

**Uso de Geomallas Multiaxiales Como Refuerzo en Vías sin Pavimentar con
Suelos Blandos o Subrasantes Débiles**



Tesis para optar al título de Ingeniero Civil

Presentado por:

Eduardo Andres Diaz Cepeda

Universidad Antonio Nariño

Notas del autor

Andrés Díaz, Facultad de Ingeniería, Universidad Antonio Nariño

Este proyecto ha sido financiado por el alumno

La correspondencia de este proyecto debe ser dirigida a Eduardo Andrés Díaz Cepeda

Universidad Antonio Nariño, Sede Sur, Calle 22 sur No. 12D - 81

Contacto: eduardoadiaz@uan.edu.co

**Uso de Geomallas Multiaxiales Como Refuerzo en Vías sin Pavimentar con
Suelos Blandos o Subrasantes Débiles**

Monografía

Tesis para optar al título de Ingeniero Civil

Presentado por:

Eduardo Andres Diaz Cepeda

Director

Dr. Juan Pablo Rodríguez Rincón

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia

2020

Nota de Aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá, Colombia

2020

Dedicatoria

Doy gracias a Dios por darme fortaleza y sabiduría por culminar este proyecto, a la Universidad Antonio Nariño por aportar en mi formación profesional y personal, a mis padres y hermanos por sus consejos y apoyo incondicional. Quiero también hacer partícipe a mi hija y esposa por su paciencia y perseverancia durante este logro tan importante para mi vida profesional.

Agradecimientos

Quiero dar un agradecimiento especial a la Ingeniera Alexandra Morales por aportarme su experiencia y conocimiento a mi formación profesional y motivarme siempre a continuar trabajando con honestidad y rectitud. Al Ingeniero Juan Pablo Rodríguez por creer siempre en mis capacidades sin importar las dificultades, brindándome siempre su apoyo y entusiasmo del deber cumplido, gracias infinitas.

Me siento muy feliz haber logrado un sueño que nunca pensé que se fuera a cumplir, pero con esfuerzo, compromiso y responsabilidad ¡lo he logrado! Gracias.

Abstract

The roads nowadays are a fundamental part of the social and economic development of any country whatsoever, since they facilitate the exchange of goods, goods and services, generating a significant growth for the nation and allowing more national and / or foreign investments, being able to increase of the economy of a people. For this reason it is so important that the tracks remain constantly in excellent structural condition.

In Colombia, we have a very high percentage of primary roads in bad condition because many of them are not designed to withstand heavy vehicle loads and thus generate their constant deterioration in the short term, we remember that the roads must be designed for long periods of useful life avoiding an investment unnecessary in short periods.

With respect to the above, geogrids play a major role as structural reinforcement in all types of roads; this modern element used worldwide makes the structure prolong its useful life, significantly reducing the action of vehicular loads (ditches or furrows) in Rolling, thus achieving more durable, safe and efficient routes.

Due to the constant and accelerated growth of vehicular traffic, it is necessary to explore the different methods used to reinforce the roads with this type of structural element and its evolution. In this document he emphasizes the methodology used by engineers J. P. Giroud and Jie Han. The method is applied to determine the soil-geosynthetic interaction by the action of rolling loads on paved and unpaved roads. Increasing its bearing capacity, decreasing layers of stone materials, time, costs and most importantly being environmentally friendly.

Keywords: reinforcement, tracks, rolling, loads, geogrids, petty materials.

Resumen

Las vías en la actualidad hacen parte fundamental del desarrollo social y económico de un país cualquiera que sea, pues facilitan el intercambio de mercancías, bienes y servicios generando un crecimiento significativo para la nación y permitiendo más inversiones nacionales y/o extranjeras, logrando incrementar de forma significativa la economía de un pueblo. Por esta razón es tan importante que las vías permanezcan constantemente en excelentes condiciones estructurales.

En Colombia tenemos un porcentaje muy alto de vías terciarias en mal estado pues muchas de ellas no están diseñadas para soportar grandes cargas vehiculares generando así su deterioro constante a corto plazo, recordemos que las vías deben ser diseñadas para grandes periodos de vida útil evitando una inversión innecesaria en periodos cortos.

Con respecto a lo anterior las geomallas juegan un papel principal como refuerzo estructural en todo tipo de vías, este elemento moderno utilizado a nivel mundial logra que la estructura prolongue su vida útil, reduciendo significativamente la acción de las cargas vehiculares (zanjas o surcos) en la rodadura, logrando así vías más perdurables, seguras y eficientes.

Debido al crecimiento constante y acelerado del tráfico vehicular se hace necesario explorar los diferentes métodos utilizados para el refuerzo en las vías terciarias con este tipo de elemento estructural y su evolución. En este documento hace énfasis a la metodología utilizada por los ingenieros J. P. Giroud y Jie Han. El método se aplica para determinar la interacción suelo-geosintético por acción de las cargas por rodadura en caminos pavimentados y sin pavimentar. Aumentando su capacidad portante, disminuyendo capas de materiales pétreos, tiempo, costos y lo más importante siendo amigable con el medio ambiente.

Palabras clave: refuerzo, vías, rodadura, cargas, geomalla, materiales pétreos.

Tabla de Contenido

| | |
|--|------|
| Abstract | v |
| Resumen..... | vii |
| Tabla de Contenido | viii |
| Tabla de Ilustraciones | xi |
| Índice de Tablas | xiii |
| Introducción | 1 |
| Objetivos | 4 |
| Objetivo General | 4 |
| Objetivos Específicos | 4 |
| Justificación | 5 |
| Marco Conceptual..... | 7 |
| Antecedentes | 7 |
| Estabilización de Suelos | 7 |
| Propiedades de los Suelos | 7 |
| Permeabilidad | 8 |
| Compresibilidad..... | 8 |
| Resistencia del suelo..... | 9 |
| Estabilidad volumétrica | 9 |
| Durabilidad en el tiempo | 10 |
| Métodos de Estabilización de suelos..... | 10 |
| Estabilización con cal | 10 |
| Estabilización con cemento | 11 |
| Estabilización de suelos con Silicato de Sodio (Na_2SiO_3) | 12 |
| Estabilización de suelos con Cloruro de Sodio (NaCl) | 13 |
| Estabilización mecánica de suelos..... | 13 |
| Estabilización de suelos con asfalto | 14 |
| Métodos Experimentales en la Estabilización de Suelos | 15 |
| Estabilización con polvo de cáscara de huevo y desechos plásticos | 15 |
| Estabilización con fibras de acero | 16 |

| | |
|--|----|
| Estabilización con fibras de coco y cenizas volantes | 17 |
| Estabilización con cemento-vidrio | 17 |
| Estabilización con geomallas..... | 18 |
| Suelos Problemáticos Predominantes en Colombia..... | 20 |
| Estado del Conocimiento | 24 |
| Revisión de la Literatura sobre la Utilización de Geomallas en Vías no Pavimentadas | 27 |
| Enfoque Histórico | 27 |
| Métodos de Desarrollo | 29 |
| Mecanismos a Través de los Cuales las Geomallas Pueden Mejorar el Rendimiento de una Estructura Pavimentada y no Pavimentada | 30 |
| Nuevas Tecnologías en la Estabilización y Refuerzo en Vías Pavimentadas y sin Pavimentar Utilizando Geomallas..... | 34 |
| Metodología | 49 |
| Función de los Geosintéticos en Carreteras sin Pavimentar | 50 |
| Objetivos del Metodo Giroud-Han..... | 51 |
| Función y Comportamiento de las Carreteras sin Pavimentar..... | 52 |
| Función de la Capa Base en Carreteras sin Pavimentar | 52 |
| Desempeño de una Carretera sin Pavimentar y sin Refuerzo | 52 |
| Comportamiento de las Carreteras sin Pavimentar Reforzadas con Geomallas | 53 |
| Influencia de la Geomalla en el Comportamiento de la Capa Base | 53 |
| Influencia de las Geomallas en el Comportamiento del Suelo de la Subrasante | 54 |
| Prevención del cizallamiento local de la subrasante | 55 |
| Mejora de la distribución de la carga..... | 56 |
| Reducción o reorientación de la tensión de cizallamiento en la interfaz de la subrasante | 56 |
| Efecto membrana tensada..... | 57 |
| Parámetros de diseño | 58 |
| Geometría de la Estructura no Pavimentada | 58 |
| Trafico | 59 |
| Ejes y Cargas..... | 59 |
| Profundidad de los Surcos y Criterio de Servicio | 60 |
| Propiedades del Material de la Capa Base | 61 |

| | |
|--|-----|
| Propiedades del Suelo de la Subrasante | 64 |
| Relación del Módulos entre la Capa Base y el Suelo de la Subrasante | 65 |
| Desarrollo del Metodo de Diseño | 65 |
| Principio del Desarrollo del Método de Diseño | 65 |
| Factor de Capacidad Portante | 66 |
| Carreteras Reforzadas y no Reforzadas sin Pavimentar..... | 66 |
| Coeficiente de Movilización de la Capacidad Portante | 67 |
| Efecto del Trafico en el Angulo de Distribución de la Tensión..... | 68 |
| Desarrollo de las Ecuaciones de Diseño | 69 |
| Desarrollo de la Ecuación Teórica | 69 |
| Ajuste y Calibración de la Ecuación Giroud-Han para Determinar el Espesor de la capa Base con Refuerzo y Sin refuerzo | 70 |
| Aplicación del Metodo Giroud-Han | 72 |
| Casos de Estudio Para determinar el Espesor de la Capa Base (h) Utilizando el Metodo Giroud-Han..... | 73 |
| Solución del caso I (sin refuerzo) | 73 |
| Solución caso I (con geomalla) | 74 |
| Conclusiones Sobre el Caso de Estudio I (con y sin refuerzo) | 75 |
| Caso de Estudio II (Construcción de una vía Sobre la Sabana de Bogotá)..... | 77 |
| Solución caso II (sin refuerzo y con refuerzo) | 78 |
| Conclusión Caso de Estudio II | 79 |
| Caso de Estudio III: Diseño de Vía no Pavimentada con Refuerzo y sin Refuerzo Utilizando la Metodología Giroud-Han, Caso de Aplicación de Honduras. | 80 |
| Procedimiento Constructivo en la Instalación de Geomallas..... | 82 |
| Análisis y Comparación de Precios Unitarios Para Diferentes Métodos de Estabilización de Suelos..... | 84 |
| Conclusiones..... | 85 |
| Recomendaciones | 88 |
| Referencias..... | 90 |
| Anexos | 100 |

Tabla de Ilustraciones

| | |
|--|-----|
| Figura 1. Estabilización con cal (prefanicsa 2014)..... | 11 |
| Figura 2. Estabilización con cementó (Cementos argos, 2017)..... | 11 |
| Figura 3. Estabilización mecánica de suelos (Derpet,2016)..... | 14 |
| Figura 4. Estabilización con asfalto (Vía Julio Delgado Uruguay,2019)..... | 14 |
| Figura 5. Cáscara de huevo (ESP). (Alzaidy, 2019)..... | 15 |
| Figura 6. Plástico usado en tiras (Alzaidy, 2019)..... | 16 |
| Figura 7. Carga-penetración del suelo+20% CV para varios % de FC, (Kodicherla & Nandyala, 2019)..... | 17 |
| Figura 8. Clasificación de las geomallas según: su sentido de interacción longitudinal y transversal (a, b, c) y sus tipos de aplicación (d, e, f, g, h, i). Fuentes: (inversiones, 2011); (King top, 2015); (Tensar Tx150, 2019); (Projar, 2019); (Huesker, 2019); (Trocha vichada, 2017); (Petgeogrid, 2018); (Transporte latinoamericano, 2014); (Orrego Cabanillas, 2014)..... | 20 |
| Figura 9. Suelo blando arcilloso (Aisyaqilumar, 2015)..... | 21 |
| Figura 10. Suelos volcánicos en Manizales (Espectador, 2017)..... | 22 |
| Figura 11. Suelo orgánico (LV, 2019)..... | 22 |
| Figura 12. Capacidad portante al efecto de cargas con y sin geomalla. (J.P. Giroud & Han, 2004)..... | 55 |
| Figura 13. Rodamientos vehiculares y radio de contacto: a) equivalencia geométrica de las ruedas; b) zonas de contacto de los neumáticos; c) contacto equivalente del área para estudio (J.P Giroud & Han, 2004). | 58 |
| Figura 14. Ahuellamientos comunes en vías no pavimentadas ((Mexichem Soluciones Integrales, 2012)..... | 61 |
| Figura 15. Relación de rodamiento de California (CBR) relación entre la capa base y el suelo de subrasante (Hammit, 1970)..... | 62 |
| Figura 16. Correlación del módulo elástico y la relación de rodamiento de California (CBR) de la capa de base (AASHTO, 1993) | 63 |
| Figura 17. Influencia del módulo de estabilidad de apertura de la geomalla en la pendiente de las curvas de la Fig. 26 (J.P Giroud & Han, 2004)..... | 69 |
| Figura 18. Procedimiento de diseño. Elaboración propia, adoptado (Giroud & Han, 2004)..... | 72 |
| Figura 19. Proceso constructivo en la instalación de geomallas (Almendarez & Reyes, 2017),.. | 83 |
| Figura 20. Análisis y comparación de precios unitarios (INVÍAS, 2019)..... | 85 |
| Anexo 1 Figura 21. Proyección de tendencia de publicaciones entre los años 1984 y 2019. (Scopus, 2019) | 100 |
| Anexo 2 Figura 22. Análisis de la fuente más relevante de la muestra comprendida entre los años 1992 y 2018. (Scopus, 2019). | 100 |
| Anexo 3 Figura 23. Autores con mayor número de publicaciones en el intervalo 1984 y 2019. (Scopus, 2019). | 101 |

| | |
|--|-----|
| Anexo 4 Figura 24. Instituciones con mayor cantidad de publicaciones entre los años 1984 y 2019. (Scopus, 2019). | 101 |
| Anexo 5 Figura 25. Análisis por país con mayor cantidad de documentos publicados entre los años 1984 y 2019. (Scopus, 2019). | 101 |
| Anexo 6 Figura 26. Tipos de documentos publicados sobre geomallas en carreteras entre los años 1984 y 2019. (Scopus, 2019) | 101 |
| Anexo 7 Figura 27. Temas en los que se publica sobre geomallas en carreteras entre los años 1984 y 2019. (Scopus, 2019). | 101 |
| Anexo 8 Figura 28. Tendencia de la revista con mayor número de publicaciones desde 1996 hasta 2019. (Scopus, 2019) | 101 |
| Anexo 9 Figura 29. Análisis precios unitarios, estabilización con cal (INVÍAS, 2019) | 101 |
| Anexo 10 Figura 30. Análisis precios unitarios, estabilización con cemento (INVÍAS, 2019) . | 101 |
| Anexo 11 Figura 31. Análisis precios unitarios, estabilización con Silicato de Sodio (INVÍAS, 2019) | 101 |
| Anexo 12 Figura 32. Análisis precios unitarios, estabilización con Cloruro de Sodio (INVÍAS, 2019) | 101 |
| Anexo 13 Figura 33. Análisis precios unitarios, estabilización con material de remoción (INVÍAS, 2019) | 101 |
| Anexo 14 Figura 34. Análisis precios unitarios, estabilización con piedra rajón (INVÍAS, 2019) | 101 |
| Anexo 15 Figura 35. Análisis precios unitarios, estabilización con emulsión asfáltica tipo BEE-38 (INVÍAS, 2019) | 101 |
| Anexo 16 Figura 36. Análisis precios unitarios, estabilización con geomalla biaxial BXG-120 (INVÍAS, 2019) | 101 |

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Razones y Consecuencias de la Intransitabilidad | 6 |
| Tabla 2 Volumen de cemento para varios tipos de suelo para estabilización..... | 12 |
| Tabla 3 Cuadro sinóptico para la clasificación de las geomallas y sus principales aplicaciones . | 19 |
| Tabla 4 Análisis sinóptico para los artículos mas relevantes en el estudio de las geomallas | 37 |
| Tabla 5 Ecuaciones utilizadas para cálculos para el caso I (sin refuerzo y con refuerzo)..... | 73 |
| Tabla 6 Datos de entrada y espesor de capa base hallado por iteración sucesiva, caso I sin refuerzo | 74 |
| Tabla 7 Datos de entrada y espesor de capa base hallado por iteración sucesiva, caso I con refuerzo | 75 |
| Tabla 8 Datos de entrada y espesor de capa base hallado por iteración sucesiva, caso II sin refuerzo | 78 |
| Tabla 9 Datos de entrada y espesor de capa base hallado por iteración sucesiva, caso II con refuerzo | 79 |
| Tabla 10 Ahorro de material granular entre capa reforzada y no reforzada | 80 |
| Tabla 11. Parámetros de diseño, caso Honduras..... | 80 |
| Tabla 12 Ahorro de material granular entre capa reforzada y no reforzada, caso Honduras | 82 |

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

Introducción

Colombia es un país que presenta una topografía muy variada al igual que sus condiciones climáticas a lo largo y ancho de nuestro territorio, donde el ingeniero civil se encontrara con variedad de retos y dificultades durante el proceso estructural en la ejecución de las obras.

Uno de estos retos lo encontramos en las vías de nuestro territorio nacional donde el 80% de la carga es movilizadada por carretera, el 96% está en malas condiciones y siete de cada 10 Km de carreteras en Colombia corresponden a vías sin pavimentar o terciarias. Solo un 0,7% de los recursos de la nación son destinados para mantenimientos de estas vías. (Salcedo Rodríguez, 2019).

Estudios realizados recientemente por el foro económico mundial con respecto a la calidad de nuestra infraestructura vial, con una calificación de 47,8 sobre 100 lo cual nos ubica en el puesto 97 de 140 países, pues una vía en óptimas condiciones para el desplazamiento, reduce los costos en transporte y logística, aumentando economías. (González Bell, 2018).

Colombia posee actualmente 207.708 kilómetros donde 142.284 km pertenecen a vías terciarias. El estado tiene a su cargo más del 65% de estas, es decir, 110.419 km (18%). Alrededor de 27.577 km es responsabilidad del INVÍAS (Instituto Nacional de Vías); 9% (13.959 km) de las entidades departamentales y un 8% (12.251 km) son administradas por entidades privadas. (Salcedo Rodríguez, 2019).

Según el Departamento Nacional de Planeación en Colombia, la cuarta parte del total de las vías terciarias se encuentran sin recubrimiento, de estas; el 36,1% su estado es regular y el 45% en un pésimo estado, según Juan Esteban Gil, director del Instituto Nacional de Vías el 96% de estas vías se encuentran intransitables, donde, 8.000 tienen pavimentos en malas condiciones. (Salcedo Rodríguez, 2019)

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

Las vías de tercer orden o terciarias generalmente las ubicamos en zonas de difícil acceso vehicular, por esta situación al momento de ser intervenidas para su rehabilitación o mantenimiento el transporte de material granular óptimo, al sitio, aumenta su precio considerablemente. El periodo en el cual las vías no reciben servicio de mantenimiento o rehabilitación y considerando los fenómenos naturales en nuestro país llegan a tener deterioros considerables, manifestados en; deformaciones superficiales, que a la larga termina afectando el tránsito vehicular hasta la inutilización de la propia vía, afectando la comercialización de productos, retraso en actividades como; el derecho a los servicios médicos oportunos, aumento en costos de transportes de carga, pasajeros, deserción escolar e incrementos en los valores de la canasta familiar, afectando la economía y el desarrollo integral de los habitantes.

Para poder mitigar estos acontecimientos debemos enfocarnos en dos factores fundamentales que son las causas del deterioro continuo de nuestras vías de tercer orden, como lo es; falta de mantenimiento periódico y vías en mal estado o intransitables, donde, los eventos climáticos juegan un papel fundamental sobre el impacto negativo social, económico y ambiental de los habitantes de las zonas que comparten estos corredores viales. (Departamento Nacional de Planeación, 2018).

En el periodo 2010-2012 en Colombia tuvimos una temporada invernal muy compleja debido a las fuertes lluvias que causaron innumerables inundaciones en todo el territorio nacional. A escala de infraestructura los daños en vías secundarias y terciarias se estimaron en 3'236.618 millones de pesos, los departamentos que mayor daño vial presentaron fueron; Santanderes, Atlántico, Boyacá, Antioquia y Cundinamarca, de los 142.284 km de vías terciarias, sufrieron deterioros 28.456 km, alrededor de un 20% del total de las vías terciarias del país. (Banco Interamericano de Desarrollo - BID, 2010).

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

Debido a las problemáticas expuestas en este documento se han realizado diferentes investigaciones utilizando métodos convencionales y no convencionales con el único objetivo de estabilizar los suelos débiles de una manera eficiente y minimizando ahorros en costos y tiempo. Dentro de las innumerables alternativas, este estudio monográfico pretende dar a conocer al lector el avance que se ha tenido en la implementación de las nuevas tecnologías.

Las geomallas ofrecen economía en el tiempo, pues se reducen; espesores de suelo, calidad de materiales convencionales, pero sobre todo durabilidad de la estructura. Es conveniente reevaluar la utilización de esta nueva tecnología, debido a que, las reparaciones, el mantenimiento que tiene que hacerse a la estructura suele espaciarse en el tiempo y eso hace que sea mucho más económico esa primera inversión inicial, siendo una alternativa que ofrece grandes beneficios en el desempeño a largo plazo de una vía de tercer orden, como una solución costo-eficiente de mayor de rendimiento por menos dinero. (Fernando, Téllez, & Montejo, 2016).

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

Objetivos

Objetivo General

Construir un estado del conocimiento sobre los beneficios mecánicos e hidráulicos de las geomallas en la estabilización y refuerzo de suelos y como el uso de estos geosintéticos aumenta la capacidad portante en vías sin pavimentar, suelos blandos o subrasantes débiles minimizando desplazamientos laterales, disminuyendo capas de rodadura y garantizando la estabilidad de la estructura en el largo plazo en relación con las soluciones tradicionales, así mismo ahorrando en los costos generales del proyecto.

Objetivos Específicos

Relacionar los diferentes métodos convencionales y no convencionales en la estabilización de suelos.

Explorar las diferentes alternativas que ofrecen los geosintéticos para estabilizar y reforzar suelos blandos en vías pavimentadas y no pavimentadas.

Estudiar el comportamiento de las cargas cíclicas por el accionar del tráfico en terrenos blandos reduciendo obras de mantenimiento.

Evaluar las mejoras asociadas a geosintéticos y geomallas multiaxiales de alta resistencia para reforzar caminos sin pavimentar sobre subrasantes débiles.

Analizar la metodología Giroud-Han para determinar espesores de capa base en caminos sin pavimentar y sus casos de aplicación.

Analizar las tres funciones potenciales de los geosintéticos entre la interacción suelo-geosintético; restricción lateral, aumento de la capacidad de carga y efecto de membrana tensada.

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

Justificación

Cuando un determinado tráfico no puede ser soportado por un suelo, debido, a su insuficiente capacidad de carga y que la tensión en el suelo es menor a la capacidad portante de este, es necesario distribuir la carga colocando un material con las propiedades mecánicas adecuadas para mantener su función de distribución a la acción de cargas repetidas. Lo que requiere que las deformaciones del suelo sean limitadas para prevenir desplazamientos laterales o verticales por cargas de tráfico. En comparación con las vías pavimentadas estas deformaciones suelen ser bastante grandes (ahuellamientos o surcos). (J. Giroud, Ah-Line, & Bonaparte, 1984).

Este fenómeno es una constante en los 142.284 km (46%) del total de las vías en Colombia, esto implica tener vías en malas condiciones e intransitables y tener prácticamente nuestro campo desconectado. Reduciendo drásticamente el desarrollo de nuestros habitantes del agro colombiano, así como los servicios a la educación, salud y comercio evitando el desplazamiento vehicular para el ingreso y salida de productos afectando gravemente la economía en términos generales de los habitantes.

Según el censo general de población 2005, de una población de 42'090.502 habitantes el 25% viven en zonas rurales.(DANE, 2005).

Por los motivos expuestos es conveniente evaluar las diferentes alternativas que existen para aumentar la capacidad portante de estos suelos. Actualmente los geosintéticos brindan una alternativa tecnológica eficiente y económico perdurable en el tiempo. Conoceremos como las geomallas interactúan con el suelo siendo capaces de soportar una mayor carga tanto dinámica como estática sin llegar a deterioros últimos por esfuerzos. (Otero Téllez & Montejo Ochoa, 2016).

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

Actualmente en el mercado nacional disponemos de distintos tipos de geomallas entre las que se destacan las multiaxiales debido a sus grandes desempeños en pruebas de laboratorio y en situaciones reales de construcción.

Teniendo en cuenta la baja inversión del estado en las vías de tercer orden y la dificultad de contar con materiales calificados y transportados, por el mal estado de las vías al sitio de obra, se hace indispensable optar por alternativas tecnológicas como la utilización de las geomallas como parte del material de refuerzo reduciendo espesores de material granular y aumentando la vida útil de la vía. De esta manera los recursos destinados por el gobierno tendrían mayor impacto en la solución al problema de movilidad en vías terciarias mejorando la economía de la región.

Tabla 1
Razones y Consecuencias de la Intransitabilidad

| Problema central | Causas Directas | Efectos Directos | Causas Indirectas | Efectos Indirectos |
|--|----------------------------------|--|---|--|
| Dificultad en la transitabilidad vehicular terrestre entre vías terciarias | Deterioro de las vías terciarias | Congestión en las vías por pasos restringidos | Deterioro de la superficie de rodadura y desatención en puntos críticos | Incremento en gastos económicos de las familias |
| | Deficiente mantenimiento | Aumento de los tiempos de viaje | Deficientes tratamientos anteriores | Incremento en precios de alimentos |
| | | Baja comercialización de productos | Inexistente mantenimiento periódico o rutinario | Perdida de las cosechas |
| | | | Falta de recursos para inversión | Deterioro acelerado de los tratamientos efectuados |
| | | | Cumplimiento de periodo de diseño las vías existentes | Inoportuno acceso a servicios médicos |
| | | | Zona de inestabilidad geológica o geotécnica | Aumento en los costos de transporte de carga y pasajeros |
| | | | Drenaje deficiente de escorrentía, | Incremento del riesgo de deserción escolar |
| | | | Inestabilidad de taludes | |
| | | Construcción con consideraciones técnicas antiguas | | |

Nota. Fuente adaptado de (Departamento Nacional de Planeación, 2018)

Marco Conceptual

Antecedentes

El hombre en su afán de evolución ha utilizado ampliamente los recursos disponibles a su alrededor, uno de estos es el suelo, el cual ha tenido una connotación importante en el transporte de mercancías entre poblaciones, pero los suelos no poseen las mismas características portantes debido a su composición. Es así como encontramos en la naturaleza gran variedad de suelos con diversos comportamientos a la acción de cargas cíclicas repetidas, de ahí que el hombre se ha encargado de hallar métodos para convertirlos en estructuras más resistentes. (Orrego Cabanillas, 2014).

Desde la antigüedad las civilizaciones han intentado dar solución al reforzamiento de estos suelos y sus desventajas utilizando materiales biológicos como: troncos, vegetación, escombros, rocas, pieles de animales y diversidad de elementos disponibles en su entorno. Sin embargo, el hombre continuó desarrollando sistemas de reforzamiento de suelos hasta llegar a desarrollar sistemas sintéticos de fibras a base de polímeros, copiando las cadenas de alta resistencia matriciales naturales como el ADN, proteínas y celulosas. (Orrego Cabanillas, 2014).

Estabilización de Suelos

Propiedades de los Suelos

En la actualidad debido al aumento de la población y también al desarrollo en la construcción, se ha conseguido valiosa información sobre los distintos métodos de mejoramiento de suelos para su uso en diversos proyectos de ingeniería. El mejoramiento del suelo es una de las formas más confiables, prácticas y económicas, en donde podemos encontrar grandes beneficios como: aumento en su capacidad portante, resistencia a cargas vehiculares, disminución de la permeabilidad, disminución de la plasticidad, control de erosión, control de

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

expansiones volumétricas, control sobre la compresibilidad, pérdida de agua entre otros.

(Marto, Latifi, & Sohaei, n.d.).

Dentro las principales propiedades de los suelos a ser tenidas en cuenta por los ingenieros antes de su estabilización encontramos: la permeabilidad, compresibilidad, resistencia, estabilidad volumétrica y durabilidad en el tiempo. (Montejo Fonseca, 2002).

Permeabilidad

El uso y desarrollo del suelo como material de construcción está notablemente limitado por sus comportamientos térmicos y mecánicos específicos en relación con el agua, que actualmente no se consideran en las normas de construcción y guías técnicas. A medida que la resistencia a la compresión disminuye con la presencia de agua en los poros, una buena predicción de la evolución del contenido de agua dentro de las paredes de las partículas de suelo es fundamental para garantizar la seguridad. El parámetro clave que impulsa el flujo de agua líquida a través del material es la permeabilidad intrínseca. (Fabbri, Soudani, McGregor, & Morel, 2019).

Cuando en los suelos hay una excesiva presión de poros, estos terminan generando deslizamientos de terreno y la circulación de agua en el subsuelo originando la formación de tubos o túneles (tubificaciones) que progresivamente aumentan su tamaño hasta generar fallas de asentamientos.

Compresibilidad

El comportamiento de la compresibilidad del suelo es un parámetro importante que implica el cambio en el volumen bajo tensión aplicada, en otras palabras, es la relación entre la relación de vacío y la tensión efectiva. Dependiendo del tipo de suelo y su origen, el comportamiento de compresibilidad varía en un amplio rango. (Ahmed & Siddiqua, 2016).

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

Basado en la magnitud de la compresibilidad, hay dos tipos de suelo: suelo natural (baja compresibilidad), y los suelos blandos (alta calidad compresible). Los hallazgos experimentales de la literatura sugieren que las características de plasticidad del suelo y el contenido inicial de agua impactan la proporción de vacío y la relación de tensiones efectivas que podrían ser curvas. (Ahmed & Siddiqua, 2016).

Resistencia del suelo

La resistencia de los suelos difiere respecto a su contenido de humedad. Existen suelos arcillosos que al secarse aumentan considerablemente su resistencia, como sucede en la fabricación de ladrillos, como también hay otro tipo de suelos que al disminuir su contenido de humedad se comportan como un tipo de suelo friccionante poco cohesivo, generando abrasión al paso vehicular pulverizándolo y perdiendo su cohesión.

La compactación de suelos es un factor importante que determina la resistencia de este y su cambio volumétrico, los diferentes tipos de compactación ya sean dinámicos o estáticos alteran también su resistencia. Es evidente que mientras los suelos no tengan cambios volumétricos su resistencia aumenta, esto puede ser logrado con adiciones químicas como; el cemento portland o más comúnmente adicionando cal.

Estabilidad volumétrica

Los problemas asociados con el asentamiento continuo se observan típicamente en suelos con predominio de arcillas retráctiles (arcillas expansivas). Este tipo de arcillas se caracterizan por expansiones y contracciones significativas cuando se someten a procesos de humedad y secado, respectivamente. Gran parte de los daños en las vías corresponden a que estas están sometidas a cambio de volumen por este fenómeno, que generalmente conducen a asentamientos

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

irregulares inaceptables. Los asentamientos diferenciados afectan tanto a los costos operativos como a la seguridad. (Sánchez, Wang, Briaud, & Douglas, 2014).

Durabilidad en el tiempo

La durabilidad en las vías depende de varios factores asociados, que determinan en últimas su vida útil, como son: resistencia a la intemperie, lluvias, bajas y altas temperaturas, erosión, abrasión al paso vehicular entre otros. Este tipo de problemas son generales tanto en suelos naturales como estabilizados.

El comportamiento de los suelos estabilizados ha sido de gran estudio alrededor del mundo buscando siempre disminuir mantenimientos constantes y costos por sobrediseños. La durabilidad de una vía es muy difícil de cuantificar, de ahí que los estudios para aumentar la vida útil continúan, siempre buscando el equilibrio entre durabilidad y costo-beneficio. (Montejo Fonseca, 2002).

Métodos de Estabilización de suelos

Estabilización con cal

En el diseño de vías, las dos propiedades más críticas que influyen en el espesor total de una estructura de vía pavimentada o no, son las cargas de tráfico y el estado de la subrasante. La rigidez de la subrasante es muy variable con respecto a su tipo de suelo y puede ser diseñada para mejorar sus características portantes y deberían mejorarse siempre que sea posible. La cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), cal viva calcítica (CaO) es particularmente adecuada para mejorar dramáticamente la capacidad de carga, reduce la inestabilidad volumétrica y disminuye la susceptibilidad a la humedad de materiales arcillosos, expansivos y plásticos que se encuentran comúnmente en los suelos. (Young, Ismail, & Chong, 2019).

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO



Figura 1. Estabilización con cal (prefanicsa 2014)

Estabilización con cemento

La estabilización con cemento data desde 1917 como método de reforzamiento de suelos, su uso es muy común sobre todo en suelos arcillosos y arenosos. La estabilización suelo-cemento proporciona mayor manejabilidad en suelos arcillosos, aumento de índice de plasticidad y disminución de índice líquido. Al igual que la cal, la interacción suelo-cemento incrementa la resistencia portante del suelo, pero con la particularidad que a medida que aumenta el proceso de curado también aumenta su resistencia. (Das, 2011).



Figura 2. Estabilización con cementó (Cementos argos, 2017)

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

Tabla 2

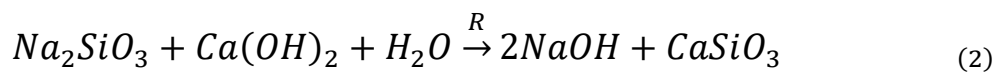
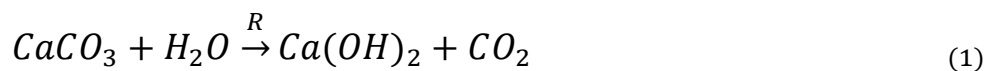
Volumen de cemento para varios tipos de suelo para estabilización

| Tipo de suelo | | <u>% de cemento (volumen)</u> |
|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| <u>Calcificación AASTHO</u> | <u>Clasificación unificada</u> | |
| A-3 y A-2 | SP – GP – SW | 6 – 10 |
| A-5 y A-4 | ML – CL – MH | 8 – 12 |
| A-7 y A-6 | CL – CH | 10 – 14 |

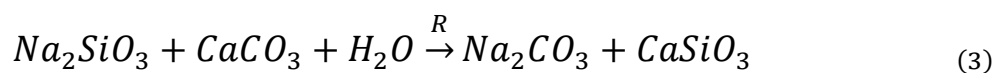
Nota. Fuente adaptado de (Das, 2011).

