

MUROS EN SUELO REFORZADO EN LA VÍA DOBLE CALZADA IBAGUÉ – CAJAMARCA – COLOMBIA, UF1, APP GICA

Michael Antonio Romero Guerrero
Ingeniero de soporte técnico Sur América y El Caribe
Magister en Ingeniería Civil con Énfasis en Geotécnica.
PAVCO – BIDIM - WAVIN
michael.romero@wavin.com

RESUMEN

Uno de los principales proyectos de infraestructura vial en Colombia es la construcción de la carretera que conecta Bogotá con Buenaventura. Esta conexión se realizará mediante la construcción de una autopista a doble calzada. Uno de los tramos más importantes de esta carretera es la conexión de Ibagué, con el municipio de Cajamarca donde se planea la construcción de dos nuevos carriles, que complementará la carretera existente.

La nueva calzada tiene longitud 33 km y requiere la construcción de más de 100 estructuras de contención y obras de ampliación y estabilización. Para optimizar estas estructuras y aprovechar los materiales de corte locales, se propone la construcción de muros en el suelo reforzado con geotextil tejido, lo que generará una plataforma de trabajo para la nueva vía en condiciones estables.

La elección del tipo de geosintético que se utilizará en el refuerzo del muro fue de vital importancia para los diferentes análisis de estabilidad, ya que era necesario beneficiarse al máximo la interacción del geosintético con el material de relleno, aprovechado el material de corte del mismo proyecto. También fue importante la instalación del sistema de subdrenaje con la inclusión de geotextiles no tejidos y geocompuestos drenantes, para garantizar la estabilidad de las estructuras a largo plazo.

1. INTRODUCCIÓN

El presente artículo tiene como objeto exponer los estudios, diseños, procesos constructivos, monitoreo y control, realizados para la construcción y operación de los muros en suelo reforzado con geotextil tejido de la UF-1 de la doble calzada Ibagué Cajamarca, una de las vías más importantes en Colombia.

La vía en el tramo entre la ciudad de Ibagué y el municipio de Cajamarca, atraviesa unos terrenos montañosos y ondulados, derivados de la actividad volcánica, con presencia de suelos residuales del batolito de Ibagué y depósitos piroclásticos (cenizas volcánicas) intercalados con suelos aluviales de grandes espesores.

Inicialmente se presentaron diseño de muros en suelo reforzado, los cuales requerían de varios sistemas de estabilización adicional con anclajes pasivos y micropilotes; una vez analizados estos diseños y con el fin de realizar una optimización, contemplando el aprovechamiento de los materiales de corte locales, se propuso la construcción de muros en suelo reforzado con geotextil tejido, variando la geometría del muro, pero eliminando en un gran porcentaje los sistemas de estabilización adicionales.

Debido a la topografía de la zona y el tipo de suelo encontrado como material de fundación. Fue necesario realizar un estudio especial para cada estructura, diseñando muros esbeltos con escalonamiento en el espaldón y caras verticales, los cálculos de estabilidad interna, externa y global, se realizaron partiendo de la caracterización particular para cada estructura, ejecutando ensayos de laboratorio y modelos complejos, en estos análisis se tuvo en cuenta la variabilidad de los materiales de relleno para el muro en suelo reforzado, donde predominaban los materiales muy finos como arenas, limos y arcillas con altos límites líquidos e índices de plasticidad.

2. LOCALIZACIÓN DEL MACROPROYECTO

La doble calzada entre Ibagué y Cajamarca hace parte del proyecto transversal Buenaventura-Cúcuta, eje primordial para la competitividad de Colombia.

El proyecto tiene inicio en el municipio de Ibagué (puente Combeima) en el departamento de Tolima localizado a 40.3 Km de Cajamarca, recorriéndose en un tiempo aproximado de 80 minutos con una velocidad de operación de 30 Km/h, lo cual no favorece en nada los tiempos de desplazamientos tanto de viajeros como de transportadores. La comunicación entre Ibagué y Cajamarca se realiza por una vía existente de dos carriles uno en cada sentido, con características inadecuadas de nivel geométrico, seguridad y movilidad, tal es el caso que en el tramo Ibagué-Boquerón prácticamente no tiene ningún sitio donde se pueda realizar maniobras de adelantamiento.