Estabilización de suelos con Silicato de Sodio (Na_2SiO_3)

El silicato de sodio podría reaccionar con la cal en presencia de silicato cálcico productor de agua. La primera posibilidad de la reacción puede por como se indica en las ecuaciones 1 y 2.



La segunda posibilidad de reacción es:



En las dos posibilidades de reacción a partir de la Ecuación 2 y 3 se producirá el silicato de calcio (CaSiO_3). Es bien conocido que el silicato de calcio es mucho más duro que el silicato de sodio Na_2SiO_3 . En este caso, el material absorbido y el agua entre capas contribuyen de manera significativa a las propiedades mecánicas dinámicas del suelo. Las moléculas de agua en la región de la capa intermedia actúan como un freno para la estructura de silicato que aumenta la resistencia del suelo. (Maaitah, 2012). Esta reacción permite un aumento de la adherencia entre el suelo y las partículas que causan la reducción de la hinchazón, aumentando la resistencia al cizallamiento. (Maaitah, 2012).

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

Estabilización de suelos con Cloruro de Sodio (NaCl)

Los efectos de las sales utilizadas como aditivo en los suelos y estabilizadas con cal.

Generalmente, la cal no es el estabilizador más efectivo para la arcilla orgánica debido al bajo incremento en la resistencia. Las materias orgánicas tienen la tendencia a cubrir las partículas del suelo, causando la obstrucción o el retraso de la reacción puzolánica cuando se introduce la cal. Sin embargo, los resultados en las investigaciones indicaron que cuando se añade sal de sodio (NaCl) o sal de calcio (CaCl₂) a la mezcla de cal y arcilla orgánica, la fuerza de la mezcla aumenta, al aumentar la concentración de sal. La resistencia aumenta 10 veces más con un 10% adicional de sal. Además, el producto cementante es muy visible en las muestras microscópicas de las mezclas de cal y sal; estos resultados fueron concurrentes con el desarrollo de la resistencia en el suelo estabilizado. (Koslanant, Onitsuka, & Negami, 2006).

Estabilización mecánica de suelos

La estabilización mecánica es un proceso en el que los materiales son proporcionados para obtener la gradación y plasticidad deseada de la mezcla. El material correctamente proporcionado (áridos y suelo pobre) puede ser adecuadamente compactado para formar una capa de pavimento mecánicamente estable. (Mishra, Sachdeva, & Manocha, 2019);

La estabilización mecánica de suelos muestra un aumento en la estabilización mecánica máxima en densidad seca (MMD) y una disminución en el contenido de humedad óptimo (OMC), aumento en CBR (California Bearing Ratio), Al añadir estabilizantes se incrementa el MMD y el CBR. (Mishra et al., 2019).



Figura 3. Estabilización mecánica de suelos (Derpet,2016)

Estabilización de suelos con asfalto

En general, todos los suelos responden muy bien a una estabilización con asfalto o agentes bituminosos. En el país esta técnica es muy común, la estabilización con asfalto en suelos arenosos no-plásticos ejercen una acción tipo ligante proporcionando al suelo confinamiento y baja deformación a la acción de las cargas. En los suelos tipo cohesivos (arcillas) la estabilización con asfalto crea una aglomeración de partículas arcillosas ocupando vacíos, impermeabilizando y protegiendo al suelo del agua. (Montejo Fonseca, 2002).



Figura 4. Estabilización con asfalto (Vía Julio Delgado Uruguay,2019)

Métodos Experimentales en la Estabilización de Suelos

Estabilización con polvo de cáscara de huevo y desechos plásticos

La construcción de carreteras y otras estructuras de ingeniería civil en suelo arcilloso se considera arriesgado, ya que dicho suelo es susceptible a asentamientos diferenciales y a cambios de volumen ya sea en compresibilidad o hinchazón. Por lo tanto, existe el deseo de mejorar ciertas propiedades requeridas, tales como capacidad de carga, parámetros de resistencia al cizallamiento y reducir el cambio de volumen del suelo. (Alzaidy, 2019).

El polvo de cáscara de huevo (ESP) es un buen reemplazo para la cal sintetizada artificialmente, ya que su composición química es similar a la de la cal (Fig. 5). Su composición contiene principalmente calcio, carbonato de magnesio (cal) y proteínas; la cáscara de huevo de gallina es un material de desecho de fuentes domésticas como aves de corral, criaderos, hogares y locales de comidas. En los últimos años en Irak la cáscara de huevo ha sido utilizada para estabilización de suelos, han estudiado la estabilización del suelo con (ESP) en el reemplazo potencial de cal en un suelo expansivo. (Alzaidy, 2019).



Figura 5. Cascara de huevo (ESP). (Alzaidy, 2019)



Figura 6. Plástico usado en tiras (Alzaidy, 2019)

Por otro lado, un aumento en el contenido de fibra de los desechos plásticos (Fig. 6) condujo a un aumento en la resistencia y el potencial de contracción, resistencia al cizallamiento, resistencia a la tracción y disminución de ahuellamientos. (Alzaidy, 2019).

Estabilización con fibras de acero

El uso del acero se está utilizando actualmente como material de geoingeniería para la estabilización del suelo. Con el conocimiento de los beneficios de filamentos de acero, las estimaciones de CBR pueden mejorar y el grosor de las capas de agregados pétreos puede disminuir. También podría disminuir la potencia del peso en la subrasante. Los filamentos de acero son un material geosintético que es efectivamente accesible, ecológico y, además, financieramente inteligente. Al utilizar las fibras de acero en la estabilización del suelo, el gasto general puede disminuir cuando se compara con diferentes técnicas en estabilización de suelos. (Chaitanya & Neeharika, 2019).

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

Estabilización con fibras de coco y cenizas volantes

La estabilización de la subrasante arcillosa cuando se mezcla aleatoriamente con fibras de coco (FC) y cenizas volantes (CV) mejoran de la resistencia y la relación de soporte de California (CBR). Además, se observa que la mezcla aleatoria de 1% de FC y 20% de CV resultó en una mejora de la CBR de la subrasante en comparación con la subrasante de arcilla tratada con 20% de solo CV y este aumento se observa como 1,5 veces (Fig. 7). En general, se concluye que 20% CV + 1% FC resultó en una mejora de la subrasante en términos de CBR. (Kodicherla & Nandyala, 2019).

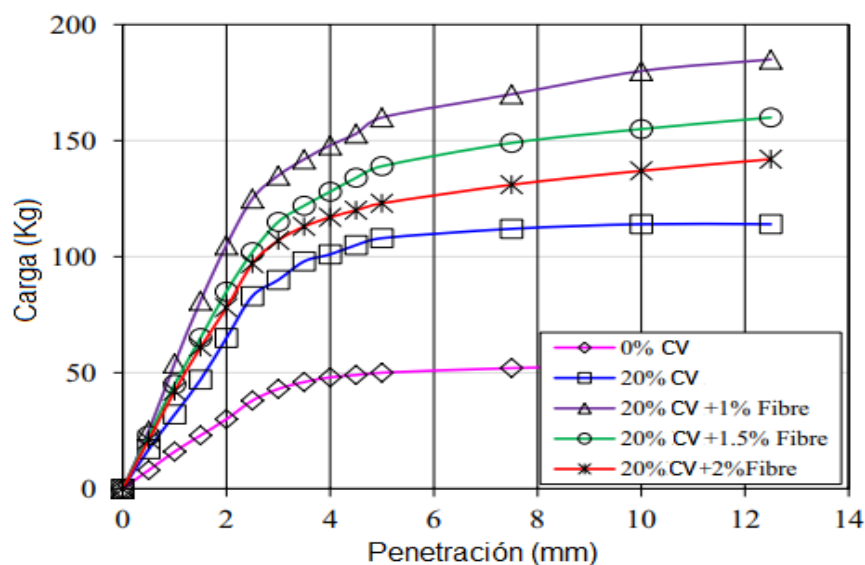


Figura 7. Carga-penetración del suelo+20% CV para varios % de FC, (Kodicherla & Nandyala, 2019)

Estabilización con cemento-vidrio

El vidrio de desecho es 100% reciclable, no biodegradable y tiene usos potenciales como material de ingeniería. En los estudios realizados con este tipo de material estabilizante evidenciaron una mejora considerable en las propiedades del suelo, demostrando que es factible utilizar vidrio procedente de residuos como material estabilizador en suelos teóricamente no apto para su uso en bases de carreteras. La viabilidad de la incorporación de este tipo de en proyectos

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

de construcción lineal, como carreteras, produce importantes beneficios medioambientales, como la absorción sostenible de grandes cantidades de residuos. Además, es factible encontrar plantas procesadoras cercanas de este material evitando la necesidad de transportar los residuos a largas distancias a una planta de procesamiento y reciclaje específica, reduciendo así los costos, gasto energético y emisiones de carbono a la atmósfera (tanto para el transporte como para la explotación). (Pacheco-Torres & Varela, 2019).

Estabilización con geomallas

El Servicio Forestal del USDA ha estado utilizando geosintéticos en sus carreteras de bajo volumen durante los últimos 40 años en aplicaciones de separación, refuerzo, drenaje, filtración y otros. El objetivo de utilización de este tipo de materiales geosintéticos, es proporcionar refuerzo estructural a las vías, donde sus suelos son débiles y disminuir su costo. Los usos en aplicaciones de carreteras de bajo volumen son similares a los utilizados en muchos proyectos de autopistas, y tienen muchos de los mismos beneficios y costos, sin embargo, la utilización es variable e inconsistente. En muchos países en desarrollo, los ingenieros que diseñan caminos rurales apenas han oído hablar de los materiales geosintéticos, y mucho menos de sus beneficios. (Keller, 2016a).

Las carreteras de bajo volumen representan aproximadamente dos tercios de todas las carreteras del mundo, es decir, unos 30 millones de kilómetros de carreteras, sin embargo, no reciben la atención y las tecnologías apropiadas que merece una cantidad tan grande de infraestructura, ahorro significativo de costes y mejoras en el diseño. El rendimiento estructural de las carreteras puede lograrse con un mayor uso de geosintéticos en: refuerzo de subrasante, estructuras de contención geosintéticamente reforzadas y en mejor control de la erosión. Los materiales utilizados incluyen geotextiles, geomallas, geoceldas, geoespuma, redes, y otros geosintéticos. (Keller, 2016a).

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

El uso de geosintéticos (Fig. 8), ha demostrado ser muy rentable en una amplia variedad de carreteras de bajo volumen, sin embargo, siguen siendo muy poco utilizados en el enorme número de carreteras de bajo volumen que se encuentran en todo el mundo. Los materiales geosintéticos se han utilizado con éxito durante los últimos 40 años en caminos rurales, el uso inicial era a menudo experimental, pero hoy en día los parámetros de diseño y su uso, se adaptan a las necesidades más particulares. El uso de geosintéticos puede reducir los costos, aumentar el rendimiento y facilitar una construcción más rápida, así como también mejorar la calidad de vida de los habitantes que dependen de estas vías. (Keller, 2016a).

Tabla 3

Cuadro sinóptico para la clasificación de las geomallas y sus principales aplicaciones

| Clasificación de las Geomallas | | |
|---|---|---|
| Sentido de Interacción (longitudinal y transversal) | Fabricación | Aplicación |
| <p>Geomallas uniaxiales</p> <ul style="list-style-type: none"> • Son geomallas dispuestas ortogonalmente entrelazadas por las uniones o nodos desarrollando alta resistencia a la tracción en una única dirección (Fig. 13), su función principal es el refuerzo de taludes, terraplenes y muros de contención. (Nader Ghafoori, Ph.D. & Sharbaf, 2016). (Fig. 8a) | <p>Geomallas extruidas</p> <ul style="list-style-type: none"> • La geomalla extruida se produce a partir de un monobloque de polímero que se perfora y se dibuja en ya sea una o más formas. Los distintos tipos de aberturas se moldean según función que desempeñara en el proyecto. Generalmente son extruidas en una, dos o tres direcciones (uniaxial, biaxial y geomallas triaxiales). (Koerner, 2012). | <ul style="list-style-type: none"> • Muros de suelo reforzado. (Fig. 8d) • Taludes de suelo reforzado. (Fig. 8e) |
| <p>Geomallas biaxiales</p> <ul style="list-style-type: none"> • Las geomallas biaxiales tienen resistencia a la tracción en dos dimensiones y se usan a menudo para refuerzo de pavimentos, incluidos caminos sin pavimentar, vías férreas y pavimentos flexibles. La geomalla biaxial no puede proporcionar una tensión constante cuando se somete a tensión en más de dos direcciones es un limitante de este tipo de geomallas. (Nader Ghafoori, Ph.D. & Sharbaf, 2016). (Fig. 8c) | <p>Geomallas tejidas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Las geomallas tejidas son fabricadas generalmente de fibras de poliéster (PET), polipropileno (PET), polietileno de alta densidad (PEAD) entre otras fusiones entre polímeros. Forman costillares transversales y longitudinales unidos por nodos. Para este tipo de geomallas es muy común que se les recubra con látex, pvc y materiales tipo polímero que permita la flexibilidad del material y a su vez proteja la geomalla de los componentes químicos abrasivos del suelo. (Koerner, 2012) | <ul style="list-style-type: none"> • Refuerzo de vías no pavimentadas. (Fig. 8f) • Refuerzo de vías pavimentadas. (Fig. 8g) • Estabilización de plataformas de construcción. (Fig. 8h) |
| <p>Geomallas triaxiales o multiaxiales</p> <ul style="list-style-type: none"> • Son geomallas tipo rígidas que presentan alta eficiencia a la tracción uniforme en todas las direcciones del entramado, su sistema de ordenamiento interno entre nodos proporciona una mayor estabilidad debido a su apertura triangular. (Nader Ghafoori, Ph.D. & Sharbaf, 2016). (Fig. 8b) | <p>Geomallas soldadas</p> <ul style="list-style-type: none"> • El sistema de fabricación para una geomalla soldada es por soldadura de las juntas extruidas en los nodos. Las geomallas soldadas también se encuentran en dos grupos principales en función de su rigidez (Polietileno) son elementos duros y rígidos y geomallas tipo flexibles (poliéster). (Nader Ghafoori, Ph.D. & Sharbaf, 2016) | <ul style="list-style-type: none"> • Refuerzo de fundaciones superficiales. (Fig. 8i) |

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO



Figura 8. Clasificación de las geomallas según: su sentido de interacción longitudinal y transversal (a, b, c) y sus tipos de aplicación (d, e, f, g, h, i). Fuentes: (inversiones, 2011); (King top, 2015); (Tensar Tx150, 2019); (Projar, 2019); (Huesker, 2019); (Trocha vichada, 2017); (Petgeogrid, 2018); (Transporte latinoamericano, 2014); (Orrego Cabanillas, 2014).

Suelos Problemáticos Predominantes en Colombia

En los innumerables estudios de los suelos en el territorio colombiano se han identificado suelos de características muy complejas y de difícil estabilización en los que se encuentran: suelos arcillosos (blandos), con alto contenido orgánico, suelos volcánicos, suelos expansivos y suelos diatomáceos entre otros. (Montejo Fonseca, 2002).

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

Los suelos arcillosos (Fig. 9), predominan en zonas con altos índices de precipitaciones como: en la zona pacífica, Orinoquia, amazonia y el valle de aburra. Son suelos con una baja eficiencia en su drenaje natural, con altos contenidos de humedad y baja resistencia a soportar cargas estáticas y dinámicas. Son fáciles de detectar a simple vista pues sus índices de ahuellamiento son altos al contacto con cargas, no permite estabilidad ni apoyo. (Montejo Fonseca, 2002).



Figura 9. Suelo blando arcilloso (Aisyaqilumar, 2015)

Los suelos orgánicos presentes en Colombia son predominantes en los páramos. Se dice que un suelo es orgánico si tiene un contenido de materia orgánica suficiente para afectar las propiedades mecánicas del material (Fig. 10), pero no tiene que tener la estructura esponjosa de turba o el escombro de la materia. Aunque el contenido orgánico de la mayoría de los suelos oscila entre el 0,5 y el 5% en masa, el comportamiento coloidal de la materia orgánica tiene una influencia negativa en la química y los ingenieros clasifican los suelos orgánicos como uno de los suelos más problemáticos debido a su alta compresibilidad, contenido de humedad que varía entre 200 y 300% y altos índices de vacíos. (Saride, Chikyala, Puppala, & Harris, 2010).

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO



Figura 11. Suelo orgánico (LV, 2019)

Los suelos volcánicos son comunes en el cinturón cafetero (Fig. 11) donde predominan húmedas cordilleras entre los 1000 y 2000 msnm, este tipo de suelos volcánicos o piroclásticos en su estado natural presentan varias complejidades, comenzando con su comportamiento mecánico, que a menudo se encuentra en la transición entre suelos duros y rocas débiles además de problemas en la compactación debido a su humedad.



Figura 10. Suelos volcánicos en Manizales (Espectador, 2017)

Estos suelos son muy reactivos al óxido de calcio (CaO) debido a la concentración de cal, la eficacia de la estabilización depende principalmente de la cantidad de agua que se utilice. Sin embargo, faltan estudios sistemáticos sobre la adecuación de los suelos piroclásticos a la

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

estabilización con cal y los efectos de los parámetros de tratamiento sobre las propiedades de ingeniería del material estabilizado. (Cecconi & Russo, 2012).

Los suelos expansivos en Colombia son muy comunes y los encontramos a lo largo y ancho del país, pero en gran cantidad se han encontrado en ciudades como: Bogotá, Medellín, Norte del Valle, Cúcuta, Sur del Cauca, Barranquilla, Cali, Huila entre otros. (Montejo Fonseca, 2002).

Los asentamientos diferenciales generados por arcillas expansivas se observan típicamente en las vías. Diferentes mecanismos físicos pueden estar detrás de estos problemas. Los suelos naturales en Colombia están dominados por arcillas retráctiles (también conocidas como suelos expansivos).

Este tipo de arcillas se caracterizan por expansiones y contracciones significativas cuando se someten a procesos de humectación y secado, respectivamente. El paso vehicular por este tipo de suelos retráctiles está sujetos a grandes solitudes asociadas con los cambios de volumen del suelo, que generalmente conducen a asentamientos desiguales inaceptables. Los movimientos relativos de los vehículos en este tipo de suelo también pueden estar relacionados con fallas progresivas de cizalladura y con la consolidación y el arrastre a largo plazo. Los asentamientos desiguales afectan tanto a los costos operativos como a la seguridad. (Sánchez et al., 2014).

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

Estado del Conocimiento

A continuación, se presenta la consulta que se realizó con la herramienta de análisis bibliométrico de la base de datos Spocus. Para este caso de estudio con respecto a; geomallas multiaxiales como refuerzo en vías sin pavimentar en suelos blandos se ingresó al sistema de información Spocus las palabras *Geogrids on Roads* obteniendo los siguientes resultados:

Nos dirigimos a la opción análisis de resultados, donde la base de datos nos mostró, como primer análisis una proyección de la tendencia de las publicaciones asociadas a la muestra que contiene 332 artículos, presentando una tendencia creciente desde 1984 hasta 2019 relacionados con la palabra, geomallas en carreteras. (ver anexo 1 figura 21).

En segundo lugar, revisaremos el análisis de las fuentes de la muestra. La base de datos nos muestra un análisis de 6 fuentes de revistas principales como son; publicaciones especiales de geotecnia, registros de investigación de transporte, geotextiles y geomenbranas, Zhongguo Gonglu Xuebao diario de china de carreteras y transporte, revista electrónica de Ingeniería Geotécnica y geosintéticos, donde las publicaciones especiales de geotecnia iniciaron a partir de 1992. Las publicaciones especiales de geotecnia lideran la consulta con 18 publicaciones hasta el 2017, publicando artículos en 1992, 1994, 2000 y 2004 en 2006 se publican 2 artículos para luego decrecer a un artículo en el 2008 y 2009 ya en el 2011 su tendencia es creciente publicando 4 artículos, decrece en el 2012 con un artículo, para luego aumentar su tendencia nuevamente en el 2014 con dos artículos y finalizando sus publicaciones en el 2016 y el 2017 con un artículo respectivamente. (ver anexo 2 figura 22).

Continuando con el análisis en el gestor bibliográfico Scopus, nos dirigimos, a las tendencias con mayor cantidad de publicaciones relacionadas por autor, liderando, el autor Kwon, J. que tiene 9 artículos asociados a las geomallas en carreteras, después siguiendo en la lista dos autores

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

con 8 artículos, Al-Qadi, I.L. y Vollmert, L., Han, J. con 7 publicaciones. Después tendríamos 5 autores con 6 publicaciones en su orden (Abu-Farsakh, M., Klompaker, J., Palmeira, E.M., Tang, X. y Tutumluer, E.) y finalizando Alexiew, D. con 5 artículos. (ver anexo 3 figura 23).

Revisando las instituciones vemos que la Universidad de BBG Bauberatung Geokunststoffe GmbH & Co. KG de Alemania, lidera el grupo con 13 investigaciones y en segundo lugar la Universidad de Illinois at Urbana-Champaign de EE. UU con 8 publicaciones y tercer lugar se ubica la compañía NAUE GmbH y Co. KG de Alemania y el centro de investigaciones de transportes de Louisiana) con 7 publicaciones respectivamente. (ver anexo 4 figura 24).

En el análisis por países Estados Unidos lidera con 72 documentos, china en segundo lugar con 49 publicaciones, Alemania con 32, India con 29, Reino Unido con 18, seguido de Italia con 15 y en su orden Polonia, Brasil, Canadá y Rusia con (9,8,8,7) documentos respectivamente alrededor de la temática geomallas en carreteras. (ver anexo 5 figura 25).

Ahora determinaremos que tipos de documentos o artículos se publicaron sobre el tema donde el 48,9 % son artículos, 44,6 % conferencias de investigación y el 6,2 restante entre capítulos de libros, revisiones, notas, libros y encuestas entre otros (ver anexo 6 figura 26).

Finalmente, el campo con más publicaciones fue el área de Ingeniería con 184 publicaciones, segundo, el área de ciencias del suelo con 161 publicaciones, en tercer lugar, ciencia de los materiales con 83, en cuarto lugar, ciencia medioambiental con 46, quinto lugar para ciencias sociales con 20 y sexto lugar para Ciencias Agropecuarias y Biológicas con 19 publicaciones respectivamente. (ver anexo 7 figura 27).

Después de haber realizado una mirada general a la muestra en la aplicación de cada uno de los análisis, que nos permite Spocus, con sus herramientas de trabajo, haremos uso de la herramienta *cite score* la cual utilizaremos en el análisis bibliométrico Spocus, esta herramienta

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

nos permite comparar las revistas basándonos en los indicadores de calidad de cada una de estas fuentes.

La herramienta cite score por defecto nos muestra un análisis basado en el índice *cite score* donde observamos que la revista o fuente de información geotextiles y geomembranas es la que más se destaca con un promedio cite score de 3.2 en los últimos 7 años, la segunda revista que se destaca es el registro de investigación de transportes, en tercer lugar está la revista de transporte chino en cuarto lugar se ubican las publicaciones especiales de geotecnia y en último lugar la revista de geosintéticos.

Si estamos pensando en un tema de visibilidad sobre investigación, la revista que más publicaciones realiza es la revista de registro de la investigación de transporte, esta revista ha crecido en citaciones entre 1996 con 736 citaciones hasta el 2018 con 25156 respectivamente, actualmente aparece con 4964 en lo transcurrido del 2019. (ver anexo 8 figura 28).

Revisaremos el número de documentos que se publican en cada una de las revistas por año. La revista de registro de investigación de transporte es la que lidera la lista. Pero en el año 2014 la revista de publicaciones especiales de geotecnia lidero la tendencia con 1103 documentos con respecto a los 919 que registro la revista de registro de transporte.

La revista de registro de investigación de transporte se ha mantenido desde 1996 publicando documentos de investigación con un promedio de 835 artículos desde 1996 hasta el 2019 mientras la segunda revista en importancia de publicaciones, revista de publicaciones especiales de geotecnia ha publicado un promedio de 556 documentos en el mismo periodo.

Revisión de la Literatura sobre la Utilización de Geomallas en Vías no Pavimentadas

Enfoque Histórico

Durante más de 30 años, se ha intentado comprender la influencia de los geosintéticos sobre el rendimiento de las carreteras reforzadas con estos productos. Se ha tenido en cuenta tanto las propiedades físicas que definen las características geométricas de una geomalla como las propiedades mecánicas que describen la fuerza, la rigidez, la robustez de una geomalla, etc. A continuación, se examina la necesidad de reevaluar la idoneidad de este enfoque, particularmente a la luz de algunos de los avances tecnológicos que han tenido lugar recientemente en la industria de las geomallas.

Existen muchos usos útiles y rentables de los materiales geosintéticos para carreteras de bajo volumen, similares a las aplicaciones realizadas en la mayoría de las carreteras y autopistas de gran volumen. Sin embargo, en muchos proyectos de carreteras de bajo volumen se encuentra un uso limitado o nulo de geosintéticos. Esto se debe en parte a la preocupación por los presupuestos típicamente bajos y a la falta de familiaridad y experiencia de los diseñadores o constructores del proyecto. Esto es particularmente cierto en muchos países en desarrollo. Sin embargo, durante siglos los caminos han incorporado formas de refuerzo y separación. Los primeros intentos se hicieron para estabilizar pantanos y suelos arcillosos utilizando troncos de árboles, bambú, piedras, paja y pequeños arbustos. El uso de troncos o ramas de árboles para formar una "estructura plana" para estabilizar los caminos se puede encontrar antes de la era cristiana. El concepto de reforzar los suelos de baja capacidad de carga ha ido evolucionando a través de la historia y continúa en la actualidad. El primer uso documentado de tejidos en la construcción de carreteras en los Estados Unidos fue realizado por el Departamento de Carreteras de Carolina del Sur en 1926. (Koerner, 2012).

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

Las carreteras de bajo volumen se caracterizan por tráfico diario medio anual (TDAA) de 1000 a 400 o menos vehículos por día. Las carreteras de bajo volumen constituyen aproximadamente dos tercios de todas las carreteras del mundo, o unos 30 millones de kilómetros (18 millones de millas) de caminos. (Faiz, 2012), y sin embargo no reciben la atención y las tecnologías apropiadas que merecen una cantidad tan grande de infraestructura. El Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, maneja un sistema de transporte con más de 600.000 kilómetros (370.000 millas) de caminos a través de América, en su mayoría caminos de bajo volumen. (Faiz, 2012).

En los últimos 40 años se ha adquirido una considerable experiencia en la aplicación y el uso de una amplia variedad de materiales geosintéticos en los caminos rurales estadounidenses. (Groenier, 2008).

Los geotextiles tejidos comenzaron a utilizarse durante los años sesenta para controlar la erosión y los geotextiles no tejidos comenzaron a utilizarse en aplicaciones de muros de contención y suelos reforzados, así como en drenajes subterráneos, en los años setenta. Más tarde, las geomallas comenzaron a utilizarse en muros y rellenos geosintéticos reforzados. Los primeros usos de los geosintéticos están documentados en la publicación "Directrices para la utilización de tejidos en la construcción y el mantenimiento de carreteras de bajo volumen". (Steward et al., 1977) y Powell et al. (1999). Hoy en día los materiales geosintéticos utilizados incluyen geotextiles, georedes, geomallas, geoceldas, geoespuma y geocompuestos. Los materiales geosintéticos también incluyen tuberías de plástico, vallas de plástico y membranas y revestimientos impermeables. Se están desarrollando nuevas combinaciones de materiales, como geocompuestos de drenaje, filtros multicapa, geomallas con geotextiles, geoespumas y una

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

amplia variedad de aplicaciones para el control de los sedimentos y la erosión. La separación y el refuerzo también se utilizan comúnmente juntos en las aplicaciones de apoyo de subsuelo.

Métodos de Desarrollo

La experiencia de los últimos 40 años de trabajo con materiales geosintéticos y su uso en carreteras sin pavimentar junto con la colaboración de organismos de infraestructura vial, como la Administración Federal de Carreteras (FHWA) y la Asociación Americana de Carreteras Estatales y Organización del Transporte (AASHTO), (Abu-Farsakh, Hanandeh, Tang, & Chen, 2016), (Tingle & Webster, 2003), así como en las universidades y en el sector privado, (Huang & Wu, 2009), el uso de los geosintéticos, las prácticas de diseño, las especificaciones y los métodos de ensayo han ido evolucionando. El Servicio Forestal estadounidense ha sido pionero en el desarrollo de algunos usos de los geosintéticos, (Lipomi & Wayne, 2014), y ha trabajado aprovechando otros desarrollos dando soluciones de diseño rentables a los problemas de las carreteras, en particular para la estabilización de suelos blandos, en estructuras de retención para la estabilidad de los taludes y en medidas básicas de drenaje en carreteras de bajo volumen.

Durante la década de 1970 y a lo largo de la década de los años 80 el Servicio Forestal participó en la construcción de miles de kilómetros de caminos para la explotación forestal en todo el territorio de los Estados Unidos, y en particular en el oeste. Tenía un gran número de ingenieros geotécnicos y geólogos capacitados que ayudaron a desarrollar muchas aplicaciones creativas y útiles de los geosintéticos en el diseño de carreteras de bajo volumen. La mayoría de estos usos se desarrollaron mediante una combinación de diseño de ingeniería y aplicación empírica de los productos geosintéticos. El ensayo y error fue a menudo el proceso utilizado que condujo a sus útiles aplicaciones. Muchos de los primeros desarrollos y aplicaciones están documentados en el informe provisional de la FHWA "Evaluation of Test Methods and Use

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

Criteria for Geotechnical Fabrics in Highway Applications" (Bell JR, Hicks RG, 1980) y

También, Historia de los muros reforzados en el Servicio Forestal del USDA (Steward, 1992).

En la actualidad, la mayoría de los métodos de diseño han evolucionado y son generalmente mucho más sofisticados que las primeras aplicaciones, pero las aplicaciones básicas siguen siendo útiles y se utilizan comúnmente en toda la industria del transporte. Lamentablemente, los geosintéticos se siguen utilizando poco en el sector de las carreteras rurales, especialmente en las vías sin pavimentar que están a cargo de entidades de ordenación territorial estatales, en particular, en los países en desarrollo.

Muchas organizaciones y conferencias, así como considerables investigaciones, han contribuido a acelerar el uso de los geosintéticos en la ingeniería actual. La Asociación Internacional de Tejidos Industriales (IFAI) y su revista comercial Geosynthetics han proporcionado una gran cantidad de información útil sobre la fabricación, el uso, el diseño y el ensayo de esos materiales, así como aplicaciones y casos prácticos, como ejemplo citaremos algunas revistas geotécnicas y métodos de diseño en carreteras sin pavimentar. (C.-N. Liu, Zornberg, Chen, Ho, & Lin, 2009), (Lyons & Fannin, 2006a), (Sadık Bakır & Tolga Yılmaz, 2006) entre otras.

Mecanismos a Través de los Cuales las Geomallas Pueden Mejorar el Rendimiento de una Estructura Pavimentada y no Pavimentada

Las aplicaciones geosintéticas corresponden a los diferentes tipos de proyectos que se pueden llevar a cabo para lograr objetivos de diseño específicos. Cada aplicación geosintética puede implicar una sola función geosintética o una combinación de tales funciones para desarrollar mecanismos hidráulicos o mecánicos destinados a mejorar el rendimiento de la carretera. Con anterioridad hablamos sobre las diferentes aplicaciones de las geomallas, en esta

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

oportunidad sintetizaremos la información en un gráfico donde nos muestra una sección de carretera pavimentada con la ubicación de posibles capas geosintéticas y las diversas funciones que estos geosintéticos pueden cumplir.

El desarrollo económico de un país está íntimamente relacionado con su infraestructura de transporte. Por ejemplo, en los EE.UU. los camiones transportan aproximadamente el 60 por ciento del total de los envíos de carga por peso y 70 por ciento por valor (sin incluir los envíos movidos por camión en combinación con otro modo) y se asigna una cantidad importante de recursos para el mantenimiento y la construcción de vías. (FHWA, 2006). En Brasil, aproximadamente el 61% de los fletes se transportan por carretera, y casi el 90% de la longitud total de la red de carreteras consiste en caminos sin pavimentar (GEIPOT, 2008). En Colombia de acuerdo con la ANDI y Fenalco, el 90% del total de la carga es transportada por carretera ubicándolo en la posición 58 de 160 países en desempeño logístico según el banco mundial. (Delgado Gómez, 2019), el 45% de las vías del territorio colombiano son de tipo terciarias y si a esto le sumamos un tráfico interrumpido periódicamente debido a las vías en mal estado y un mantenimiento deficiente. En este contexto, durante las últimas tres décadas, los geotextiles y geomallas de polímero han sido propuestos y utilizados para mejorar el rendimiento de carreteras pavimentadas y no pavimentadas y para reducir la capa de base de espesor. La mayoría de los estudios se concentran principalmente en carreteras reforzadas sin pavimentar y han sido capaces de identificar beneficios en términos de reducción de la deformación plástica o de la capacidad de reducir el espesor del árido, lo que permite aumentar considerablemente la vida útil de las carreteras y reducir los costos de mantenimiento, por ejemplo, (J. P. Giroud & Noiray, 1981); (Bauer & El Halim, 1987); (Carter & Dixon, 1995); (HUFENUS et al., 2006); (Maubeuge &

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

Klomp maker, 2011); (Millien, Dragomir, Wendling, Petit, & Ilescu, 2012); (Han, 2013); (Tabatabaei & Rahman, 2013); (Tang, Abu-Farsakh, Hanandeh, & Chen, 2014) entre otros.

Varias obras en la literatura han mostrado los beneficios de refuerzo de pavimentos con geosintéticos (E. Yoder & M. W. Witzak, 1975); (Koerner, 2012); (Holtz, Christopher, & Berg, 2008); (Perkins e Ismeik, 1997a,b). La presencia de la capa de refuerzo aumenta la sujeción lateral o la resistencia pasiva del material de relleno, lo que aumenta la rigidez del sistema y la reducción de las deformaciones verticales y laterales de la estructura pavimentada y no pavimentada (J. Giroud et al., 1984); (Bauer & El Halim, 1987); (Sprague, Lothspeich, Chuck, & Goodrum, 2004); (Zhang & Hurta, 2008a); (E. M. Palmeira & Antunes, 2010) y otros. Dentro de las mejoras asociadas a las geomallas, se cree ampliamente que el refuerzo con geomallas puede dar lugar a reducciones del espesor estructural de la carretera, con evidentes repercusiones económicas favorables. (Milligan & Love, 1984); (Leu et al., 2001); (Sadık Bakır & Tolga Yılmaz, 2006); (Nader Ghafoori, Ph.D. & Sharbaf, 2016); (Vennamaneni, Raju Aketi, & Paisa, 2018); (Tencate, 2014); (Singh, Trivedi, & Shukla, 2019) entre otros.

(Anderson y Killeavy, 1989; Al-Qadi y otros, 1994; Cancelli y otros, 1996; Perkins, 1999b); (Zornberg, 2011); (Maubeuge & Klomp maker, 2011); (Millien et al., 2012); (Keller, 2016b); han demostrado que la presencia de refuerzo geosintético puede reducir el espesor del pavimento entre un 20% y un 50% y extender su vida útil. Knapton y Austin (1996); (Leng & Gabr, 2006); (E. M. Palmeira & Antunes, 2010); (Cuelho & Perkins, 2017) encontró reducciones significativas en la profundidad de los surcos de la superficie de las estructuras pavimentadas y no pavimentadas para un número determinado de ciclos de carga debido al uso de refuerzo geosintético.

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

La presencia de la armadura en carreteras sin pavimentar puede también mejorar notablemente el rendimiento de estas carreteras cuando se construyen sobre subrasantes débiles (Jarrett, 1984); (Douglas & Valsangkar, 1992); (Sigurdsson, 1993); (Som & Sahu, 1999); (Douglas & Valsangkar, 1992); (HUFENUS et al., 2006); (Basu, Roy, Bhattacharyya, & Ghosh, 2009); (Latha, Nair, & Hemalatha, 2010); (Góngora & Palmeira, 2012); (Sun, Han, Wayne, Parsons, & Kwon, 2014); (Otero Téllez & Montejó Ochoa, 2016); (Elleboudy, Saleh, & Salama, 2017) y otros. Los resultados de innumerables pruebas revelaron que tanto la deformación vertical como la lateral estaban influenciadas por el tipo de geomalla y su ubicación, que a su vez también influye en el rendimiento de la carretera (Bauer & El Halim, 1987); (Ismail y Raymond, 1995); (S.W. Perkins & Ismeik, 1997); (Raymond & Ismail, 2003); (Abu-Farsakh, Souci, Voyiadjis, & Chen, 2012); (Mousavi, Gabr, & Borden, 2017); (Ahirwar & Mandal, 2018) y otros. Además los caminos no pavimentados reforzados con geosintéticos también son soluciones más fáciles y rápidas en comparación con las alternativas tradicionales, como el uso de mayores alturas de relleno o la sustitución del suelo de cimentación pobre por otro más competente, que son soluciones perjudiciales para el medio ambiente. (Millien et al., 2012).

(Giroud y Noiray, 1981); (S.W. Perkins & Ismeik, 1997); resumieron tres funciones potenciales de los geosintéticos como: restricción lateral, aumento de la capacidad de carga y efecto de membrana tensada.

El confinamiento lateral de los agregados en la geomalla da como resultado una capa base más rígida y una menor desviación dinámica de la estructura de la carretera durante la carga del tráfico, (J. P. Giroud & Han, 2004a); (J. P. Giroud & Han, 2004b). La geomalla cambia la condición de la interfaz entre la subrasante débil y la base de agregado. Este fenómeno aumenta la capacidad de carga del subsuelo. (Sun et al., 2014), (Bhandari, Han, & Parsons, 2015). Cuando

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

se acumula una cantidad excesiva de deformaciones bajo la carga de tráfico aplicada, el refuerzo curvado y tensado puede desarrollar una fuerza ascendente para soportar la carga, efecto bien conocido como membrana tensada. Este efecto ha sido estudiado por muchos investigadores en las últimas décadas. Las investigaciones anteriores sobre el análisis del efecto de la membrana tensada han seguido generalmente dos amplios enfoques, uno es el de utilizar un modelo analítico para representar los mecanismos de refuerzo que se supone actúan dentro del sistema. El segundo es utilizar el método numérico para formular y resolver las ecuaciones de compatibilidad y equilibrio basadas en métodos de elementos finitos. (J. P. Giroud & Han, 2004a); (J. P. Giroud & Han, 2004b); (Sharma, Chen, Abu-Farsakh, & Yoon, 2009), (Zornberg, 2011). Además de los mecanismos mencionados, el comportamiento de las geomallas en la interfaz entre la base de material pétreo y la subrasante débil evitan que los agregados de la base se perforen en la subrasante y que los finos de la subrasante migren a las capas de base, dependiendo mucho del tamaño y distribución de las partículas de agregado y la apertura de las costillas de las geomallas. (Rahman, Arulrajah, Piratheepan, Bo, & Imteaz, 2014), (Yu & Pradhan, 2017).

Nuevas Tecnologías en la Estabilización y Refuerzo en Vías Pavimentadas y sin Pavimentar Utilizando Geomallas

Las geomallas han sido introducidas en la ingeniería civil hace casi 40 años. Se han utilizado con éxito en un gran número de aplicaciones, especialmente en proyectos de infraestructura de transporte, como carreteras y ferrocarriles. Durante ese tiempo, las geomallas se han desarrollado constantemente para crear productos más eficientes. Las rejillas rígidas por ejemplo han experimentado una innovación con el desarrollo de nuevos patrones de perforación que producen aperturas de forma triangular después del proceso de estiramiento. La nueva forma tiene varios

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

beneficios en el perfil del producto, el grosor de las costillas y en la rigidez del plano, y se espera que esta estructura tridimensional ofrezca una mejora en el confinamiento, lo que redundará en una mayor resistencia al surco y una mejor distribución de la carga. (Tensar, 2010).

El refuerzo del suelo ha visto la entrada de un tercer tipo de geomalla, los flejes soldados (también descritos como tiras o barras), que es de estructura rígida. Producida tanto en poliéster como en polipropileno, la rejilla de fleje soldada se utiliza tanto en aplicaciones uniaxiales como biaxiales. Las propiedades de interés son las fuertes uniones, las excelentes características de arrastre en la forma de poliéster y la alta resistencia química. En la forma biaxial se emplean dos barras en dirección transversal a la máquina, lo que da una estructura tridimensional para ayudar en las aplicaciones de confinamiento (Elias, 2000). Como ejemplo de un beneficio de una geomalla elaborada en poliéster de alta densidad hablaremos de lo que sucede cuando los materiales bituminosos ligados son incapaces de soportar los altos esfuerzos de tracción que resultan de las fuerzas externas como el tráfico y las variaciones de temperatura, estas grietas se propagan rápidamente en la nueva capa de asfalto. Este fenómeno, conocido como agrietamiento reflectante, es uno de los principales problemas asociados con el uso de las capas superpuestas de asfalto. Para hacer frente al problema de las grietas reflectantes y, por lo tanto, prolongar la vida útil de un pavimento, una rejilla de refuerzo hecha de poliéster de alto módulo ha demostrado ser una solución muy eficaz. Los geosintéticos como refuerzo del asfalto han mostrado sistemáticamente resultados sobresalientes en el tratamiento de la propagación de las grietas, eliminando los daños causados por la intrusión de agua que, en última instancia, conduce al fracaso de la estructura del pavimento. (Leite Gembus & Thesseling, 2015).

El tema tridimensional se lleva adelante en las aplicaciones de confinamiento mediante el desarrollo de superficies tridimensionales en las geomembranas. Las fallas de deslizamiento, que

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

por lo general se identifican en la interfaz entre la geomembrana y el geotextil o la geomembrana y el suelo, han sido aliviadas por el desarrollo de superficies texturizadas y labradas en las geomembranas. Las geomembranas tridimensionales, las superficies en relieve, por ejemplo, tienen un grosor consistente, una altura de aspereza consistente y propiedades consistentes y son fáciles de instalar y, lo que es más importante, dan como resultado un mejor rendimiento (mejor adhesión, mejor resistencia al deslizamiento). (Frobel, 1996).

La electrocinética y la electroósmosis son técnicas empleadas para manipular la presión de los poros y los índices de plasticidad de los suelos. Los ánodos y cátodos se crean a partir de geosintéticos utilizando materiales conductores como la fibra de carbono, o mediante el entrelazamiento de conductores (alambre) en el tejido. Otras aplicaciones geosintéticas son el manejo eficiente de los desechos químicos de las minas y los desagües en aguas residuales (tubos geotextiles). El césped deportivo se maneja usando la corriente para extraer el exceso de agua, o invirtiendo la polaridad, entregando agua a las raíces de las plantas. Los conceptos de la electrocinética son aplicables a la estabilidad de los taludes, el suelo estabilizado mecánicamente (muros), el drenaje entre otros. (E. Palmeira & Tatsuoka, 2008).

Las geoceldas se han utilizado de manera innovadora para estabilizar los agregados, al tiempo que proporcionan un gran volumen de drenaje y apoyo a la plataforma de trabajo. En un compuesto de deshielo para aeropuertos, la geocelda confina el agregado, mejora la capacidad de carga del agregado y la subrasante, contiene grandes volúmenes de fluido en eventos de gran volumen y drena el fluido de la estructura de manera controlada. (Leu et al., 2001); (Latha et al., 2010); (Han & Thakur, 2012).

Pruebas recientes han confirmado que las geomallas hexagonales en la estabilización de carreteras puede dar lugar a un incremento importante de la vida útil de los pavimentos o

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

permitir una disminución del espesor de las capas de los pavimentos, incluidas las capas de asfalto, para una vida útil determinada. Esto abre una gama de oportunidades económicas para el contratista y el cliente, esto incluirá el ahorro de tiempo y costos de construcción, la reducción del tráfico de la construcción y los daños asociados a las carreteras de acceso, o ahorros sustanciales en la emisión de gases de efecto invernadero. (Horton, Mazurowski, & Oliver, 2019).

Se ha desarrollado un nuevo método de diseño para que el diseñador pueda variar la ubicación de las geomallas, así como el tipo, el número y la propiedad de las mismas utilizando un modelo de varias capas. Una vez definido el espesor de la base y/o de la subbase con uno de los métodos disponibles en la literatura (método AASHTO, método Giroud-Han, método Leng-Gabr, etc.) el método de diseño propuesto permite establecer el número y las características mecánicas de las capas de geomalla necesarias para absorber las fuerzas horizontales generadas por el peso propio, la carga de las ruedas y el efecto de la membrana tensada. Se presentan estudios de casos de proyectos indios en los que este método se aplicó con éxito. (Rimoldi & Korulla, 2019).

Tabla 4

Análisis sinóptico para los artículos más relevantes en el estudio de las geomallas, desde 1984

| Autores | Objetivo general | Categorías /Variables | Contenido | Resultados |
|--------------------------|--|--|--|---|
| (J. Giroud et al., 1984) | Revisar los mecanismos a través de los cuales las geomallas pueden mejorar el rendimiento de una estructura sin pavimentar | <ul style="list-style-type: none"> • Mecanismos de funcionamiento • Desplazamiento lateral • Contaminación • Hundimiento y confinamiento • Distribución de carga • Efecto geomalla | Método de diseño para reforzar una vía sin pavimentar con geomalla tensar, analizando mecanismos a través de los cuales las geomallas pueden llegar a mejorar el rendimiento de una estructura sin pavimentar. | <ul style="list-style-type: none"> • Mejora la capacidad de distribución de carga en capa base • El enclavamiento del agregado retrasa el deterioro de la estructura no pavimentada • El ahorro en el espesor de la capa base no es proporcional a la rigidez a la tracción de la geomalla |

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

| | | | | |
|------------------------------|---|---|---|---|
| (Bauer & El Halim, 1987) | <p>Analizar los resultados de una extensa investigación de laboratorio se emplearon geomallas de alta resistencia, para fortalecer las bases de carreteras granulares sujetas a condiciones de carga de tránsito y comparar la sección reforzada con la sección de control no reforzado para estimar el aumento de vida útil de la base del camino.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Resistencia a cargas repetidas y sostenidas • Fricción y enclavamiento • Mecanismos de falla • Áreas de anclaje • Mecanismos de refuerzo de bases • Parámetros de materiales | <p>La caja de prueba o recipiente estaba hecha de contrachapado laminado y fue reforzado con tirantes angulares para minimizar cualquier desviación lateral bajo carga, la caja se forro con acero galvanizado para retener humedad y para minimizar la fricción lateral de la pared. La bandeja de prueba se llenó con una arena de tamaño medio bastante uniforme hasta una altura de 900 mm. La arena fue compactada en 150 mm. La densidad seca máxima y contenido de humedad óptimo ($\delta_d = 1.95 \text{ g/cm}^3$ y $w = 10\%$). El material de base granular consistía en un material de piedra caliza triturada y bien graduado, el material de piedra triturada varió de 75 mm a 3000 mm.</p> <p>La malla de refuerzo utilizada en esta investigación fue un polímero de alta densidad y alta resistencia (Tensar ARI). Las aberturas de malla fueron de 60 por 50 mm. La rejilla tiene hilos de aproximadamente 1 mm de grosor y 10 mm de ancho en la parte estrecha y de aproximadamente 10 mm de ancho y 2 mm de grosor en los puntos nodales.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • La ubicación de la geomalla en la base /interfaz de subrasante dio lugar a la reducción de la deformación observada en aproximadamente un 40% en comparación con la sección no reforzada. • la sección no reforzada tuvo una deformación permanente de 28 mm después de un total de 155,300 ciclos de carga, mientras que a la sección reforzada le llevó 233,700 ciclos de carga. Esto corresponde a un aumento de alrededor del 50% en términos de repeticiones de carga. |
| (Douglas & Valsangkar, 1992) | <p>Desarrollar aún más la investigación sobre carreteras sin pavimentar utilizando geosintéticos en subrasantes altamente compresibles, simulando ciclos de carga de baja frecuencia a baja velocidad de vehículos pesados, llevando a cabo un proyecto piloto para identificar la relación agregado-geosintético.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Subrasantes de turba altamente compresibles • Rigidez en lugar de la profundidad como variable dependiente • Costos y eficiencia entre la relación vehículos-carretera | <p>Las pruebas de carga cíclica se llevaron a cabo en varios tipos de pavimentos, en un pozo de prueba de 2 m de profundidad 3 X 4 m en planta, utilizando un sistema de carga programable. Las cargas se aplicaron a través de una placa rígida de 300 mm de diámetro para modelar pavimentos. con un grosor de base granular de 150 mm, sobre una turba suave compresible artificial 1,2 m de profundidad. Se realizaron selecciones de los geosintéticos para la interfaz base/subrasante y las cargas fueron cicladas a una frecuencia de 0.5 Hz, correspondiente a una flujo constante de ejes espaciados a 4 m, viajando a unos 7 km / h.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • La rigidez para cada prueba de modelo en todos los casos, hay un gran aumento de la rigidez desde el primer ciclo hasta el segundo, correspondiente al aumento de carga progresivo. La rigidez continuó aumentando gradualmente con el ciclo de carga. La implicación es que, para estos materiales y modelos de diseños de pavimento, las estructuras continuaron endureciéndose con ciclo de carga. Lo mismo puede no ser cierto para otros materiales (por ejemplo, arcillas en lugar de turba). |
| (Barry, Trigunars) | <p>Construir carreteras de más de 11 m de</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Niveles de turba • Nivel freático del terreno | <p>En la solución del diseño en la construcción de las carreteras se consideraron varias opciones,</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Los diferentes ensayos de campo incorporaron las limitaciones reales que se |

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

| | | | | |
|------------------------------|---|--|--|--|
| yah, Symes, & Younger, 1995) | turba en el este de Sumatra ha requerido grandes investigaciones de ingeniería. Restricciones ambientales en un área forestal sensible no desarrollada, ha requerido el uso de una combinación de materiales disponibles localmente combinados con geomallas para producir una solución satisfactoria | <ul style="list-style-type: none"> • Resistencia de geotextil • Compresibilidad de la madera • Tensión de la geomalla • Compresión del lecho de piedra | incluyendo el uso de varios tipos de relleno ligero y una geomalla apilada como balsa reforzada. Se consideró los materiales disponibles in situ; no había ningún relleno de ingeniería disponible ni en las islas ni en la región costera. La madera estaba disponible localmente desde concesiones con licencia en el bosque de turba. La madera, una especie llamada bintangor, es muy recta y consistente con tamaño de 150-200 mm de diámetro; sin embargo, puede pudrirse completamente en unos dos años cuando se coloca en el suelo por encima del nivel freático, se revisaron los espaciamientos de las pilas, se controló la podredumbre de las pilas de madera sobre el nivel freático, el uso y tamaño de las tapas de pila y el número de capas de geomallas Tensar SS1 (tensión 18 KN/m ²). | <p>encontraron durante la construcción para luego ser utilizados en posteriores trabajos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Es probable que la capa de pana (geotextil) se pudra relativamente rápido y habrá transferencia de carga a los pilotes • La complejidad de la interacción entre las pilas, La balsa de pana, el pavimento de piedra y la geomalla en el tiempo, hace que sea difícil comparar el comportamiento real con predicciones, no obstante, la relación geomalla / pavimento reforzado tiene el potencial de soportar mayores cargas que las predichas por los diseños convencionales. |
| (Voskamp, 2000) | Analizar el comportamiento de una nueva geomalla hecha de correas separadas, soldadas entre sus conexiones utilizando una técnica de soldadura láser que se ha desarrollado después de años de investigación intensiva | <ul style="list-style-type: none"> • Geomalla rígida y flexible. • Resistencia y fluencia del material • Resistencia de unión • Resistencia a la rotura • Durabilidad • Precio | La nueva geomalla combina las propiedades de las rejillas rígidas y las ventajas de las geomallas flexibles y pueden estar hechas de varios polímeros. De esta manera, se puede seleccionar el polímero más adecuado para cumplir con las propiedades requeridas en la aplicación. Además, la técnica de soldadura da como resultado conexiones rígidas entre las correas. Las correas de PET se utilizan para aplicaciones a largo plazo como refuerzo de taludes; las correas de PP para aplicaciones con requisitos de resistencia a corto plazo, como por ejemplo en carretera de refuerzo. Los resultados de varias pruebas de rendimiento a largo plazo como; la fluencia, los daños mecánicos, la extracción y la tensión a largo plazo se calcula utilizando el método descrito en FHWA-SA-96-071. | <ul style="list-style-type: none"> • El resultado de las pruebas de la nueva geomalla muestra que la red es muy eficiente en el uso con diferentes materiales • Las pérdidas de fuerza en el sistema de conexión son muy pequeñas • Los resultados de fluencia dan valores más altos que los valores de ruptura conocidos para PET. Esto es causado por el uso de correas altamente orientadas en lugar de hilos • Los factores de reducción de daño mecánico son comparables a los de otras geomallas • Los valores en combinación con el material de relleno de bordes afilados son muy buenos. |
| (Leu et al., 2001) | Describir cuatro aplicaciones diferentes de los geosintéticos en la reconstrucción de carreteras en el norte de Minnesota. Las | <ul style="list-style-type: none"> • Resistencia a la tracción bidireccional • Efecto de fortalecimiento • Fisuración transversal y longitudinal • Costos | En los proyectos de carreteras del condado se utilizaron geotextiles para la separación y fortalecimiento de suelos débiles, depositados en lagos, de subsanante; incluyendo un proyecto único en el noroeste del condado (la chimenea de Minnesota) donde se utilizaron | <ul style="list-style-type: none"> • Los resultados indican que los geosintéticos tienen efectos de fortalecimiento que podría reducir el grosor de la capa base de grava, manteniendo al mismo tiempo el diseño original de capacidad de carga |

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

| | | | | |
|--|---|--|--|---|
| <p>vías se encuentran sobre pavimento y sin pavimentar en el condado, las carreteras son de volumen medio, y una carretera estatal principal</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Grietas transversales del pavimento bituminoso | <p>geotextiles para proporcionar un camino transitable durante las vacaciones de primavera. El proyecto de la carretera principal del estado consiste en secciones de geoceldas, geomallas y geotextiles construidas en secuencia para determinar cuál es la más rentable. La mayoría de las instalaciones han estado en funcionamiento durante más de cinco años en 2001.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Los geosintéticos tienen beneficios potenciales a largo plazo cuando se aplican como parte integral del diseño sin reducir el espesor de la grava o del asfalto • Los beneficios a largo plazo observados son la reducción del mantenimiento de la fisuración transversal y longitudinal. • Un camino más fuerte para resistir cargas, lo que podría ofrecer un tipo de preservación más económico en el futuro reduciendo así costos | |
| <p>(Tingle & Webster, 2003)</p> | <p>Revisar el procedimiento de diseño del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU. para validar los criterios existentes para las carreteras sin pavimentar reforzadas con geotextiles y para modificar los criterios para la adición de geomallas biaxiales rígidas</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Rigidez torsional • Estabilidad de apertura • Factor de capacidad de rodamiento • Suelo de arcilla de baja plasticidad • Resistencia del suelo de la subrasante • Carga de diseño • Capacidad portante de la subrasante • Costos de diseño | <p>Se revisó la base teórica del procedimiento de diseño existente para garantizar que se utilizaron los procedimientos apropiados, para derivar el método de diseño actual. Los resultados históricos de la sección de pruebas fueron utilizados para validar los factores empíricos de capacidad de soporte de rodamiento, N_c, utilizados para materiales de base no reforzados y reforzados con geotextiles. Además, un factor empírico de capacidad de carga para el refuerzo con geomallas, para modificar el procedimiento de diseño existente tanto para el geotextil como para el uso de la geomalla. Se utilizó la teoría relevante ejecutada para el desarrollo de la teoría existente, se describe el método de diseño para establecer las bases de los análisis.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Los resultados indican que la sección de prueba a escala real, aunque limitada en sus variaciones de los parámetros clave, cumple con muchas de las suposiciones hechas durante el desarrollo original del procedimiento de diseño y la teoría detrás de ello • La sección de prueba a escala real demostró un potencial ahorro del agregado base del 25% utilizando un geotextil en función de separación y del 50% para un geotextil y una geomalla rígida utilizada para la separación y el refuerzo, respectivamente. • Se determinaron factores de reducción de base de 0,75 y 0,50 para las secciones reforzadas con geotextil y geomalla-geotextil, respectivamente. • El factor de capacidad del rodamiento del elemento no reforzado para la sección de prueba a escala real fue de 2,6 y el factor de capacidad de rodamiento de diseño fue 2,8 el resultado es apropiado sobre la base de datos limitados a gran escala |
| <p>(Sprague, Lothspeich, Chuck, &</p> | <p>Reforzar el material pétreo de una base para una carretera y</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Ciclos de carga estática • Cargas cíclicas • Confinamiento lateral de la geomalla | <p>Una propiedad relevante de una geomalla es el confinamiento que genera el material en las diferentes capas de una vía. Recientemente</p> | <ul style="list-style-type: none"> • El protocolo de prueba de confinamiento es muy prometedor como prueba de índice a pequeña escala para |

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

| | | | | |
|------------------------|--|--|---|---|
| Goodrum, 2004) | medir el beneficio de confinamiento. | <ul style="list-style-type: none"> • Esfuerzos de tensión • Relación beneficio- tráfico • Rigidez de las costillas • Deflexión y elongación | <p>se ha desarrollado una prueba a pequeña escala que es capaz de cuantificar los efectos del confinamiento ofrecido por una geomalla, utilizando la carga fuera del plano para crear condiciones de estrés multiaxial relevantes para el refuerzo de la base. Este documento revisa el desarrollo de la prueba de confinamiento, comenta los resultados en comparación con las evidencias de rendimiento a gran escala y sugiere cómo los resultados de estas pruebas a confinamiento pueden incorporarse en los procedimientos de diseño.</p> | <p>medir la mayor rigidez aportada por un geosintético a un agregado de base de carretera.</p> <ul style="list-style-type: none"> • También puede proporcionar los datos necesarios para la entrada en un modelo de diseño, mientras que el protocolo inicial emplea carga estática de un solo ciclo, el trabajo posterior con carga cíclica simularía mejor el acondicionamiento de tensión que tiene lugar en el campo bajo carga de tráfico repotenciada y potencialmente proporcionaría correlación con los resultados empíricos de la TBR (relación beneficio-tráfico) de las secciones de prueba a gran escala |
| (Lyons & Fannin, 2006) | Realizar una comparación de dos métodos de diseño en caminos no pavimentados re forzados con geosintéticos, el método se basa en un análisis de equilibrio límite de la capacidad de carga en el estado límite último. | <ul style="list-style-type: none"> • Límite de capacidad de carga • Estado limite ultimo • Resistencia de la subrasante • Resistencia al corte no drenado • Ángulos de dispersión de carga | <p>Se muestra que dos métodos de diseño semiempíricos se basan en una relación fundamental común, pero difieren en la parametrización de los grupos de entrada. La degradación de la resistencia de subrasante con carga repetida está bien caracterizada por cada método de diseño y se cree que es de importancia primordial para obtener una buena concordancia entre el resultado del análisis y la respuesta observada en el tráfico de campo.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Se puede formular una relación común entre el espesor de la capa de base (h) y el radio del área (R) de contacto del neumático y la resistencia al cizallamiento no drenada de la subrasante (SU), con referencia a tres grupos de entrada (λ_i). La evaluación de estos grupos de entrada (λ_i) a partir de un análisis retrospectivo de los datos de campo revela que el método Jewell (1996) invoca una carga relativamente menor repartida en la capa base y moviliza una proporción relativamente mayor de la resistencia no drenada del suelo de subrasante, en comparación con el método Giroud y han (2004b). |
| (Hu, 2008) | Estudio sobre la relación entre la carga de las ruedas y la profundidad de la rodadura debido a estas en carreteras sin pavimentar reforzada con geomallas | <ul style="list-style-type: none"> • Resistencia a la tracción • Rigidez a la tracción • Interfaz relleno y terreno blando • Relación carga- profundidad • Profundidad admisible • Módulo de tensión | <p>Se estudia la geomalla sobre terreno blando, teniendo en cuenta los resultados del ensayo del modelo y la superficie. El ahuellamiento de esta carretera reforzada se analiza bajo la carga de las ruedas. La relación entre cargas dinámicas, profundidad y la presión de contacto de la llanta, se puede utilizar para estimar la profundidad del rodamiento en la superficie y determinar una</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Para un camino sin pavimentar en terreno blando con refuerzo de geomalla, cómo calcular la profundidad del surco inducida por la carga de la rueda es una cuestión clave. El método que se presenta en este documento es una respuesta del problema. Si se indica la profundidad admisible de la ranura en la |

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

| | | | | |
|--|--|---|---|--|
| (C.-N. Liu, Zornberg, Chen, Ho, & Lin, 2009) | Analizar el comportamiento de la interfaz geomalla-arena en modo de corte directo con ensayos de cizallamiento, evaluando la contribución de las costillas transversales a la interfaz cizalla | <ul style="list-style-type: none"> • Cizallamiento • Interfaz arena-geomalla • Resistencia pasiva • Nervaduras transversales • Desplazamientos de cizallamiento • Resistencia al corte • Resistencia a tracción de las costillas | geomalla para refuerzo en la vía no pavimentada calculando el grosor adecuado de agregado para la capa de relleno granular, se puede utilizar la función de tensión de la que se conoce. Por lo tanto, el método teórico propuesto en este documento es una guía para diseñar la carretera sin pavimentar reforzada con geomallas sobre terreno blando | superficie, el espesor correspondiente del relleno granular puede determinarse por el método, si se aplica una determinada geomalla. Por otro lado, mientras se fija el espesor del relleno granular, una geomalla con el módulo de tensión adecuado puede ser seleccionada utilizando el método aquí descrito |
| (Latha, Nair, & Hemalatha, 2010) | Evaluar el comportamiento de los geosintéticos en terrenos no pavimentados. | <ul style="list-style-type: none"> • Variación de los asentamientos • Relación beneficio TBR • Movimiento lateral del material de relleno. • Tensión vertical • Mecanismo de enclavamiento de los | Este documento presenta los resultados de un amplio programa de ensayos de cizallamiento directo destinado a evaluar la contribución de las costillas transversales a la interfaz cizalla. Las pruebas de cizallamiento directo incluyeron arena de Ottawa y varias geomallas de poliéster con una variedad de resistencia a la tracción del material, con un porcentaje abierto de área, y patrón de apertura. | <ul style="list-style-type: none"> • Esta contribución está positivamente correlacionada con la resistencia a la tracción y la rigidez de las costillas de la geomalla, pero está correlacionada negativamente con el porcentaje de área abierta de la geomalla • La contribución de la resistencia pasiva en el modo de cizallamiento directo tiene lugar en valores de desplazamiento de cizallamiento que son comparativamente grandes • Un sistema suelo-geosintético puede basarse en aumento de la resistencia al cizallamiento de la interfaz más allá de la inducida por los mecanismos de cizallamiento internos • El comportamiento de desplazamiento por esfuerzo cortante de las interfaces arena-geotextil muestra un patrón diferente al de la interface arena-arena. • las costillas transversales de la geomalla utilizada en este estudio proporcionan aproximadamente el 10% de la resistencia al corte de la interfaz • En el caso de la sección de prueba no reforzada, se observó la mezcla del agregado con el subsuelo después de la prueba. Cuando se utilizaron geosintéticos, esto se detuvo porque el geotextil actuó |

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

| | | | | |
|--|--|--|--|--|
| | | <p>materiales agregados en la geomalla</p> <ul style="list-style-type: none"> • Módulo de rigidez de los materiales geosintéticos • Efecto membrana tensada • Relación beneficio TBR | <p>capacidad de carga y reducción de la profundidad de las roderas.</p> <p>También se compararon los coeficientes de beneficios de diferentes secciones de prueba reforzadas con respecto al tráfico de prueba.</p> | <p>como separador entre estos dos capas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cuando se comparan los índices de beneficio del tráfico, en términos de la eficiencia de los materiales de refuerzo, la capa de se utilizó geoceldas fue la mejor opción. • Debido a que la sección reforzada con geotextil falló después de 100 pasadas, no es adecuada para subrasantes muy débiles. • El valor TBR de la sección reforzada con trozos de neumático fue mayor que el de la sección reforzada con geotextiles. Por lo tanto, el refuerzo con trozos de neumáticos es una buena opción para las subrasantes muy débiles. |
| (Qian, Han, Pokharel, & Parsons, 2011) | <p>Analizar el estrés en bases reforzadas con geomallas de apertura triangular sobre subrasante débil bajo carga cíclica</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Confinamiento lateral • Deformaciones superficiales permanentes • Deformaciones verticales • Tensiones en la interfaz base-subrasante • Angulo de distribución de la tensión • Relación módulo entre la capa base y subrasante • Tasas de reducción en la distribución del estrés • Separación, contención lateral y un efecto de membrana tensada • Enclavamiento geomalla-agregado | <p>las geomallas uniaxiales y biaxiales con forma rectangular no proporcionan una resistencia uniforme en todas las direcciones. En este estudio se pretende evaluar la eficiencia de las geomallas con aperturas triangulares (triaxiales). se construyeron bases reforzadas con geomallas uniaxiales, biaxiales y triaxiales sobre una subrasante débil en una gran caja de pruebas geotécnicas (2x2,2x2 m) en la Universidad de Kansas y probado bajo carga cíclica. Durante los ensayos, las deformaciones de la superficie y las tensiones verticales en la interface entre la base y el subrasante fueron monitoreados</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Los resultados de la prueba mostraron que la apertura triangular de las geomallas redujo las deformaciones superficiales permanentes y las deformaciones por tensiones verticales en la interfaz base-subrasante en comparación con una base no reforzada. El beneficio se hizo más pronunciado cuando se usó una geomalla más pesada. • Los cálculos generados a partir de las tensiones verticales entre la base y la subrasante, mostró que el ángulo de distribución de la tensión y la relación de módulo entre la base y la subrasante disminuyó con un aumento del número de ciclos. • Las tasas de reducción en la distribución del estrés y la relación de módulo para la base no reforzada fueron más rápidas que los de las bases reforzadas. |
| (Maubeuge & Klompma ker, 2011) | <p>Nuevos desarrollos para bases reforzadas con geomallas teniendo en cuenta las</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Retención lateral de la capa base • Tensión lateral de la capa base • Resistencia al corte | <p>Cuando se inserta una geomalla en una capa de la capa base, hay varias propiedades que afectan al rendimiento a largo plazo del diseño. En este documento se enumerarán las propiedades</p> | <ul style="list-style-type: none"> • El uso de geosintéticos para el refuerzo cuando se colocan en la parte inferior o dentro de la capa de base, las capas de agregado de los |