En la Figura 1 se muestra la localización general del proyecto

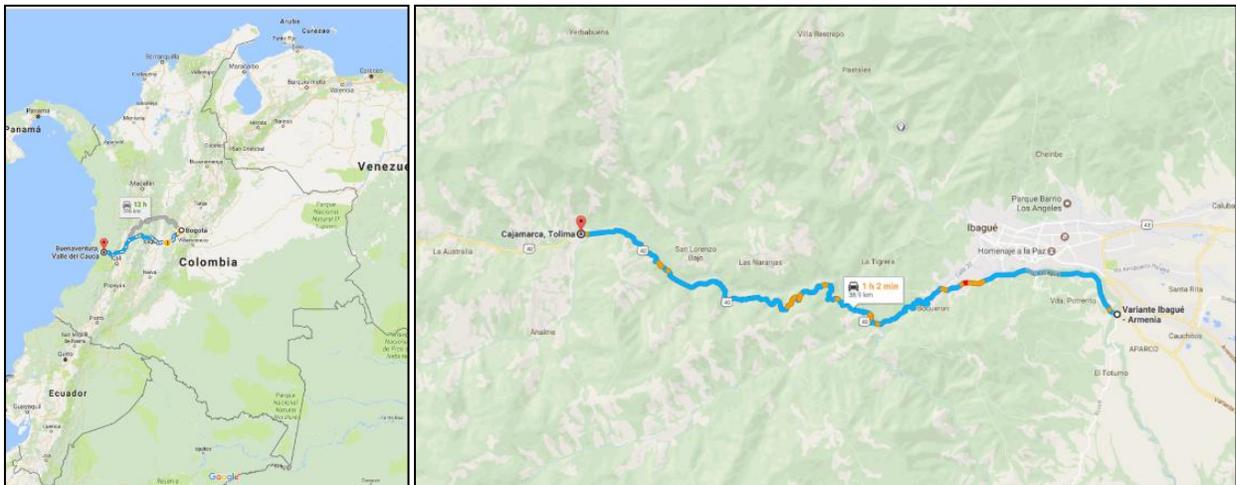


Figura 1. Localización general del proyecto

El proyecto doble calzada Ibagué-Cajamarca se localiza en la parte alta de la Cordillera Central a 1.815 m.s.n.m; presenta una longitud aproximada de 35.1 Km.

El proyecto contempla dos unidades funcionales con cinco tramos:

- **Unidad funcional uno (UF1):** La conforman los tramos 1, 2 y 3.
 - **Unidad funcional dos (UF2):** La conforman los tramos 4 y 5.
 - ✓ **Tramo 1:** se desarrolla en el tramo Combeima-Boquerón consta de 10.8 Km, se plantea una calzada hacia el costado derecho de la vía existente en sentido Ibagué-Cajamarca, la cual tiene su inicio o K0+000 en la intersección Combeima donde se contempla construir un viaducto paralelo al existente, el recorrido atraviesa la intersección Ferias y Boquerón las cuales se van a modificar para que todos los giros se adapten a la nueva vía. la nueva vía continúa hasta llegar a la intersección Boquerón, donde finaliza en el K10+800 aproximadamente.
 - ✓ **Tramo 2:** Se denomina variante Boquerón, esta calzada se plantea hacia el costado derecho de la vía existentes, tiene 1.2 Km.
 - ✓ **Tramo 3:** Este tramo inicia en Boquerón y va hasta el valle del Cocora con aproximadamente 3.2 Km.
 - ✓ **Tramo 4:** el parte desde el valle de Cocora hasta Cajamarca, al igual que el tramo anterior se traza un par vial hacia el costado derecho de la vía existente.
 - ✓ **Tramo 5:** Llamado también paso urbano por Cajamarca, este corredor consta de 2.5 Km, donde se propone una calzada paralela a la vía existente por el costado izquierdo, además de la rehabilitación de la vía existente y el reforzamiento del puente existente de Cajamarca.
- ### 3. MODELO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO DEL MATERIAL DE FUNDACIÓN Y RELLENO PARA LOS MUROS EN SUELO REFORZADO CON GEOTEXTIL TEJIDO.

La UF-1 discurre en su totalidad sobre el denominado Batolito de Ibagué, de edad jurásica, uno de los mayores cuerpos intrusivos aflorantes en el flanco oriental de la Cordillera Central de Colombia. A lo largo del trazado, esta unidad presenta diferentes estados de meteorización desde suelos residuales areno-arcillosos hasta roca levemente a moderadamente sana.