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

| | | | | |
|------------------------------|--|--|--|---|
| propiedades del refuerzo | <ul style="list-style-type: none"> • Sujeción lateral • Resistencia al cizallamiento • Distribución de la carga biaxial • Rigidez radial • Absorción de fuerzas de tracción • Resistencia a la tracción isotrópica | <p>mecánicas de las geomallas utilizadas en las capas de base de los pavimentos flexibles, que actualmente se consideran beneficiosas para el rendimiento de esta capa.</p> <p>Además, se describirá un nuevo método de diseño de pavimentos flexibles reforzados con geosintéticos, el llamado método de diseño mecanístico-empírico, y se presentarán los resultados experimentales de una geomalla y un geocompuesto colocados y soldados. Los resultados se compararán finalmente con el método de diseño de Giroud & Noiray (1981).</p> | <p>pavimentos flexibles generalmente proporcionan un buen rendimiento equivalente con una vida útil más larga.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Los trabajos de investigación realizados en las dos últimas décadas han demostrado que las principales propiedades mecánicas de los refuerzos geosintéticos, que mejoran la capacidad portante de los pavimentos flexibles, están relacionadas con la estructura de la malla, la rugosidad de la superficie, la abertura de la geomalla y el módulo de rigidez torsional. | |
| (Góngora & Palmeira, 2012) | Influencia de las características de los rellenos y de la geomalla en el rendimiento de los caminos no pavimentados en subrasantes débiles utilizando grava y escombros reciclados de la construcción y demolición | <ul style="list-style-type: none"> • Tasa de asentamiento de subrasante blanda • Desplazamientos verticales debido a cargas • Efecto membrana tensada • Módulo de tracción y apertura • Relación beneficio de tráfico (TBR) • Escombros reciclados de la construcción y demolición • Propiedades mecánicas del suelo • CBR de subrasante y base • Módulo de tracción de la geomalla • Rigidez a la tracción secante | <p>Este artículo presenta y discute los resultados de las pruebas en carreteras no reforzadas y caminos sin pavimentar reforzados con geomallas. Grava y escombros reciclados de la construcción y demolición se utilizaron como materiales de relleno. Tres tipos de rejilla polimérica con diferentes geometrías y características mecánicas se emplearon como refuerzo en las pruebas bajo carga cíclica con una frecuencia de 1 Hz.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Los resultados sugieren que el rendimiento de la carretera puede ser una función de varios factores, como la estabilidad del módulo de la apertura de la geomalla, la rigidez a la tracción e interacción suelo-geomalla, características de los materiales. • Las características del proyecto, los materiales y el nivel de interacción entre el suelo y el refuerzo pueden aumentar o reducir los factores que intervienen en el desempeño de la carretera. |
| (Tabataba ei & Rahman, 2013) | Estudiar el efecto de utilización de las geomallas en la reducción los espesores de capa para carreteras no pavimentadas | <ul style="list-style-type: none"> • Volumen de tráfico • Estabilización y refuerzo • Separación y refuerzo • Vida útil • Capacidad de compactación de los áridos superpuestos • Arcillas expansivas de alta plasticidad • Cargas equivalentes (ESAL) | <p>Se realizaron muchos estudios para evaluar las mejoras asociadas con la geomallas y refuerzo de pavimentos. Se cree ampliamente que el refuerzo con geomallas de las carreteras puede extenderse la vida útil del pavimento y/o reducir su espesor estructural. Este documento examina un método para comparar los diseños tradicionales de estructuras de pavimento sin refuerzos con respecto a diseños que incorporan geosintéticos.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • En los caminos no pavimentados en los que la subrasante no puede soportar adecuadamente las cargas de tráfico, se puede colocar un refuerzo geosintético en la interfaz de agregado y subrasante para mejorar el rendimiento del pavimento disminuyendo la carga distribuida en la subrasante. Como resultado, un espesor equivalente de la sección de la carretera reforzada |

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

- | | | | | |
|--|---|--|---|---|
| (Rahman, Arulrajah, Piratheepan, Bo, & Imteaz, 2014) | Efecto de las geomallas en las propiedades de resistencia al corte de la interfaz base-subrasante utilizando ladrillo triturado reciclado | <ul style="list-style-type: none"> • Características geotécnicas del ladrillo aplastado (CB) • Pruebas de compresión del material • Abrasión de la partícula de ladrillo • Densidad específica • Absorción de agua • Resistencia al corte del material sin refuerzo • Resistencia al corte material-geomalla • Resistencia a la tracción para la geomalla triaxial y biaxial | En el presente documento se describen las características físicas y geotécnicas de los ladrillos triturados reciclados (CB) para su reutilización en diferentes aplicaciones de ingeniería civil. Los experimentos de laboratorio incluyeron la prueba de compactación modificada, la distribución del tamaño de las partículas, la gravedad específica, la absorción de agua y la abrasión de Los Ángeles. Además, las propiedades de resistencia al corte de la interfaz del material de CB con las geomallas y su rendimiento como material de base de pavimento se determinaron utilizando un gran aparato de ensayos de corte directo (DST). | <p>produce un aumento de la carga de tráfico permitida en comparación con la sección de la carretera no reforzada.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se descubrió que la geomalla triaxial de mayor resistencia a la tracción alcanzaba propiedades de mayor resistencia al corte de la interfaz que la geomalla biaxial de menor resistencia a la tracción. • Sin embargo, los resultados del DST indicaron que las propiedades de resistencia al corte de la interfaz del material de CB reforzado con geomalla eran menores que las del material respectivo sin refuerzo. • También se comprobó que los resultados cumplían los requisitos de resistencia al cizallamiento máximo y residual y a los requisitos de las autoridades viales locales para los materiales de construcción típicos en las aplicaciones de ingeniería civil. |
| (Bhandari, Han, & Parsons, 2015) | Análisis bidimensional del comportamiento de las bases granulares uniformes reforzadas con geomallas bajo una carga cíclica vertical | <ul style="list-style-type: none"> • Efectos de carga cíclica • Distribución de cargas • Movimiento de las partículas y fuerzas de contacto • Resistencia a la tracción • Capacidad portante • Deformación plástica • Confinamientos laterales • Módulo de rigidez de la geomalla • Características físicas de la geomalla • Entrelazamiento geomalla-agregado | Se analizó la interacción geomalla-agregado utilizando el método de elementos discretos, para investigar esta interacción bajo una carga cíclica vertical. El refuerzo de la geomalla se colocó en la parte inferior o en la mitad de la profundidad de la capa base. Se aplicó una rueda de carga vertical cíclica en la parte superior de la capa base. Este estudio investigó los efectos de la carga cíclica y la profundidad de colocación de la geomalla en el rendimiento de la base reforzada con geomalla en comparación con la base no reforzada. | <ul style="list-style-type: none"> • La geomalla colocada a media profundidad de la base tuvo un mejor rendimiento que la colocada en la parte inferior de la base. • Los resultados numéricos muestran que la geomalla ayudó a ampliar la distribución de las cargas de contacto y movilizar su resistencia a la tracción. • La geomalla aumentó la capacidad de carga y la deformación elástica y redujo la deformación plástica de la capa base al proporcionar confinamientos laterales y verticales |
| (Otero Téllez & Montejo Ochoa, 2016) | Evaluación del comportamiento mecánico de una estructura bicapa, reforzada con geomalla biaxial | <ul style="list-style-type: none"> • Distribución de carga • Ahuellamientos debido a cargas • Condiciones mecánicas de la estructura • Módulos de resiliencia | En este trabajo, se hace una evaluación de diferentes configuraciones de estructuras bicapa formadas por una subrasante de características blandas y material clasificado como afirmado, relacionado en el | <ul style="list-style-type: none"> • Los resultados de las pruebas muestran que, si el espesor de capa es igual o menor a 15 cm, se presentan un ahuellamiento rápido, debido a la |

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

| | | | | |
|-------------------------------------|---|---|--|--|
| | <p>utilizando afirmado bajo la norma INVÍAS en subrasante blanda en carreteras sin pavimentar</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Resistencia a la tensión • Módulos de rigidez de las geomallas • Angulo de distribución de tensiones | <p>Instituto Nacional de Carreteras (INVÍAS 2013). Diversos espesores de material granular e incluyendo capas de geomalla biaxial fueron sometidas a una carga cíclica, simulando el efecto de los vehículos.</p> | <p>deficiencia en la distribución de las cargas.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Las geomallas de refuerzo mostraron aumentos en las condiciones mecánicas de la estructura entre 30% y 50% para la geomalla tipo 1 y un 30% y 80% para la geomalla tipo 2, disminuyendo los ahuellamientos y aumentando los ciclos de carga. • Hubo un aumento en la resistencia al esfuerzo de tensión de 20 kN/m y 30 kN/m (1 y 2). • El ángulo de distribución de la tensión aumentó un 16% para la geomalla 1 y un 25% para la geomalla 2. |
| <p>(Cuelho & Perkins, 2017)</p> | <p>Estabilización de subrasante-geosintético en una prueba de campo, calibrando y utilizando el método Giroud-Han</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad portante de la subrasante • Distribución de carga • Confinamiento al movimiento lateral base-subrasante • Efecto membrana tensada • Profundidad de los surcos • Geometría de la estructura • Nivel de tráfico • Configuración de los ejes • Capacidad de servicio de la vía • Propiedades de los materiales y geomallas • Módulo de relación base-subrasante • Carga del neumático • Radio de contacto del neumático • Módulo de rigidez de la tensión para la apertura de la geomalla | <p>Se construyeron, transitaron y supervisaron secciones de prueba a escala completa para comparar el rendimiento operativo de los geosintéticos utilizados como estabilización de la subrasante, así como para determinar qué propiedades de materiales estaban más relacionadas con el rendimiento. Se construyeron secciones de prueba sin pavimentar utilizando doce geosintéticos que consistían en una variedad de geomallas y geotextiles. Se realizaron pruebas de control múltiple, se construyeron secciones para estimar el efecto de la fuerza de la subrasante, el espesor de la base, y el desempeño que tuvo la presencia de los geosintéticos.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • El método Giroud-Han es actualmente el método más sofisticado para diseñar caminos no pavimentados estabilizados con geosintéticos; sin embargo, la calibración de este método hasta la fecha se basa en datos muy limitados. • Los datos de rendimiento de las pruebas de campo a escala real se utilizaron para calibrar la ecuación de diseño de Giroud-Han. • La rigidez de los nodos de la geomalla en la dirección transversal de la máquina, fue el principal indicador de rendimiento en estas secciones de prueba y, por lo tanto, se utilizó como propiedad fundamental para calibrar la ecuación de diseño. • El desarrollo de la capacidad de tracción de la geomalla depende fundamentalmente de la capacidad de la unión para transmitir tensiones a los miembros orientados en la dirección transversal de la máquina. |
| <p>(Mousavi, Gabr, &</p> | <p>Analizar la ubicación óptima del</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Espesor de la capa base de agregado | <p>Este estudio evaluó la mejor ubicación de una capa de refuerzo para maximizar la eficiencia de la</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Se realizaron análisis numéricos utilizando Plaxis |

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

| | | | | |
|---|---|--|---|--|
| Borden, 2017) | refuerzo de la geomalla en un camino sin pavimentar | <ul style="list-style-type: none"> • Resistencia al cizallamiento • Rigidez de la subrasante • Propiedades mecánicas y geométricas de la subrasante • Ubicación optima del refuerzo • Carga cíclica estática • Presión de confinamiento • Deformación axial • Módulo de rigidez elástica de la geomalla • Interfaz geomalla-relleno | <p>al inclusión de la armadura en un tramo de carretera sin pavimentar y explicar las posibles razones de la mejora del rendimiento. Se realizó una serie de análisis FEM en 3D, y se evaluó la respuesta a la tensión y el esfuerzo de una sección de carretera reforzada sin pavimentar con dos espesores diferentes de capa base.</p> | <p>3D y carga cíclica para evaluar los resultados.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Independientemente del grosor de la capa base, la deformación de la superficie se minimiza cuando el refuerzo se incrusta a una profundidad de aproximadamente la mitad del radio del área cargada, ($D/r = 0,5$). • La inclusión de refuerzos puede dar lugar a una deformación de la superficie aún menor si se coloca a la profundidad en la que se produce la máxima tensión vertical. Esto es especialmente importante en los casos con un mayor grosor de capa base, donde el refuerzo está convencionalmente situado en la interfaz de las capas de base y subsuelo. |
| (Ahirwar & Mandal, 2018) | Estudiar el comportamiento del lecho del suelo reforzado con rejilla de bambú | <ul style="list-style-type: none"> • TBG (rejilla de Bambú tridireccional) • BBG (rejilla de Bambú bidireccional) • Resistencia a la tracción • Fricción entre geomalla-material de relleno • Capacidad portante • Reducción de asentamientos • Resistencia a la tracción de las rejillas de bambú • Recubrimiento bituminoso del bambú. | <p>El bambú es un refuerzo natural fabricado con tiras de bambú, y ha sido aceptado como un sustituto de la geomalla para aplicaciones de refuerzo, debido a sus propiedades de resistencia a la tracción. Las dos formas diferentes de apertura utilizados en la rejilla de bambú son hexagonales (tridireccionales) y cuadrados (bidireccionales). Los parámetros estudiados en esta investigación experimental incluyeron los efectos de la ubicación de la capa superior de reforzamiento, la dimensión del reforzamiento, el número de capas del reforzamiento y la forma de la apertura de la rejilla de bambú.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Los estudios comparativos indican que la capacidad de carga y la reducción del asentamiento de los pies cuadrados pueden mejorarse más con la TBG que con la BBG. • La mejora de la presión de apoyo mejoró en un 372% y la reducción del asentamiento en un 84% se logra con la provisión de refuerzo de TBG, mientras que el refuerzo de BBG mejoró la presión de apoyo en un 278% y la reducción del asentamiento en un 73%. • Debido al efecto de la forma de la abertura, la resistencia al rodamiento que ofrece la arena reforzada con TBG es mayor que la del refuerzo con BBG para el mismo tamaño de refuerzo |
| (Vennama neni, Raju Aketi, & Paisa, 2018) | Analizar la reducción del espesor del pavimento mediante el uso de geomallas | <ul style="list-style-type: none"> • Efecto refuerzo geomalla sobre el valor del CBR • Condiciones de suelo húmedas y no húmedas • Estabilización del suelo | <p>El objetivo principal de esta investigación fue comprobar el efecto del refuerzo de la geomalla en el valor de CBR en una muestra de subrasante de suelo relativamente rojo en condiciones húmedas y no húmedas de la subrasante reforzada con</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Se obtuvieron valores más altos a una penetración de 5 mm tanto para condiciones húmedas como no húmedas y observamos que los valores de CBR aumentaron en condiciones húmedas y no húmedas. |

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

| | | | | |
|----------------------------------|---|---|---|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Reducción de espesores del pavimento • Trafico de diseño estándar acumulativo • Deformaciones verticales por cargas | <p>geomalla en el grosor de diseño de los caminos pavimentados de bajo volumen. Colocando una capa de geomalla biaxial a diferentes alturas como una capa a h/2, dos capas a h/5 superior e inferior, tres capas a h/6 superior, inferior y media, los efectos de los refuerzos se relacionan con el CBR del suelo.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Aunque el valor de CBR fue mayor para la muestra de geomalla de tres capas, el grosor del pavimento es casi igual para la muestra de dos y tres capas. Según los cálculos, el espesor del pavimento se reduce en un 17,5% en condiciones no húmedas mediante el uso de doble capa a una altura de H/5 en la parte superior e inferior. Según los cálculos, el espesor del pavimento se reduce en un 21,31% mediante el uso de geomallas de doble capa en la condición húmeda a una altura de H/5 en la parte superior e inferior. | |
| (Singh, Trivedi, & Shukla, 2019) | <p>Mejora de la resistencia del suelo de la subrasante de la carretera sin pavimentar con capas geosintéticas de refuerzo</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Relación (CBR) • Profundidad optima del refuerzo • Confinamiento lateral • Reducción de la profundidad de surcos • Reducción de capa de agregado • Mejora de la capacidad de carga • Reducir riesgos de accidentes • Reducción de costos de mantenimiento • Rendimiento de la geomalla (rigidez, resistencia y tamaño de la apertura) | <p>Se realizó una investigación experimental para evaluar el comportamiento del suelo de la subrasante colocando una capa simple y dos capas de refuerzos geosintéticos (Glasgrid, rejilla 3D Tenax y Tenax multimat) horizontalmente a diferentes profundidades de la superficie superior del suelo de la subrasante. La capa única de refuerzo se ha colocado en el centro, a un tercio y un cuarto de la altura del espécimen de CBR de la superficie superior del suelo en el molde de CBR. Las capas dobles de refuerzo se colocaron a un cuarto de la altura del espécimen desde la parte superior y la superficie del fondo.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • La inclusión de una sola capa y dos capas de refuerzos geosintéticos a diferentes profundidades en el suelo, aumenta la resistencia del suelo de la subrasante en términos de valor CBR. • El valor CBR del suelo aumenta entre 5 y 60 % cuando se coloca una sola capa de refuerzo en el interior del suelo. • El suelo de la subrasante y la resistencia aumenta entre un 112 y un 325 % cuando se refuerza con capas dobles de refuerzo. • Colocando el refuerzo geosintético en capas dobles se obtiene la mayor mejora independientemente del tipo de geosintético |

Metodología

Antiguamente se utilizaban dos métodos para definir espesores de capa base en vías sin pavimentar, el primero desarrollados por Giroud y Noiray (1981) y el segundo desarrollado por la compañía Tensar Corporation (1986). Ambos métodos incorporan en sus diseños, distribuciones de esfuerzos por acción de cargas de rodadura, calculando presión vertical de los neumáticos al camino y posibles efectos en la subrasante, determinando así espesores de capa base, con el objetivo de minimizar el efecto de surco en la rodadura incluyendo un geosintético para aumentar la capacidad portante igualando cargas y disminuyendo daños. (Cruz, 2013).

Aunque ambos métodos relacionan las cargas por neumáticos, presión por neumáticos, esfuerzos de corte y aumento de capacidad portante por inclusión de un geosintético y número de aplicaciones por carga y profundidad de daño al contacto neumático-suelo para el método Giroud Noiray, no se consideran factores como: propiedades de los materiales pétreos y propiedades de los materiales geosintéticos. Hacia la década de los 90 después de varias investigaciones se creó un método más eficiente para abordar los aspectos mencionados anteriormente. El método Giroud-Hand adopto módulos de resistencia de los materiales incluyendo pruebas de California Bearing Ratio (CBR), variaciones en los ángulos de distribución de esfuerzos y considero el módulo de rigidez para materiales geosintéticos en sus aperturas.

En consecuencia, el método es más eficiente para determinar la interacción suelo-geosintético en la acción de las cargas por rodadura en caminos sin pavimentar. Aumentando su capacidad portante, disminuyendo capas de materiales pétreos, tiempo, costos y lo más importante siendo amigable con el medio ambiente.

El método de diseño de Giroud-Han (G-H) proporciona una herramienta de diseño para determinar el espesor de bases de agregado no reforzadas y reforzadas con geosintéticos para

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

caminos no pavimentados sobre subrasantes débiles. El método fue publicado en dos partes (Giroud y Han, 2004a, b) en la Revista de Ingeniería Geotécnica y Geoambiental de ASCE.

El método G-H reemplaza ampliamente al método utilizado publicado por Giroud y Noiray (1981) y ha sido incluido en la actualización del "Diseño y Construcción Geosintética". Manual "Guidelines" de la Administración Federal de Carreteras (FHWA, 2008).

El desarrollo del método G-H fue un esfuerzo largo y complejo que inicio al final del año de 1990 y finalizo a principios del año 2000. (J. P. Giroud & Han, 2012).

Función de los Geosintéticos en Carreteras sin Pavimentar

Los materiales geosintéticos se han empleado para la estabilización de subrasantes y el refuerzo de la capa base en la construcción de estructuras no pavimentadas (carreteras y áreas) desde la década de 1970. Colocado entre la subrasante y la capa de base, o dentro de la capa de base. El geosintético mejora el rendimiento de las carreteras sin pavimentar sujetas a tráfico aleatorio, mejorando el rendimiento, debido a los aumentos en el volumen de tráfico, reduciendo la capa base a un determinado grosor para soportar un determinado volumen de tráfico, o combinaciones de aumento de tráfico y reducción de espesor. El uso de material de capa base de menor calidad es otro potencial beneficio proporcionado por los geosintéticos.

Los geosintéticos pueden proporcionar la separación entre los materiales que componen la capa base y de la subrasante y el refuerzo de la capa de base y de la subrasante. La separación evita la mezcla del suelo de la subrasante y materiales de base granulares y el consiguiente deterioro de la base. La armadura aumenta la capacidad portante de la subrasante, endurece la capa base y reduce así las tensiones normales y el desgaste, orienta las tensiones de cizallamiento en la subrasante en el área cargada, restringe el movimiento lateral de la capa base y del suelo de subrasante, y puede proporcionar soporte de membrana tensada cuando se producen surcos

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

profundos (Giroud et al. 1985; La Corporación Tensar 1996, 1998); (Geosynthetic Materials Association, 2000).

Dos tipos de geosintéticos se utilizan típicamente en las estructuras: geotextiles y geomallas. Desde el punto de vista del refuerzo de la estructura sin pavimentar, hay una diferencia significativa entre las geomallas y los geotextiles. Debido a sus grandes aperturas, Las geomallas pueden entrelazarse con los agregados de la capa base siempre y cuando exista una relación entre las dimensiones de apertura de la geomalla y las dimensiones de las partículas del agregado. Si existe una relación proporcional entre el tamaño de la abertura de la geomalla y el tamaño de las partículas de los agregados, la efectividad del enclavamiento depende de la rigidez y dilatación de la geomalla, la estabilidad de las tiras o costillas y sus entrelazamientos. Como resultado del enclavamiento, el mecanismo del refuerzo de la estructura es diferente para los geotextiles y las geomallas. (J. P. Giroud & Han, 2004a).

Objetivos del Metodo Giroud-Han

El objetivo del estudio presentado en este documento es utilizar los datos disponibles para implementar el método desarrollado por los ingenieros Jean Pierre Giroud y Jie Han, un método de diseño para definir el espesor de la capa de base para carreteras sin pavimentar que relacione la distribución de la tensión, la resistencia del material pétreo de la base, el enclavamiento entre el material y el geosintético y la rigidez del geosintético en el plano, además de considerar los siguientes ítems no tenidos en cuenta en los métodos anteriores: volumen de vehículos o tráfico, cargas de las ruedas, presión de los neumáticos, resistencia de la subrasante, profundidad del surco e influencia de la presencia de un geosintético de refuerzo (geotextil o geomalla) en el modo de falla de la carretera o área no pavimentada. El método de diseño presentado en este documento se basa en la teoría y está calibrado experimentalmente. Por lo tanto, predice con

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

mayor precisión el rendimiento tanto para carreteras sin pavimentar reforzadas con geomallas y geotextiles como para carreteras sin reforzar que los métodos anteriores desarrollados por Giroud y Noiray (1981) y Giroud et al. (1985). Como tal, el método presentado en el presente documento sustituye a los anteriores métodos. Este documento detalla el desarrollo del método de diseño, su respectiva calibración y sus aplicaciones.(J. P. Giroud & Han, 2004a).

Función y Comportamiento de las Carreteras sin Pavimentar

Función de la Capa Base en Carreteras sin Pavimentar

Se requiere una capa base de agregado cuando la resistencia de un suelo es insuficiente para soportar directamente la carga de las ruedas del vehículo. El suelo recubierto por una capa de base se denomina suelo de subsuelo o, simplemente, la subrasante. El material de la capa base debe tener suficiente resistencia para soportar la carga sin ocasionar cizallamiento interno.

También debe tener un grosor suficiente para distribuir la carga vertical sobre un área más grande sobre la subrasante de tal manera que la presión vertical se reduzca y no comprometa la capacidad portante del suelo de la subrasante. (J. P. Giroud & Han, 2004a).

Desempeño de una Carretera sin Pavimentar y sin Refuerzo

A menudo es aceptable una formación significativa de surcos en la superficie, por ejemplo, 50-100 mm, para carreteras temporales sin pavimentar que pueden ser fácilmente accesibles y de fácil mantenimiento mediante la adición de material y la reclasificación. Sin embargo, la formación de surcos profundos en el subsuelo puede causar la contaminación de la capa de base con partículas del suelo de la subrasante, que puede requerir el reemplazo completo de la capa de base. (J. P. Giroud & Han, 2004a).

La formación de surcos en la superficie es el resultado de los siguientes factores:

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

- Compactación del agregado de la capa de base y/o del suelo de la subrasante bajo carga de tráfico repetida.
- Fallo de capacidad portante en la capa de base o subrasante debido a tensiones normales y de cizallamiento inducidas por el tráfico. (Fig. 12).
- Fallo de la capacidad portante en la capa de base o subrasante después de cargas de tráfico repetidas resultantes de un deterioro progresivo del material de la capa de base, una reducción de la base efectiva por contaminación de la capa de base por el suelo de la subrasante, una reducción de la capacidad de la capa de base a distribuir las cargas de tráfico a la subrasante, o una disminución en la resistencia de la subrasante debido a la acumulación de presión de poros o perturbación.
- Desplazamiento lateral de las partículas que conforman la capa de base y la subrasante debido a la acumulación de deformaciones plásticas incrementales e inducidas por cada ciclo de carga.

Comportamiento de las Carreteras sin Pavimentar Reforzadas con Geomallas

La geomalla tiene como función prevenir y reducir las rodaduras causadas por el agua, por falta de capacidad portante de la capa base o subsuelo y por el desplazamiento lateral de las partículas que conforman la capa de base y subrasante (Fig. 12). (Bauer & El Halim, 1987).

Influencia de la Geomalla en el Comportamiento de la Capa Base

El material agregado de la capa base interactúa con una geomalla principalmente al entrelazarse dentro de las aberturas. Las costillas de la geomalla confinan el árido y resiste el movimiento lateral de este cuando la capa de base se carga en la superficie. (Steven W. Perkins, 1999). Se atribuyen cuatro beneficios al confinamiento del material de la capa base para las carreteras pavimentadas y no pavimentadas. Pueden resumirse de la siguiente manera:

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

- Prevención del movimiento lateral del material de la capa base, lo que resulta en una reducción de la formación de surcos en la superficie.
- Aumento de la rigidez del material de la capa de base, lo que reduce tensiones verticales dentro de la capa base.
- Mejora de la rigidez a la flexión de la capa de base, que distribuye las cargas de tráfico y reduce la tensión máxima vertical a la subrasante.
- Reducción de la tensión de cizallamiento transmitida desde la capa de base a la subrasante, lo que aumenta la capacidad portante de esta.

En el caso de las carreteras no pavimentadas, hay beneficios potenciales adicionales a la capa base proporcionados por el refuerzo:

- Prevención de fallos de cizallamiento en la capa de base.
- Membrana tensada que soporta directamente la carga de tráfico después de un paso significativo de vehículos.
- Prevención de fisuras por tensión en la parte inferior de la base que minimiza la contaminación del material de la capa base con suelo de subsuelo (subrasante) a medida que la capa se flexiona bajo carga.
- Prevención de la pérdida de áridos de la capa base en suelos con subrasantes blandas (J. P. Giroud & Han, 2004a).

Influencia de las Geomallas en el Comportamiento del Suelo de la Subrasante

Las geomallas pueden mejorar el rendimiento del suelo de la subrasante a través de cuatro mecanismos: prevención del cizallamiento local de la subrasante, mejora de la distribución de la carga a través de la capa base, reducción o reorientación de las tensiones de cizallamiento en la

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

subrasante y efecto de la membrana tensada. A continuación, se examinan estos cuatro mecanismos. (J. P. Giroud & Noiray, 1981).

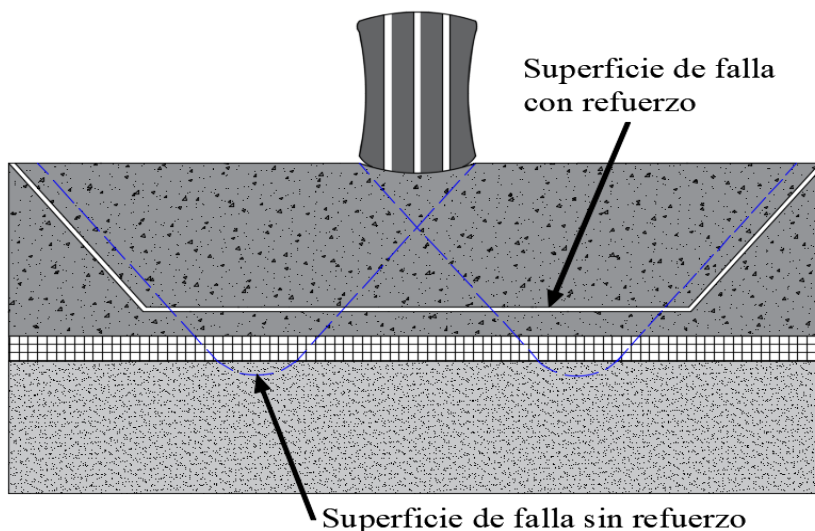


Figura 12. Capacidad portante al efecto de cargas con y sin geomalla. (J.P. Giroud & Han, 2004)

Prevención del cizallamiento local de la subrasante

En carreteras no reforzadas, si la tensión vertical en el subsuelo excede el límite elástico del suelo, se produce un cizallamiento permanente limitado o "local". El material de la capa base se perfora en el subsuelo y se deforma permanentemente. Bajo cargas repetidas, las zonas de cizallamiento crecen, la capa de base se deteriora, aumentan los niveles de tensión vertical y se forman surcos en la superficie. Eventualmente, se alcanza el límite plástico, o capacidad portante definitiva, del suelo de la subrasante y se produce una falla por cizallamiento total. El refuerzo adecuado entre la capa de base y el subsuelo impide el desarrollo y crecimiento de las zonas de cizallamiento locales y permite que el subsuelo soporte tensiones cercanas al límite plástico mientras actúa como si aún estuviera dentro de su límite elástico. (J. P. Giroud & Noiray, 1981).

Mejora de la distribución de la carga

Como se discutió anteriormente, el refuerzo de la geomalla aumenta la capacidad de la capa de base para distribuir las cargas de tráfico y reducir la tensión normal máxima en la subrasante. De este modo se aumenta el factor de seguridad contra fallos de capacidad portante (Fig. 12). (J. P. Giroud & Han, 2004a).

Reducción o reorientación de la tensión de cizallamiento en la interfaz de la subrasante

De acuerdo con Milligan et al (1989a) y (Steven W. Perkins, 1999) como se mencionó anteriormente, uno de los efectos beneficiosos de los geosintético como refuerzo se encuentra en la interface entre la capa base y el suelo de la subrasante. Su función es soportar los esfuerzos de corte inducidos por las cargas vehiculares en la interface. Es importante entender que los esfuerzos de tensión de cizallamiento transmitidas desde la capa base a la subrasante pueden estar orientadas hacia afuera o hacia adentro. Según un resultado clásico de la teoría de la plasticidad, las tensiones de cizallamiento exterior disminuyen la capacidad portante de la subrasante, mientras que las tensiones de cizallamiento interior aumentan la capacidad portante de la subrasante. Las tensiones de cizallamiento inducidas por las cargas vehiculares tienden a orientarse hacia el exterior, lo que disminuye la capacidad portante de la subrasante. El entrelazamiento entre la geomalla y el agregado de la capa de base produce dos efectos beneficiosos: (1) el movimiento lateral del agregado de la capa de base se reduce o elimina y, como resultado, no se transmiten esfuerzos de cizallamiento hacia afuera a la subrasante; (2) la superficie inferior de la capa de base junto con el agregado confinado golpeando a través de las aberturas de la geomalla, proporciona una superficie áspera que resiste el movimiento lateral de la subrasante, lo cual genera esfuerzos de cizallamiento hacia adentro que aumentan la capacidad portante de la subrasante.

Efecto membrana tensada

Las ranuras en la superficie de la subrasante están acompañadas de un movimiento de balanceo adyacente si el suelo de la subrasante comienza a cizallarse, una capa geosintética en la interfaz toma una forma ondulada que la estira y tensa. Cuando un material flexible estirado tiene una forma curva, la tensión normal contra su cara cóncava es mayor que la tensión normal contra su cara convexa. Esto se conoce como el "efecto membrana tensada" (Giroud y Noiray 1981). Debajo de la rueda, en el surco de la onda, la membrana tensada lleva parte de la carga que genera el neumático y reduce la tensión normal en la subrasante. Fuera del área de carga, sobre las crestas adyacentes de la onda, la membrana tensada presiona hacia abajo sobre la subrasante y aumenta la tensión normal ("presión de confinamiento") donde sirve para resistir el fallo por cizallamiento. De este modo, la membrana tensada reduce la tensión aplicada y aumenta la capacidad de carga. El efecto de la membrana tensada es significativo solo si las cargas de tráfico se canalizan y las profundidades de los surcos son relativamente grandes (Giroud et al. 1985).

Parámetros de diseño

Geometría de la Estructura no Pavimentada

La capa de base tiene un espesor uniforme. Se supone que se utilizara una sola sección de geomalla estructural en la interface entre la capa base y la subrasante del suelo. El material que conforma la subrasante es generalmente homogéneo, lo cual permite el desarrollo de fallas continuas, la profundidad estimada donde ocurre la falla teóricamente establecida en la literatura suele ser inferior a 1,5 m para tamaños de rueda típicos.

En el desarrollo de este documento se asume un espesor mínimo de capa base de 10 cm (0,10 m). Es necesario asumir un espesor mínimo para asegurar la constructibilidad o posibles errores en el diseño de la capa de base y para minimizar alteraciones del suelo de la subrasante durante el tráfico. Otra razón para utilizar un espesor mínimo de capa de base es proporcionar suficiente anclaje para la geomalla. (J. P. Giroud & Han, 2004a).

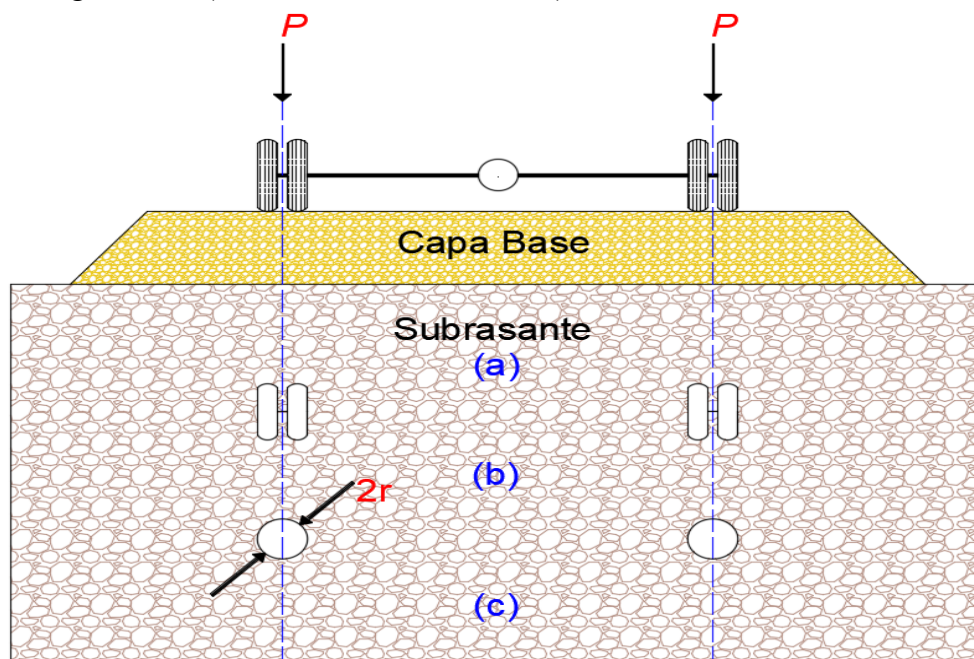


Figura 13. Rodamientos vehiculares y radio de contacto: a) equivalencia geométrica de las ruedas; b) zonas de contacto de los neumáticos; c) contacto equivalente del área para estudio (J.P Giroud & Han, 2004).

Trafico

El tráfico puede ser canalizado, como en el caso de una carretera, o no restringido sobre un área. El tráfico orientado o controlado se determina por el número de pasadas, N , de un eje determinado durante la vida útil del diseño estructural. El tráfico sin impedimentos o no controlado sobre un área es muy complejo de caracterizar y se requiere una opinión por parte de los ingenieros del proyecto. En la mayoría de los proyectos hay zonas de tráfico, como entradas y salidas, donde la circulación se canaliza y, por lo tanto, hay mayor control y estudio. (J. P. Giroud & Han, 2004a).

Ejes y Cargas

La geometría del eje se representa en la Fig. 13. (a). Existen diferentes tipos de ruedas para los ejes de los camiones: simples y dobles. Las ruedas mostradas en la Fig. 13. (a) son ruedas dobles. La carga del neumático o rueda, P , es la carga aplicada por uno de los neumáticos en el caso de los ejes de una sola rueda y la carga aplicada por un conjunto de dos neumáticos en el caso de los ejes de dos ruedas. Se considera que la carga de la rueda, P , es la mitad de la carga sobre el eje, P_A . La relación entre la carga de las ruedas y la presión de contacto de los neumáticos es la siguiente:

$$P = pA \quad (1)$$

Donde P = carga de la rueda (kN); A = superficie de contacto del neumático (m^2); y p = presión de contacto del neumático (kPa), que se supone que es igual al valor medio de la presión de contacto real (no uniformemente distribuida) entre cada neumático y la capa base. Cabe señalar que la presión de contacto de las llantas es cercana a la presión de inflado de las llantas. P se considera generalmente igual a la presión de inflado de los neumáticos. (Milligan, Jewell, Houlsby, & Burd, 1989).

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

El área de contacto del neumático [Fig. 13(b)] se reemplaza por una superficie circular llamada área de contacto equivalente de la rueda o neumático. La superficie de contacto equivalente tiene la misma área de contacto del neumático, y su radio es “ r ” [Fig. 13(c)], por lo tanto:

$$A = \pi r^2 \quad (2)$$

La siguiente relación se deduce de las ecuaciones (1) y (2):

$$r = \sqrt{\frac{P}{\pi p}} \quad (3)$$

La Ecuación (3) es útil para el análisis subsiguiente porque los vehículos se caracterizan generalmente por la carga de las ruedas, P y la presión de contacto de los neumáticos, p . Para la carga por eje estándar americano-británica ($P_A = 80$ kN, es decir, $P = 40$ kN) y una presión de inflado de los neumáticos de 550 kPa, el radio del área de contacto equivalente de los neumáticos, r , es de aproximadamente 0,15 m.

Profundidad de los Surcos y Criterio de Servicio

El tránsito continuo de vehículos genera surcos o depresiones en el suelo, que se observan en la rodadura de la capa base donde el tráfico es orientado. La depresión que genera el surco es la distancia vertical entre el punto más bajo debido al socavamiento y los puntos longitudinales más altos en la superficie de la rodadura a cada lado del surco. Cuando el tráfico no es orientado o canalizado, se desarrollan patrones aleatorios de surcos. Allí, la profundidad del surco puede definirse como la distancia vertical máxima entre la parte alta y baja adyacente de la capa de base. (Fig. 14). (Bhandari et al., 2015).

Los integrantes del cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, por ejemplo, (Hammit, 1970) adoptó un criterio de "fracaso" definido por una profundidad de surco

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

"admisible" de 75 mm. El criterio de 75 mm es ampliamente utilizado para carreteras sin pavimentar. Para el diseño de carreteras de bajo volumen, (AASHTO 1993) consideran profundidades de surco permitidas de 13 mm a 75 mm. Para carreteras sin pavimentar, a veces se utilizan profundidades de surco permitidas mayores de 75 mm, hasta 100 mm.

Es importante establecer que la profundidad de surco permitida es un valor adoptado. Este criterio no corresponde necesariamente a una falla real de la capa base o del suelo de la

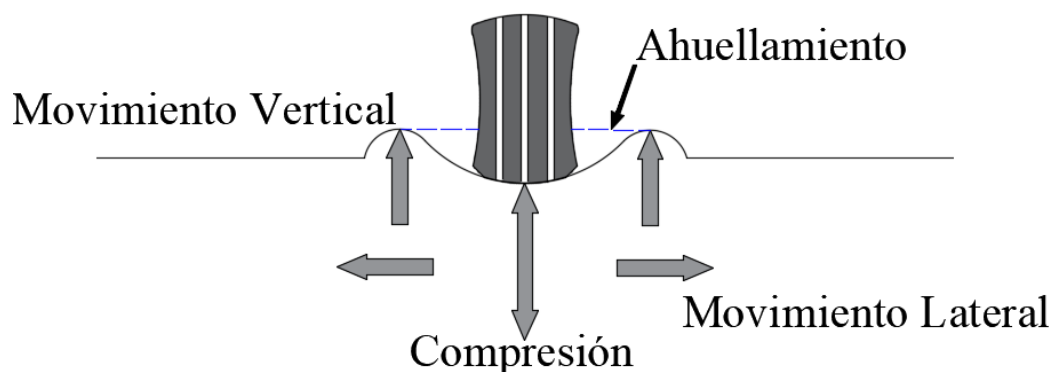


Figura 14. Ahuellamientos comunes en vías no pavimentadas ((Mexichem Soluciones Integrales, 2012)

subrasante.

Propiedades del Material de la Capa Base

El material de la capa base se caracteriza por su relación de soporte California, relacionado como CBR_{bc} . Esta es una propiedad importante del método presentado aquí, ya que las características del material de la capa base no fueron tomadas en cuenta en los métodos de diseño de Giroud y Noiray (1981) y Giroud y otros (1985). El valor de CBR de la capa de base juega un papel importante en el número de pasadas de los ejes en una carretera sin pavimentar. (Barber & Odom, 1978).

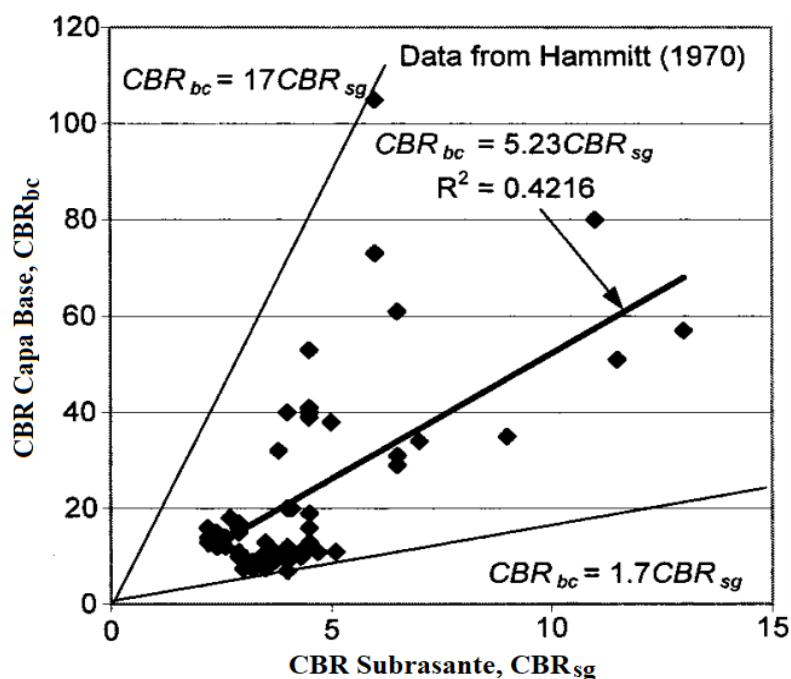


Figura 15. Relación de rodamiento de California (CBR) relación entre la capa base y el suelo de subrasante (Hammitt, 1970)

El CBR (Relación de Rodamiento de California) es un indicador adimensional determinado en un ensayo de laboratorio estándar o en el terreno. No obstante, el valor del CBR en el terreno es comúnmente diferente del valor del CBR hallado en el laboratorio debido a las condiciones para hallar su valor. En el terreno, el valor CBR de la base depende del valor del suelo de subrasante. El suelo blando de la subrasante no proporciona el apoyo necesario para lograr una óptima compactación de los materiales que componen la capa base; por consiguiente, el CBR_{bc} del terreno puede ser mucho menor que el CBR_{bc} de laboratorio. Los índices del CBR hallados para la capa base y el suelo de la subrasante en el análisis de Hammitt (1970) se interpretan en la Fig. 15. La correlación del CBR en el terreno (es decir, CBR_{bc} / CBR_{sg}) en el estudio de Hammitt (1970) cambia de 1,7 a 17 con una relación de 5,23 fundamentado en una regresión lineal. Esta controversia sobre la relación del CBR tiene por objeto suministrar una guía para

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

evaluar los valores del CBR de la capa base cuando no es proporcionada, mientras que los valores de CBR del suelo de subrasante son generalmente conocidos.

En el estudio presentado en este documento, se utiliza el módulo de resiliencia del material de la capa base. La información sobre este módulo puede obtenerse de la guía de diseño para carreteras pavimentadas de la AASHTO (1993).

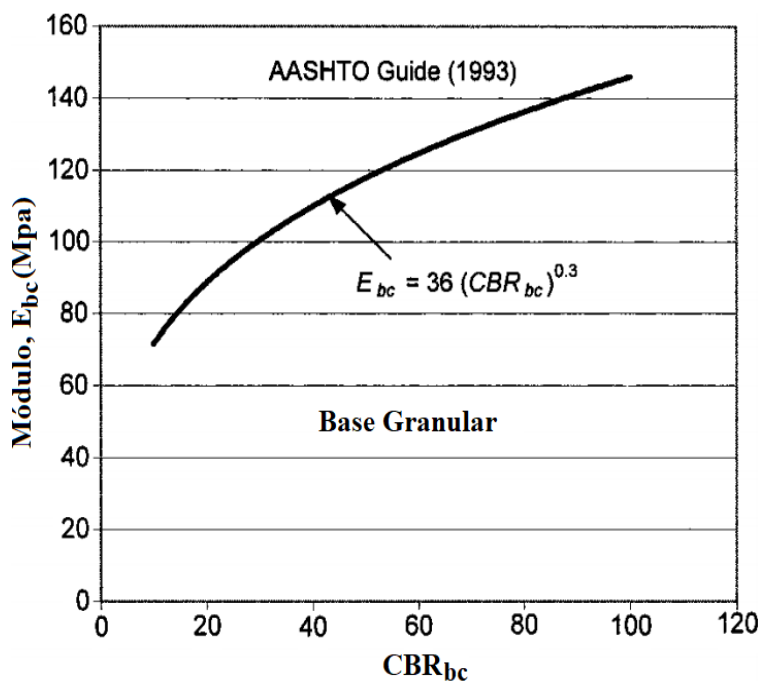


Figura 16. Correlación del módulo elástico y la relación de rodadura de California (CBR) de la capa de base (AASHTO, 1993)

la carta de la AASHTO (1993) se utilizó para desarrollar la correlación entre el módulo de resiliencia y el CBR para el material de capa de base granular para carreteras no pavimentadas presentado en la Fig. 16 y puede expresarse de la siguiente manera:

$$E_{bc} = f_{EBC} CBR_{bc}^{0.3} \quad (4)$$

donde E_{bc} = módulo resiliente de la capa de base (MPa); CBR_{bc} = relación de rodamientos de California de la capa de base; y f_{EBC} = factor igual a 36 MPa.

Propiedades del Suelo de la Subrasante

Se supone que el suelo de la subrasante está saturado y tiene una baja permeabilidad (limo, arcilla). Por lo tanto, bajo carga de tráfico, el suelo de la subrasante se comporta de manera no drenante. En la práctica, esto significa que el suelo de la subrasante es incompresible y sin fricción. En consecuencia, su resistencia al cizallamiento es igual a su cohesión no drenada, C_u .

El valor de C_u se mide en el laboratorio utilizando ensayos de compresión no consolidados, no drenados o no confinados, o ensayos rápidos de cizallamiento directo; y en el campo utilizando ensayos de cizallamiento de paletas.

El valor de C_u también puede deducirse aproximadamente del valor CBR del suelo de subrasante (para CBR_{sg} inferior a 5) utilizando la siguiente relación (J. P. Giroud & Noiray, 1981).

$$C_U = f_C CBR_{sg} \quad (5)$$

donde C_u = cohesión no drenada del suelo de la subrasante (kPa); CBR_{sg} = relación de soporte California del suelo de la subrasante; y f_C = factor igual a 30 kPa. Se pueden utilizar otras relaciones entre C_u y CBR_{sg} . Un ejemplo puede encontrarse en un artículo de (Tingle & Webster, 2003).

La CBR del suelo de la subrasante se puede medir en un laboratorio o en una prueba de campo. También se puede derivar de la cohesión no drenada usando la Ec. (5).

En el estudio aquí presentado, el módulo de suelo de la subrasante es usado por Heukelom y Klomp (1962) donde desarrollaron la siguiente correlación lineal entre CBR_{sg} (para $CBR_{sg} < 10$) y el módulo resiliente E_{sg} para suelos de grano fino, con CBR_{sg} y E_{sg} medida en el campo:

$$E_{sg} = f_{ESG} CBR_{sg} \quad (6)$$

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

donde E_{sg} = módulo de resiliencia del suelo de subrasante (MPa); y f_{ESG} = factor igual a 10,35 MPa.

Relación de Módulos entre la Capa Base y el Suelo de la Subrasante

La relación de módulo de la capa base y el suelo de subrasante se utilizará en el estudio presentado en este documento. Esta relación puede calcularse usando la siguiente ecuación deducida de las ecuaciones (4) y (6):

$$\frac{E_{bc}}{E_{sg}} = \frac{3.48 CBR_{bc}^{0.3}}{CBR_{sg}} \quad (7)$$

La Ecuación (7) muestra que la relación de módulo no es proporcional a la relación CBR. Los valores de CBR_{bc} y CBR_{sg} utilizados en la Ecuación (7) para calcular E_{bc}/E_{sg} pueden obtenerse como se indica en las secciones "Propiedades del material de la capa base" y "Propiedades del suelo de la subrasante", respectivamente.

En el estudio de Heukelom y Klomp (1962), la relación de módulo, E_{bc}/E_{sg} , es del orden de 1.0 a 5.0, que se basa en secciones de suelo no reforzadas de la capa base/subrasante. Por lo tanto, en este documento se sugiere un límite máximo de 5,0 para la relación del módulo. Sin embargo, existe la posibilidad de que la introducción de la geomalla permita una mejor compactación de la base. Lo que podría justificar una relación de módulos superior a 5.0.

Desarrollo del Método de Diseño

Principio del Desarrollo del Método de Diseño

Como se indicó anteriormente, la falla en la capacidad de servicio de la carretera sin pavimentar ocurre cuando la profundidad del surco alcanza un cierto valor predeterminado llamado la profundidad admisible del surco, por ejemplo, 75 mm. La profundidad del surco depende de la deformación del suelo de la subrasante. La deformación del suelo de la subrasante

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

depende de las tensiones aplicadas a la superficie del suelo de la subrasante, es decir, las tensiones que se desarrollan (interface) entre la capa base y el suelo de la subrasante. Por lo tanto, el principio del desarrollo del método que aquí se presenta consiste en: (1) determinar las tensiones en la interface entre la capa de base y la subrasante; y (2) determinar la profundidad del surco en función de las tensiones en la interfaz de la base y el suelo de subrasante, y la capacidad portante del suelo de la subrasante. Estos dos aspectos juegan un papel esencial en el número de pasadas de los ejes y las propiedades de la geomalla en el espesor requerido de la capa base. (J. P. Giroud & Han, 2004a).

Factor de Capacidad Portante

Carreteras Reforzadas y no Reforzadas sin Pavimentar

Basándose en la información presentada en la literatura (Milligan et al., 1989) varios autores han utilizado valores que van de 2,8 a 3,3 para el factor de capacidad portante en el caso de carreteras no reforzadas sin pavimentar. Giroud y Noiray (1981) utilizaron $3.14 (\pi)$, que es el valor del límite elástico para un suelo de subrasante saturado no drenado, posteriormente

Giroud y Noiray (1981) utilizaron $N_c = 5,14$ (es decir, $\pi + 2$), para carreteras sin pavimentar reforzadas con geotextiles, ya que esta es la capacidad portante definitiva en el caso de carreteras saturadas sin drenaje en la subrasante, pero posteriores estudios aumentaron un valor teórico del factor de capacidad portante, con la máxima tensión de cizallamiento interior de la interfaz en la subrasante de $N_c = 5,71$ (es decir, $3\pi/2 + 1$).

En el método de diseño presentado en este documento, se utilizan los siguientes valores para el factor de capacidad portante, basados en las discusiones anteriores: $N_c = 3,14$ para carreteras no reforzadas, $N_c = 5,14$ para carreteras no pavimentadas reforzadas con geotextiles y $N_c = 5,71$ para carreteras no pavimentadas con geomallas.

Coefficiente de Movilización de la Capacidad Portante

El coeficiente de movilización de la capacidad portante en la Ecuación (8) explica el hecho de que solo se movilice una fracción de la capacidad portante del suelo de la subrasante. Se asume que el suelo de la subrasante alcanza su capacidad portante significativa (es decir, el límite elástico para caminos no pavimentados y la capacidad portante final, es decir, el equilibrio límite, para caminos no pavimentados reforzados) cuando la desviación de la interfaz entre la capa de base y el suelo de la subrasante es de 75 mm.

$$P_i \leq mN_C C_U \quad (8)$$

La deflexión de la interfaz es menor que la profundidad del surco porque parte de la profundidad del surco observado en la superficie de la carretera se debe a la deformación dentro de la capa base. Por lo tanto, cuanto más gruesa sea la capa de base, menor será la deflexión de la interfaz para un valor dado de la profundidad del surco superficial. En conclusión, el valor del coeficiente de movilización de la capacidad portante es 1,0 para un espesor cero de la capa base y es inferior a 1,0 para un espesor de la capa base mayor que cero. (J. P. Giroud & Han, 2004a).

Basado en la discusión anterior, el coeficiente de movilización de la capacidad portante para una profundidad de surco admisible de 75 mm es igual a 1,0 cuando el espesor de la capa de base es cero, y disminuye con valores crecientes del espesor de la capa de base. Por lo tanto, se sugiere la siguiente ecuación para el coeficiente de movilización de la capacidad portante cuando el criterio de servicio es una profundidad de surco admisible de 75 mm.

$$m = 1 - \xi \exp \left[-\omega \left(\frac{r}{h} \right)^n \right] \quad (9)$$

donde ξ , ω , y n = parámetros desconocidos que se determinarán más adelante en el documento (Giroud y Han 2004), cuando el método se calibre con datos experimentales.

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

El valor de m definido por la Ecuación (9) corresponde a un criterio de servicio expresado por una profundidad de surco admisible de 75 mm. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, existen situaciones de diseño en las que se considera un criterio de servicio expresado por una profundidad de surco admisible diferente de 75 mm. Se supone que el coeficiente de movilización de la capacidad portante es proporcional a la profundidad del surco, para profundidades de surco diferentes de 75 mm, por lo tanto

$$m = \left(\frac{S}{f_s}\right) \left\{1 - \xi \exp\left[-\omega \left(\frac{r}{h}\right)^n\right]\right\} \quad (10)$$

donde S = profundidad de surco admisible (mm); y f_s = factor igual a 75 mm.

Considerando que el coeficiente de movilización de la capacidad portante es proporcional a la profundidad del surco para profundidades de surco diferentes de 75 mm, se sugiere que la Ecuación (10) se utilice solo para profundidades de surco que oscilen entre 50 y 100 mm. Esta limitación se aplica a todas las ecuaciones derivadas de la Ecuación (10).

Efecto del Tráfico en el Ángulo de Distribución de la Tensión

Los caminos sin pavimentar se deterioran bajo cargas repetidas. Como resultado, el ángulo de distribución de la tensión disminuye con el aumento de la cantidad de aplicaciones de carga. Este fenómeno fue medido en pruebas de laboratorio de carga cíclica de placas por Gabr (2001). Que fue desarrollado con base en los resultados de las pruebas de Gabr (2001), $1/\tan \alpha$ es una función lineal de $\log N$.

$$\frac{1}{\tan \alpha} = \frac{1+k \log N}{\tan \alpha_1} \quad (11)$$

donde α = ángulo de distribución de tensiones para el caso en el que el número de pasadas es N ; α_1 = ángulo de distribución de tensiones para el caso en el que el número de pasadas es uno; y k = constante en función del espesor de la capa de base y de la armadura.

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

La rigidez estructural de la geomalla puede ser expresada por el módulo de estabilidad de apertura de la geomalla. La influencia del módulo de estabilidad de apertura de la geomalla en la pendiente, λ , se muestra en la figura 17.

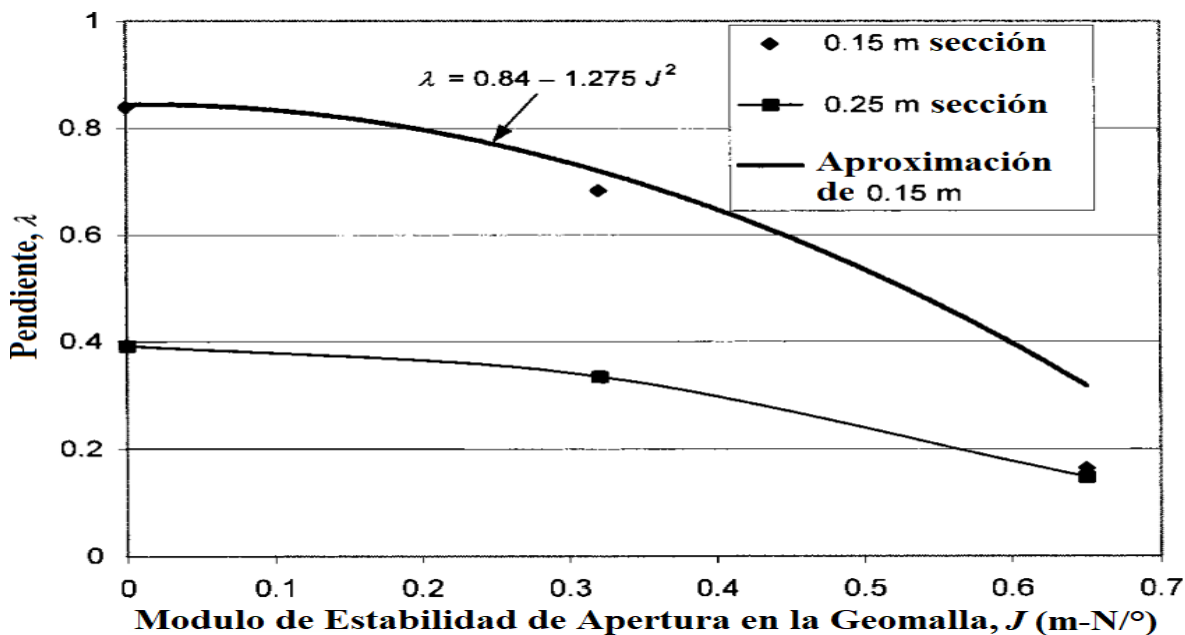


Figura 17. Influencia del módulo de estabilidad de apertura de la geomalla en la pendiente de las curvas de la Fig. 26 (J.P Giroud & Han, 2004).

Desarrollo de las Ecuaciones de Diseño

Desarrollo de la Ecuación Teórica

$$h = \frac{1.26 + (0.96 - 1.46J^2) \left(\frac{r}{h}\right)^{1.5} \log N}{[1 + 0.204(R_E - 1)]} \left[\sqrt{\frac{P}{\pi r^2 \left(\frac{s}{f_s}\right) \left\{1 - \xi \exp\left[-\omega \left(\frac{r}{h}\right)^n\right]\right\} N_C C_U}} - 1 \right] r \quad (12)$$

donde h = espesor de la capa de base (m); R_E = relación de módulo limitado de la capa de base con el suelo de la subrasante; r = radio del área de contacto equivalente del neumático (m); y P = carga de la rueda (kN).

La Ecuación (12) es equivalente a la siguiente ecuación:

$$h = \frac{1.26 + (0.96 - 1.46J^2) \left(\frac{r}{h}\right)^{1.5} \log N}{f_E} \left[\sqrt{\frac{P}{\pi r^2 m N_C C_U}} - 1 \right] r \quad (13)$$

Es importante señalar que las ecuaciones (12) y (13) son válidas para los casos no reforzados y reforzados. En el caso no reforzado, $J = 0$. La única otra diferencia entre los casos no reforzado y reforzado es el valor del factor de capacidad portante N_C , esta ecuación fue desarrollada usando los resultados de pruebas de laboratorio. Para ser aplicable a carreteras sin pavimentar, la ecuación necesita ser calibrada usando datos de pruebas de campo. La calibración y las aplicaciones de las ecuaciones de diseño se presentan a continuación (Giroud y Han 2004).

Ajuste y Calibración de la Ecuación Giroud-Han para Determinar el Espesor de la capa

Base con Refuerzo y Sin refuerzo

Partiendo de la ecuación 12 e introduciendo nuevos datos de pruebas de campo y de laboratorio; (Fannin & Sigurdsson, 1996); (Knapton y Austin 1996); Gabr 2001; (Tingle & Webster, 2003), muestran la necesidad de un método de diseño mejorado para carreteras sin pavimentar reforzadas con geomallas. Es importante destacar que estos estudios proporcionan los datos necesarios para la calibración y verificación del método. Considerando distribución de la tensión, resistencia del material de la capa de base, entrelazado entre la geomalla y el material pétreo de la capa base, rigidez geosintética, volumen de tráfico, cargas de las ruedas, presión de los neumáticos, resistencia de la subrasante, profundidad del surco e influencia de la presencia de un geosintético de refuerzo (geotextil o geomalla) en el modo de falla de la carretera o área sin pavimentar, se desarrolló un método de diseño para hallar el espesor de la capa base basado en la teoría de diseño de (J. P. Giroud & Han, 2004b) y calibrando nuevos datos de campo se llegó a la siguiente ecuación:

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

$$h = \frac{0.868 + (0.661 - 1.006J^2) \left(\frac{r}{h}\right)^{1.5} \log N}{f_E} \left[\sqrt{\frac{\frac{P}{\pi r^2}}{mN_c f_c CBR_{sg}}} - 1 \right] r \quad (14)$$

$$h = \frac{0.868 + (0.661 - 1.006J^2) \left(\frac{r}{h}\right)^{1.5} \log N}{1 + 0.204[R_E - 1]} \left[\sqrt{\frac{\frac{P}{\pi r^2}}{\left(\frac{s}{f_s}\right) \left\{1 - 0.9 \exp\left[-\left(\frac{r}{h}\right)^2\right]\right\} N_c f_c CBR_{sg}}} - 1 \right] r \quad (15)$$

Donde h = espesor de la capa base requerido (m); J = módulo de estabilidad de la abertura de la geomalla (m N/°); N = número de pasadas por eje; P = carga sobre las ruedas (kN); r = radio del área de contacto de las llantas equivalente (m); R_E = relación de módulo limitado de la capa base con el suelo de la subrasante; s = profundidad de surco permitida (mm); f_s = factor igual a 75 mm; N_c = factor de capacidad portante; f_c = factor igual a 30 kPa [véase la Ec. (5)]; y CBR_{sg} = CBR del suelo de la subrasante. De acuerdo con la Ec. (3), $P/(\pi r^2)$ es igual a la presión de contacto de los neumáticos, la cual es cercana a la presión de los neumáticos. (J. P. Giroud & Han, 2004b).

Casos de Estudio Para determinar el Espesor de la Capa Base (h) Utilizando el Método

Giroud-Han

Este ejemplo de diseño demuestra el uso del método de diseño desarrollado en este estudio. En él, se determina el espesor de la capa base requerido para los casos reforzados y no reforzados con geomalla.

El refuerzo considerado es la geomalla B12; tiene una abertura módulo de estabilidad de 0,65 m N/°. La carretera no pavimentada se diseñará para 5.000 pasadas de una carga de ruedas de 40 kN con una presión de neumáticos de 550 kPa. El suelo de la subrasante tiene una CBR_{sg} de 1,0 y la capa base del campo después de la compactación tiene una CBR_{bc} de 15,0. La profundidad de surco admisible es de 75 mm.

Solución del caso I (sin refuerzo)

Se sigue el procedimiento presentado en el diagrama de flujo Fig. 18.

Se calculará la capacidad portante admisible para el suelo de la subrasante sin refuerzo utilizando la Ec. (15)

Tabla 5

Ecuaciones utilizadas para cálculos para el caso I (sin refuerzo y con refuerzo)

| Ecuaciones Utilizadas en el Proceso | | |
|---|--|---|
| $r = \sqrt{\frac{P}{\pi p}}$ | $f_E = 1 + 0.204(R_E - 1)$ | $m = \left(\frac{S}{f_s}\right) \left\{1 - 0.9 * \exp \left[-\left(\frac{r}{h}\right)^2\right]\right\}$ |
| $P_{h=0} = \left(\frac{S}{f_s}\right) \pi r^2 N_c f_c CBR_{sg}$ | $\frac{E_{bc}}{E_{sg}} = \frac{3.48 CBR_{bc}^{0.3}}{CBR_{sg}}$ | $R_E = \min\left(\frac{E_{bc}}{E_{sg}}, 5.0\right)$ |
| P > Ph = 0 (Se requiere una capa base con o sin geosintético) | Relación de módulos entre base/subrasante | Se sugiere un limite máximo de 5,0 para la relación de módulos en suelos no reforzados |

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

Tabla 6

Datos de entrada y espesor de capa base hallado por iteración sucesiva, caso I sin refuerzo

| CASO DE ESTUDIO I (sin refuerzo) | | | Factor entre la cohesión no drenada y la subrasante | $f_c = 30$ | (Kpa) | |
|--|-------------------|---------|--|--|-------------|---------------|
| Modulo de estabilidad de apertura | $J = 0$ | (m N/°) | Factor de relación de modulo | $f_E = 1,816$ | | |
| Carga por rueda | $P = 40$ | (KN) | Factor de capacidad portante | $N_c = 3,14$ | | |
| Presión de contacto de los neumáticos | $P = 550$ | (Kpa) | Relación de modulos | $\frac{E_{bc}}{E_{sg}} = \frac{3.48 CBR_{bc}^{0.3}}{CBR_{sg}}$ | $RE = 7,84$ | Se adopta 5,0 |
| Radio de la superficie de contacto del neumático | $r = 0,152$ | (m) | Relación de modulo limitado entre base/subrasante ($3 \geq RE \leq 5$) | $RE = 5,0$ | | |
| Numero de pasadas del eje | $N = 5000$ | | Coefficiente de movilización de la capacidad portante | $m = 0,150$ | | |
| Profundidad del surco admisible | $S = 75$ | (mm) | Espesor de la capa base asumido | $h_1 = 0,504$ | (m) | |
| Factor de profundidad del surco | $f_s = 75$ | (mm) | Espesor de la capa base encontrada | $h_2 = 0,504$ | (m) | |
| CBR de la subrasante | $CBR_{sg} = 1,0$ | | | | | |
| CBR de la base | $CBR_{bc} = 15,0$ | | | | | |

El cálculo del espesor de la capa base requiere iteraciones por sustitución directa o aproximaciones sucesivas, para determinar el valor de (h), se utilizó la herramienta Excel para hallar el valor solicitado. Para iniciar el proceso de iteración para el caso de la carretera no pavimentada no reforzada, se asume que el espesor de la capa base requerido es 0.40 m, donde debemos llegar a una igualdad matemática donde h (asumido) = h (encontrado). En este caso de estudio podemos redondear el valor y determinar que la capa base será de 50 (cm).

Solución caso I (con geomalla)

En el caso de la geomalla reforzada, el radio del área de contacto y el factor de relación de módulo son los mismos que en el caso no reforzado.

Utilizando la Ec. (14) con $N_c = 5.71$ y $J = 0.65$ m N/°, el espesor de la capa base calculado para el caso de la geomalla reforzada B12 es:

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

Tabla 7

Datos de entrada y espesor de capa base hallado por iteración sucesiva, caso I con refuerzo

| CASO DE ESTUDIO I (con geomalla) | | | Factor entre la cohesión no drenada y la subrasante | $f_c = 30$ | (Kpa) | |
|--|-------------------|---------|---|--|--------------|---------------|
| Modulo de estabilidad de apertura | $J = 0,65$ | (m N/°) | Factor de relación de modulo | $f_E = 1,816$ | | |
| Carga por rueda | $P = 40$ | (KN) | Factor de capacidad portante | $N_c = 5,71$ | | |
| Presión de contacto de los neumáticos | $P = 550$ | (Kpa) | Relación de modulos | $\frac{E_{bc}}{E_{sg}} = \frac{3.48 CBR_{bc}^{0.3}}{CBR_{sg}}$ | $R_E = 7,84$ | Se adopta 5,0 |
| Radio de la superficie de contacto del neumático | $r = 0,152$ | (m) | Relación de modulo limitado entre base/subrasante ($3 \geq R_E \leq 5$) | $R_E = 5,0$ | | |
| Numero de pasadas del eje | $N = 5000$ | | Coefficiente de movilización de la capacidad portante | $m = 0,555$ | | |
| Profundidad del surco admisible | $S = 75$ | (mm) | Espesor de la capa base asumido | $h_1 = 0,181$ | (m) | |
| Factor de profundidad del surco | $f_s = 75$ | (mm) | Espesor de la capa base encontrada | $h_2 = 0,181$ | (m) | |
| CBR de la subrasante | $CBR_{sg} = 1,0$ | | | | | |
| CBR de la base | $CBR_{bc} = 15,0$ | | | | | |

En este caso de estudio podemos redondear el valor y determinar que la capa base será de 18 (cm).