A lo largo de la mayor parte de la Tramo I, el substrato anterior se encuentra cubierto por materiales originados a partir de lahares relacionados con la actividad del Nevado del Tolima durante el Holoceno-Pleistoceno; estos lahares constituyen abanicos de flujos de detritos de origen fluvio-volcánico, formados por cantos y bloques de roca ígnea plutónica, volcánica y metamórfica, se trata casi siempre de gravas y bloques clastosoportados y en ocasiones, matriz soportadas, en una matriz areno-limosa en diferentes grados de cementación y compactación, que se agrupan en la zona de estudio en la unidad denominada Abanico de Ibagué

Finalmente, mencionar la presencia de depósitos aluviales pertenecientes del río Coello y Combeima, así como los depósitos coluviales que cubren parcialmente las laderas. Ambas litologías presentan un carácter marcadamente granular, poco cohesivo; su desarrollo es poco importante y su influencia en los cortes previstos es mínima, como se comenta más adelante.

4. CONDICIONES SISMICAS DEL PROYECTOS DONDE SE CONSTRUYERON LOS MUROS EN SUELO REFORZADO CON GEOTEXTIL TEJIDO

Se ha efectuado un estudio específico de respuesta sísmica local en los emplazamientos de la mayor parte de las estructuras. Nos remitimos a estos documentos como principal referencia para los análisis sísmicos del Proyecto.

En la figura 3.10.2.1-1 del Código Colombiano de Puentes CCP-14, con el Mapa de valores PGA (Aceleración Pico Horizontal del Terreno) se observa como el área de estudio se enmarca dentro de la Región 5, a la que le corresponde un valor de PGA de 0,25. Lo que implica una condición sísmica compleja para estructuras de gran altura. los muros en suelo reforzado con geosintéticos son estructuras flexibles que se adaptan a condiciones sísmicas complejas, dilatando los movimientos y no actuando de forma rígida.

5. RETOS DEL PROYECTO PARA LA CONTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN.

Visto desde cualquier ángulo, la planeación, el diseño y la construcción de este proyecto es todo un reto para la ingeniería. A parte de lidiar con los problemas geotécnicos, sísmicos y sociales era necesarios ajusta presupuestos en todo el proyecto para garantizar la construcción, ya que se trata de una inversión publico privada, es ahí donde la utilización de geosintéticos para la construcción de diferentes obras de ingeniería se convirtió en un elemento vital dentro del proyecto.

La aplicación de geosintéticos dentro del proyectos redujo el costo de las estructuras, aprovechando los materiales de locales, optimizando estructuras de contención, eliminando las cimentaciones profundas de algunas soluciones, facilitando el proceso constructivo y disminuyendo la longitud de los puentes. En la figura 2, se observa la morfología del sitio de obra.



Figura 2. Vista general de la topografía y construcción del Proyecto

6. MATERIALES DE RELLENO PARA LOS MUROS EN SUELO REFORZADO.

Uno de los principales retos del proyecto era poder utilizar los materiales de corte locales. En Colombia para las estructuras de contención en suelo reforzado es necesario cumplir con las especificaciones constructivas de rellenos estructurales del INVIAS.

Debido a las características y condiciones especiales del proyecto, donde era necesario aprovechar los materiales locales que se estaban extrayendo de los diferentes puntos de ejecución de obra. fue necesario emitir una especificación particular para este proyecto donde se aprueba la utilización de los materiales de corte locales para la construcción de muros en suelo reforzado con geotextiles. Porque las características de los materiales locales no cumplen con los requisitos de rellenos estructurales del INVIAS.

El material presentaba las características descritas en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización de los materiales de corte del proyecto para el relleno de los muros en suelo reforzado.

Fuente: (GICA_V42_UF1_GFOM_V1).

Característica	Resultados
Tamaño máximo, mm	9,50
Porcentaje que pasa por el tamiz de 2 mm (No. 10) en masa, máximo	94,43
Porcentaje que pasa por el tamiz de 75 µm (No. 200) en masa, máximo	56,54
Limite Líquido, máximo (%)	43
Limite Plástico, máximo (%)	32
Índice de Plasticidad, máximo (%)	10
Densidad Seca, máxima	1998 kg/m3
Humedad Optima (%)	10,6

Para garantizar el adecuado comportamiento del material y la mejor interacción con el geosintético, fue necesario realizar ensayos de comportamiento mecánico a los materiales de corte locales modelando las condiciones de compactación y cargas de cada estructura.

En la figura 3 se presentan los resultados de un ensayo triaxial de los materiales locales compactados.

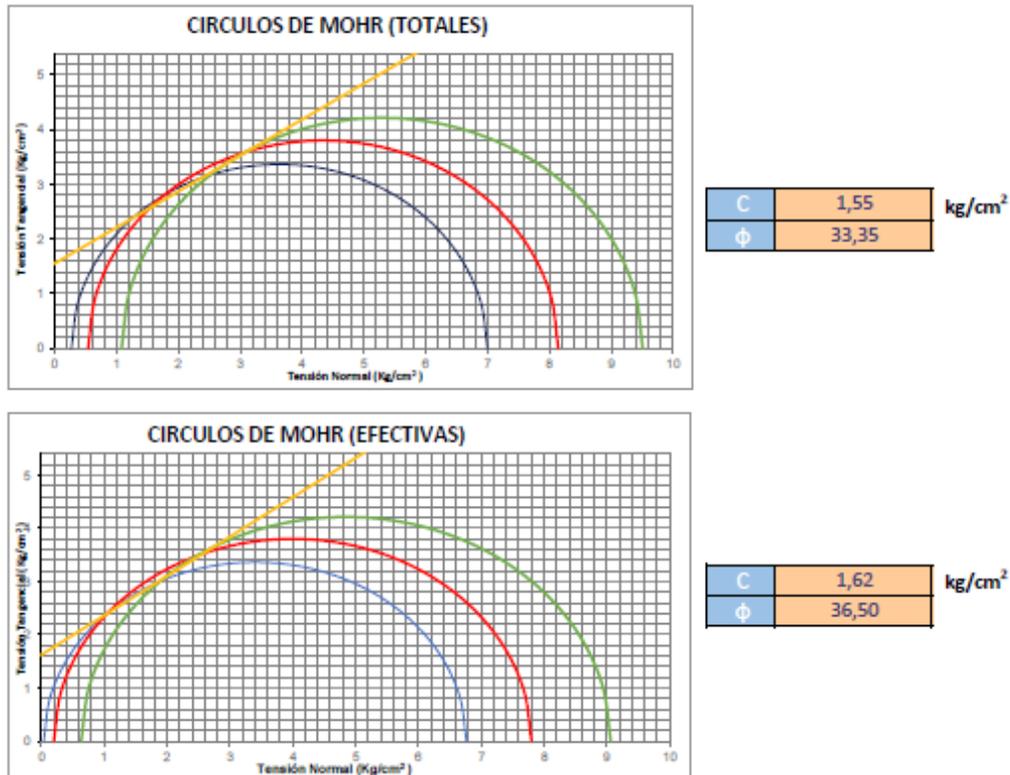


Figura 3. Resistencia al corte de materiales locales para relleno de muros. (ensayo triaxial).

Adicional a los ensayos mecánicos, se realizaron ensayos de comportamiento hidráulico, con el fin de estimar la presión de poros a diferentes grados de saturación. En la figura 4, se presenta los resultados de presión de poros para las diferentes probetas y muestras.

De estos ensayos se concluyó, que era necesario instalar un adecuado sistema de drenaje que impidiera la acumulación de agua y la saturación del material. Incluyendo geocompuestos de drenaje en la base, espaldón y cuerpo interno de las estructuras en suelo reforzado. la saturación o aumento de humedad, modificaba la resistencia al corte de los materiales.

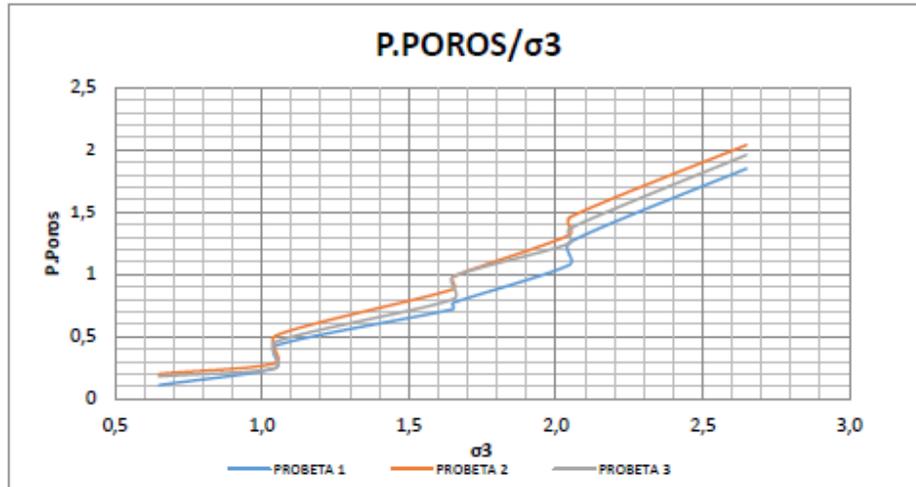


Figura 4. Resultados presiones intersticiales de lo mater (ensayo triaxial)