Conclusiones Sobre el Caso de Estudio I (con y sin refuerzo)

Si la carga de la rueda hubiese sido menor a 6.8 kN, la capacidad de soporte del suelo de la subrasante hubiese obtenido un valor negativo utilizando la ecuación (15) tanto para el caso no reforzado como para el reforzado. Entonces se habría seleccionado el espesor mínimo de la capa base de 0.10 m.

Si la carga de la rueda hubiera sido inferior a 12.4 kN, se habría obtenido un valor negativo utilizando la ecuación (15) para el caso de la geomalla reforzada. Se habría seleccionado el espesor mínimo de la capa base de 0.10 m. El valor de 12,4 kN es la carga de la rueda que teóricamente puede soportar el suelo de la subrasante que acaba de cubrirse con una geomalla. Esta carga de la rueda se calcula utilizando la siguiente ecuación.

$$P_{h=0} = \left(\frac{S}{f_s}\right) \pi r^2 N_c f_c CBR_{sg} \quad (16)$$

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

de la siguiente manera y utilizando el símbolo $P_{h=0,GGD}$, (carga de las ruedas que se puede transportar sin una capa base pero con un refuerzo de geomalla en la parte superior del suelo de la subrasante)

$$P_{h=0,GGD} = \left(\frac{S}{f_s}\right) \pi r^2 N_c f_c CBR_{sg}$$

$$P_{h=0,GGD} = \left(\frac{75}{75}\right) (\pi)(0.152)^2(5.71)(30)(1.0) = 12.43 \text{ kN}$$

Como la carga de la rueda (40 kN) es superior a 12,4 kN, se obtuvo un espesor positivo de la capa base necesaria tanto para el caso no reforzado como para el reforzado.

La carga máxima de la rueda para el caso de un espesor adoptado (mínimo) de la capa de base no reforzada de 10 cm (0,10) m puede calcularse utilizando cualquiera de las ecuaciones (17) - (18).

$$P = \pi r^2 m N_c f_c CBR_{sg} \left[1 + \frac{\left(\frac{h}{r}\right) f_E}{0.868 + (0.661 - 1.006 J^2) \left(\frac{r}{h}\right)^{1.5} \log N} \right]^2 \quad (17)$$

$$P = \pi r^2 \left(\frac{S}{f_s}\right) \left\{ 1 - 0.9 \exp \left[- \left(\frac{r}{h}\right)^2 \right] \right\} N_c f_c CBR_{sg} \left[1 + \frac{\left(\frac{h}{r}\right) [1 + 0.204(R_E - 1)]}{0.868 + (0.661 - 1.006 J^2) \left(\frac{r}{h}\right)^{1.5} \log N} \right]^2 \quad (18)$$

Para realizar este cálculo es necesario calcular primero el valor del coeficiente de movilización de la capacidad de carga, m , para un espesor de la capa base de 0.10 m, utilizando la siguiente ecuación de la siguiente manera:

$$m = \left(\frac{S}{f_s}\right) \left\{ 1 - 0.9 * \exp \left[- \left(\frac{r}{h}\right)^2 \right] \right\} \quad (19)$$

Aplicando la ecuación (19) obtenemos:

$$m = \left(\frac{75}{75}\right) \left\{ 1 - 0.9 * \exp \left[- \left(\frac{0.152}{0.10}\right)^2 \right] \right\} = 0.911$$

Utilizando la ecuación (17) tenemos:

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

$$P_{h=0.10} = \pi(0.152)^2(0.911)(3.14)(30)(1.0) \left[1 + \frac{\left(\frac{0.10}{0.152}\right)(1.816)}{0.868 + (0.661)\left(\frac{0.152}{0.10}\right)^{1.5} \log 5000} \right]^2 = 9.3 \text{ kN}$$

Puede comprobarse que la Ec. (14) con $P = 9.3 \text{ kN}$, $N_c = 3.14$, y $J = 0$ da $h = 0,10 \text{ m}$. Si la carga de la rueda hubiera estado entre 6,8 y 9.3 kN, el espesor de la capa base requerido para el caso no reforzado, utilizando la Ecuación (14) con $N_c = 3.14$, habría sido positiva y menor de 0,10 m, entonces se adopta la capa base mínima de 0,10 m.

La carga máxima de la rueda para el caso de la base mínima de 0,10 m reforzada con la geomalla B12 puede ser calculada mediante la Ecuación (17):

$$P_{h=0.10} = \pi(0.152)^2(0.911)(5.71)(30)(1.0) \left[1 + \frac{\left(\frac{0.10}{0.152}\right)(1.816)}{0.868 + [0.661 - 1.006(0.65)^2]\left(\frac{0.152}{0.10}\right)^{1.5} \log 5000} \right]^2$$

$$P_{h=0.10} = 24.7 \text{ kN}$$

Puede comprobarse que la ecuación: $P_{h=0} = \left(\frac{S}{f_s}\right) \pi r^2 N_c C_U$ (20)

con $P = 24.7 \text{ kN}$, $N_c = 5.71$, y $J = 0.65 \text{ m N}^\circ$ da $h = 0.10 \text{ m}$. Si la carga de la rueda hubiese estado entre 12.4 y 24.7 kN, el espesor de la capa base requerido para el caso de la geomalla reforzada calculado utilizando la Ec. (20) con $N_c = 5.71$ hubiese sido positivo y menor de 0.10 m

Entonces se hubiese seleccionado el espesor mínimo de la capa base de 0.10 m.

Caso de Estudio II (Construcción de una vía Sobre la Sabana de Bogotá)

La capacidad portante de la vía es muy deficiente, el estudio de suelos arrojó un $\text{CBR}_{\text{sg}} = 1.5\%$, la estructura se proyectó para soportar un tráfico de 1.5×10^6 ejes equivalentes de 8.20 Toneladas.

El material que se propone para el remplazo de la capa base, se compone de una granulometría tipo granular (sub-base), estimando un CBR_{bc} de 30%, Para evaluar el espesor de

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

capa base que se necesita para estabilizar la subrasante, se asume, un estimado de 660 vehículos de 3 ejes durante el proceso de construcción de la carretera, se asumen un número de repeticiones $N = 2000$ y considerando una presión de inflado de los neumáticos de 550 (KPa) o 80 psi. Se desea obtener datos para la carretera con refuerzo (geomalla biaxial) y sin refuerzo. (Mexichem Soluciones Integrales, 2012).

Solución caso II (sin refuerzo y con refuerzo)

Condición sin refuerzo para una vía sin pavimentar ($J = 0$; $N_C = 3.14$; $R_E = 5.0$)

Condición con refuerzo para una geomalla biaxial coextruida P-BX12 ($J = 0.65 \text{ m-N}^\circ$; $N_C = 5.71$; $R_E = 5.0$).

Para fines constructivos se adopta un espesor de capa base de 56 (cm) para una carretera sin pavimentar sin refuerzo y con refuerzo (geomalla biaxial P-BX12) un espesor de capa base de 23 (cm). A continuación, se aplicará la metodología con la que se llegaron a los resultados propuestos en este caso de estudio.

Tabla 8

Datos de entrada y espesor de capa base hallado por iteración sucesiva, caso II sin refuerzo

| CASO DE ESTUDIO II (sin refuerzo) | | | Factor entre la cohesión no drenada y la subrasante | $f_c = 30$ | (Kpa) |
|--|-------------------|---------|---|---------------|---------------|
| Modulo de estabilidad de apertura | $J = 0$ | (m N/°) | Factor de relación de modulo | $f_E = 1,816$ | |
| Carga por rueda | $P = 40$ | (KN) | Factor de capacidad portante | $N_C = 3,14$ | |
| Presión de contacto de los neumáticos | $P = 550$ | (Kpa) | Relación de modulos $\frac{E_{bc}}{E_{sg}} = \frac{3.48CBR_{bc}^{0.3}}{CBR_{sg}}$ | $R_E = 6,44$ | Se adopta 5,0 |
| Radio de la superficie de contacto del neumático | $r = 0,152$ | (m) | Relación de modulo limitado entre base/subrasante ($3 \geq RE \leq 5$). Autor | $R_E = 5,0$ | |
| Numero de pasadas del eje | $N = 2000$ | | Coefficiente de movilización de la capacidad portante | $m = 0,086$ | |
| Profundidad del surco admisible | $S = 40$ | (mm) | Espesor de la capa base asumido | $h_1 = 0,570$ | (m) |
| Factor de profundidad del surco | $f_s = 75$ | (mm) | Espesor de la capa base encontrada | $h_2 = 0,570$ | (m) |
| CBR de la subrasante | $CBR_{sg} = 1,5$ | | | | |
| CBR de la base | $CBR_{bc} = 30,0$ | | | | |

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

La carga máxima de la rueda para el caso de un espesor mínimo para la capa de base no reforzada de 0,10 m debe ser de: 4.1 kN.

Tabla 9

Datos de entrada y espesor de capa base hallado por iteración sucesiva, caso II con refuerzo

| CASO DE ESTUDIO II (con geomalla P-BX12) | | | Factor entre la cohesión no drenada y la subrasante | $f_c = 30$ | (Kpa) | |
|--|-------------------|---------|---|--|-------------|---------------|
| Modulo de estabilidad de apertura | $J = 0,65$ | (m N/°) | Factor de relación de modulo | $f_E = 1,816$ | | |
| Carga por rueda | $P = 40$ | (KN) | Factor de capacidad portante | $N_c = 5,71$ | | |
| Presión de contacto de los neumáticos | $P = 550$ | (Kpa) | Relación de modulos | $\frac{E_{bc}}{E_{sg}} = \frac{3.48 CBR_{bc}^{0.3}}{CBR_{sg}}$ | $RE = 6,44$ | Se adopta 5,0 |
| Radio de la superficie de contacto del neumático | $r = 0,152$ | (m) | Relación de modulo limitado entre base/subrasante ($3 \geq RE \leq 5$). Autor | $RE = 5,0$ | | |
| Numero de pasadas del eje | $N = 2000$ | | Coeficiente de movilización de la capacidad portante | $m = 0,232$ | | |
| Profundidad del surco admisible | $S = 40$ | (mm) | Espesor de la capa base asumido | $h_1 = 0,223$ | (m) | |
| Factor de profundidad del surco | $f_s = 75$ | (mm) | Espesor de la capa base encontrada | $h_2 = 0,223$ | (m) | |
| CBR de la subrasante | $CBR_{sg} = 1,5$ | | | | | |
| CBR de la base | $CBR_{bc} = 30,0$ | | | | | |

La carga máxima de la rueda para el caso de un espesor mínimo para la capa base con refuerzo (geomalla) de 0,10 m debe ser de: 11.1 kN.

Conclusión Caso de Estudio II

El método de diseño desarrollado por (J. P. Giroud & Han, 2004b), presentado en este documento, está basado en pruebas de campo y ensayos de laboratorio con su respectiva calibración, sobre vías sin pavimentar con y sin refuerzo sobre subrasantes débiles. Este método es muy acertado en el momento de pronosticar los espesores de capa base en carreteras sin pavimentar reforzadas (geomallas o geotextiles) y no reforzadas.

Este método es muy utilizado por los ingenieros para estimar espesores de base en carreteras no pavimentadas, plataformas de trabajo, acceso de vías temporales, etc. Al igual que proporciona ahorros económicos en comparación de las vías no reforzadas siendo también amigable con el medio ambiente, minimizando movimientos de suelo y excavaciones. (Mexichem Soluciones Integrales, 2012).

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

Tabla 10

Ahorro de material granular entre capa reforzada y no reforzada

| Suelo de Capa Base | Espesor calculado (m) | Espesor constructivo (m) | Ahorro* |
|--------------------------------|-----------------------|--------------------------|---------|
| Sin refuerzo | 0,570 | 0,57 | - |
| Con refuerzo (geomalla P-BX12) | 0,223 | 0,23 | 40,35 % |

Nota: *comparación entre estructura reforzada y no reforzada, adaptado (Mexichem, 2012).

Caso de Estudio III: Diseño de Vía no Pavimentada con Refuerzo y sin Refuerzo Utilizando la Metodología Giroud-Han, Caso de Aplicación de Honduras.

Tabla 11.

Parámetros de diseño, caso Honduras

| Carga de tráfico | Carga de eje | Carga de la rueda | Número de pasadas |
|-----------------------|--|-------------------|-------------------|
| | 18 kip = 80 kN | 9 kip = 40 kN | 100000 |
| Ahuellamiento | Profundidad de surco S = 3 in = 75 mm | | |
| CBR | CBRsg 2 | CBR bc 40 | |
| Refuerzo | Geomalla TX140 | | |
| Factores de capacidad | Factor de capacidad portante Nc = 5,71 (con refuerzo) Nc = 3,14 (sin refuerzo) | | |

A. El contenido de diseño para el caso de estudio lo podemos analizar en la tabla 5.

B. Hallaremos el radio de la superficie de contacto con la ecuación (3).

$$r = \sqrt{\frac{40}{\pi(550 \text{ KPa})}} = 0.152 \text{ m} = 6 \text{ pulg}$$

C. Relación de módulos de proporción entre E_{bc} / E_{sg} , con la ecuación (7).

$$R_E = \frac{3.48(40)_{bc}^{0.3}}{2} = 5.26 > 5$$

Si el valor de la relación de módulos es mayor a 5,0 (autor), se adopta el mínimo $R_E = 5$

D. Verificación de la capacidad portante con la ecuación (16)

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

$$P_{h=0, \sin ref.} = \left(\frac{75mm}{75mm}\right) \pi(0.152)^2(3.14)(30kPa)(2) = 13.68 kN$$

$$P_{h=0, \sin ref.} = 13.68 kN < 40kN$$

La carga de la rueda (40 kN) es mayor que esta capacidad de carga. En síntesis, la subrasante no puede resistir la carga del tráfico vehicular, entonces se requiere una capa base con o sin refuerzo.

$$P_{h=0, \sin ref.} = \left(\frac{75mm}{75mm}\right) \pi(0.152)^2(3.14)(30kPa)(2) = 13.68 kN$$

E. Factor de corrección (C_f), relacionado con el módulo de estabilidad de apertura de la geomalla (J), el cual es diferente en todas las geomallas, los proveedores del material sintético determinan este módulo de estabilidad de apertura realizando pruebas de rigidez torsional al material. (Holtz et al., 2008).

$$C_f(0.661 - 1.006 * J^2)$$

F. Aplicaremos la fórmula de diseño con la ecuación (15). Utilizando un factor de corrección de $C_f = 0.672$ así:

$$h = \frac{0.868 + (0.672) \left(\frac{0.152}{h}\right)^{1.5} \log 10000}{1 + 0.204[5-1]} \left[\sqrt{\frac{\frac{40}{\pi(0.152)^2}}{\left(\frac{75}{75}\right) \left\{1 - 0.9 * \exp\left[-\left(\frac{0.152}{h}\right)^2\right]\right\}} (3.14)(30)(2)} - 1 \right] * 0.152$$

El resultado de la capa base para una carretera sin pavimentar y sin refuerzo, utilizando la herramienta Excel con iteraciones sucesivas corresponde a: $h = 0.366$ m, para fines constructivos adoptamos un valor de $h = 0.38$ m o 38 cm.

Para el caso de una carretera sin pavimentar, pero incluyendo como refuerzo una geomalla TX-140 de tensor, factor de capacidad portante ($N_c = 5.71$) y un factor de corrección ($C_f = 0.348$)

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

obtenemos un espesor de capa base de $h = 0.112$ m, para fines constructivos adoptamos un valor de $h = 0.12$ m o 12 cm.

Tabla 12

Ahorro de material granular entre capa reforzada y no reforzada, caso Honduras

| Suelo de Capa Base | Espesor calculado (m) | Espesor constructivo (m) | Ahorro* |
|--------------------------------|-----------------------|--------------------------|---------|
| Sin refuerzo | 0,366 | 0,38 | - |
| Con refuerzo (geomalla TX-140) | 0,112 | 0,12 | 68,42% |

Nota: *comparación entre estructura reforzada y no reforzada, adaptado (Mexichem, 2012).

Procedimiento Constructivo en la Instalación de Geomallas

Los beneficios de instalación de las geomallas tienen como función: disminuir el uso de agregado, reducir el socavamiento, mejorar la compactación del suelo y aumentar la vida útil de la carretera.

El embalaje del material geosintético (geomalla) viene dispuesto en rollos, que facilita su utilización y desplazamiento al sitio de trabajo.

En la figura (19) se presenta el proceso general de instalación del geosintético. Antes de iniciar los procesos constructivos, se deben seguir los siguientes parámetros: preparación inicial; donde se realizan las consultas correspondientes a los ingenieros o especialistas sobre el sitio y se globaliza la cantidad de material a utilizar con sus respectivas características de trabajo.

Una vez el material se encuentre en el campo, se prepara el sitio de trabajo; limitando la subrasante y dejándola a nivel para colocar la geomalla; se desenrolla y se extiende el material geosintético para ser fijado y anclado, evitando así el desplazamiento y las posibles ondulaciones al momento del extendido; el traslapo entre geomallas no debe ser superior a 30 cm. Una vez terminado el proceso de extendido se procede a esparcir el material granular para conformar la

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

base, garantizando los espesores hallados en el diseño, y finalmente compactamos el terreno. (Almendarez & Reyes, 2017). El método Giroud-Han aplicado para el caso de estudio de Honduras demostró un ahorro significativo del 68,42% utilizando la geomalla TX-140 con respecto al espesor de la capa base de la carretera sin refuerzo para CBR con capacidad portante débil. Hay que mencionar que las propiedades mecánicas de las geomallas difieren entre proveedores de este producto por lo que se recomienda validar sus características en las fichas técnicas.

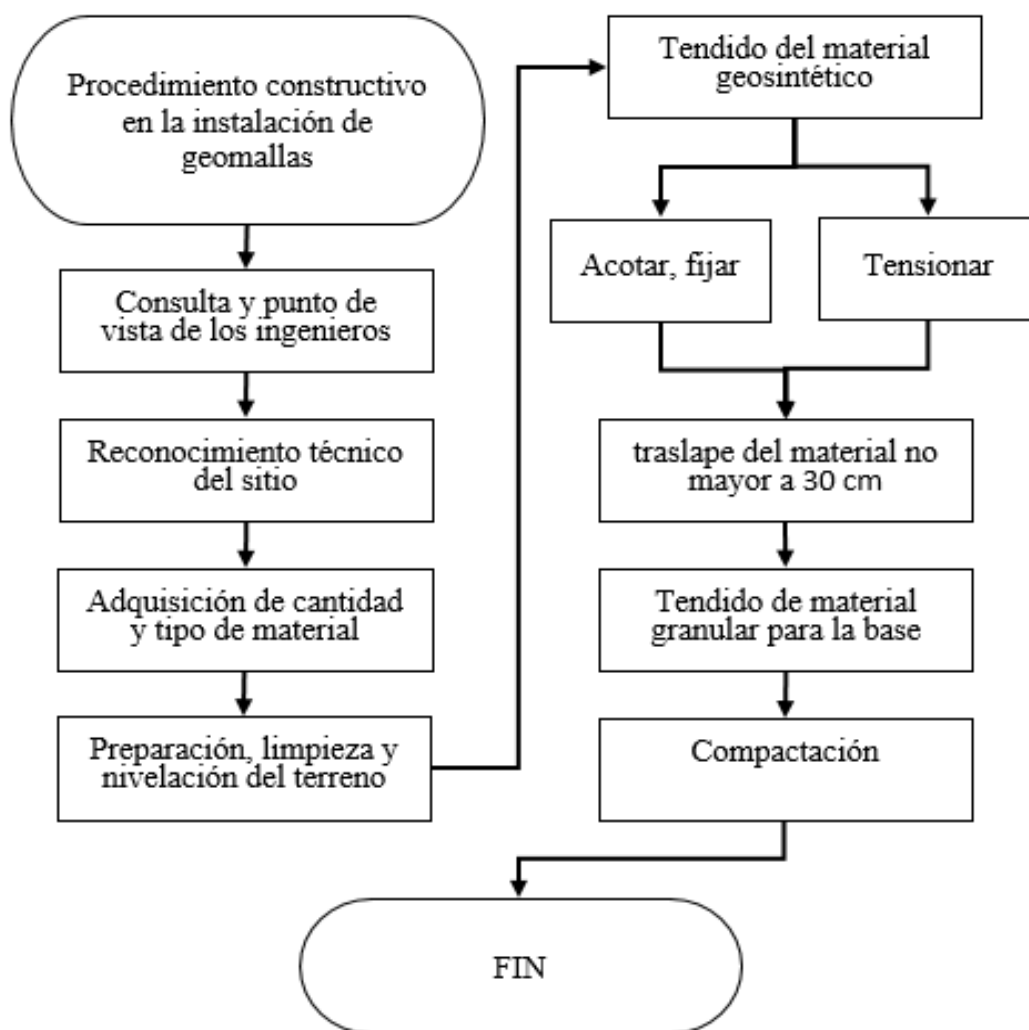


Figura 19. Proceso constructivo en la instalación de geomallas (Almendarez & Reyes, 2017),

Análisis y Comparación de Precios Unitarios Para Diferentes Métodos de Estabilización de Suelos

Un análisis económico permite a las instituciones encargadas de las carreteras identificar, cuantificar y valorar los beneficios económicos y los costos de los proyectos y programas de carreteras en un marco de tiempo a largo plazo, pudiendo generar un diseño y una construcción rentables. Las carreteras y caminos son una parte importante de los bienes públicos de cada país, permitiendo la ocupación de los terrenos y la comunicación entre las comunidades. Al igual que otros tipos de infraestructura, los activos viales requieren una planificación adecuada, que implica la viabilidad de estudios, diseño, construcción, operación, preservación y rehabilitación. (Geiger, 2003).

La evaluación de costos se considera una de las etapas más importantes y críticas de un proyecto de ingeniería. (Jrade & Alkass, 2007). Los estudios informan que la inexactitud en la estimación de los costos oscila entre el 20,4 y el 44,7%, y a pesar de décadas de esfuerzos para reducir los sobrecostos de los proyectos, los grandes proyectos de infraestructura siguen estando plagados de problemas, por los retrasos y los grandes sobrecostos. Sin embargo, en los proyectos de carreteras y autopistas no solo son importantes los costos de construcción iniciales: la gestión de las carreteras parte de la premisa de que la red de carreteras es un activo que debe ser mantenido y mejorado para garantizar el mejor rendimiento y la mejor relación calidad-precio, así como la máxima vida útil. (L. Liu, Wehbe, & Sisovic, 2010).

En este documento analizaremos los diferentes APU (análisis de precios unitarios). (Instituto Nacional de Vías, 2019). Partiendo de lo importante que es la rentabilidad en un proyecto vial, analizaremos los costos generados por los métodos de estabilización más utilizados y haremos

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

una comparación entre ellos, para determinar el más viable con relación a su costo y vida útil en el tiempo. (ver anexos 9 al 16).

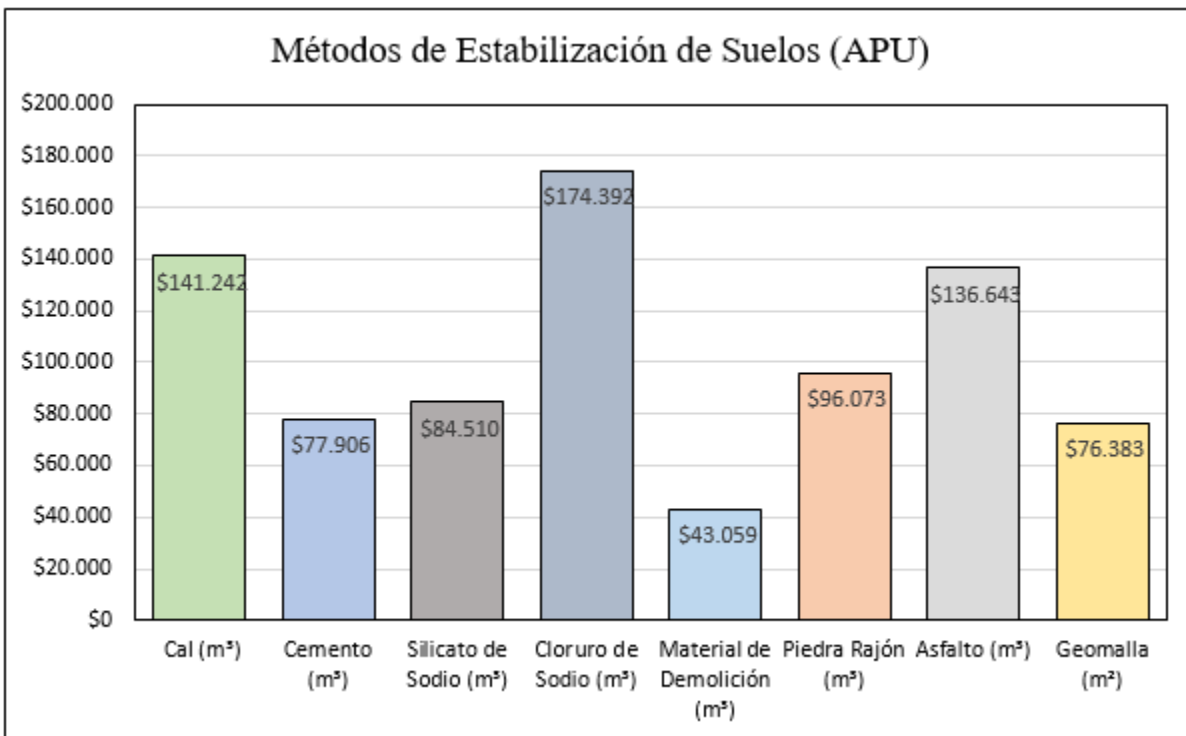


Figura 20. Análisis y comparación de precios unitarios (INVIAS, 2019)

Conclusiones

Con el aumento de la carga de tráfico, el diseño de las capas base de las carreteras se han vuelto más grueso. Secciones de capas más gruesas indican que más material deberá ser utilizado, y por lo tanto más costo. La geomalla puede ser utilizada como alternativa para reducir el costo de estos materiales y mejorar el rendimiento de los tramos de carretera reforzados. Al mismo tiempo, se han llevado a cabo muchos estudios para cuantificar el beneficio de utilizar el refuerzo de la base con geomallas (por ejemplo, Hass et al. 1988; Barksdale et al. 1989; Al-Qadi et al. 1994; Perkins 1999, 2002; Berg et al. 2000; Giroud y Noiray 1981; Tensar Corporation 1986; Giroud-Hand 2004 y otros). Estos estudios demuestran que la geomalla es una alternativa viable con respecto a los crecientes costos de los materiales de construcción. No solo la geomalla ayuda a reducir el material necesario (Cancelli y Montanelli 1999; Montanelli et al. 1997; Giroud y Noiray 1981; Tensar Corporation 1986; Giroud-Hand 2004), también puede extender el servicio y vida útil de la estructura (Cancelli y Montanelli 1999; Al-Qadi et al. 1997; Giroud-Hand 2004) y proporciona fuerza adicional a las áreas de subrasante más débiles.

El grado de mejora del rendimiento de una carretera con la inclusión de la geomalla en la capa base depende de muchos factores, entre ellos las propiedades físicas de la geomalla (Webster 1993), las propiedades mecánicas de la geomalla (Perkins 1999; Cancelli y Montanelli 1999; Berg y otros 2000), la ubicación de la geomalla en el suelo (Webster 1993; Perkins 1999; Al-Qadi 2008 y otros), el espesor de la capa base (Collin 1996; Kinney 1998 y otros), y las tensiones generadas por el agregado de la base (Kwon 2008 entre otros). La caracterización eficaz del agregado de base reforzado con geomallas es un requisito clave para comprender mejor las ventajas de la geomalla para incorporarla en la estabilización y mejoramiento de futuras carreteras sin pavimentar.

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

Los resultados de diferentes investigaciones han mostrado el mejor rendimiento de los caminos no pavimentados reforzados con geosintéticos sobre los no reforzados después de sucesivas reparaciones de la superficie, donde el surco tuvo que ser rellenado y nivelado de nuevo (Palmeira y Cunha 1993; Palmeira y Ferreira 1994; Palmeira 1998; Palmeira y Antunes 2010). Los grandes desplazamientos verticales de la capa de refuerzo debajo del área cargada después de sucesivas reparaciones de la superficie de relleno magnifican la contribución del efecto de membrana del refuerzo. Sin embargo, el beneficio de la presencia del refuerzo cuando son necesarias varias reparaciones de la superficie de la carretera durante la vida útil de la misma rara vez se considera en el análisis de costos de este tipo de trabajo. Palmeira y Antunes (2010).

Después de que aparezcan una cierta cantidad de surcos de tráfico, la superficie de la carretera debe ser reparada para permitir el tráfico continuo de vehículos en condiciones seguras y económicas. Una contribución importante del refuerzo es reducir las obras de mantenimiento de la carretera (Palmeira y Ferreira, 1994; Palmeira, 1998). Esta contribución rara vez se tiene en cuenta al evaluar los costos de la utilización de refuerzos en las carreteras no pavimentadas. Palmeira y Cunha (1993) han demostrado que el rendimiento de la carretera no pavimentada reforzada puede ser significativamente mejor que el de la no reforzada en condiciones de grandes surcos debido a la mejora de los mantenimientos de la superficie cuando actúa el efecto membrana. (Giroud y Noiray, 1981; Palmeira, 1998).

Además, reforzando el sistema, sustituyendo los cimientos pobres del suelo por uno más competente, son soluciones perjudiciales para el medio ambiente. Goldfingle (2009).

Recomendaciones

✓ La cantidad de material de relleno necesario para construir la carretera puede ser bastante significativa, dependiendo de las características geométricas del proyecto y de las condiciones de la subrasante. Dado que los materiales de buena calidad pueden ser escasos en las proximidades de la carretera, o su explotación puede estar restringida por la normativa ambiental, otro aspecto relevante relacionado con la construcción de carreteras sin pavimentar es la posibilidad de utilizar materiales de relleno alternativos. Es probable que el rendimiento de una carretera construida con un material de relleno más pobre pueda ser mejorado por la presencia del refuerzo. En este contexto, los escombros reciclados de las obras de construcción y demolición son un candidato potencial para ser utilizados en combinación con el refuerzo geosintético como sustituto del material de grava más caro y tradicional.

Se necesita más investigación para comprender mejor los factores que afectan la carretera no pavimentada rendimiento, en particular con respecto al uso combinado de materiales de relleno alternativos de bajo costo y refuerzo con geosintéticos.

✓ La incorporación de una capa estabilizada mecánicamente (geomalla-agregado), en carreteras no pavimentadas puede aportar importantes ahorros económicos y beneficios ambientales a los proyectos. Los aspectos medioambientales, en particular el cálculo de la reducción de CO², debería convertirse en un procedimiento de control estándar en la fase de diseño de cualquier tipo de carretera. Los ejemplos de cálculos muestran los beneficios potenciales de la optimización de materiales de agregados y capas asfálticas (carreteras pavimentadas) en términos de protección del medio ambiente. (Kawalec, Gołos, & Mazurowski, 2018).

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

✓ Los desarrollos tecnológicos en la construcción de carreteras no solo deben dar como resultado soluciones duraderas, seguras y rentables para carreteras y pavimentos, sino también, y quizás, sobre todo, soluciones que minimicen el impacto negativo de la construcción en el medio ambiente. Un estudio realizado en la India demostró que el bambú es un material de refuerzo natural y ha sido aceptado como sustituto de la geomalla para aplicaciones de refuerzo, debido a sus propiedades de resistencia a la tracción, demostrando factores de mejora en la presión de cargas debidas al tráfico en un 4,3% y una reducción en los asentamientos en un 81%, respectivamente. (Ahirwar & Mandal, 2018).

✓ El yute es una fibra natural similar al fique oriunda de la India y Bangladés, y es utilizada comúnmente en la India como material geosintético. Los geotextiles de yute biodegradables son un eficaz material de refuerzo para los caminos no pavimentados, pero su utilidad es limitada debido a la rápida degradación microbiana. En Colombia se cultiva el fique, de donde se extrae fibras naturales (cabuya), según estudios realizados por el Departamento de Materiales de Ingeniería de la Universidad del Valle, el fique es un excelente sustituto de materiales geosintéticos compuestos por matrices poliméricas debido a sus altas propiedades mecánicas, su bajo costo y sobre todo amigable con el medio ambiente. Debido a estos beneficios es indispensable priorizar una investigación con el fin de desarrollar una geomalla hecha a base de fique, como sabemos es una planta biodegradable, pero utilizando recubrimientos a base de ceras, recubrimientos bituminosos entre otros materiales que protejan al fique de elementos químicos que puedan reducir la vida útil del material y la capacidad portante de la estructura.

Referencias

- Abu-Farsakh, M., Hanandeh, S., Tang, X., & Chen, Q. (2016). Sustainability Evaluation of Geosynthetic Stabilized Soft Subgrade Soil in Unpaved Test Sections. In *Geo-Chicago 2016* (pp. 687–696). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784480137.065>
- Abu-Farsakh, M., Souci, G., Voyiadjis, G. Z., & Chen, Q. (2012). Evaluation of Factors Affecting the Performance of Geogrid-Reinforced Granular Base Material Using Repeated Load Triaxial Tests. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(1), 72–83. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000349](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000349)
- Ahirwar, S. K., & Mandal, J. N. (2018). Behaviour of bamboo grid-reinforced soil bed. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 1–10. <https://doi.org/10.1080/19386362.2018.1550909>
- Ahmed, S. I., & Siddiqua, S. (2016). Compressibility Behavior of Soils: A Statistical Approach. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(6), 2063–2070. <https://doi.org/10.1007/s10706-016-9996-7>
- Almendarez, L., & Reyes, J. (2017). Diseño de Pavimentos Flexibles con Refuerzo de Geomalla Triaxial Utilizando la Metodología Giroud-Han : Caso de Aplicación en Honduras. *Laccei*, (July), 10.
- Alzaidy, M. N. J. (2019). Experimental study for stabilizing clayey soil with eggshell powder and plastic wastes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 518(2), 22008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/518/2/022008>
- Banco Interamericano de Desarrollo - BID. (2010). *Valoración de daños y pérdidas*. Bogota.
- Barber, V. C., & Odom, E. C. (1978). Deterioration and Reliability of Pavements. *U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi 39180*, 2(ADA056407), 15.
- Barry, A. J., Trigunaryyah, B., Symes, T., & Younger, J. S. (1995). Geogrid reinforced piled road over peat. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, 10(1), 205–210. <https://doi.org/10.1144/GSL.ENG.1995.010.01.16>
- Basu, G., Roy, A. N., Bhattacharyya, S. K., & Ghosh, S. K. (2009). Construction of unpaved rural road using jute–synthetic blended woven geotextile – A case study. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(6), 506–512. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.03.004>
- Bauer, G. E., & El Halim, A. O. A. (1987). The performance of geogrid reinforced road bases. *Construction and Building Materials*, 1(2), 71–75. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(87\)90002-X](https://doi.org/10.1016/0950-0618(87)90002-X)
- Bell JR, Hicks RG, et. al. (1980). Evaluation of Test Methods and Use Criteria for Geotechnical Fabrics in Highway Applications, Interim Report FHWA/RD-80/021. *Federal Highway*

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

- Administration, US Department of Transportation*, 190. <https://doi.org/PB81-156150>
- Bhandari, A., Han, J., & Parsons, R. L. (2015). Two-dimensional DEM analysis of behavior of geogrid-reinforced uniform granular bases under a vertical cyclic load. *Acta Geotechnica*, 10(4), 469–480. <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0299-3>
- Burmister, D. M. (1958). Evaluation of Pavement Systems of the WASHO Road Test by Layered System Methods. *Highway Research Board Bulletin*, (177), 26–54.
- Carter, G. R., & Dixon, J. H. (1995). Oriented polymer grid reinforcement. *Construction and Building Materials*, 9(6), 389–401. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00068-2](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00068-2)
- Cecconi, M., & Russo, G. (2012). Geotechnical Properties of Lime Stabilized Pyroclastic Soils. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17, 2581–2597. <https://doi.org/10893032>
- Chaitanya, D. V. S. ., & Neeharika, P. (2019). Soil Stabilization using Geosynthetic Material (Steel Fibres). *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(6 Special), 553–556. <https://doi.org/10.35940/ijitee.F1114.0486S419>
- Collin, J. G., Kinney, T. C., & Fu, X. (1996). Full Scale Highway Load Test of Flexible Pavement Systems with Geogrid Reinforced Base Courses. *Geosynthetics International*, 3(4), 537–549. <https://doi.org/10.1680/gein.3.0074>
- Cruz, E. (2013). *Influencia De Geomallas En Los Parámetros Mecánicos De Materiales Para Vías Terrestres*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- Cuelho, E. V., & Perkins, S. W. (2017). Geosynthetic subgrade stabilization – Field testing and design method calibration. *Transportation Geotechnics*, 10, 22–34. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.10.002>
- DANE. Censo general 2005 (2005).
- Das, B. M. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. (S. R. Cervantes González & O. A. Ramírez Rosas, Eds.) (7 edición). Mexico.
- Das, B. M. (2016). Use of geogrid in the construction of railroads. *Innovative Infrastructure Solutions*, 1(1), 15. <https://doi.org/10.1007/s41062-016-0017-8>
- Delgado Gómez, P. (2019). La reestructuración que necesita el transporte de carga. Retrieved May 2, 2020, from <https://www.elespectador.com/economia/la-reestructuracion-que-necesita-el-transporte-de-carga-articulo-853987>
- Departamento Nacional de Planeación. Mejoramiento de vías terciarias - vías de tercer orden (2018). Bogota: Subdirección Territorial y de Inversiones Públicas.
- Douglas, R. A., & Valsangkar, A. J. (1992). Unpaved geosynthetic-built resource access roads: Stiffness rather than rut depth as the key design criterion. *Geotextiles and Geomembranes*, 11(1), 45–59. [https://doi.org/10.1016/0266-1144\(92\)90012-Y](https://doi.org/10.1016/0266-1144(92)90012-Y)

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

- Elleboudy, A. M., Saleh, N. M., & Salama, A. G. (2017). Assessment of geogrids in gravel roads under cyclic loading. *Alexandria Engineering Journal*, 56(3), 319–326. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.09.023>
- Fabbri, A., Soudani, L., McGregor, F., & Morel, J.-C. (2019). Analysis of the water absorption test to assess the intrinsic permeability of earthen materials. *Construction and Building Materials*, 199, 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.014>
- Faiz, A. (2012). The Promise of Rural Roads. *The Promise of Rural Roads*, (September). <https://doi.org/10.17226/22711>
- Fannin, R. J., & Sigurdsson, O. (1996). Field Observations on Stabilization of Unpaved Roads with Geosynthetics. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(7), 544–553. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:7\(544\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:7(544))
- Fernando, D., Téllez, O., & Montejó, F. (2016). Evaluación del comportamiento mecánico de una estructura bicapa , reforzada con geomalla biaxial , compuesta por afirmado INVÍAS sobre subrasante blanda , aplicable a vías no pavimentadas Evaluation of the mechanical behavior of a bilayer structure , rein. *XV CONGRESO COLOMBIANO DE GEOTECNIA & II CONFERENCIA INTERNACIONAL ESPECIALIZADA EN ROCAS BLANDAS. CARTAGENA 5 AL 7 DE OCTUBRE DE 2016.*
- Geiger, D. R. (2003). *Economic Analysis Primer: Benefit-Cost Analysis*. (Federal Highway Administration's, Ed.) (1st ed.). U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Office of Asset Management.
- Geosynthetic Materials Association. (2000). *Geosynthetic Reinforcement of the Aggregate Base/Subbase Courses of Pavement Structures*. (AASHTO Committee 4E, Ed.) (2nd ed.). Roseville.
- Giroud, J., Ah-Line, C., & Bonaparte, R. (1984). Design of unpaved roads with TENAX geogrids. *Telford (Thomas) Limited*, 116–127.
- Giroud, J. P., & Han, J. (2004a). Design method for geogrid-reinforced unpaved roads. I. Development of design method. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(8), 775–786. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:8\(775\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:8(775))
- Giroud, J. P., & Han, J. (2004b). Design Method for Geogrid-Reinforced Unpaved Roads. II. Calibration and Applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(8), 787–797. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:8\(787\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:8(787))
- Giroud, J. P., & Han, J. (2012). The Giroud-Han design method for geosynthetic-reinforced unpaved roads. *Geosynthetics*, 30(1), 40–49.
- Giroud, J. P., & Noiray, L. (1981). Geotextile-reinforced unpaved road design. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 107(9), 1233–1254. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(82\)90853-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(82)90853-1)

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

- Gmbh, N., & Kg, C. (2011). Geo-Frontiers 2011 © ASCE 2011 2917. *Prevention*, 2917–2927.
- Góngora, I. A. G., & Palmeira, E. M. (2012). Influence of fill and geogrid characteristics on the performance of unpaved roads on weak subgrades. *Geosynthetics International*, 19(2), 191–199. <https://doi.org/10.1680/gein.2012.19.2.191>
- Gonzales Bell, J. (2018). Colombia ocupa el puesto 97 en conectividad de carreteras según el Foro Económico Mundial. Retrieved August 18, 2019, from <https://www.larepublica.co/especiales/especial-infraestructura/colombia-ocupa-el-puesto-97-en-conectividad-de-carreteras-segun-el-foro-economico-mundial-2795752>
- Hammit, G. M. (1970). *Thickness Requirements For Unsurfaced Roads and Airfields, Bare Base Support Project 3782-65*. (U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Ed.) (2nd ed.). Vicksburg, Mississippi: Chief of Engineers and U. S. Air Force.
- Han, J. (2013). Design of Planar Geosynthetic-Improved Unpaved and Paved Roads. In *Pavement and Geotechnical Engineering for Transportation* (pp. 31–41). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784412817.003>
- Han, J., & Thakur, J. K. (2012). Use of Geosynthetics to Stabilize Recycled Aggregates in Roadway Construction. In *ICSDEC 2012* (pp. 473–480). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784412688.057>
- Holtz, R. D., Christopher, B. R., & Berg, R. R. (2008). *Geosynthetic Design & Construction Guidelines Reference Manual*. (U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Ed.) (FHWA NHI-0). Washington, D.C.: Institute, National Highway.
- Horton, M., Mazurowski, P., & Oliver, T. (2019). Incorporation of the Influence of Hexagonal Stabilisation Geogrids into Mechanistic-Empirical Pavement Design Method (pp. 165–179). https://doi.org/10.1007/978-981-13-6713-7_14
- Hu, Y. (2008). Study on Relationship Between Wheel Load and Rut Depth of Geogrid-Reinforced Unpaved Road. In *Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation* (pp. 642–647). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-79846-0_80
- Huang, B., & Wu, H. (2009). *Ensayo de laboratorio de desempeño de geomallas utilizando un equipo de ensayos de ruedas con cargas*. Centro de Investigación del Transporte Universidad de Tennessee. Tennessee.
- HUFENUS, R., RUEEGGER, R., BANJAC, R., MAYOR, P., SPRINGMAN, S., & BRONNIMANN, R. (2006). Full-scale field tests on geosynthetic reinforced unpaved roads on soft subgrade. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(1), 21–37. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2005.06.002>
- Instituto Nacional de Vías. Análisis de Precios Unitarios, Gobierno de Colombia § (2019). Bogota, Colombia: Mintransporte.

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

- Jarrett, P. M. (1984). Evaluation of Geogrids for Construction of Roadways Over Muskeg. Jarrett, P. M. (1984). Evaluation of Geogrids for Construction of Roadways Over Muskeg. Royal Military Coll of Canada, 149–153. *Royal Military Coll of Canada*, 149–153.
- Jeon, H.-Y. (2010). Evaluation of long-term behaviours of geogrids: a review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 163(4), 189–195. <https://doi.org/10.1680/grim.2010.163.4.189>
- Jrade, A., & Alkass, S. (2007). Computer-Integrated System for Estimating the Costs of Building Projects. *Journal of Architectural Engineering*, 13(4), 205–223. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0431\(2007\)13:4\(205\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0431(2007)13:4(205))
- Kawalec, J., Gołos, M., & Mazurowski, P. (2018). Environmental aspects of the implementation of geogrids for pavement optimisation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 356, 12018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/356/1/012018>
- Keller, G. R. (2016a). Application of geosynthetics on low-volume roads. *Transportation Geotechnics*, 8, 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.04.002>
- Keller, G. R. (2016b). Application of geosynthetics on low-volume roads. *Transportation Geotechnics*, 8, 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.04.002>
- Kodicherla, S. P. K., & Nandyala, D. K. (2019). Influence of randomly mixed coir fibres and fly ash on stabilization of clayey subgrade. *International Journal of Geo-Engineering*, 10(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s40703-019-0099-1>
- Koerner, R. M. (2012). *Designing with geosynthetics* (Sexta Edic). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Koslanant, S., Onitsuka, K., & Negami, T. (2006). Influence of salt additive in lime stabilization on organic clay. *Geotechnical Engineering*, 37(2), 95–101. <https://doi.org/00465828>
- Latha, G., Nair, A., & Hemalatha, M. (2010). Performance of geosynthetics in unpaved roads. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 4(3), 337–349. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2010.04.03.337-349>
- Lawton, E. C., Mokashi, A. A., & Fox, N. S. (1996). Field Tests and Numerical Analyses of Subgrade Soil Reinforced with Grids of Stabilized Granular Columns. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1534(1), 72–79. <https://doi.org/10.1177/0361198196153400111>
- Leite Gembus, F., & Thesseling, B. (2015). Polyester geogrids as asphalt reinforcement - a sustainable solution for pavement rehabilitation. *Huesker Syntethic GmbH*. <https://doi.org/10.1201 / b18538-91>
- Leng, J., & Gabr, M. A. (2006). Deformation–Resistance Model for Geogrid-Reinforced Unpaved Road. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1975(1), 146–154. <https://doi.org/10.1177/0361198106197500116>

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

- Leu, W., State, D., Engineer, A. I. D., Tasa, L., State, D., & Engineer, A. I. D. (2001). Applications of geotextiles, geogrids, and geocells in Northern Minnesota. *Conferencia de Geosintéticos 2001; Portland, Oregon*, 809–821.
- Lipomi, D., & Wayne, M. H. (2014). Geosynthetic Solutions for Paved and Unpaved Applications. In *Shale Energy Engineering 2014* (pp. 565–575). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784413654.059>
- Liu, C.-N., Zornberg, J. G., Chen, T.-C., Ho, Y.-H., & Lin, B.-H. (2009). Behavior of Geogrid-Sand Interface in Direct Shear Mode. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(12), 1863–1871. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000150](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000150)
- Liu, L., Wehbe, G., & Sisovic, J. (2010). The Accuracy of Hybrid Estimating Approaches: A Case Study of an Australian State Road & Traffic Authority. *The Engineering Economist*, 55(3), 225–245. <https://doi.org/10.1080/0013791X.2010.502962>
- Lyons, C. K., & Fannin, J. (2006a). A comparison of two design methods for unpaved roads reinforced with geogrids. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(12), 1389–1394. <https://doi.org/10.1139/t06-075>
- Lyons, C. K., & Fannin, J. (2006b). A comparison of two design methods for unpaved roads reinforced with geogrids. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(12), 1389–1394. <https://doi.org/10.1139/t06-075>
- Maaitah, O. N. (2012). Soil Stabilization by Chemical Agent. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(6), 1345–1356. <https://doi.org/10.1007/s10706-012-9549-7>
- Marto, A., Latifi, N., & Sohaei, H. (n.d.). *Stabilization of Laterite Soil using GKS Soil Stabilizer*.
- Maubeuge, K. v., & Klompmaker, J. (2011). New Developments for Geogrid Reinforced Base Courses. In *Geo-Frontiers 2011* (pp. 4624–4634). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)473](https://doi.org/10.1061/41165(397)473)
- Mexichem Soluciones Integrales. (2012). *Manual de Diseño con Geosintéticos*. (Geosoft Pavco, Ed.) (9th ed.). Bogotá.
- Millien, A., Dragomir, M. L., Wendling, L., Petit, C., & Iliescu, M. (2012). Geogrid Interlayer Performance in Pavements: Tensile-Bending Test for Crack Propagation. In *7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements* (pp. 1209–1218). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4566-7_115
- Milligan, G. W. E., Jewell, R. A., Housby, G. ., & Burd, H. J. (1989). New approach to the design of unpaved roads - part I. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 26(6), 25–29. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(89\)91753-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(89)91753-1)
- Milligan, G. W. E., & Love, J. P. (1984). Model Testing of Geogrids Under an Aggregate Layer on Soft Ground. In N. L. Science & Engineering Research Council, Swindon, Engl (Ed.)

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

(pp. 128–138). England: Engl, Thomas Telford, Londres, Engl.

Mishra, S., Sachdeva, S. N., & Manocha, R. (2019). Subgrade Soil Stabilization Using Stone Dust and Coarse Aggregate: A Cost Effective Approach. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5(3), 20. <https://doi.org/10.1007/s40891-019-0171-0>

Montejo Fonseca, A. (2002). *www.litecsa.com.ec 2587713*. (A. Montejo Fonseca, Ed.) (II Edición). Bogotá: Universidad Católica de Colombia.

Mousavi, S. H., Gabr, M. A., & Borden, R. H. (2017). Optimum location of geogrid reinforcement in unpaved road. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(7), 1047–1054. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0562>

Nader Ghafoori, Ph.D., P. ., & Sharbaf, M. (2016). *Use of GEOGRID for Strengthening and Reducing the Roadway Structural Sections*. Las Vegas.

Orrego Cabanillas, D. A. (2014). *Análisis técnico-económico del uso de geomallas como refuerzo de bases granulares en pavimentos flexibles*. Pontificia Universidad Católica del Perú.

Otero Téllez, D. F., & Montejo Ochoa, F. (2016). *Evaluación del comportamiento mecánico de una estructura bicapa, reforzada con geomalla biaxial, compuesta por afirmado invías sobre subrasante blanda, aplicable a vías no pavimentadas*. Pontificia Universidad Javeriana.

Pacheco-Torres, R., & Varela, F. (2019). Mechanical performance of cement-stabilised soil containing recycled glass as road base layer. *Road Materials and Pavement Design*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1602073>

Palmeira, E. M., & Antunes, L. G. S. (2010). Geosynthetic reinforced unpaved road performance after surface maintenance. *9th International Conference on Geosynthetics - Geosynthetics: Advanced Solutions for a Challenging World, ICG 2010*, (May 2010), 1457–1460.

Palmeira, E. M., & Antunes, L. G. S. (2010). Large scale tests on geosynthetic reinforced unpaved roads subjected to surface maintenance. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(6), 547–558. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2010.03.002>

Palmeira, E., & Tatsuoka, F. (2008). Advances in geosynthetics materials and applications for soil reinforcement and environmental protection works. *Electron J Geotech ...*

Perkins, S. W. (1999). *Geosynthetic Reinforcement of Flexible Pavements: Laboratory Based Pavement Test Sections*. Bozeman. <https://doi.org/FHWA/MT-99-001/8138>

Perkins, S. W., & Ismeik, M. (1997). A Synthesis and Evaluation of Geosynthetic-Reinforced Base Layers in Flexible Pavements- Part II. *Geosynthetics International*, 4(6), 605–621. <https://doi.org/10.1680/gein.4.0107>

Qian, Y., Han, J., Pokharel, S. K., & Parsons, R. L. (2011). Stress Analysis on Triangular-

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

- Aperture Geogrid-Reinforced Bases over Weak Subgrade under Cyclic Loading. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2204(1), 83–91. <https://doi.org/10.3141/2204-11>
- Rahman, M. A., Arulrajah, A., Piratheepan, J., Bo, M. W., & Imteaz, M. A. (2014). Effect of Geogrids on Interface Shear Strength Properties of Recycled Crushed Brick. In *Geo-Congress 2014 Technical Papers* (pp. 3615–3624). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784413272.350>
- Raymond, G., & Ismail, I. (2003). The effect of geogrid reinforcement on unbound aggregates. *Geotextiles and Geomembranes*, 21(6), 355–380. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(03\)00044-X](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(03)00044-X)
- Rimoldi, P., & Korulla, M. (2019). Design Model for Strength and Location of Geogrids for Road Stabilization (pp. 153–165). Pendergrass, Georgia: TenCate Geosynthetics Americas. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6701-4_9
- Sadık Bakır, B., & Tolga Yılmaz, M. (2006). Discussion of “Subsurface Characterization at Ground Failure Sites in Adapazari, Turkey” by Jonathan D. Bray, Rodolfo B. Sancio, Turan Durgunoglu, Akin Onalp, T. Leslie Youd, Jonathan P. Stewart, Raymond B. Seed, Onder K. Cetin, Ertan Bol, M. B. Baturay, . *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(4), 537–539. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:4\(537\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:4(537))
- Salcedo Rodriguez, C. (2019). Del total de la red vial terciaria con la que cuenta Colombia, 96% está en mal estado. Retrieved August 17, 2019, from <https://www.larepublica.co/infraestructura/del-total-de-la-red-vial-terciaria-con-la-que-cuenta-colombia-96-esta-en-mal-estado-2828335>
- Sánchez, M., Wang, D., Briaud, J.-L., & Douglas, C. (2014). Typical geomechanical problems associated with railroads on shrink-swell soils. *Transportation Geotechnics*, 1(4), 257–274. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.07.002>
- Saride, S., Chikyala, S. R., Puppala, A. J., & Harris, P. J. (2010). Effects of Organics on Stabilized Expansive Subgrade Soils. In *Ground Improvement and Geosynthetics* (pp. 155–164). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/41108\(381\)21](https://doi.org/10.1061/41108(381)21)
- Sharma, R., Chen, Q., Abu-Farsakh, M., & Yoon, S. (2009). Analytical modeling of geogrid reinforced soil foundation. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(1), 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.07.002>
- Sieira, A. C. C. F., Gerscovich, D. M. S., & Sayão, A. S. F. J. (2009). Displacement and load transfer mechanisms of geogrids under pullout condition. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(4), 241–253. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.11.012>
- Sigurdsson, O. (1993). *Geosynthetics Stabilization of Unpaved Roads on Soft Ground: a Field Evaluation*. B.Sc., *The Technical College of Iceland, 1991*. The University of British Columbia.

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

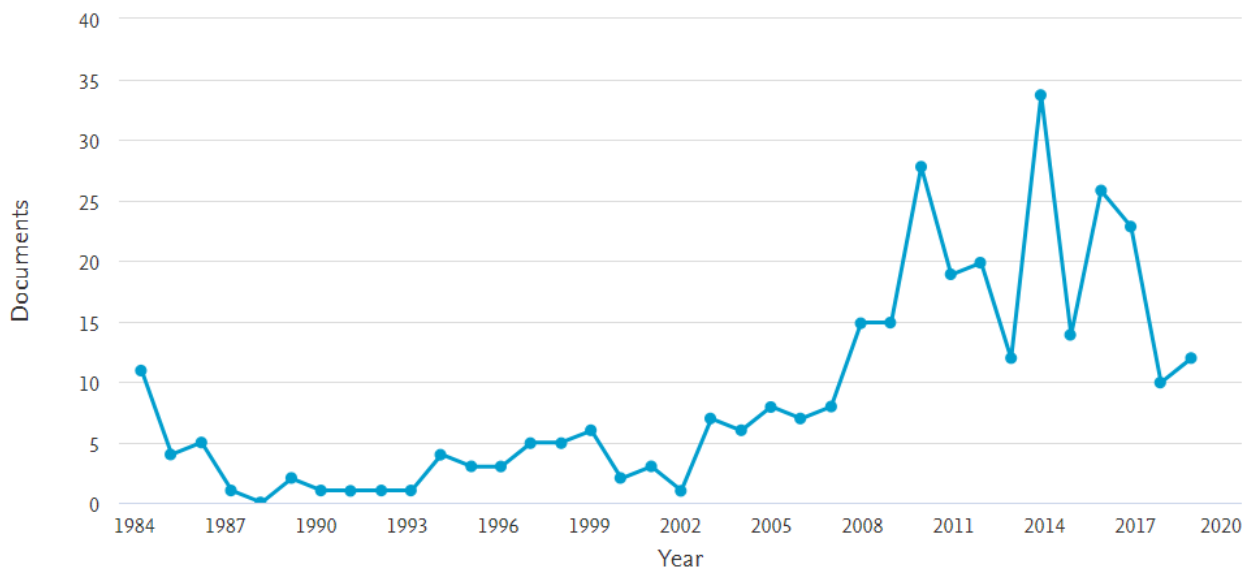
- Singh, M., Trivedi, A., & Shukla, S. K. (2019). Strength enhancement of the subgrade soil of unpaved road with geosynthetic reinforcement layers. *Transportation Geotechnics*, 19, 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.01.007>
- Som, N., & Sahu, R. B. (1999). Bearing Capacity of a Geotextile-Reinforced Unpaved Road as a Function of Deformation: A Model Study. *Geosynthetics International*, 6(1), 1–17. <https://doi.org/10.1680/gein.6.0140>
- Sprague, C. J., Lothspeich, S., Chuck, F., & Goodrum, R. (2004). Geogrid Reinforcement of Road Base Aggregate — Measuring the Confinement Benefit. In *Geotechnical Engineering for Transportation Projects* (pp. 996–1005). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/40744\(154\)87](https://doi.org/10.1061/40744(154)87)
- Sun, X., Han, J., Kwon, J., Parsons, R. L., & Wayne, M. H. (2015). Radial stresses and resilient deformations of geogrid-stabilized unpaved roads under cyclic plate loading tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(5), 440–449. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.04.018>
- Sun, X., Han, J., Wayne, M. H., Parsons, R. L., & Kwon, J. (2014). Experimental Study on Resilient Behavior of Triaxial Geogrid-Stabilized Unpaved Roads. In *Ground Improvement and Geosynthetics* (pp. 353–362). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784413401.035>
- Tabatabaei, S. A., & Rahman, A. (2013). The Effect of Utilization of Geogrids on Reducing the Required Thickness of Unpaved Roads. *Advanced Materials Research*, 712–715, 937–941. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.712-715.937>
- Tang, X., Abu-Farsakh, M., Hanandeh, S., & Chen, Q. (2014). Evaluation of Geosynthetics in Unpaved Roads Built over Natural Soft Subgrade Using Full-Scale Accelerated Pavement Testing. In *Geo-Congress 2014 Technical Papers* (pp. 3035–3043). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784413272.295>
- Tencate. (2014). Application of the Giroud – Han Design Method for Geosynthetic Reinforced Unpaved Roads with TenCate Mirafi® Geosynthetics, (706).
- Tensar, I. (2010). *The properties and performance advantages of Tensar TriAx™ geogrids*. Blackburn.
- Tingle, J. S., & Webster, S. L. (2003). Corps of Engineers Design of Geosynthetic-Reinforced Unpaved Roads. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1849(1), 193–201. <https://doi.org/10.3141/1849-21>
- Vennamaneni, S., Raju Aketi, N., & Paisa, S. (2018). Reduction in Pavement Thickness by Using Geogrid. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.3), 17. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.3.14473>
- Voskamp, W. (2000). Index and Performance Testing a New Geogrid Made of Highly Oriented Straps. In *Advances in Transportation and Geoenvironmental Systems Using Geosynthetics*

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

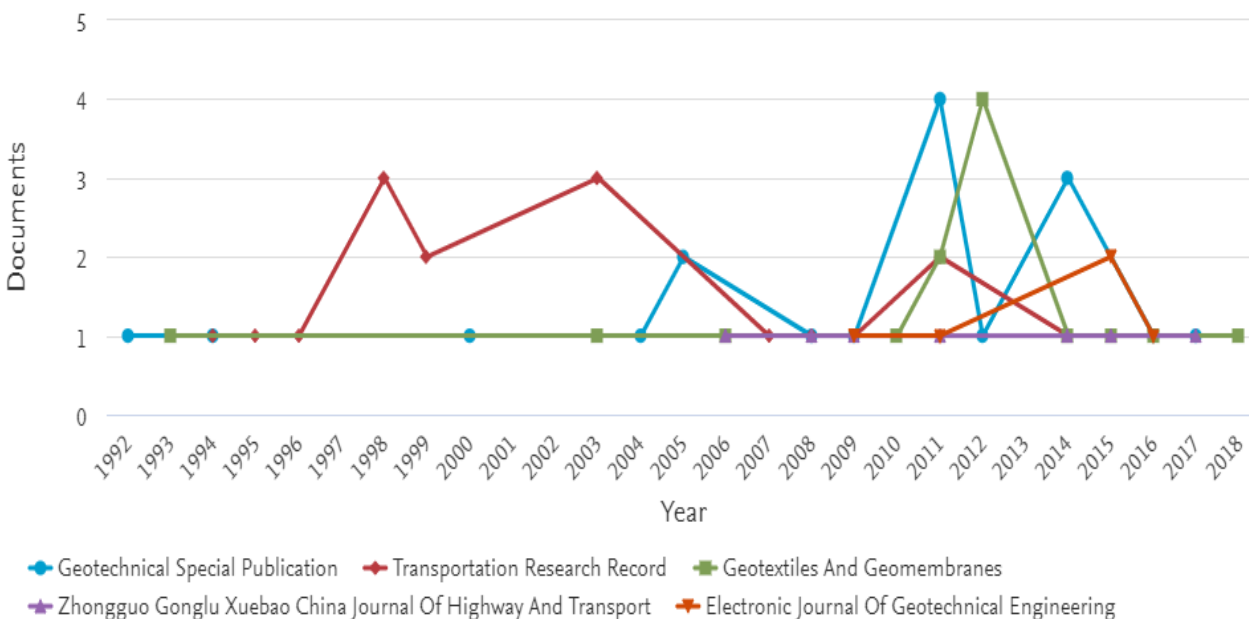
- (pp. 360–372). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
[https://doi.org/10.1061/40515\(291\)24](https://doi.org/10.1061/40515(291)24)
- Webster, S. L. (1993). *Geogrid reinforced base courses for flexible pavements for light aircraft: test section construction, behavior under traffic, laboratory tests, and design criteria*. Vicksburg, Mississippi.
- Yoder, E., & M. W. Witzczak. (1975). *Principles of Pavement Design, Second Edition*. (E. J. (University of M. Yoder, Ed.) (Second). Canada.
- Young, S., Ismail, G., & Chong, A. (2019). Towards innovative design and construction standards for lime stabilised subgrades. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 512, 12028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/512/1/012028>
- Yu, X., & Pradhan, A. (2017). Effect of Particle Shape on Geogrid-Reinforced Granules (pp. 109–116). https://doi.org/10.1007/978-981-10-1926-5_13
- Zhang, J., & Hurta, G. (2008a). Comparison of Geotextile and Geogrid Reinforcement on Unpaved Road, 530–537. [https://doi.org/10.1061/40971\(310\)66](https://doi.org/10.1061/40971(310)66)
- Zhang, J., & Hurta, G. (2008b). Comparison of Geotextile and Geogrid Reinforcement on Unpaved Road. In *GeoCongress 2008* (pp. 530–537). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/40971\(310\)66](https://doi.org/10.1061/40971(310)66)
- Zornberg, J. (2011). Advances in the use of geosynthetics in pavement desing. *Ce.Utexas.Edu*, 1(September), 23–24. <https://doi.org/10.1378/chest.128.2.609>

Anexos

Documents by year

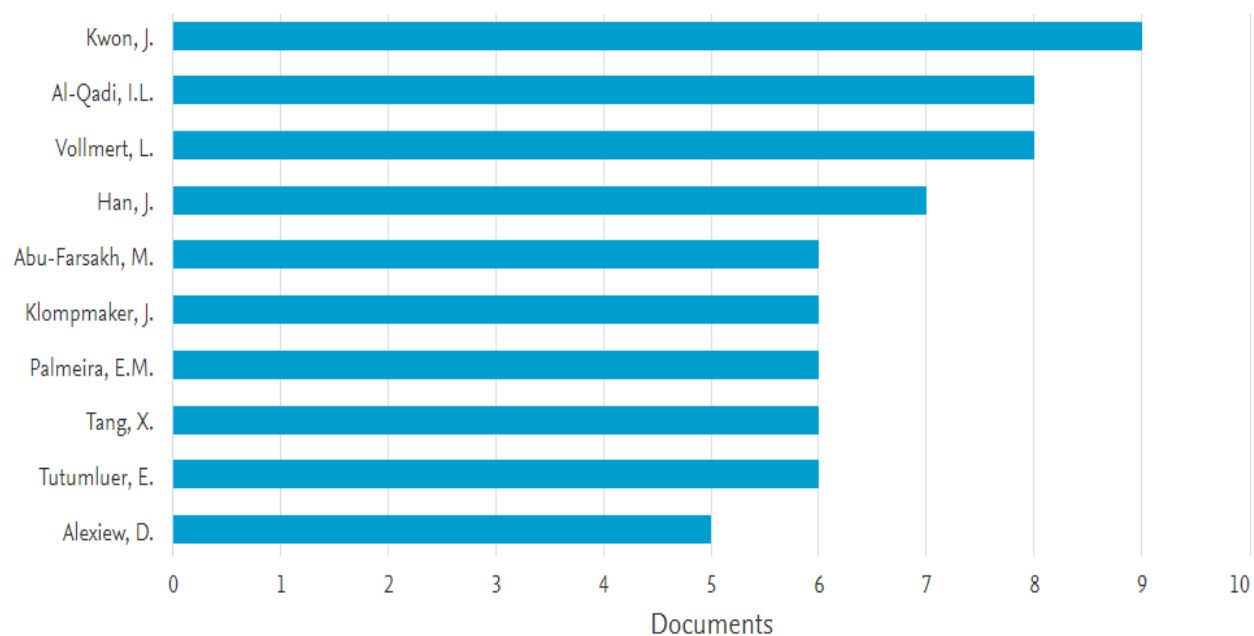


Anexo 1 *Figura 21*. Proyección de tendencia de publicaciones entre los años 1984 y 2019. (Scopus, 2019)

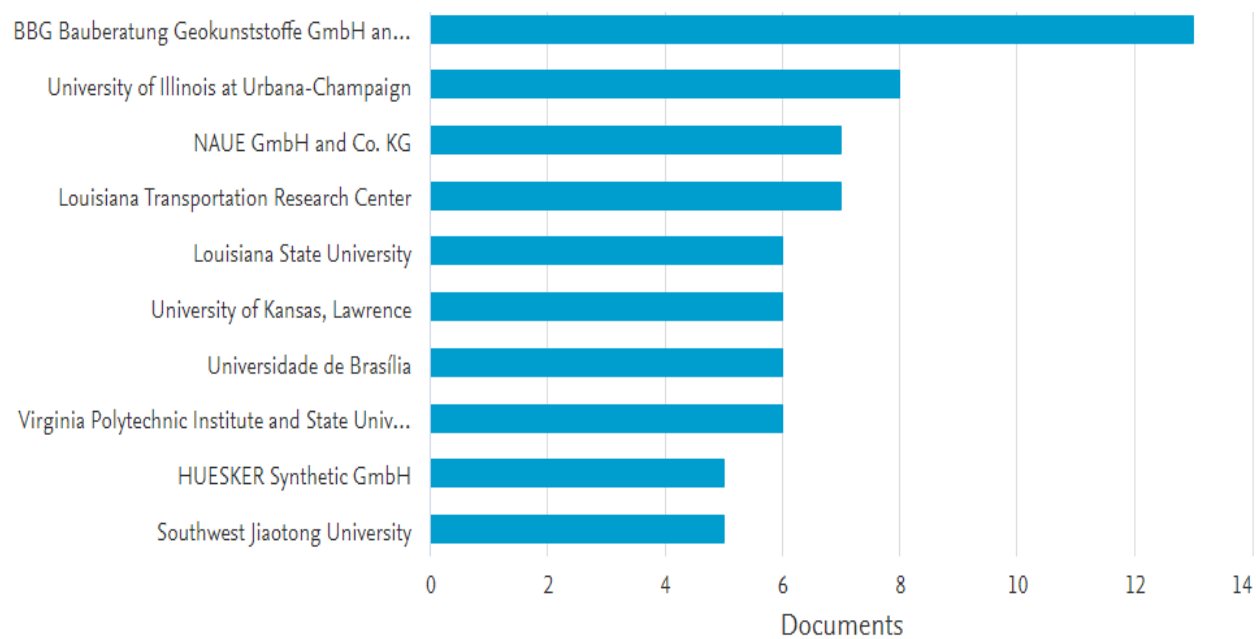


Anexo 2 *Figura 22*. Análisis de la fuente más relevante de la muestra comprendida entre los años 1992 y 2018. (Scopus, 2019).

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

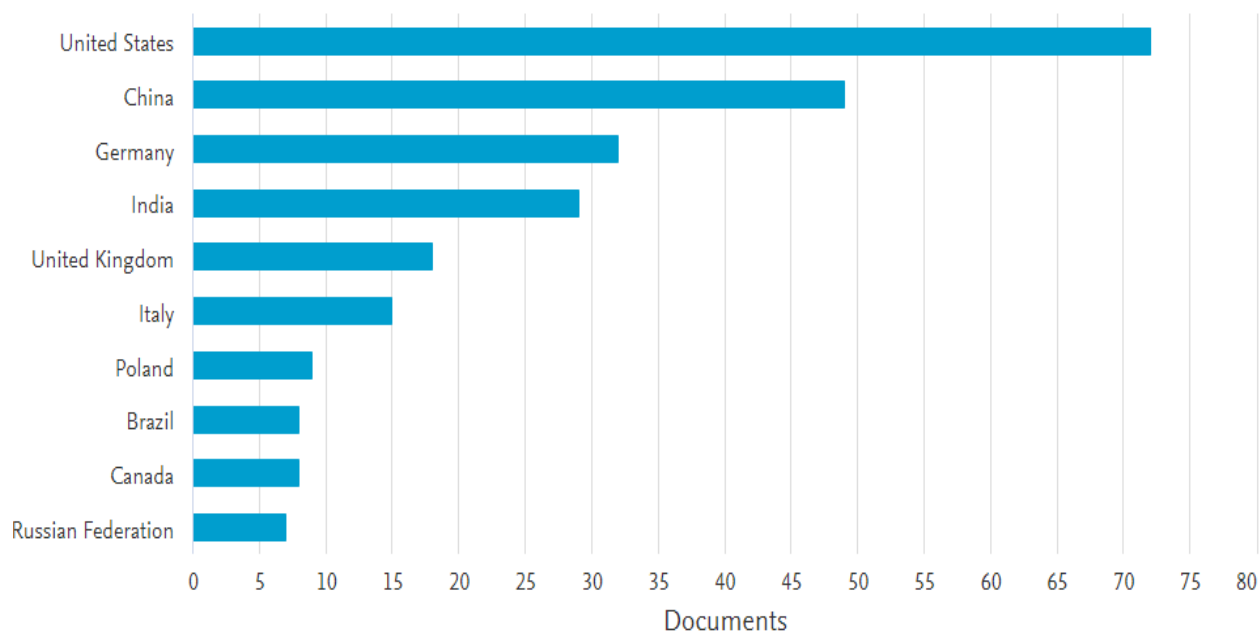


Anexo 3 *Figura 23*. Autores con mayor número de publicaciones en el intervalo 1984 y 2019. (Scopus, 2019).

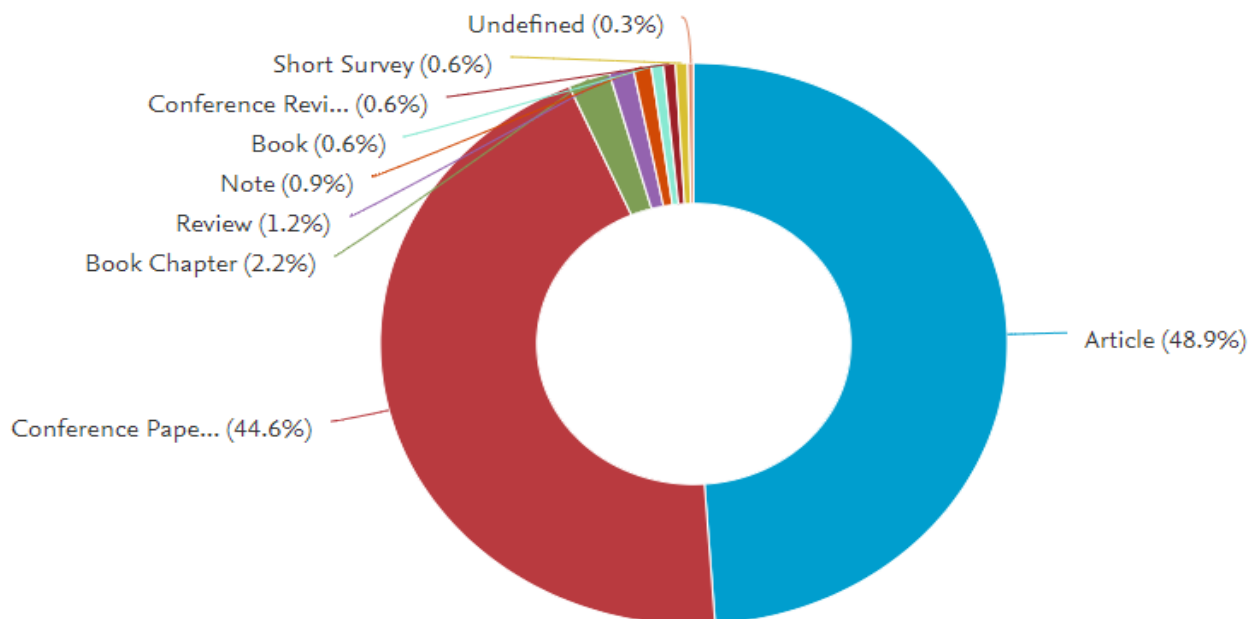


Anexo 4 *Figura 24*. Instituciones con mayor cantidad de publicaciones entre los años 1984 y 2019. (Scopus, 2019).

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

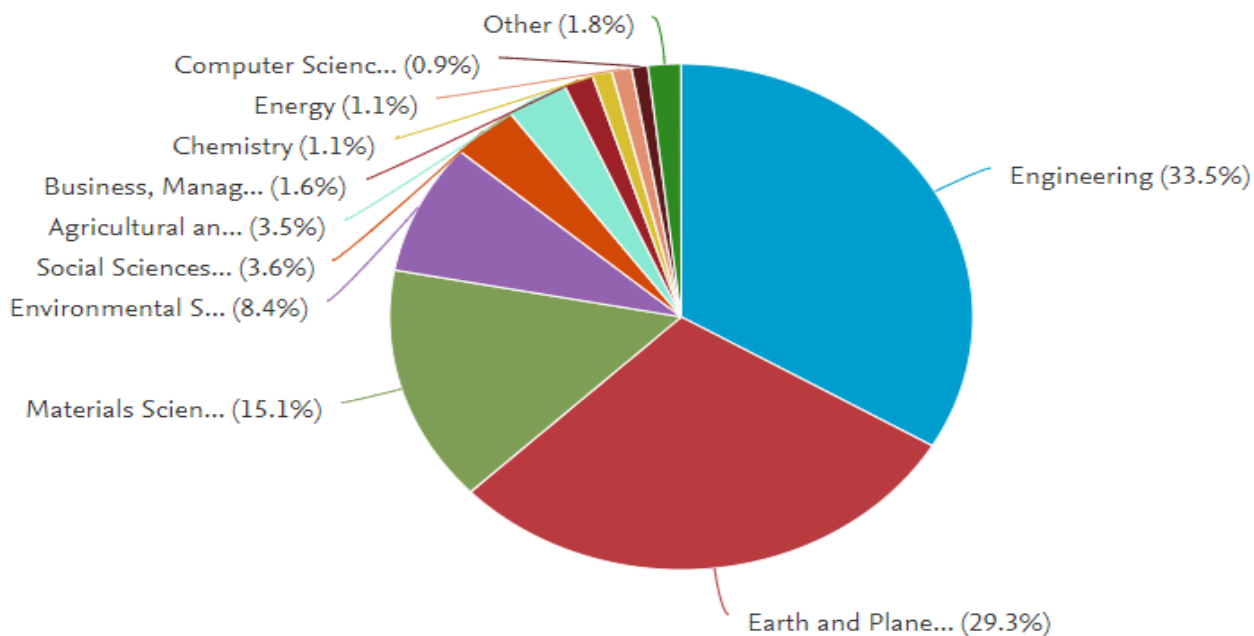


Anexo 5 Figura 25. Análisis por país con mayor cantidad de documentos publicados entre los años 1984 y 2019. (Scopus, 2019).

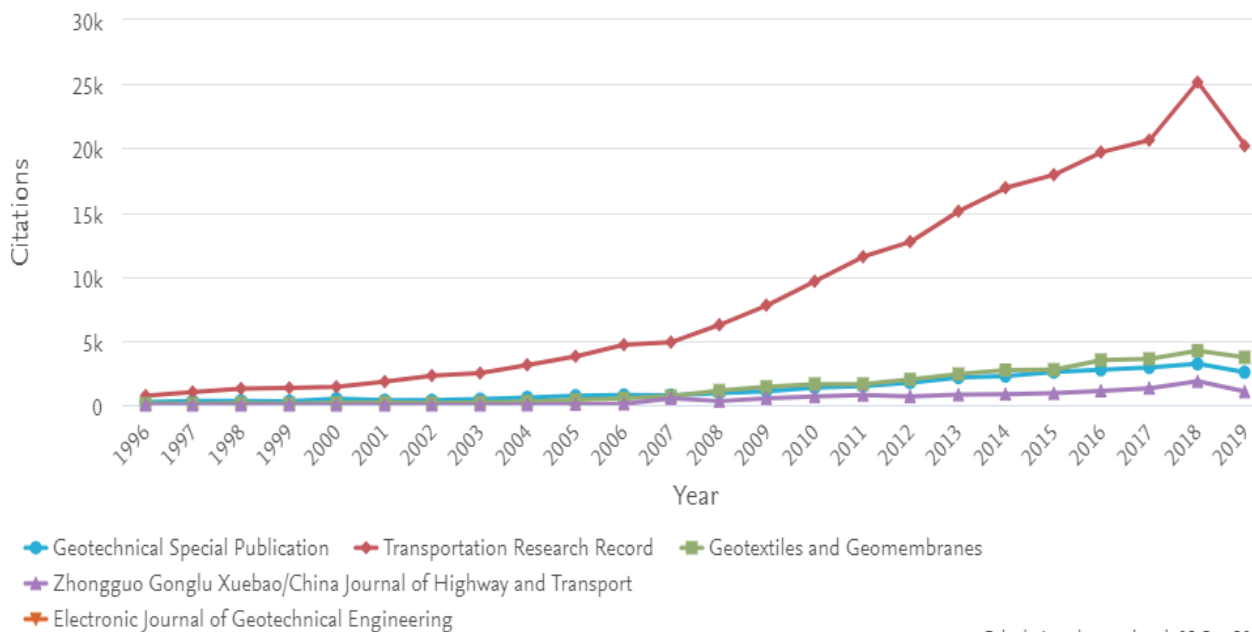


Anexo 6 Figura 26. Tipos de documentos publicados sobre geomallas en carreteras entre los años 1984 y 2019. (Scopus, 2019)

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO



Anexo 7 Figura 27. Temas en los que se publica sobre geomallas en carreteras entre los años 1984 y 2019. (Scopus, 2019).



Anexo 8 Figura 28. Tendencia de la revista con mayor número de publicaciones desde 1996 hasta 2019. (Scopus, 2019)

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

| DATOS ESPECÍFICOS | | | | | | |
|--|---|--------------|------------------|--------------------|--|-------------------|
| ITEM | DESCRIPCIÓN | Ajuste | Unidad | Cantidad | | |
| 236.1 | Subrasante Estabilizada con Cal (incluye suministro de cal) | | m ³ | | | |
| I. EQUIPO | | | | | | |
| DESCRIPCION | | Tarifa/hora | Rendimiento | Vr. Unitario | | |
| Carrotanque de agua (1000 galones) | | \$ 64.103 | 35 | \$ 1.831,51 | | |
| Motoniveladora potencia 215 HP, ancho de cuchilla 4.27 m, peso 18 ton. | | \$ 175.544 | 35 | \$ 5.015,54 | | |
| Vibrocompactador, potencia 153 HP, peso 10 ton. | | \$ 105.327 | 35 | \$ 3.009,34 | | |
| HERRAMIENTA MENOR (%) | | | 2% | 14,53 | | |
| | | | | SUBTOTAL \$ | \$ 9.870,93 | |
| II. MATERIALES | | | | | | |
| DESCRIPCION | | Unidad | Cantidad | Precio Unit. | Vr. Unitario | |
| Cal | | kg | 80 | \$ 1.200 | \$ 96.000 | |
| Agua | | Lt | 25 | \$ 82,00 | \$ 2.050 | |
| | | | | SUBTOTAL \$ | \$ 98.050 | |
| III. TRANSPORTES | | | | | | |
| MATERIAL | Unidad | Cantidad (1) | Distancia (2) | (1) * (2) | Tarifa | Vr. Unitario |
| | | | | | | |
| | | | | SUBTOTAL \$ | | |
| IV. MANO DE OBRA | | | | | | |
| TRABAJADOR | | Jornal | Prestaciones (%) | Jornal Total | Rendimiento | Vr. Unitario |
| Oficial | | \$ 54.987 | 185 | \$ 101.729 | 280 | \$ 363,32 |
| Obrero (2) | | \$ 54.987 | 185 | \$ 101.729 | 280 | \$ 363,32 |
| | | | | SUBTOTAL \$ | | 726,64 |
| | | | | | TOTAL COSTO DIRECTO \$ | 108.647,57 |
| V. COSTOS INDIRECTOS | | | | | | |
| Descripción | | Porcentaje | Valor Total | | | |
| ADMINISTRACION | | 20% | 21.729,51 | | | |
| IMPREVISTOS | | 5% | 5.432,38 | | | |
| UTILIDAD | | 5% | 5.432,38 | | | |
| | | | | SUBTOTAL \$ | 32.594,27 | |
| | | | | | Precio Unitario Total Aproximado al Peso \$ | 141.242 |

Anexo 9 Figura 29. Análisis precios unitarios, estabilización con cal (INVIAS, 2019)

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

| DATOS ESPECÍFICOS | | | | | | |
|--|---|--------------|------------------|--|---------------|--------------|
| ITEM | DESCRIPCION | Ajuste | Unidad | Cantidad | | |
| 235.1 | Subrasante Estabilizada con Cemento (incluye suministro de cemento) | | m ² | | | |
| I. EQUIPO | | | | | | |
| DESCRIPCION | | Tarifa/hora | Rendimiento | Vr. Unitario | | |
| Carrotanque de agua (1000 galones) | | \$ 64.103 | 35 | \$ 1.831,51 | | |
| Motoniveladora potencia 215 HP, ancho de cuchilla 4.27 m, peso 18 ton. | | \$ 175.544 | 35 | \$ 5.015,54 | | |
| Vibrocompactador, potencia 153 HP, peso 10 ton. | | \$ 105.327 | 35 | \$ 3.009,34 | | |
| HERRAMIENTA MENOR (%) | | | 2% | 14,53 | | |
| | | | | SUBTOTAL \$ | \$ 9.870,93 | |
| II. MATERIALES | | | | | | |
| DESCRIPCION | | Unidad | Cantidad | Precio Unit. | Vr. Unitario | |
| Agua | | Lt | 25 | \$ 82 | \$ 2.050 | |
| Cemento gris | | Kg | 80 | \$ 591,00 | \$ 47.280 | |
| | | | | SUBTOTAL \$ | \$ 49.330 | |
| III. TRANSPORTES | | | | | | |
| MATERIAL | Unidad | Cantidad (1) | Distancia (2) | (1) * (2) | Tarifa | Vr. Unitario |
| | | | | | | |
| | | | | SUBTOTAL \$ | | |
| IV. MANO DE OBRA | | | | | | |
| TRABAJADOR | | Jornal | Prestaciones (%) | Jornal Total | Rendimiento | Vr. Unitario |
| Oficial | | \$ 54.987 | 185 | \$ 101.729 | 280 | \$ 363,32 |
| Obrero (2) | | \$ 54.987 | 185 | \$ 101.729 | 280 | \$ 363,32 |
| | | | | SUBTOTAL \$ | 726,64 | |
| | | | | TOTAL COSTO DIRECTO \$ | 59.927,57 | |
| V. COSTOS INDIRECTOS | | | | | | |
| Descripción | | Porcentaje | Valor Total | | | |
| ADMINISTRACION | | 20% | 11.985,51 | | | |
| IMPREVISTOS | | 5% | 2.996,38 | | | |
| UTILIDAD | | 5% | 2.996,38 | | | |
| | | | | SUBTOTAL \$ | 17.978,27 | |
| | | | | Precio Unitario Total Aproximado al Peso \$ | 77.906 | |

Anexo 10 *Figura 30*. Análisis precios unitarios, estabilización con cemento (INVIAS, 2019)

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

| DATOS ESPECÍFICOS | | | | | | |
|--|---|------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|
| ITEM | DESCRIPCIÓN | Ajuste | Unidad | Cantidad | | |
| 236.1 | Subrasante Estabilizada con Silicato de Sodio | | m ³ | | | |
| I. EQUIPO | | | | | | |
| DESCRIPCIÓN | | Tarifa/hora | Rendimiento | Vr. Unitario | | |
| Carrotanque de agua (1000 galones) | | \$ 64.103 | 35 | \$ 1.831,51 | | |
| Motoniveladora potencia 215 HP, ancho de cuchilla 4.27 m, peso 18 ton. | | \$ 175.544 | 35 | \$ 5.015,54 | | |
| Vibrocompactador, potencia 153 HP, peso 10 ton. | | \$ 105.327 | 35 | \$ 3.009,34 | | |
| HERRAMIENTA MENOR (%) | | | 2% | 14,53 | | |
| SUBTOTAL \$ | | | | \$ 9.870,93 | | |
| II. MATERIALES | | | | | | |
| DESCRIPCIÓN | | Unidad | Cantidad | Precio Unit. | Vr. Unitario | |
| Agua | | Lt | 20 | \$ 82 | \$ 1.640 | |
| Silicato de Sodio (20%) | | Lt | 5 | \$ 10.554 | \$ 52.770 | |
| SUBTOTAL \$ | | | | \$ | 54.410 | |
| III. TRANSPORTES | | | | | | |
| MATERIAL | Unidad | Cantidad (1) | Distancia (2) | (1) * (2) | Tarifa | Vr. Unitario |
| | | | | | | |
| SUBTOTAL \$ | | | | | | |
| IV. MANO DE OBRA | | | | | | |
| TRABAJADOR | Jornal | Prestaciones (%) | Jornal Total | Rendimiento | Vr. Unitario | |
| Oficial | \$ 54.987 | 185 | \$ 101.729 | 280 | \$ 363,32 | |
| Obrero (2) | \$ 54.987 | 185 | \$ 101.729 | 280 | \$ 363,32 | |
| SUBTOTAL \$ | | | | | 726,64 | |
| TOTAL COSTO DIRECTO \$ | | | | | 65.007,57 | |
| V. COSTOS INDIRECTOS | | | | | | |
| Descripción | | Porcentaje | Valor Total | | | |
| ADMINISTRACION | | 20% | 13.001,51 | | | |
| IMPREVISTOS | | 5% | 3.250,38 | | | |
| UTILIDAD | | 5% | 3.250,38 | | | |
| SUBTOTAL \$ | | | | 19.502,27 | | |
| Precio Unitario Total Aproximado al Peso \$ | | | | | 84.510 | |

Anexo 11 *Figura 31*. Análisis precios unitarios, estabilización con Silicato de Sodio (INVIAS, 2019)

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

| DATOS ESPECÍFICOS | | | | | | |
|--|--|------------------|----------------|--------------|----------------|--------------|
| ITEM | DESCRIPCION | Ajuste | Unidad | Cantidad | | |
| 236.1 | Subrasante Estabilizada con Cloruro de Sodio | | m ³ | | | |
| I. EQUIPO | | | | | | |
| DESCRIPCION | | Tarifa/hora | Rendimiento | Vr. Unitario | | |
| Carrotanque de agua (1000 galones) | | \$ 64.103 | 35 | \$ 1.831,51 | | |
| Motoniveladora potencia 215 HP, ancho de cuchilla 4.27 m, peso 18 ton. | | \$ 175.544 | 35 | \$ 5.015,54 | | |
| Vibrocompactador, potencia 153 HP, peso 10 ton. | | \$ 105.327 | 35 | \$ 3.009,34 | | |
| HERRAMIENTA MENOR (%) | | | 2% | 14,53 | | |
| SUBTOTAL \$ | | | | \$ 9.870,93 | | |
| II. MATERIALES | | | | | | |
| DESCRIPCION | | Unidad | Cantidad | Precio Unit. | Vr. Unitario | |
| Agua | | Lt | 25 | \$ 82 | \$ 2.050 | |
| Cloruro de Sodio (360 gr/lit) | | Kg | 9 | \$ 13.500 | \$ 121.500 | |
| SUBTOTAL \$ | | | | \$ 123.550 | | |
| III. TRANSPORTES | | | | | | |
| MATERIAL | Unidad | Cantidad (1) | Distancia (2) | (1) * (2) | Tarifa | Vr. Unitario |
| | | | | | | |
| SUBTOTAL \$ | | | | | | |
| IV. MANO DE OBRA | | | | | | |
| TRABAJADOR | Jornal | Prestaciones (%) | Jornal Total | Rendimiento | Vr. Unitario | |
| Oficial | \$ 54.987 | 185 | \$ 101.729 | 280 | \$ 363,32 | |
| Obrero (2) | \$ 54.987 | 185 | \$ 101.729 | 280 | \$ 363,32 | |
| SUBTOTAL \$ | | | | | 726,64 | |
| TOTAL COSTO DIRECTO \$ | | | | | 134.147,57 | |
| V. COSTOS INDIRECTOS | | | | | | |
| Descripción | | Porcentaje | Valor Total | | | |
| ADMINISTRACION | | 20% | 26.829,51 | | | |
| IMPREVISTOS | | 5% | 6.707,38 | | | |
| UTILIDAD | | 5% | 6.707,38 | | | |
| SUBTOTAL \$ | | | | 40.244,27 | | |
| Precio Unitario Total Aproximado al Peso \$ | | | | | 174.392 | |

Anexo 12 *Figura 32*. Análisis precios unitarios, estabilización con Cloruro de Sodio (INVIAS, 2019)

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

| DATOS ESPECÍFICOS | | | | | | |
|--|--|----------------|------------------|--|--------------|--------------|
| ITEM | DESCRIPCION | Grupode | Unidad | Cantidad | | |
| 223.3.1 | Subrasante Estabilizada Material de Remoción | | m ² | | | |
| I. EQUIPO | | | | | | |
| DESCRIPCION | | Tarifa/hora | Rendimiento | Vr. Unitario | | |
| Carrotanque de agua (1000 galones) | | \$ 64.103 | 35 | \$ 1.831,51 | | |
| Motoniveladora potencia 215 HP, ancho de cuchilla 4.27 m, peso 18 ton. | | \$ 175.544 | 35 | \$ 5.015,54 | | |
| Vibrocompactador, potencia 153 HP, peso 10 ton. | | \$ 105.327 | 35 | \$ 3.009,34 | | |
| HERRAMIENTA MENOR (%) | | | 2% | 14,53 | | |
| | | | | SUBTOTAL \$ 9.870,93 | | |
| II. MATERIALES | | | | | | |
| DESCRIPCION | | Unidad | Cantidad | Precio Unit. | Vr. Unitario | |
| Agua | | Lt | 25 | \$ 82 | \$ 2.050 | |
| Material de remoción | | m ² | 1 | \$ 19.220 | \$ 19.220 | |
| | | | | SUBTOTAL \$ 21.270 | | |
| III. TRANSPORTES | | | | | | |
| MATERIAL | Unidad | Cantidad (1) | Distancia (2) | (1) * (2) | Tarifa | Vr. Unitario |
| Transporte de material de demc | m ² k | 1,00 | 1,00 | 1,00 | \$ 1.255,00 | \$ 1.255,00 |
| | | | | SUBTOTAL \$ 1.255,00 | | |
| IV. MANO DE OBRA | | | | | | |
| TRABAJADOR | | Jornal | Prestaciones (%) | Jornal Total | Rendimiento | Vr. Unitario |
| Oficial | | \$ 54.987 | 185 | \$ 101.729 | 280 | \$ 363,32 |
| Obrero (2) | | \$ 54.987 | 185 | \$ 101.729 | 280 | \$ 363,32 |
| | | | | SUBTOTAL \$ 726,64 | | |
| | | | | TOTAL COSTO DIRECTO \$ 33.122,57 | | |
| V. COSTOS INDIRECTOS | | | | | | |
| Descripción | | Porcentaje | Valor Total | | | |
| ADMINISTRACION | | 20% | 6.624,51 | | | |
| IMPREVISTOS | | 5% | 1.656,13 | | | |
| UTILIDAD | | 5% | 1.656,13 | | | |
| | | | | SUBTOTAL \$ 9.936,77 | | |
| | | | | Precio Unitario Total Aproximado al Peso \$ 43.059 | | |

Anexo 13 *Figura 33*. Análisis precios unitarios, estabilización con material de remoción (INVIAS, 2019)

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

| DATOS ESPECÍFICOS | | | | | | |
|--|---|----------------|------------------|--|--------------|--------------|
| ITEM | DESCRIPCIÓN | Ajuste | Unidad | Cantidad | | |
| 223.3.1 | Subrasante Estabilizada con Piedra Rajón o Canto Rodado | | m ² | | | |
| I. EQUIPO | | | | | | |
| DESCRIPCION | | Tarifa/hora | Rendimiento | Vr. Unitario | | |
| Carrotanque de agua (1000 galones) | | \$ 64.103 | 35 | \$ 1.831,51 | | |
| Motoniveladora potencia 215 HP, ancho de cuchilla 4.27 m, peso 18 ton. | | \$ 175.544 | 35 | \$ 5.015,54 | | |
| Vibrocompactador, potencia 153 HP, peso 10 ton. | | \$ 105.327 | 35 | \$ 3.009,34 | | |
| HERRAMIENTA MENOR (%) | | | 2% | 14,53 | | |
| | | | | SUBTOTAL \$ | | |
| | | | | \$ 9.870,93 | | |
| II. MATERIALES | | | | | | |
| DESCRIPCION | | Unidad | Cantidad | Precio Unit. | Vr. Unitario | |
| Agua | | Lt | 25 | \$ 82 | \$ 2.050 | |
| Piedra rajón o canto rodado | | m ² | 1 | \$ 60.000 | \$ 60.000 | |
| | | | | SUBTOTAL \$ | | |
| | | | | \$ 62.050 | | |
| III. TRANSPORTES | | | | | | |
| MATERIAL | Unidad | Cantidad (1) | Distancia (2) | (1) * (2) | Tarifa | Vr. Unitario |
| Transporte de piedra rajón | m ² k | 1,00 | 1,00 | 1,00 | \$ 1.255,00 | \$ 1.255,00 |
| | | | | SUBTOTAL \$ | | |
| | | | | \$ 1.255,00 | | |
| IV. MANO DE OBRA | | | | | | |
| TRABAJADOR | | Jornal | Prestaciones (%) | Jornal Total | Rendimiento | Vr. Unitario |
| Oficial | | \$ 54.987 | 185 | \$ 101.729 | 280 | \$ 363,32 |
| Obrero (2) | | \$ 54.987 | 185 | \$ 101.729 | 280 | \$ 363,32 |
| | | | | SUBTOTAL \$ | | |
| | | | | 726,64 | | |
| | | | | TOTAL COSTO DIRECTO \$ | | |
| | | | | 73.902,57 | | |
| V. COSTOS INDIRECTOS | | | | | | |
| Descripción | | Porcentaje | Valor Total | | | |
| ADMINISTRACION | | 20% | 14.780,51 | | | |
| IMPREVISTOS | | 5% | 3.695,13 | | | |
| UTILIDAD | | 5% | 3.695,13 | | | |
| | | | | SUBTOTAL \$ | | |
| | | | | 22.170,77 | | |
| | | | | Precio Unitario Total Aproximado al Peso \$ | | |
| | | | | 96.073 | | |

Anexo 14 *Figura 34*. Análisis precios unitarios, estabilización con piedra rajón (INVIAS, 2019)

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

| DATOS ESPECÍFICOS | | | | | | |
|--|--|----------------|------------------|--------------|--|--------------------|
| ITEM | DESCRIPCION | | | Ajuste | Unidad | Cantidad |
| 340.1 | Base Estabilizada con Emulsión Asfáltica Tipo BEE-38 | | | | m ² | |
| I. EQUIPO | | | | | | |
| DESCRIPCION | | | | Tarifa/hora | Rendimiento | Vr. Unitario |
| Carrotanque irrigador de asfalto, 1000 galones de capacidad | | | | \$ 87.629 | 30 | \$ 2.920,97 |
| Motoniveladora potencia 140 HP, ancho de cuchilla 3.66 m, peso 11 ton. | | | | \$ 95.843 | 30 | \$ 3.194,77 |
| Vibrocompactador, potencia 153 HP, peso 10 ton. | | | | \$ 105.327 | 30 | \$ 3.510,90 |
| HERRAMIENTA MENOR (%) | | | | | 1% | 8,48 |
| | | | | | SUBTOTAL \$ | \$ 9.635,11 |
| II. MATERIALES | | | | | | |
| DESCRIPCION | | Unidad | Cantidad | Precio Unit. | Vr. Unitario | |
| Material de base (gradación 1) | | m ² | 1,25 | \$ 74.447 | \$ 93.059 | |
| | | | | | SUBTOTAL \$ | \$ 93.059 |
| III. TRANSPORTES | | | | | | |
| MATERIAL | Unidad | Cantidad (1) | Distancia (2) | (1) * (2) | Tarifa | Vr. Unitario |
| Transporte de Material de Base | m ² k | 1,25 | 1,00 | 1,25 | \$ 1.255,00 | \$ 1.568,75 |
| | | | | | SUBTOTAL \$ | \$ 1.568,75 |
| IV. MANO DE OBRA | | | | | | |
| TRABAJADOR | | Jornal | Prestaciones (%) | Jornal Total | Rendimiento | Vr. Unitario |
| Oficial | | \$ 54.987 | 185 | \$ 101.729 | 240 | \$ 423,87 |
| Obrero (2) | | \$ 54.987 | 185 | \$ 101.729 | 240 | \$ 423,87 |
| | | | | | SUBTOTAL \$ | 847,74 |
| | | | | | TOTAL COSTO DIRECTO \$ | 105.110,35 |
| V. COSTOS INDIRECTOS | | | | | | |
| Descripción | | | Porcentaje | Valor Total | | |
| ADMINISTRACION | | | 20% | 21.022,07 | | |
| IMPREVISTOS | | | 5% | 5.255,52 | | |
| UTILIDAD | | | 5% | 5.255,52 | | |
| | | | | | SUBTOTAL \$ | 31.533,11 |
| | | | | | Precio Unitario Total Aproximado al Peso \$ | 136.643 |

Anexo 15 *Figura 35*. Análisis precios unitarios, estabilización con emulsión asfáltica tipo BEE-38 (INVIAS, 2019)

GEOMALLA COMO MATERIAL DE REFUERZO

| DATOS ESPECÍFICOS | | | | | | |
|--|--|----------------|------------------|--|---------------|--------------|
| ITEM | DESCRIPCION | Ajuste | Unidad | Cantidad | | |
| 233.10 | Estabilizacion de Subrasante con Geomalla Biaxial Coextruida BXG-120 | | m ² | | | |
| I. EQUIPO | | | | | | |
| DESCRIPCION | | Tarifa/hora | Rendimiento | Vr. Unitario | | |
| Carrotanque de agua (1000 galones) | | \$ 64.103 | 35 | \$ 1.831,51 | | |
| Motoniveladora potencia 140 HP, ancho de cuchilla 3.66 m, peso 11 ton. | | \$ 95.843 | 35 | \$ 2.738,37 | | |
| Vibrocompactador, potencia 153 HP, peso 10 ton. | | \$ 105.327 | 35 | \$ 3.009,34 | | |
| HERRAMIENTA MENOR (%) | | | 1% | 7,27 | | |
| | | | | SUBTOTAL \$ | \$ 7.586,49 | |
| II. MATERIALES | | | | | | |
| DESCRIPCION | | Unidad | Cantidad | Precio Unit. | Vr. Unitario | |
| Geomalla biaxial coextruida BGX-120 | | m ² | 1,20 | \$ 12.968 | \$ 15.562 | |
| Material de base | | m ² | 1,0 | \$ 33.313 | \$ 33.313 | |
| | | | | SUBTOTAL \$ | \$ 48.875 | |
| III. TRANSPORTES | | | | | | |
| MATERIAL | Unidad | Cantidad (1) | Distancia (2) | (1) * (2) | Tarifa | Vr. Unitario |
| Transporte de material de base | m ² k | 1,25 | 1,00 | 1,25 | \$ 1.255,00 | \$ 1.568,75 |
| | | | | SUBTOTAL \$ | \$ 1.568,75 | |
| IV. MANO DE OBRA | | | | | | |
| TRABAJADOR | | Jornal | Prestaciones (%) | Jornal Total | Rendimiento | Vr. Unitario |
| Oficial | | \$ 54.987 | 185 | \$ 101.729 | 280 | \$ 363,32 |
| Obrero (2) | | \$ 54.987 | 185 | \$ 101.729 | 280 | \$ 363,32 |
| | | | | SUBTOTAL \$ | 726,64 | |
| | | | | TOTAL COSTO DIRECTO \$ | 58.756,48 | |
| V. COSTOS INDIRECTOS | | | | | | |
| Descripción | | | Porcentaje | Valor Total | | |
| ADMINISTRACION | | | 20% | 11.751,30 | | |
| IMPREVISTOS | | | 5% | 2.937,82 | | |
| UTILIDAD | | | 5% | 2.937,82 | | |
| | | | | SUBTOTAL \$ | 17.626,94 | |
| | | | | Precio Unitario Total Aproximado al Peso \$ | 76.383 | |

Anexo 16 *Figura 36*. Análisis precios unitarios, estabilización con geomalla biaxial BXG-120 (INVIAS, 2019)