Con base en los ensayos de caracterización mecánica y permeabilidad a los materiales locales y realizando modelos de comportamiento a largo plazo, se pudo corroborar la estabilidad de estructura reforzada con geotextiles tejidos y su adecuado sistema de drenaje.

7. METODOLOGIA DE DISEÑO.

Desde el principio y hasta los inicios de la última década, la única filosofía de diseño utilizada fue conocida como “diseño por esfuerzos de trabajo” conocida como WSD y expuesta hace algún tiempo por la “FHWA (Federal Highway Administration)”. Basado en dicha metodología se han construido más 10000 estructuras en suelo reforzado solo en Colombia en lo últimos 30 años, las cuales en su gran mayoría han permanecido estables a lo largo del tiempo, exceptuando algunos casos puntuales donde se han generado problemas por temas estabilidad externa y drenaje.

Últimamente se han expedido normas y especificaciones por la gran mayoría de los países, basadas en la filosofía de diseño con factores de cargas y resistencia LRFD, fundamentada en uso confiable de los métodos estadísticos mediante procedimientos fácilmente utilizables por los diseñadores de puentes. “AASHTO LRFD Bridge Design Specifications “ 7^a edition (2014)”.

Fue precisamente esta nueva norma con metodología LRFD la que se utilizó para el diseño de todas las estructuras en suelo reforzado que se necesitaron en el proyecto. Para Colombia y otros países, aplicar metodología LRFD a muros en suelo reforzado no era muy común y más cuando los factores de carga y de resistencia no han sido calibrados dentro de las condiciones críticas de dichos países. Sin embargo, se realizó una buena adaptabilidad a la norma aplicando metodología LRFD.

8. MUROS EN SUELO REFORZADO, CASOS DE ESTUDIO.

En esta ponencia vamos a analizar y exponer de forma detallada tres de los más de 40 casos de estudio en muros de suelo reforzado construidos hasta ahora, planteados como alternativa para construcción de estructuras de contención en el proyecto de APP GICA. Contando todos sus detalles técnicos y aplicativos de cada una de estas experiencias.

8.1. Muro 8 y 9 K3+769 - K4+118

Para los tramos del proyecto, correspondientes a los muros 8 y 9, se realizó un ajuste al diseño geométrico de la vía; esto generó la unificación de los muros 8 y 9, y una variación muy pequeña de las abscisas de inicio y fin respecto al diseño inicial, en el cual estaba previsto incluir sistema de estabilización global con pernos y pilotes.

Basados en la variabilidad del suelo de fundación y tomando como base los sondeos realizados en el estudio inicial, se realizó un análisis de estabilidad con sensibilidad a la variación de parámetros mecánicos calculando la probabilidad de falla en una posible variación de parámetros.

Como resultado de los estudios y de la parametrización del suelo de fundación, se propuso la construcción de un muro en suelo reforzado con geotextiles tejidos con una longitud total de 449m y altura máxima de 11.6, eliminando el sistema de anclaje pasivo e instalando un adecuado sistema de drenaje interno, adicionalmente se optimizó en la separación entre capas disminuyendo la cantidad de geotextil por metro cubico de muro.

En la figura 5 podemos observar la instalación del sistema de drenaje y las capas de geotextil tejido. En la figura 6 se presenta el resultado final, con una revegetalización natural con hidrosiembra en la facha del muro.



Figura 5. Proceso constructivo, Muro (8 y 9) K3+769 - K4+118).



Figura 8. Proceso constructivo, Muro 22 K6+857 - K7+020.

Los modelos complementarios entre estructuras flexibles y rígidas son poco comunes. Sin embargo, como en este caso, son muy útiles para la construcción de estructuras de contención y estabilización modernas. En este tipo de estructuras se suman todas las ventajas técnicas de cada elemento, conformado finalmente una estructura estable y económicamente viable.

8.3. Muros Columnas Viaducto Puente 20.

Una de las mejores y más utilizadas aplicaciones de muros en suelo reforzado con geotextil en este proyecto, fue la creación de plataformas para el acceso y apoyo de una piloteadora que pesa 200 toneladas. Debido a las condiciones topográficas era necesario la conformación de áreas planas para la operación de una máquina que pretendía instalar un número definido de pilotes escavados para la cimentación de las columnas del viaducto puente 20.

Era necesario que el muro de contención soportara el peso de la piloteadora y la excavación de los pilotes a través de su estructura. Después de realizar varias pruebas piloto a escala real y diseños especializados, se concluyó que un muro en suelo reforzado con geotextil tejido podía soportar las condiciones de carga y el procedimiento constructivo de forma temporal.

Se instalaron 5 muros en suelo reforzado, en zonas de difícil acceso, con el fin de apoyar la piloteadora e instalar los pilotes de soporte de las columnas del puente, tal como se observa en la figura 10 y 11.

Tanto el cálculo de los pilotes escavados como el de las estructuras de reforzadas con geosintético, fue un complejo desafío para la ingeniería geotecnica que concluyo con éxito. El uso de los geosintéticos, sus resistencias, la posibilidad de cortar los elementos de refuerzo y la interacción con el suelo de relleno, fue lo que permitió la aplicación de estas estructuras, ahorrando considerablemente los tiempos de ejecución de la obra.



Figura 10. Proceso constructivo, Muros Columnas Puente 20.



Figura 11. Instalación Pilotes a través de los Muros en Suelo Reforzado del Pente 20.

9. CONCLUSIONES.

Los muros en suelos reforzados con geosintéticos son estructuras versátiles que se adaptan a diferentes topografías y condiciones especiales, genera menor impacto ambiental aprovechando los materiales locales y reduce los costos de los proyectos.

Al viabilizar la utilización de los materiales extraídos del mismo proyecto, garantizando la operación técnica de las estructuras. Genero una optimización en el proceso constructivo y los costos del proyecto. Se han construido más de 40 estructuras en suelo reforzado en ese proyecto, aprovechado sus ventajas.

Se pueden construir muros en suelo reforzado con geosintéticos utilizando materiales de rellenos con características especiales de suelos finos por fuera de los estándares internacionales. En esto caso es necesario evaluar el

comportamiento mecánico e hidráulico de estos materiales y acompañarlos con geosintéticos de refuerzo y sistemas de drenaje adecuados para este tipo de suelos.

Los muros en suelo reforzado se complementan adecuadamente con otras estructuras de contención y estabilización más rígidas. Creando sistemas económicos y adaptables a las necesidades del proyecto.

Cambiamos algunos paradigmas de la ingeniería con geosintéticos, realizando perforaciones de grandes diámetros a una estructura de suelo reforzado ya construida con una carga de 200 ton en la parte superior. Actualmente las estructuras construidas para las columnas del puente 20 se encuentran estables y en permanente monitoreo para clasificarlas como estructuras permanentes.

En todos los proyectos de ingeniería es muy importante conocer las características de los materiales de fundación y relleno, la aplicación de un geosintético de refuerzo depende principalmente de la interacción con estos materiales.

10. RECONOCIMIENTOS

Departamento de Ingeniería de Geosintéticos Pavco Wavin, Bidim Wavin y Amanco Wavin.

Constructora Colpatria

Constructora Mincivil

Consorcio BT

Consorcio Vías, Viaductos y Túneles del Tolima VVT

Consorcio Constructor de la APP GICA S.A

REFERENCIAS

Braja M. Das (2008). *Principios de Ingeniería de Cimentaciones*. 5ª Edición.

Robert M. Koerner (2012), *Designing with Geosynthetics*, 6a Edition.

Robert D. Holtz, Barry R. Christopher, Ryan R. Berg (1995). *Geosynthetics Engineering*. 1a Edition.

Geosintéticos Pavco Wavin (2012), *Manual de Diseño con Geosintéticos*, 9ª edición.

AASHTO M288-17. Norma para la Especificación de Geotextiles Designación

CCP-14 (2014), Capítulo 11, Código Colombiano de Puente.

NSR-10 (2010), Título H, Normas Sismo Resistente Colombiana.

Especificaciones técnicas y constructivas, Geosintéticos Pavco Wavin, Bidim Wavin, Amanco Wavin.

INVIAS Colombia (2013), Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras.