

**EVALUACIÓN DE LAS DEFORMACIONES DE UN SISTEMA ESTRUCTURAL
MURO-TALUD REFORZADO CON GEOSINTETICOS DURANTE SU
CONSTRUCCIÓN, SEVILLA-VALLE DEL CAUCA
-TRABAJO DE GRADO-**

LUIS SEBASTIAN HERRERA CARDONA

Trabajo de grado presentado al programa académico de Ingeniería Civil y
Geomática de la Universidad del Valle

UNIVERSIDAD DE VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMATICA
SANTIAGO DE CALI
AGOSTO DE 2017

**EVALUACIÓN DE LAS DEFORMACIONES DE UN SISTEMA ESTRUCTURAL
MURO-TALUD REFORZADO CON GEOSINTETICOS DURANTE SU
CONSTRUCCIÓN, SEVILLA-VALLE DEL CAUCA
-TRABAJO DE GRADO-**

LUIS SEBASTIAN HERRERA CARDONA

Director. Ing. Diego Duque Arango

UNIVERSIDAD DE VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMATICA
SANTIAGO DE CALI
AGOSTO DE 2017

NOTA DE ACEPTACIÓN

El presente trabajo de grado fue
aprobado por el director del
Programa Académico, los jurados y
el director de investigación.

MANOLO GALVAN, Ph.D.
Director del Programa Académico de
Ingeniería Civil

DIEGO DUQUE ARANGO
Director de investigación

ING. CARLOS MANRIQUE
Jurado

ING. MANOLO GALVAN, Ph.D
Jurado

Ciudad y fecha

Agradecimientos

A GEOMATRIX, empresa proveedora del material de reforzamiento del proyecto ejecutado para la recuperación vial Uribe (Bugalagrande) – Sevilla, sector la cristalina, en especial a la Ingeniera Ana Milena Gómez y al ingeniero Omar Torres.

A la empresa IAEP, encargada de todo el diseño de la obra y la Interventoría de la misma, en especial al Ingeniero Iván Estrada.

A el Consorcio Vial Sevilla, encargado de la ejecución del proyecto, en especial al Ingeniero Iván Zuluaga.

A el Ingeniero Diego Duque, director de este proyecto de investigación.

A todos mil gracias por compartir conmigo parte de su conocimiento para poder desarrollar este proyecto de investigación.

Contenido

RESUMEN:	10
1. INTRODUCCIÓN	11
2. PROBLEMA	12
2.1 Descripción del problema	12
2.2 Formulación	15
2.3 Objetivos	15
2.3.1 Objetivo General	15
2.3.2 Objetivos Específicos	15
2.4 Justificación	15
3. MARCO DE REFERENCIA	18
3.1 Marco Teórico	18
3.1.1 Movimientos en masa	19
3.1.2 Geosintéticos	20
3.1.3 Muros de contención reforzados con geotextil	23
3.2 Estado del Arte	24
3.2.1 Instrumentación y Monitoreo	24
3.2.2 Objetivos de la instrumentación	25
3.2.3 Tipo de instrumentación	26
4. SEGUIMIENTO AL PROCESO CONSTRUCTIVO	30
5. ENSAYOS DE LABORATORIO	39
5.1 Granulometría	40
5.2 Límites de consistencia o límites de Atterberg	42
5.3 Corte directo Consolidado Drenado	44
5.4 Relaciones humedad-densidad, ensayo de compactación (Proctor Modificado)	46
5.5 Resultado de laboratorios entregados por el contratista para el diseño del muro MSE con geosintéticos	47
6. INSTRUMENTACION PARA MEDIR DEFORMACIONES RELATIVAS INTERNAS	49
6.1 Descripción del instrumento para medir deformaciones horizontales internas	50
6.2 Metodología toma de datos Instrumento para medir deformaciones horizontales internas	54
7. MONITOREO A PARTIR DE DEFORMACIONES HORIZONTALES INTERNAS DEL MURO MSE CON GEOSINTÉTICOS	57
7.1 Monitoreo con instrumentación para medir deformaciones	58
8. MONITOREO DE DEFORMACIONES VERTICALES DEL MURO	61
9. ANALISIS DE RESULTADOS	63
9.1 Análisis y resultados del sistema constructivo	63
9.2 Análisis de resultados laboratorios	66

9.2.1	Propiedades Índice	66
9.2.2	Propiedades geomecánicas.....	68
9.3	Análisis de monitoreo con instrumentación para medir deformaciones internas	69
9.3.1	Análisis de resultados	69
9.3.2	Análisis funcionamiento del equipo.....	72
9.4	Análisis de deformaciones verticales	72
10.	DISEÑO DE VERIFICACIÓN DEL MURO MSE REFORZADO CON GESOSINTETICO PARA LA RECUPERACIÓN VIAL DE LA CARRETERA CONOCIDA COMO LA VÍA URIBE – SEVILLA	72
11.	CONCLUSIONES	75
12.	RECOMENDACIONES	76
13.	REFERENCIAS	77

Figuras

Figura 1. Derrumbe ladera, sector la Cristalina, vía Uribe-Sevilla. (Fuente: Geomatrix).	13
Figura 2. Estado de la vía Uribe-Sevilla intervenida para la remoción del material desprendido de la ladera. (Fuente: Geomatrix).....	13
Figura 3. Derrumbe km 13 vía Medellín – Bogotá, cantera Las Nieves. (Fuente: El Tiempo).....	17
Figura 4. Tipos de movimientos (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2017).....	20
Figura 5. Tipos de tejido. (Fuente: Marienco)	21
Figura 6. Productos de Geomatrix principales para estabilización del muro de tierra construido a. Fortgrid b. Fibertex c. Permadrain d. Pipedrain. (Fuente: Geomatrix)	23
Figura 7. Ilustración esquemática de las partes de un muro.....	24
Figura 8. Esquema de monitoreo topográfico. (Fuente, Suarez, J. 2009).....	27
Figura 9. Esquema de medidor vertical. (Fuente: Suarez, J. 2009).	28
Figura 10. Esquema de extensómetro horizontal. (Fuente: Suarez, J. 2009)	28
Figura 11. Esquema geométrico del diseño del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.	31
Figura 12. Filtro compuesto por geodrem y material granular, utilizado en la parte trasera de muro MSE con geosintético.	33
Figura 13. Formaleta del muro. a). Formaleta de costales con material de relleno (caras laterales y frontal). b). Formaleta trasera para colocación de filtro.	33
Figura 14. Esquema general de armado del muro MSE con geosintéticos.	35
Figura 15. Instalación del Pipedrain en el muro MSE con geosintéticos.....	36
Figura 16. Formaleta de sacos envueltos del geotextil Fordgrid UX 165, de acuerdo al esquema general de armado del muro MSE con geosintéticos.	36

Figura 17. Colocación y regado del material de relleno con ayuda de retroexcavadora sobre geotextil Fordgrid UX 165, de acuerdo a metodología para la construcción del muro MSE con geosintéticos.	37
Figura 18. Esquema geométrico final del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.....	38
Figura 19. Sistemas hidraulicos para protección de aguas de infiltración del muro. a). Disipadores hidráulicos que recogen las aguas de la ladera antes de entrar en contacto con el muro. b). Conducto de agua que recoge las posibles aguas que entran al muro.	39
Figura 20. Vista general final del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca..	39
Figura 21. Grafica de los resultados de pruebas de granulometría del material de relleno del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.	41
Figura 22. Grafica de la curva promedio de los resultados de pruebas de granulometría del material de lleno del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.....	41
Figura 23. Localización relativa de los principales límites. w_s , límite de contracción. w_p , limite plástico. w_L , límite líquido.	42
Figura 24. Grafica de los resultados de pruebas de límites de Atterber realizadas al material de relleno del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.....	43
Figura 25. Grafica promedio de los resultados de pruebas de límites de Atterber realizadas al material de relleno del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.....	44
Figura 26. Resultado de prueba N° 1 de corte directo realizadas al material de relleno del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.	45
Figura 27. Resultado de prueba N° 2 de corte directo realizadas al material de relleno del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.	46
Figura 28. Curva de compactación (densidad vs humedad), realizado al material de relleno del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.	47
Figura 29. Grafica de la curva promedio de los resultados de pruebas de granulometría para el diseño del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca..	48
Figura 30. Graficos de curvas de compactación resultados de la prueba de proctor modificado para el diseño del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.	48
Figura 31. Instrumentación para medir deformaciones (un solo módulo)	51

Figura 32. Instrumentación para medir deformaciones (módulos traslapados).....	51
Figura 33. Esquema dimensional de instrumento para medir deformaciones.....	52
Figura 34. Colocación del instrumento para medir deformación.	53
Figura 35. Detalle de guayas en caja N° 1.....	54
Figura 36. Placa rígida que fue anclada en la parte trasera del muro.....	54
Figura 37. Instrumento N°1 instalado en el nivel 1516,25 (cara frontal del muro)..	55
Figura 38. Esquema grafico del instrumento para medir deformaciones en la cara frontal del muro.	55
Figura 39. Localización (altura y posición) donde fueron instalados los instrumentos para medir deformaciones.	58
Figura 40. Grafica presiones activas de Rankine vs. Deformaciones (Instrumento N°1 - cota (1516,25)).....	59
Figura 41. Grafica presiones activas de Rankine vs. Deformaciones (Instrumento N°2 - cota (1521)).....	60
Figura 42. Localización de puntos de control en corona del muro para control de niveles.....	62
Figura 43. Vista en planta de topografía final del muro.....	64
Figura 44. Cortes longitudinales del muro.....	65
Figura 45. Grafica comparativa de curvas granulométricas.	66
Figura 46. Diferencias absolutas de medidas entre los datos obtenidos. Instrumentos N°1 (cota 1516,25).	71
Figura 47. Diferencias absolutas de medidas entre los datos obtenidos. Instrumentos N°2 (cota 1521,00).	71
Figura 48. Valor acumulado de desplazamientos absolutos presentados. Instrumentos N°1 (cota 1516,25).	71
Figura 49. Valor acumulado de desplazamientos absolutos presentados. Instrumentos N°2 (cota 1521,00).	71
Figura 50. Geometría de muro para diseño de verificación.	73
Figura 51. Factores de seguridad para diseño de muros reforzados.	74

Tablas

Tabla 1. Factores influyentes en la inestabilidad de laderas. (Ferrer, 1995).....	19
Tabla 2. Refuerzo y drenaje del muro según diseño.....	35
Tabla 3. Características promedio de pruebas de límites de Atterber realizadas al material de relleno del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.....	44
Tabla 4. Resultados de la prueba de corte directo realizadas al material de relleno del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.....	46

Tabla 5. Características promedio de pruebas de límites de Atterberg y corte directo para el diseño del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.	49
Tabla 6. Tabla que debe ser implementada para anotar los datos de medición tomados en campo.	56
Tabla 7. Tabla con los datos obtenidos a partir de la información recogida en campo.	57
Tabla 8. Resultado del instrumento N°1 (cota 1516,25)	59
Tabla 9. Resultado del instrumento N°1 (cota 1532,0)	60
Tabla 10. Variación de nivel topográfico en corona del muro transcurrido dos meses y una semana.	62
Tabla 11. Comparativo de resultados de pruebas de Límites de Atterberg.	67
Tabla 12. Comparativo resultado de ensayo de Proctor Modificado.	68
Tabla 13. Comparativo de resultados de pruebas de corte directo.	68
Tabla 14. Diferencias absolutas de medidas entre los datos obtenidos. Instrumentos N°1 (cota 1516,25).	70
Tabla 15. Diferencias absolutas de medidas entre los datos obtenidos. Instrumentos N°2 (cota 1521,00).	70
Tabla 16. Valor acumulado de desplazamientos absolutos presentados. Instrumentos N°1 (cota 1516,25).	70
Tabla 17. Valor acumulado de desplazamientos absolutos presentados. Instrumentos N°2 (cota 1521,00).	70
Tabla 18. Verificación de geomalla usada en la ejecución del proyecto.	73

EVALUACIÓN DE LAS DEFORMACIONES DE UN SISTEMA ESTRUCTURAL MURO-TALUD REFORZADA CON GEOSINTETICOS DURANTE SU CONSTRUCCIÓN, SEVILLA-VALLE DEL CAUCA

Luis Sebastian Herrera Cardona
Trabajo de Grado para optar a título de Ingeniera Civil
Director: Diego Duque Arango

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil
Santiago de Cali, 2017

RESUMEN:

La inestabilidad de laderas es un problema que se enfrenta en la Ingeniería Civil, específicamente el área de geotecnia, representando grandes retos en proyectos de gran envergadura. Ya que se plantean soluciones para hacer una estabilización del material que amenaza a la población que habita o da uso de la zona expuesta a sufrir consecuencias por un deslizamiento. Durante los procesos planteados como solución está el de realizar sistemas de muro-talud reforzado con geosintéticos, el cual se encarga de confrontar esta amenaza una vez comience su construcción, por lo que se debe tener un seguimiento al comportamiento de la ladera, y a su vez de la estructura que se está implementado para la estabilización.

En este documento se hace una propuesta de investigación, para el monitoreo de las deformaciones de un muro – talud estabilizado con geosintéticos; teniendo como referencia puntos o líneas de control en el cuerpo de dicha estructura que permite realizar un seguimiento al comportamiento durante la ejecución de la obra y posterior análisis respecto a su diseño.

Palabras claves: Inestabilidad de laderas, muro talud, geosintéticos.

1.INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuevas tecnologías que promueven el avance de la Ingeniería Civil, genera nuevos campos de investigación y análisis. Actualmente en Colombia se viene implementando el uso de estas tecnologías para dar solución a problemas de estabilidad de laderas, las cuales ponen en un reto cada vez mayor dichas tecnologías, ya que se ejecutan proyectos de mayor complejidad para dar solución integral a dichas amenazas como lo son los movimientos en masa que pueden afectar a la población colombiana. Como alternativa para la construcción de estas obras, se emplean muros en suelo mecánicamente estabilizados (MSE) con geosintéticos, los cuales al ser implementados reduce el uso de los recursos naturales y económicos, generando así un foco de atención del gremio de la construcción en Colombia, dado que este tipo de obras pueden ser ejecutadas en áreas reducidas, en lugares marginales donde no se tiene a disposición material adecuado de construcción y se tienen limitaciones ambientales.

Actualmente en Colombia no existe una normatividad de carácter obligatorio que rija el diseño y la construcción de muros MSE con geosintéticos (Suarez, J. 2009), lo cual motiva a desarrollar investigaciones que aporten experiencias de campo y laboratorio, que contribuyan con la información necesaria para la obtención de los parámetros de diseño y control durante la ejecución y posterior a la finalización del proyecto.

2. PROBLEMA

2.1 Descripción del problema

En el proyecto de recuperación vial de la carretera conocida como la vía Uribe – Sevilla, de gran importancia, dado que es la única ruta que conecta los municipios del sur-oeste del Valle del Cauca con el municipio de Sevilla. Este proyecto es liderado por la gobernación del Valle del Cauca y ha generado grandes retos, siendo uno de estos, la estabilización de una de las laderas naturales en el sector La Cristalina, que ha presentado cambios en su topografía que ciernen sobre ésta carretera a causa de movimientos en masa con desprendimiento de material heterogéneo del sitio: limo orgánico superficial, limos y arcillas de formación cenizas volcánicas, rocas y cantos, los cuales se mueven sobre la roca tipo Saprolito que subyace a profundidad. El afloramiento de aguas infiltradas y corrientes de aguas superficiales, que escurren en el talud con incidencia sobre la vía, paralela a dicho talud, con dirección aguas abajo a la quebrada El Popal, haciendo arrastre en forma de lodos que llevan escombros y que en ocasiones genera represamientos en la quebrada. Este problema se ha presentado constantemente, generando remociones permanentes de los materiales que caen sobre la vía, para permitir un flujo vehicular normal del corredor intermunicipal y superar igualmente los represamientos de la quebrada el Popal.

Se considera que las causas naturales de los derrumbes son a partir de la saturación del suelo por el manejo inadecuado del agua y de los drenajes, ya que no contaba (hasta antes de iniciar los trabajos pertinentes a este proyecto) con disipadores hidráulicos ni drenes horizontales que ayudaran a mitigar la presencia del fluido sobre y en el cuerpo de la ladera produciendo así saturación del suelo.

A continuación se presentan fotografías del derrumbe de la ladera mencionada:



Figura 1. Derrumbe ladera, sector la Cristalina, vía Uribe-Sevilla. (Fuente: Geomatrix).



Figura 2. Estado de la vía Uribe-Sevilla intervenida para la remoción del material desprendido de la ladera. (Fuente: Geomatrix)

A partir de los diferentes métodos planteados para solucionar el problema de la ladera, se determinó realizar muros mecánicamente estabilizados (MSE) con geosintéticos, proyecto liderado por la empresa Geomatrix. El método planteado por Geomatrix es hacer uso de uno de sus productos. Para ello realizaron análisis considerando dos aspectos importantes, uno tiene que ver con el equilibrio y el

segundo con las características propias del terreno. Lo primero se realizó planteando las ecuaciones de equilibrio y el segundo que tiene influencia sobre el sistema planteando como solución, corresponde a las propiedades geomécnicas del suelo y sus reacciones frente a condiciones de drenado y no drenado, además, se asumió que la resistencia del suelo se expresa únicamente con los parámetros de cohesión (c) y el ángulo de rozamiento (φ) (criterio de Mohr Coulomb).

En la ingeniería civil el proceso base de toda obra es el diseño, la construcción y el mantenimiento de la estructura. En la fase inicial de diseño se toma en cuenta características nombradas anteriormente, a su vez se determina el periodo de vida útil de la estructura, esto a partir de las exigencias y las normas vigentes en donde se va a llevar a cabo el proyecto. En el caso de los muros MSE, estas características se ven afectadas durante el proceso constructivo según la calidad del proceso, los cambios ambientales a la que le estructura se ve expuesta, degradación de la estructura por infiltraciones superficiales y sub-superficiales, además de movimientos en masa entre otros. Los cambios no previstos y provocados en las propiedades de la estructura, en general, son de forma nociva para su funcionamiento; los cuales pueden ser inmediatos o tardar tiempo en ser identificados, lo que provoca que la estructura no cumpla con su funcionalidad tal como se diseñó o genere un fracaso inminente de proyecto. De no realizarse una adecuada identificación de estas variables, si se presentasen, durante el proceso constructivo, que generalmente está dado por deformaciones verticales y horizontales que superan las admisibles y de estado de equilibrio, se podrían generar, posterior a la falla de la estructura, problemas socio-económicos donde las consecuencias va desde pérdidas monetarias hasta pérdida de vidas humanas.

Para finalizar en algunos proyectos a nivel nacional se ha observado que pese a los protocolos de control e interventoría que se exigen para las obras públicas, se han encontrado problemas en el desarrollo del proyecto, incumpliendo con su total desempeño, esto dado al mal funcionamiento en el engranaje que debe haber entre el diseño, las medidas tomadas en obra y la ejecución de la misma ante una eventual ausencia de un monitoreo e interventoría especializada.

2.2 Formulación

¿Cómo diagnosticar y monitorear deformaciones durante el proceso constructivo para el sistema muro-talud reforzado con geosintéticos con base en el proyecto realizado por Geomatrix para la recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca?

2.3 Objetivos

2.3.1 Objetivo General

Implementar una metodología para el monitoreo de deformaciones del sistema muro- talud reforzado con geosintéticos en base al proyecto realizado para la recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.

2.3.2 Objetivos Específicos

- Elaborar e implementar el equipo para medir deformaciones horizontales en el muro.
- Comprobar con pruebas de laboratorio los parámetros de diseño del material de relleno con el fin de rediseñar y verificar el diseño inicial realizado para la ejecución.
- Realizar análisis y seguimiento al proceso constructivo para el sistema estructural muro-talud reforzada con geosintéticos.
- Realizar monitoreo a partir de deformaciones horizontales y verticales del sistema estructural muro-talud reforzada con geosintéticos.

2.4 Justificación

Debido características que envergan el proyecto y la importancia del mismo por lo nombrado anteriormente, es indispensable que el engranaje de todos los factores que influyen para su éxito tengan una supervisión técnica durante su ejecución y si

es posible aún después de finalizada la obra, para así verificar que se esté sea congruente frente a lo planteado en el diseño con relación a lo hecho en campo.

Actualmente la ingeniería viene desarrollando alternativas para estabilización de suelos, haciendo uso de nuevos e innovadores materiales que compiten con los métodos constructivos tradicionales; donde estos para su implementación vienen acompañados de una metodología de diseño, construcción y mantenimiento de tal manera que el fabricante garantiza el desempeño óptimo y cumpla con los requerimientos exigidos, puesto que, de esto depende la seguridad y la vida de las personas que habitan o transitan por la zona donde se lleva a cabo dicho proyecto.

Estos materiales vienen siendo objeto de estudio para el gremio de la construcción ya que el fin de estos es optimizar los procesos y los resultados, para ello es necesario hacer una evaluación de estos materiales y metodología usada en el proceso constructivo. Las deformaciones verticales como horizontales tanto en los muros como en taludes, son factores a tener en cuenta, dado que estos al presentarse pueden dar alerta a movimientos en masa, ya que estas deformaciones se manifiestan por medio de desplazamientos relativos del sistema; con ellos se puede determinar y tomar medidas para así tener un rendimiento óptimo en general durante el proceso constructivo.

Evaluar el comportamiento de estas estructuras dado el uso de nuevos materiales que se están utilizando en este tipo de construcciones que generan de alguna forma un estado de vulnerabilidad para la sociedad, se tienen aquellos factores que aportan una incertidumbre a los resultados esperados debido a las inconsistencias entre las especificaciones que vienen dadas por el diseño y las ejecuciones en obra. Uno de los casos más recientes que repercutió nuestro país se presentó el día 26 de octubre de 2016 en el kilómetro 13 de la vía Medellín - Bogotá, cuando se realizaban labores de movimiento de tierra en la cantera Las Nieves. Se presentó un gran movimiento en masa del terreno, en el cual se desplazaron por lo menos 6000 m², en este hecho fueron sepultados 16 personas,

las cuales perdieron la vida, afectando así, tanto trabajadores de la cantera, como usuarios que transitaban sobre la vía. Este es uno de los casos donde se ve los riesgos que presenta la inestabilidad de laderas aun después de haber sido estabilizada, ya que por alguna razón el talud se encontraba en su límite de resistencia generando así una falla en su estructura donde de forma inminente cubrió la carretera ocasionando la muerte de estas personas. (El Tiempo, 2016).



Figura 3. Derrumbe km 13 vía Medellín – Bogotá, cantera Las Nieves. (Fuente: El Tiempo)

Por otro lado realizar un estudio como estos es de gran importancia en el ámbito económico y de desarrollo, dado que parte de los recursos financieros aportados al proyecto vienen dados por el municipio que a su vez viene de los impuestos de los habitantes de Sevilla. El llevar a buen término esta estabilización es fomentar el desarrollo y la competitividad una región, por tanto es necesario que estas obras sean documentadas y supervisadas al detalle como respaldo de que se cumplan las garantías durante la construcción y funcionamiento, además de servir como referencia bibliográfica para futuros proyectos.

Para los estudiantes de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle es de gran importancia estar relacionados con este tipo de obras donde la innovación y uso de técnicas no convencionales presentan alternativas de información detallada de los procesos que se llevan a cabo, criterios y toman decisiones en cuanto al diseño y el trabajo hecho en campo.

3.MARCO DE REFERENCIA

3.1 Marco Teórico

Dentro de los peligros naturales más destructivos de nuestro planeta, se encuentra la inestabilidad de laderas, lo cual se traduce a una fuente de amenaza para la vida y bienes materiales de la población. Esta amenaza se manifiesta por medio de deslizamientos, flujos y movimientos complejos de tierra que se presentan con frecuencia, ocasionando así gran cantidad de víctimas, heridos y damnificados, además de cuantiosas pérdidas económicas. Estos eventos vienen afectando a países de escasos recursos dado a su alto grado de vulnerabilidad. Para prevenir estos impactos por inestabilidad de laderas, es importante que se desarrollen estudios e investigaciones para poder así concientizar a las personas y generar conocimiento a las manifestaciones inherentes a esta amenaza y los factores que potencializa este fenómeno. (Centro Nacional de Prevención de Desastres de México - CNPDM, 2001).

La inestabilidad de laderas está dada por la rotura y desplazamiento de un material heterogéneo que puede estar conformado en gran parte por rocas o tierra, estos se desplazan hacia el exterior de la misma gracias a la fuerza ejercida por la gravedad. (Moreno, Rosa & Zazo, 2005). Estos deslizamientos están dados por factores influyentes en el comportamiento de la misma, los cuales pueden agruparse en dos grupos diferentes los cuales son los que dan las condiciones de deslizamiento y el que da desencadenamiento a la acción. (Ferrer, 1995).

Tabla 1. Factores influyentes en la inestabilidad de laderas. (Ferrer, 1995).

Factores Condicionales	Factores Desencadenantes
Relieve (Pendiente)	Aporte de agua
Estructura Geológica	Cambios en condiciones hidrogeológicas
Comportamiento hidrogeológico del terreno	Aplicación de cargas (estáticas o dinámicas)
Resistencia de los materiales	Erosión o socavación en el pie de la ladera
Litología	Acciones climáticas

Para la estabilización de laderas es común la construcción de muros y taludes, estos se encargan de hacer una estabilización del terreno haciendo uso de las propiedades mecánicas del mismo suelo y materiales usados para la construcción, el equilibrio del material del cual conforma la ladera se logra realizando estructuras que podrán ser desde el pie de la ladera hasta movimientos de tierra en la corona de la misma.

3.1.1 Movimientos en masa

Los movimientos en masa, son uno de los fenómenos más destructivos que se manifiestan en la tierra, ocasionando así pérdidas, de vida y económicas para la población. Estos fenómenos, ocurren alrededor de todo el mundo, principalmente donde se presente alto relieve, como lo son las zonas montañosas. Ocurriendo así con mayor frecuencia en las montañas ubicadas en el trópico, puesto que es en esta zona donde se concentran las condiciones que potencializan este fenómeno, como lo es, la sismicidad, la meteorización y altas precipitaciones (J, Suarez. 2009). A continuación se presenta un gráfico donde se muestran los diferentes tipos de movimientos en masa que pueden ocurrir.

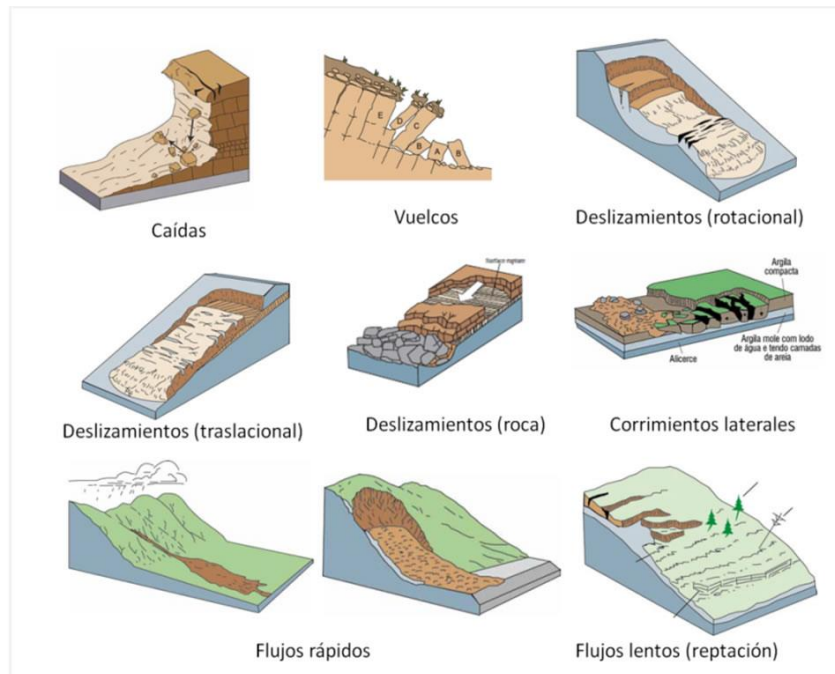


Figura 4. Tipos de movimientos (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2017)

3.1.2 Geosintéticos

Son conocidos como geosintéticos aquellos que son compuestos por materiales sintéticos de apreciable deformabilidad los cuales cumplen con propiedades mejoradas para el rendimiento en el uso de ellos en obras de ingeniería y geotecnia. Dentro de este grupo de geosintéticos se tienen los Geotextiles, que se define como “Un material textil plano, permeable polimérico (sintético o natural) que puede ser no tejido, tejido o tricotado y que se utiliza en contacto con el suelo (tierra, piedras etc.) u otros materiales en ingeniería civil para aplicaciones geotécnicas”.(Marienco).

Los geosintéticos se definen en dos grupos: materiales tejidos y no tejidos, donde los tejidos son aquellos que están formados por hilos sintéticos entrecruzados por una máquina de coser y los no tejidos se caracterizan por ser fibras o filamentos superpuestos en forma laminar, estos pueden ser unidos por medio de tres métodos, uno de ellos es por medio mecánico, el otro por medio térmico y finalmente por medio químico. (Marienco).



Figura 5. Tipos de tejido. (Fuente: Marienco)

A continuación se presenta la descripción dada por las fichas técnicas de los geotextiles que se utilizaron para realizar la estabilización y drenaje del muro MSE con geosintéticos en el proyecto para la recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector La Cristalina, municipio de Sevilla, Valle del Cauca.

3.1.2.1 Fibertex

Son geotextiles no tejidos elaborados con fibras vírgenes de polipropileno empleando la tecnología del punzonamiento en seco, en donde las fibras del polipropileno son extruidas, cardadas y finalmente punzonadas. La tecnología del punzonamiento en seco garantiza una excelente resistencia a daños producidos durante la instalación, excelentes propiedades de abrasión, alta resistencia dimensional y uniformidad, una mayor resistencia a las altas temperaturas, una elongación superior al 50% y un excelente balance entre permeabilidad y retención de partículas. Fibertex es empleado como material de filtro y separación de suelos en la construcción de obras de infraestructura, para impermeabilización de capas asfálticas en rehabilitación de pavimentos en vías y parqueaderos y como protección de geomembranas.

3.1.2.2 Fortgrid

Las geomallas uniaxiales Fortgrid son elaboradas con el exclusivo Multifilamento G5(3) de Poliéster de Alta Tenacidad, desarrolladas para interactuar con suelos y agregados pétreos, proporcionando alta resistencia a la tensión y alto módulo de deformación a las estructuras que conforman. Las fibras de geomalla son

recubiertas con un copolímero que le otorga mayor rigidez dimensional y la protección necesaria en su instalación. Fortgrid presenta estabilidad en el comportamiento mecánico a largo plazo a través de su baja plastodeformación (bajo creep), lo cual representa permanencia en la función de refuerzo a través del tiempo y control de deformaciones en la estructura reforzada. Fortgrid es empleada para el refuerzo de capas granulares en la construcción de muros de contención en suelo reforzado y taludes de alta pendiente.

3.1.2.3 Tubería Pipedrain

Esta tubería de drenaje en polietileno de alta densidad, con sección circular y de textura corrugada, la cual cuenta con orificios en forma de “ojo de puente”, la cual permite el libre paso del agua y evita a su vez el taponamiento, los cuales tienen como función captar el exceso de agua libre en suelo, para conducirlo así a un punto determinado. Esta tubería ofrece alta resistencia al ataque de productos químicos, a la compresión diametral y al impacto, además de que cuenta con una gran flexibilidad de curvatura.

3.1.2.4 Permadrain

Es un geocompuesto que está conformado por un medio drenante tipo geored de polietileno de alta densidad y un medio filtrante en geotextil no tejido, lo cual conforma un sistema de drenaje completo. La geored brinda alta resistencia a la compresión manteniendo este constante su espesor bajo altas solicitaciones de carga. Por otro lado el geotextil ofrece un eficiente paso del agua por medio de sus fibras, conservando su geometría y tamaño de abertura de poros bajo condiciones de tensión y/o confinamiento.

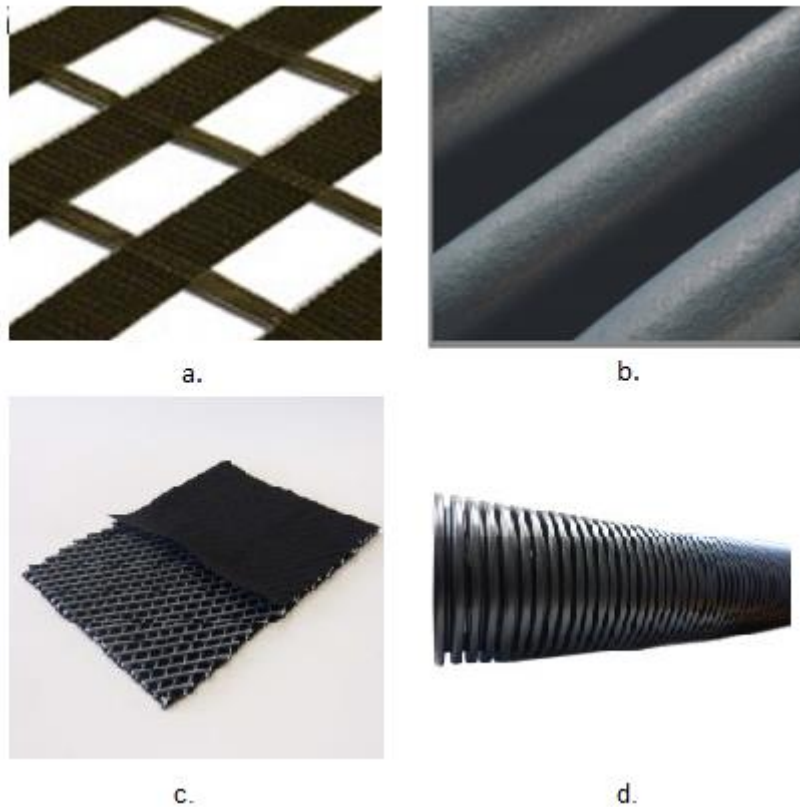


Figura 6. Productos de Geomatrix principales para estabilización del muro de tierra construido a. Fortgrid b. Fibertex c. Permadrain d. Pipedrain. (Fuente: Geomatrix)

3.1.3 Muros de contención reforzados con geotextil

En la ingeniería de vías, este tipo de obras son muy comunes los muros de contención especialmente los muros de estabilización mecánica (MSE), ya que son usados para salvaguardar las dimensiones de la banca o prevenir deslizamientos sobre la vía. Tradicionalmente se ha venido usando muros de contención que trabajan a partir de su propio peso (MSE), soportando fuerzas horizontales transmitidas por la masa de suelo problema. Estos fueron creados por el ingeniero e investigador francés Henry Vidal, que consisten en una serie de tiras metálicas amarradas a una serie de elementos externos que componen el frente del muro, hasta una determinada distancias dentro del relleno de tal manera que peso del material sobre las tiras permite la contención de la cara del muro. Actualmente este método conocido como muros de tierra armada se viene implementando dado los buenos resultados del comportamiento de la estructura

obtenida a partir de un buen diseño, con la falencia de que el material de refuerzo compuesto por materiales que podrían ser susceptibles a la corrosión dado el contacto constante y directo con el material de relleno. (Universidad del Cauca, 2003).

Gracias al desarrollo de la tecnología y de nuevos materiales, se han desarrollado algunos que soportan fuertes condiciones de humedad y de acidez producidas por el suelo, dando así entrada a los sintéticos como son los geotextiles, que suministran refuerzo debido a las caracterizaras mecánicas que poseen y su alta tenacidad, estos fueron impulsados por estudios realizados en Francia y Suecia a finales de la década de los setenta. (Universidad del Cauca, 2003).

A medida que han pasado los años estos materiales han venido presentando un desarrollo considerable, a tal punto que en países donde se maneja tecnología de punta como lo es Estados Unidos de América ha usado este material en miles de muros además del desarrollo de métodos constructivos para hacer uso de estos en la construcción de pilas para puentes y reforzar suelos con geosintéticos. (Universidad del Cauca, 2003).

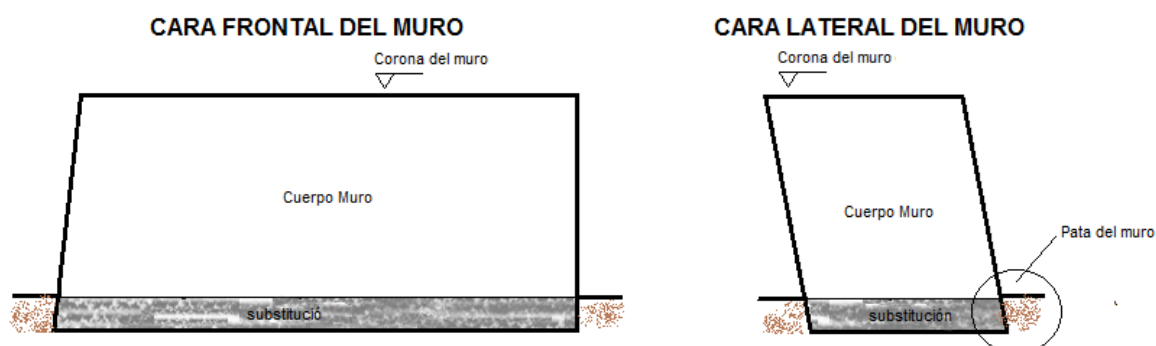


Figura 7. Ilustración esquemática de las partes de un muro.

3.2 Estado del Arte

3.2.1 Instrumentación y Monitoreo

Actualmente en el área de la geotecnia se ha vuelto punto de observación a nivel mundial, ya que esta área ha venido desarrollando proyectos cada vez más

ambiciosos lo cual ha forzado a la ingeniería a desarrollar nuevas investigaciones y medidas que atiendan a esta demanda. (Alpizar & Sanz, 2013).

Esta instrumentación en el área de la geotecnia ha venido desarrollándose generando así un nuevo campo de tecnología, con el objetivo de monitorear el comportamiento del terreno o las estructuras realizadas para la estabilización de laderas, y poder así tener nuevos parámetros que ayuden a determinar los mecanismos de falla. (Alpizar & Sanz, 2013. Suarez, J. 2009).

Antes de realizar un diseño para el programa de monitoreo es necesario tener claro las causas del deslizamiento, área de influencia y profundidad en la que influyen estos deslizamientos. Adicionalmente se requiere conocer acerca de la geología de la zona, niveles de precipitación, aguas superficiales y profundas, lo cual brinda resultados más favorables del estudio. El fin de un programa de monitoreo, es corroborar la validez o no, de lo propuesto previamente y la cuantificación de parámetros y procesos. Finalmente para la planeación del programa de instrumentación es necesario determinar (Suarez, J. 2009):

- Cuáles son las mediciones que se requieren.
- Selección de instrumentos específicos que mejor se adapten a las necesidades de la zona estudiada.
- Planeación de la localización, número y profundidad de la instrumentación.
- Determinar la metodología de lectura de los datos.
- Toma de decisiones sobre el manejo y la presentación de los datos obtenidos.

3.2.2 Objetivos de la instrumentación

De acuerdo a(Alpizar & Sanz. 2013), la instrumentación geotécnica, en zonas donde hay presencia de amenaza de deslizamientos por inestabilidad, o en estructuras que pueden verse afectadas por obras civiles; permite conocer el comportamiento y características del terreno; además, cabe recordar que en la

geotecnia, el desarrollo de un proyecto no es recomendable que este se acabe en la fase de diseño, ya que este está dado por hipótesis que no dan garantías absolutas, de ahí se parte que una obra de esta sea controlada a partir de:

- Determinación de la profundidad y forma de la superficie de falla en un deslizamiento activo.
- Determinación de los movimientos laterales y verticales dentro de la masa deslizada.
- Determinación de la rata o velocidad de deslizamiento y el establecimiento de mecanismos de alarma.
- Monitoreo de la actividad de cortes o rellenos e identificación de los efectos de una determinada construcción.
- Monitoreo de los niveles de agua subterránea o presiones de poros y su correlación con la actividad del deslizamiento.
- Colocación de medidores y comunicación a un sistema de alarma.
- Monitoreo y evaluación de la efectividad de los diferentes sistemas de estabilización o control.

3.2.3 Tipo de instrumentación

Según lo determinado por Suarez, J. (2009) y de acuerdo con él, los instrumentos que son usados comúnmente para el monitoreo en el área de geotecnia son los siguientes:

- Control topográfico de puntos determinados. Se utiliza equipo estándar de topografía.
- Extensómetros superficiales. Pueden ser metálicos, de madera, eléctricos o plásticos.
- Inclínómetros. Miden la deformación horizontal del suelo a profundidad.
- Extensómetros. Ubicación de éstos en varios puntos de control a profundidad.
- Detectores de superficie de falla. Pueden ser estacas de madera, cintas

eléctricas o extensómetros.

- Monitores de vibración.
- Piezómetros. Miden el nivel de agua o la presión de poros.
- TDR (Reflectometría de ondas eléctricas).

Dado la gran cantidad de opciones que se tienen como instrumentación y método para el monitoreo de laderas y taludes, se hace referencia en los métodos menos ortodoxos para ser implementados durante un proceso constructivo.

Equipos convencionales de topografía, este es uno de los sistemas más comunes de instrumentación. Se pueden utilizar equipos ópticos o eléctricos para determinar los movimientos horizontales y verticales de los taludes. Para ello, se colocan BMs en sitios estables y que no sean influenciados por los posibles movimientos de tierra a causa de deslizamientos de la zona de estudio y una serie de puntos de medición de esta zona (Figura 6. Esquema de monitoreo topográfico). Las mediciones pueden ser tomadas diariamente empleando tubos que se insertan dentro del deslizamiento; de esta forma, se pueden medir las deformaciones relativas, movimientos de grietas, etc. Las medidas son relativas con referencia a un BM fijo. (Suarez, J. 2009).

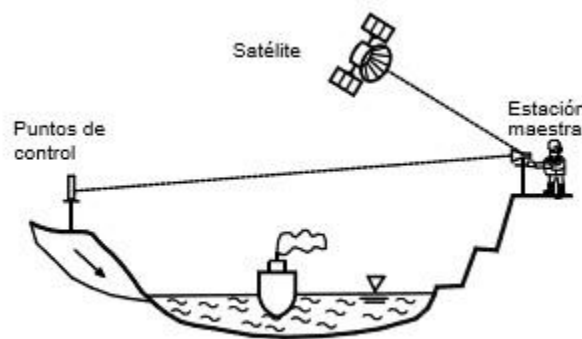


Figura 8. Esquema de monitoreo topográfico. (Fuente, Suarez, J. 2009).

Medidor de verticalidad, los medidores de verticalidad sirven para determinar el comportamiento de una vertical establecida que es alterada a partir de

deformaciones, es usado en la cabeza y en ocasiones al pie del movimiento, ayudando así a evaluar deformaciones futuras. Consiste en un nivel de agua que mide en componentes NS y EW (Figura 7. Esquema de medidor vertical).

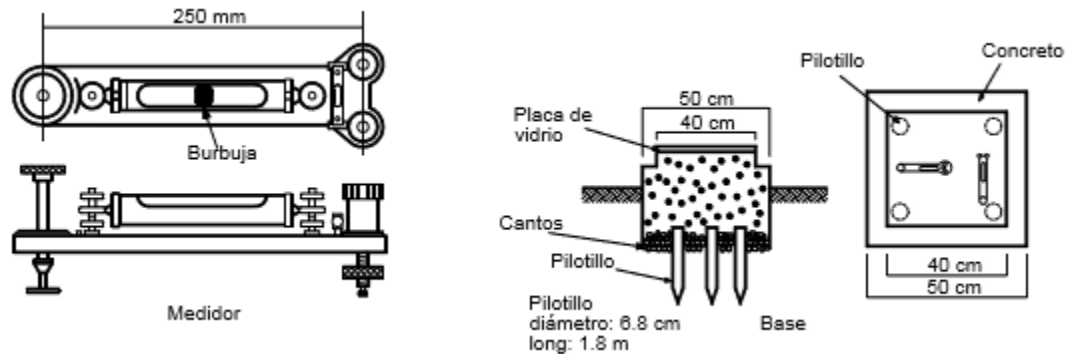


Figura 9. Esquema de medidor vertical. (Fuente: Suarez, J. 2009).

Extensómetros horizontales, los extensómetros permiten medir los movimientos horizontales y los cambios en la amplitud relativos de las grietas. Estos son utilizados para medir el movimiento relativo entre dos puntos que se encuentran a cierta distancia de una forma manual o automática. Son instalados generalmente, a través del escarpe principal o a través de las grietas, para así determinar su movimiento (Figura 8. Esquema de extensómetro horizontal).

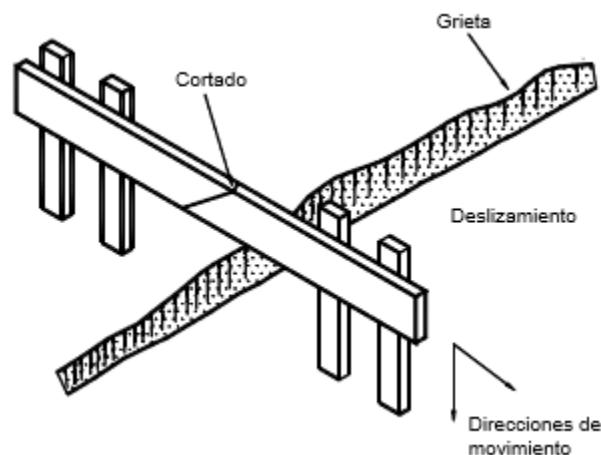


Figura 10. Esquema de extensómetro horizontal. (Fuente: Suarez, J. 2009)

Este y otros tipos de monitoreo son aplicables en proyectos que considera de forma específica el área de la geotecnia, las obras que hacen uso de estas técnicas de monitoreo son:

- Monitoreo de obras lineales o puntuales en entorno urbano e interurbano: túneles, carreteras o ferrovías, excavaciones entre pantallas, recintos apantallados, laderas inestables, taludes, desmontes.
- Monitoreo en estructuras hidráulicas: presas de material suelto y de hormigón.
- Monitoreo de la estructuras de la red de transporte: viaductos, puentes, pasos superiores e inferiores.
- Monitoreo de obras portuarias: puestos, diques, escolleras.

En España dentro de los diferentes procedimientos de negocios que la dirección ejecutiva de la red convencional, tiene en su manual de gestión de mantenimiento, está el relacionado el de mantenimiento preventivo, además que el de mantenimiento correctivo y las actuaciones de mejora. (Alpizar & Sanz, 2013).

Con el ánimo de optimizar los labores de mantenimiento y mejora, se ha implementado un monitoreo a lo largo de la red ferroviaria de línea convencional, se extiende por un total de 17.823 km de Vía. Este monitoreo se ha llevado a cabo entre los años de 1991 y 2010, por EPTISA IIC.

El monitoreo se realiza en 29 puntos a lo largo de la red, estos puntos fueron seleccionados por presentar amenaza de deslizamientos, dando así un controles exhaustivos en función de desplazamientos presentados. Entre los puntos controlados se tienen 16 laderas, 9 terraplenes, 2 túneles y 1 una estación del aeropuerto de Barcelona.

El sistema de implementación utilizado se divide en tres grupos:

- Grupo 1: Control de inestabilidad en profundidad, localizando el origen de inestabilidad.
- Grupo 2: Control del terreno en superficie, cuantificando su efecto exterior.
- Grupo 3: Control de estructuras, edificios y servicios posiblemente afectados por el fenómeno de inestabilidad.

Concluyendo así, que a la hora de ejecutar cualquier tipo de obra civil es primordial preservar la seguridad física de las personas y asegurar la integridad estructural de la construcción ejecutada. A demás que a la hora de implementar sistemas de monitoreo como el que se realizó en esta caso práctico, el monitoreo brinda un volumen mayor de información que puede ser de gran ayuda a la hora de tomar medidas preventivas durante la ejecución de la obra, estableciendo así un procedimiento de mantenimientos si es necesario tanto preventivo como correctivo, que de otra forma no hubiera sido posible determinar. Desde el punto de vista económico sale más factible ya que de no ser considerado estas anomalías, hubieran podido ser un desastre a futuro el cual representaba mayores gastos para su solución.

4.SEGUIMIENTO AL PROCESO CONSTRUCTIVO

Como se viene nombrando durante todo el documento, este tipo de estructuras (muros MSE con geosintéticos), está compuesta por una cantidad mínima de materiales primarios, como lo son los dos geotextiles, el material de relleno y el material que se usa como filtros para los drenajes. Tomando estos gran protagonismo para el buen funcionamiento de la estructura, por lo que es necesario, que durante la ejecución de la obra su manejo e instalación se hagan de manera correcta, considerando que estos materiales, pueden presentar alteraciones en campo. Además se debe considerar que esta estructura está diseñada para la estabilización de la ladera que genera un empuje constante sobre el muro que se está construyendo, por lo que es necesario, realizar un monitoreo constante.

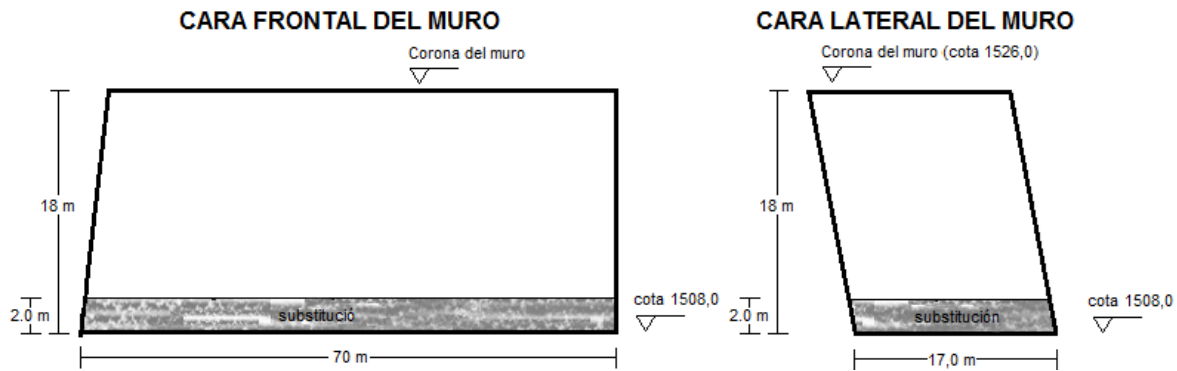


Figura 11. Esquema geométrico del diseño del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.

Para la construcción del muro el cual por diseño tiene un dimensionamiento de 18,0 m de altura incluyendo la cimentación, 70,0 m de frente y 17,0 metros de profundidad como se muestra en la Figura 9. Durante el proceso constructivo se realizó un seguimiento a las labores, las cuales fueron afectadas a causa del mal clima que se presenta en la zona, dado que durante el 25% del tiempo, se presentaron altas precipitaciones lo cual impidió un flujo adecuado del avance de las actividades respecto al cronograma inicial, ya que el material de relleno se encontraba saturado. Para ello se implementó una metodología de adecuación del material, el cual consistió en regarlo en la zona de trabajo para secarlo con ayuda del sol (oreo), generando esto tiempo de más en movimientos de tierra y ocupación de la carretera, lo cual implicaba un control especial para el tránsito de los vehículos en la zona.

Como bien se ha nombrado antes, este proyecto que consiste en armar un muro MSE con geosintéticos, tiene como objetivo ser autosuficiente para su construcción, haciendo uso del material de la ladera como material del relleno del muro (operaciones de corte y relleno). Para ello, el proyecto realizó ensayos de laboratorio para determinar características físicas y geo-mecánicas de este material y poder así determinar si cumple con las características requeridas para su uso.

Para el desarrollo de las labores constructivas de este muro, se contó con un equipo de trabajo completo tal como lo requiere este tipo de obra civil, además

cuenta con maquinaria suficiente para ejecutar las labores de forma constante. Durante las visitas realizadas se observó la siguiente maquinaria:

- Retroexcavadora de oruga grande
- Retroexcavadora de oruga pequeña 308
- Minicargador
- Bulldozers
- Compactador
- Ranas compactadoras

Estos equipos variaban en cantidad dependiendo la necesidad de la obra.

Para la construcción del muro se debió adecuar una cimentación la cual se denominó como trabajos de substitución, donde se realizó un cajón de 2,0 m de profundidad teniendo como cota de fondo el nivel N 1508,0, esta substitución constó de retirar el material existente y colocar una base granular que permita aislar el muro del suelo, con el fin de mantener el muro al margen de aguas que se filtren de la montaña o a través del mismo, ya que la principal causa de deslizamientos de esta ladera es el alto contenido de aguas de infiltración que generaba movimientos en masa. Esta parte del muro fue construida con un refuerzo de geomalla Fortgrid UX300 de refuerzo ver Tabla 2 y Figura 11.

Una vez conformada la cimentación se procede a construir el muro sobre esta, la cual tiene una tendido del geotextil Fibertex que sirve como filtro para que el agua drene sin que lleve con ella material de relleno. Para el muro se usó como formaleta frontal y lateral sacos o costales con material de relleno envueltos por geotextil Fortgrid Uniaxial. En el costado posterior o trasero del muro una formaleta lo separa 0,5 m con respecto a la ladera, este espacio es ocupado por material granular (4,0 – 8,0 pulg) envuelto en geotextil Fibertex que en conjunto funcionan como filtro, de esta manera se aísla el muro con la ladera a contener.



Figura 12. Filtro compuesto por geodrem y material granular, utilizado en la parte trasera de muro MSE con geosintético.



a).



b).

Figura 13. Formaleta del muro. a). Formaleta de costales con material de relleno (caras laterales y frontal). b). Formaleta trasera para colocación de filtro.

En tramos de 0,5 m de formaleta vertical, se procede a rellenar el núcleo del muro con material de relleno compactado y envuelto con el geotextil Fortgrid Uniaxial, de acuerdo al diseño del muro (ver Tabla 2. Refuerzo y drenaje del muro según

diseño), llevando este proceso a cabo por etapas. Este procedimiento se de la siguiente manera:

Se inicia extendiendo el geotextil Fortgrid Uniaxial sobre la toda superficie, asegurándose un traslapo mínimo de 40 cm entre los tendidos para ello se realiza una costura a lo largo de todos sus bordes dado la necesidad de tener que extender varios tramos de este geotextil para cubrir toda la superficie; más 2,5 m del geotextil se deben dejar sueltos por las caras laterales y frontal del muro, se procede a ubicar los sacos o costales de acuerdo a planos constructivos, se envuelven con los 2,5 m del geotextil, se anclan los pines (de acuerdo a planos) y se coloca el Fibertex que aislara el saco del material de relleno, ver la Figura 12 (esquema general de armado del muro MSE con geosintéticos). Una vez instalados estos componentes se procede a regar una capa de 0.25 m del material para conformar el relleno (material por el cual está constituida la ladera) con el uso de las retroexcavadoras, para luego proceder a densificarlo con ayuda del vibrocompactador compactando la parte central y con operación de las “ranas” compactadoras la partes cercanas a los sacos usados como formaletas. Finalizado este proceso se toman densidades de campo (ASTM D 1556 - 07) para evaluar la compactacion y se chequean los valores obtenidos con respecto al 95% de la densidad seca máxima obtenida en la prueba Proctor modificado (ASTM D 1557 – 09) una vez cumplida esta condición y recibida a satisfacción la capa evaluada, se coloca una nueva capa de material de relleno de 0.25 m de espesor, se compacta y se chequea. Una vez se alcanza la altura de los sacos y formaleta (0.50 m) se inicia con el siguiente nivel realizando el mismo procedimiento.

Como se observa en la Figura 12. Esquema general de armado del muro MSE con geosintéticos, el muro cuenta con una inclinación en la cara frontal, trasera y lateral izquierda. Esta inclinación dada por el diseño es de una relación 1,0 : 0.4, la cual consiste para el caso de los sacos que sirven como formaletas, que por cada saco de 0.5 m de altura, el siguiente debe colocarse con un retroceso de 0,18 m.

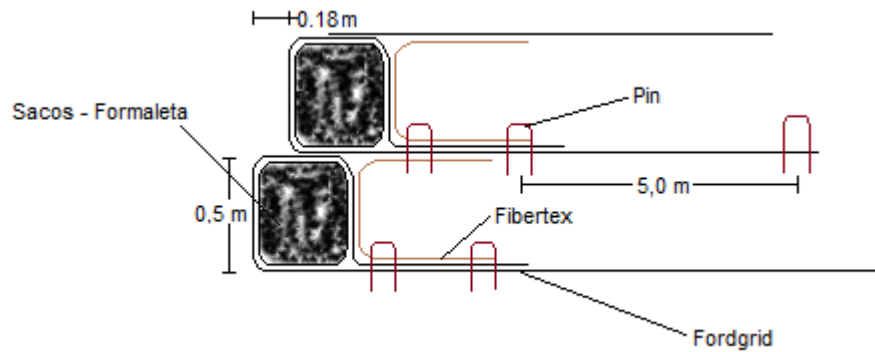


Figura 14. Esquema general de armado del muro MSE con geosintéticos.

Como se logra apreciar en Tabla 2. Refuerzo y drenaje del muro según diseño, este muro MSE con geosintéticos cuenta con algunos tendidos de Geotextiles para ayudar al drenaje del muro (Pipedrain y Permadrain) estos se extienden cada 2,0 m por todo el ancho del muro a determinados niveles, estos deben sobresalir 0,6 m de la cara frontal del muro.

Tabla 2. Refuerzo y drenaje del muro según diseño.

Altura Muro	Geotextiles de Refuerzo	Geotextiles de drenaje	Altura Muro	Geotextiles de Refuerzo	Geotextiles de drenaje
0	FgridUX300		9,5	FgridUX100	
0,5	FgridUX300		10	FgridUX100	
1	FgridUX300		10,5	FgridUX100	
1,5	FgridUX165		11	FgridUX100	Permadrain
2	FgridUX165		11,5	FgridUX100	Pipedrain
2,5	FgridUX165		12	FgridUX100	
3	FgridUX165		12,5	FgridUX100	
3,5	FgridUX165	Pipedrain	13	FgridUX100	Permadrain
4	FgridUX165		13,5	FgridUX100	
4,5	FgridUX165		14	FgridUX100	
5	FgridUX165	Permadrain	14,5	FgridUX100	
5,5	FgridUX165		15	FgridUX100	Permadrain
6	FgridUX165		15,5	FgridUX100	Pipedrain
6,5	FgridUX165		16	FgridUX100	
7	FgridUX165	Pipedrain	16,5	FgridUX100	
7,5	FgridUX100		17	FgridUX100	Permadrain
8	FgridUX100		17,5	FgridUX100	
8,5	FgridUX100		18	FgridUX100	
9	FgridUX100	Permadrain			



Figura 15. Instalación del Pipedrain en el muro MSE con geosintéticos.



Figura 16. Formaleta de sacos envueltos del geotextil Fordgrid UX 165, de acuerdo al esquema general de armado del muro MSE con geosintéticos.



Figura 17. Colocación y regado del material de relleno con ayuda de retroexcavadora sobre geotextil Fordgrid UX 165, de acuerdo a metodología para la construcción del muro MSE con geosintéticos.

Como se mencionó la actividad que más requiere tiempo es el movimiento de tierras a causa que el material es proveniente de la ladera, este debe ser ubicado en una zona del proyecto además por la limitaciones de espacio se invade la carretera que incluye parte del muro MSE con geosintéticos, lo cual impide por el manejo de los usuarios de la vía, el avance normal del proyecto en este punto, y se retarda en tramos, por lo que generó la necesidad de que el proyecto se realizara en cuatro fases (ver figura 16.). La primera fase inicio con el levantamiento del tramo 1 del muro. (Como se nombra en el documento, este muro es construido con material de la misma ladera, lo cual implica movimientos de tierra, razón por la cual se alteró el estado de equilibrio de la zona, generando esto durante el proceso de arranque de los tres tramos, se presentaron desplazamiento de la base del muro, a causa del fenómeno de supresión). Una vez esta primera fase llegó a una altura de 5,0 m (N 1515,0), se inició con la fase II, que fue el arranque de la construcción del tramo 2 del muro, una vez este tramo alcanzó una altura de 3,0 m, se dio inicio a la fase III, en la cual se dio inicio a la construcción del tramo 3.

Durante el avance de estos tres tramos una vez estos llegaron al nivel 1515,0, se dio paso a la fase IV la cual corresponde elevar de forma “pareja” todo la estructura hasta llegar a la corona del muro (N1526,0). Se recuerda que estos avances se hicieron tal como se indicó en párrafos anteriores con sus debidos refuerzos y drenajes.

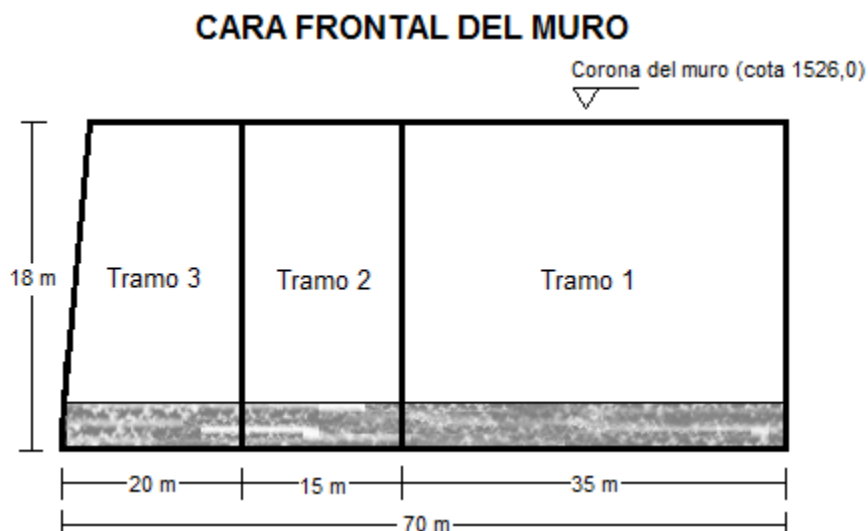


Figura 18. Esquema geométrico final del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.

Es necesario resaltar que durante el proceso de construcción del muro, el material de refuerzo (geomalla) está expuesto a deterioro causado por los movimientos para su traslado en obra, exposición a la luz ultravioleta y la falta de cuidado al ser manipulado por los trabajadores.

Para finalizar con la descripción del proceso constructivo, para la estabilización del muro y de la ladera se hizo un sistema de drenaje con disipadores hidráulicos, cuyo objetivo es recoger y encausar las aguas que escurren de la ladera evitando tener contacto con el muro y son conducidas a las canaletas o cunetas paralelas a la vía. Además de unos drenes que recogen el agua que posiblemente infiltra al interior del muro hasta la cimentación (substitución).

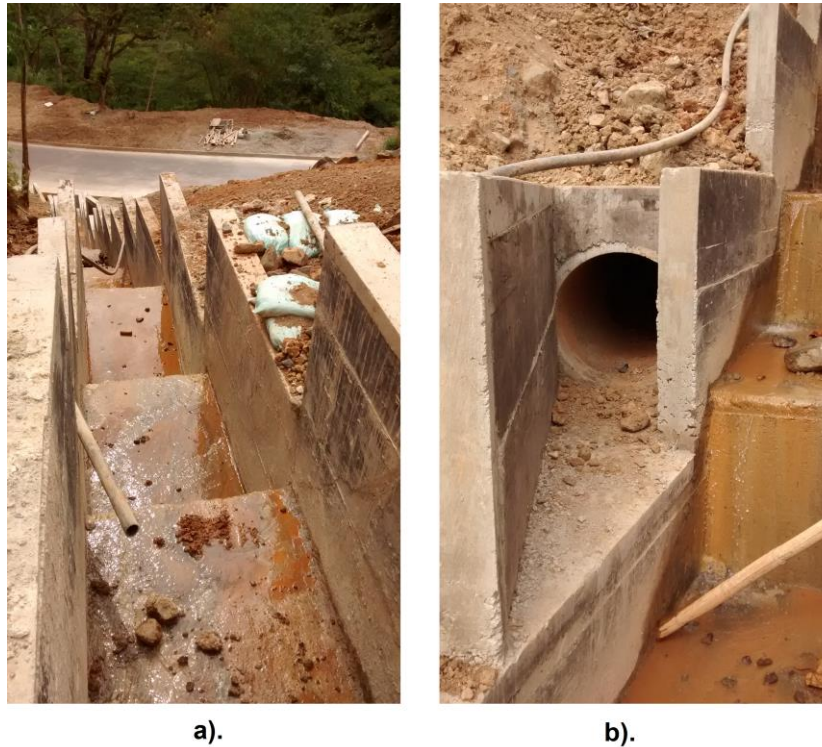


Figura 19. Sistemas hidráulicos para protección de aguas de infiltración del muro. a). Disipadores hidráulicos que recogen las aguas de la ladera antes de entrar en contacto con el muro. b). Conducto de agua que recoge las posibles aguas que entran al muro.



Figura 20. Vista general final del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.

5. ENSAYOS DE LABORATORIO

Dado que el suelo es un material complejo que tiene variabilidad en sus partículas y composición química, es necesario realizar pruebas de laboratorio, las cuales

generan un lenguaje de fácil comprensión tanto para técnicos como especialistas que deseen caracterizar y conocer propiedades de determinado tipo de suelo. De acuerdo a las necesidades que se generan en diferentes campos de la ingeniería existen una gran variedad de ensayos de laboratorio y de campo con la capacidad de brindarnos la información que requerimos, de las cuales para este proyecto se realizaron tres de dichas pruebas con muestras del material de relleno, las cuales se presentan a continuación con sus respectivos resultados.

Además presentamos los resultados de los ensayos de laboratorio con los cuales el consultor del proyecto realizó el diseño del muro.

5.1 Granulometría

Es un análisis que se acostumbra a realizar a los suelos para usos en ingeniería universalmente, lo cual nos indica una caracterización del suelo que entra dentro de los criterios de aceptabilidad del suelo para obras como carreteras, aeropistas, presas de tierra entre otros. Esta información nos brinda en porcentajes que cantidad de material de X tamaño contiene la muestra examinada, lo cual es un criterio de alta validez como se mencionaba anteriormente. (Bowles, 1981).

A continuación se presentan las curvas obtenidas de las pruebas granulométricas con base a la norma ASTM D 422, que se realizaron al material de relleno del muro MSE reforzado con geosintéticos en el proyecto realizado para la recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca

Esta prueba se realizó a ocho muestras elegidas directamente en campo aleatoriamente, y a medida que el muro iba avanzando en su construcción obteniendo así varias curvas granulométricas y finalmente una promedio.

Los formatos debidamente diligenciados de las pruebas de laboratorio realizadas para el proyecto, se adjuntan en el capítulo anexos al final del informe, junto con un registro fotográfico.

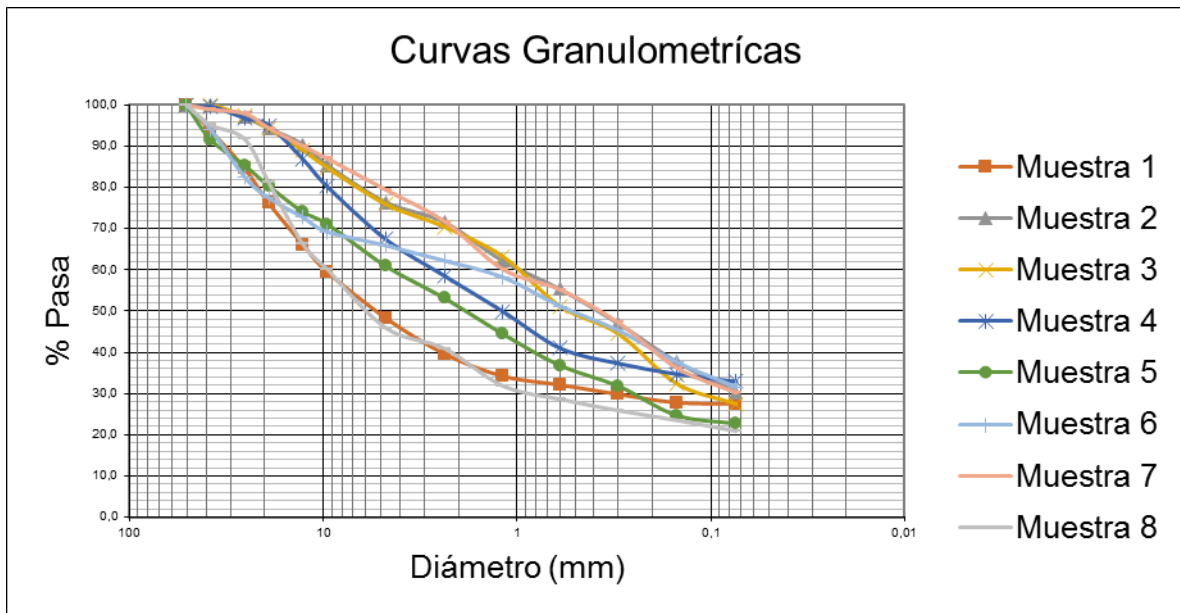


Figura 21. Grafica de los resultados de pruebas de granulometría del material de relleno del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.

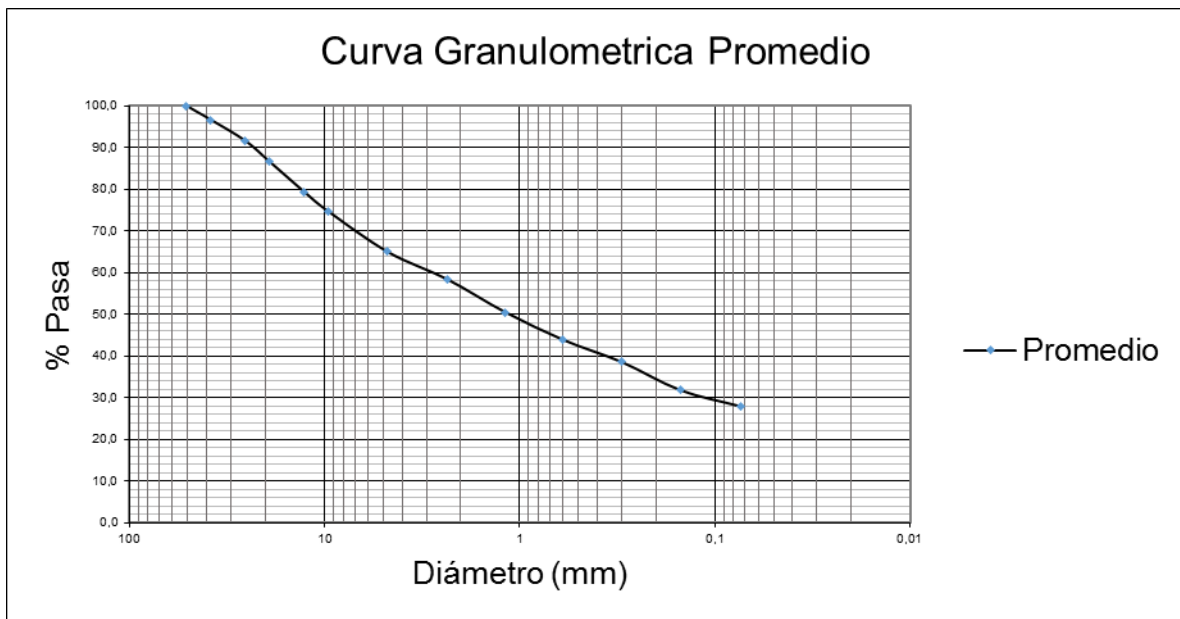


Figura 22. Grafica de la curva promedio de los resultados de pruebas de granulometría del material de lleno del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.

5.2 Límites de consistencia o límites de Atterberg

Los “límites” líquido y plástico son uno de los cinco límites que propuestos por A. Atterberg, científico que se dedicó a la agricultura y determino cinco límites de estado un suelo, estos son:

- Límite de cohesión
- Límite de pegajosidad
- Límite de contracción
- Límite plástico
- Límite líquido

Actualmente los límites líquido y plástico son utilizados a nivel mundial para clasificación de suelos, al igual que el límite de contracción ha sido de gran utilidad para zonas donde el suelo sufre grandes cambios de volumen entre su estado seco y su estado humero. Por el contrario los límites de cohesión y pegajosidad han sido muy poco utilizados universalmente. A continuación presentamos una figura donde vemos que estos límites dependen del porcentaje de humedad del suelo. (Bowles, 1981).

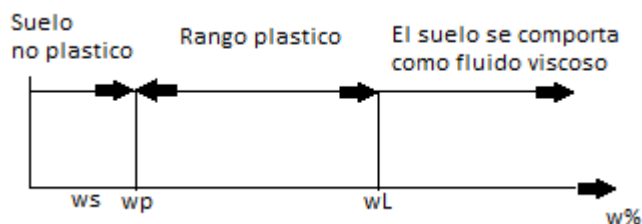


Figura 23. Localización relativa de los principales límites. ws , límite de contracción. wp , límite plástico. wL , límite líquido.

A continuación se presentan las curvas obtenidas de las pruebas de límites con base a la norma ASTM D 4318, que se realizaron al material de relleno del muro MSE reforzado con geosintéticos en el proyecto realizado para la recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.

Esta prueba al igual que la prueba de granulometría se realizó con ocho muestras elegidas directamente en campo aleatoriamente, y a medida que el muro iba avanzando en su construcción obteniendo así varias curvas granulométricas y finalmente una promedio.

Los formatos debidamente diligenciados de las pruebas de laboratorio realizadas para el proyecto, se adjuntan en el capítulo anexos al final del informe, junto con un registro fotográfico.

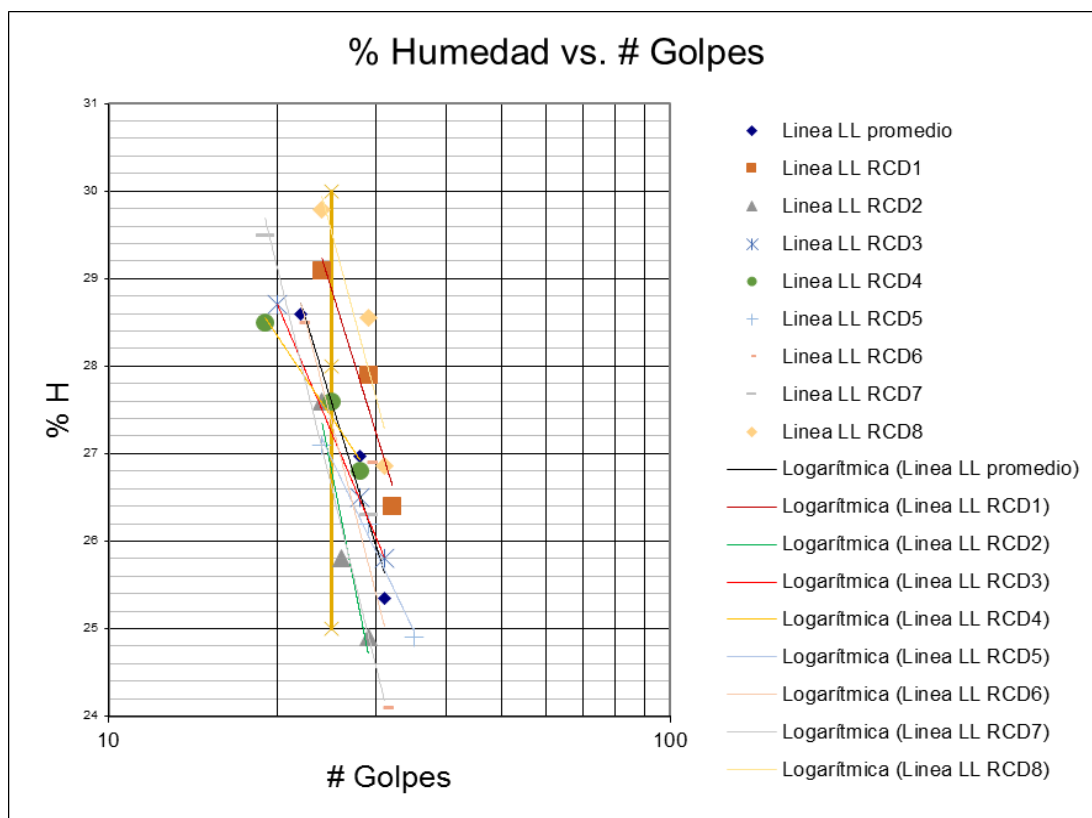


Figura 24. Grafica de los resultados de pruebas de límites de Atterber realizadas al material de relleno del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.

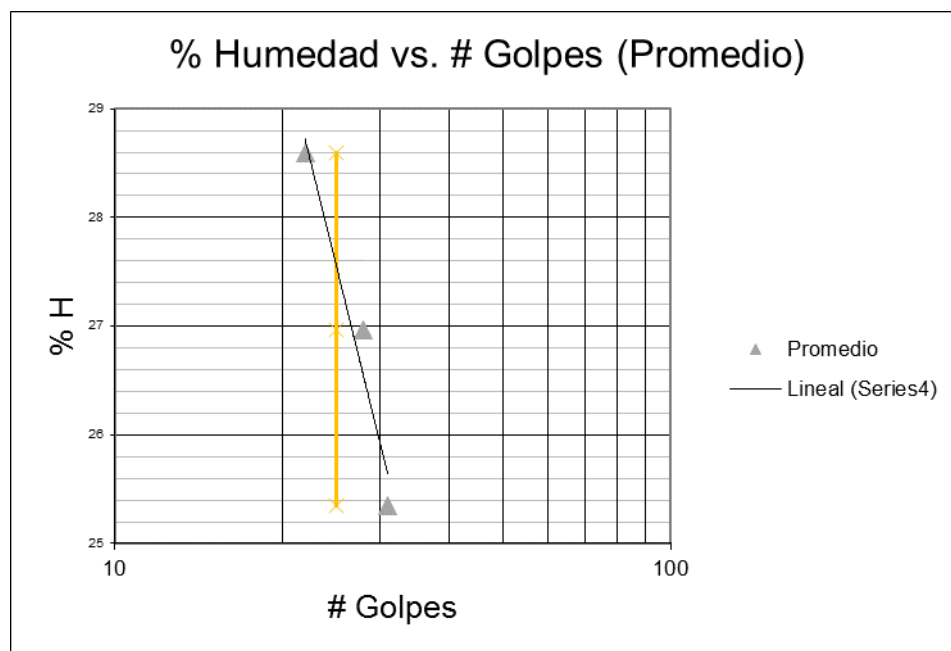


Figura 25. Gráfica promedio de los resultados de pruebas de límites de Atterber realizadas al material de relleno del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.

Obteniendo finalmente la siguiente caracterización promedio:

Tabla 3. Características promedio de pruebas de límites de Atterber realizadas al material de relleno del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.

Limite Liquido %	27,4
Limite Plastico %	16,3
Indice de Plasticidad %	11,1

De acuerdo a los resultados obtenidos durante las pruebas de clasificación, se determinó que el material de relleno con el cual se trabajó durante la construcción del muro MSE reforzado con geosintéticos en el proyecto para la recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca según el sistema de clasificación unificado de suelos (USCS) es un SC, arena arcillosa con presencia de finos tipo arcilla de baja plasticidad (CL).

5.3 Corte directo Consolidado Drenado

La finalidad de este ensayo es determinar la resistencia de un suelo sometido a una carga, simulando las condiciones a lo que podría estar expuesto este en

campo. Para esta prueba se induce a la ocurrencia de una falla sobre un plano de localización predeterminado, aplicando sobre este fuerzas (o esfuerzos), estos relacionados directamente con una carga vertical y una carga horizontal, generando así un esfuerzo normal y un esfuerzo cortante respectivamente, para lograr así determinar el parámetro Φ (ángulo de fricción interna).

A continuación presentamos los resultados de las dos pruebas de corte directo (ASTM D3080-72) que se le realizaron a dos muestras diferentes del material de relleno con el cual fue estabilizado el muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.

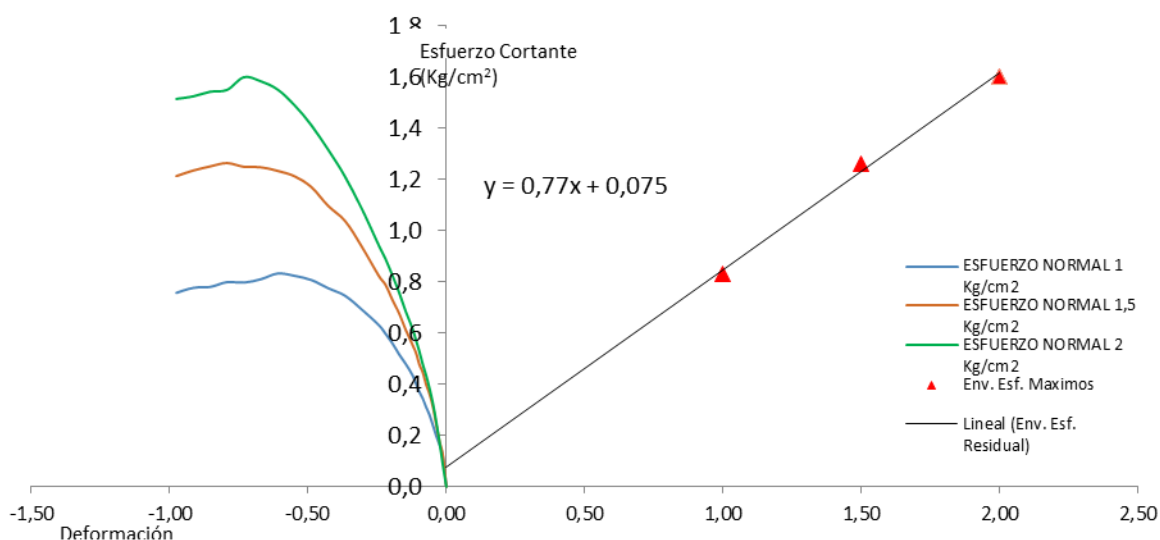


Figura 26. Resultado de prueba N° 1 de corte directo realizadas al material de relleno del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.

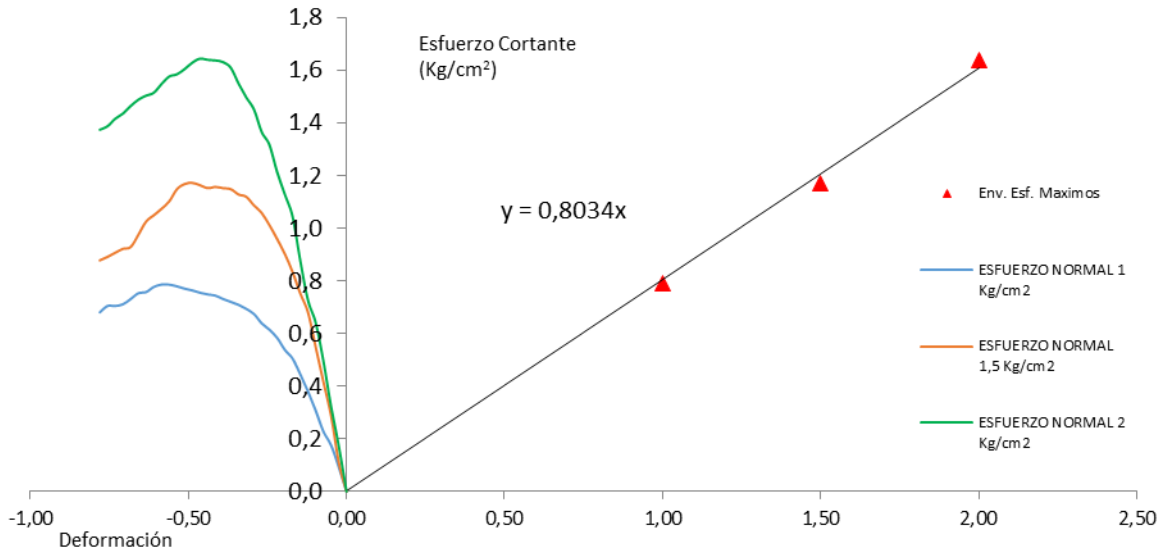


Figura 27. Resultado de prueba N° 2 de corte directo realizadas al material de relleno del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.

Finalmente se muestra a continuación el parámetro ϕ y c' obtenidos en los ensayos de laboratorio.

Tabla 4. Resultados de la prueba de corte directo realizadas al material de relleno del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.

	ϕ	c'
(Muestra N°1)	38	0,08
(Muestra N°2)	39	0,00

5.4 Relaciones humedad-densidad, ensayo de compactación (Proctor Modificado)

El ensayo modificado de compactación, es empleado para determinar la relación entre la humedad y el peso unitario seco de un suelo denominada “curva de compactación”, el cual es compactado en un molde de un diámetro de 4 o 6” con ayuda de un martillo de 10 lbf, que cae libremente desde una altura de 18” produciendo así una energía de compactación aproximada de 56000 lbf-pie/pie³. A continuación presentamos la curva de compactación obtenida del ensayo ASTM D1557-09 realizada al material de relleno con el cual fue estabilizado el muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.

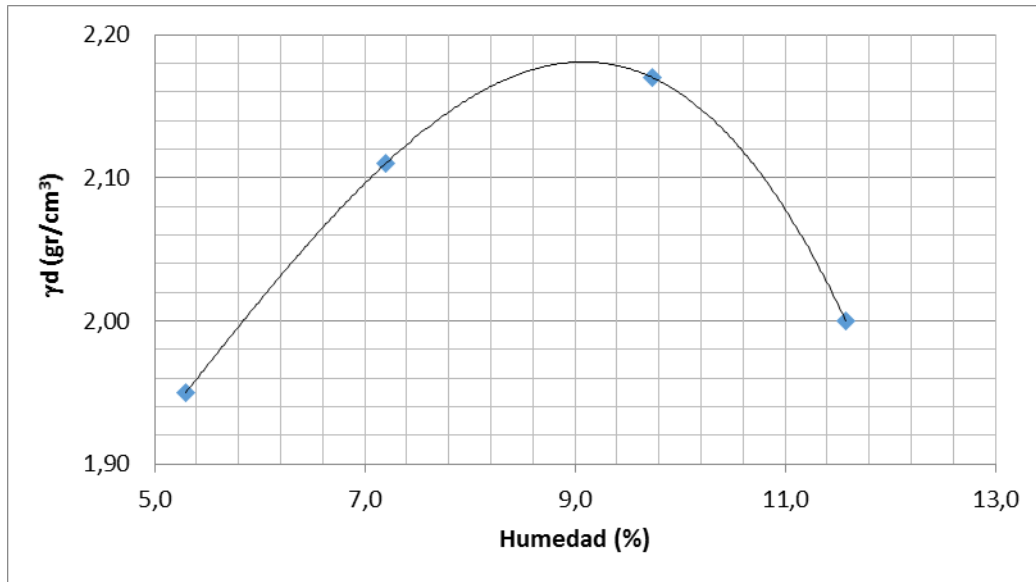


Figura 28. Curva de compactación (densidad vs humedad), realizado al material de relleno del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.

Obteniendo así que el peso unitario seco máximo es de 2,19 gr/cm³ y el contenido de humedad óptimo es del 9,2%.

5.5 Resultado de laboratorios entregados por el contratista para el diseño del muro MSE con geosintéticos

Para el diseño del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca, se realizaron pruebas de laboratorios al material de relleno con el cual se iba a estabilizar muro, con el fin determinar los parámetros de diseño. Dicho material está compuesto por tres tipos de suelo diferente. A continuación se presenta los datos con los cuales se diseñó dicho muro.

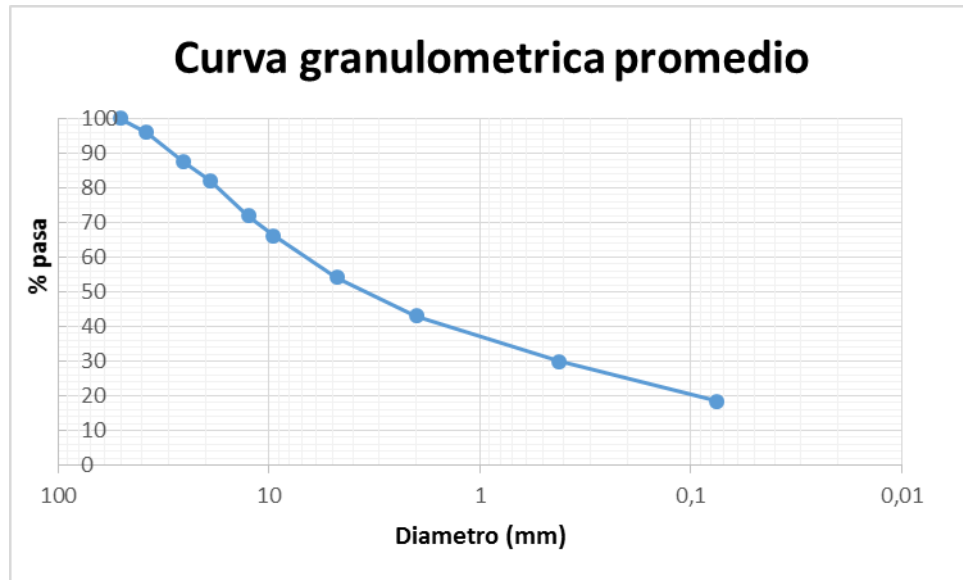


Figura 29. Grafica de la curva promedio de los resultados de pruebas de granulometría para el diseño del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.

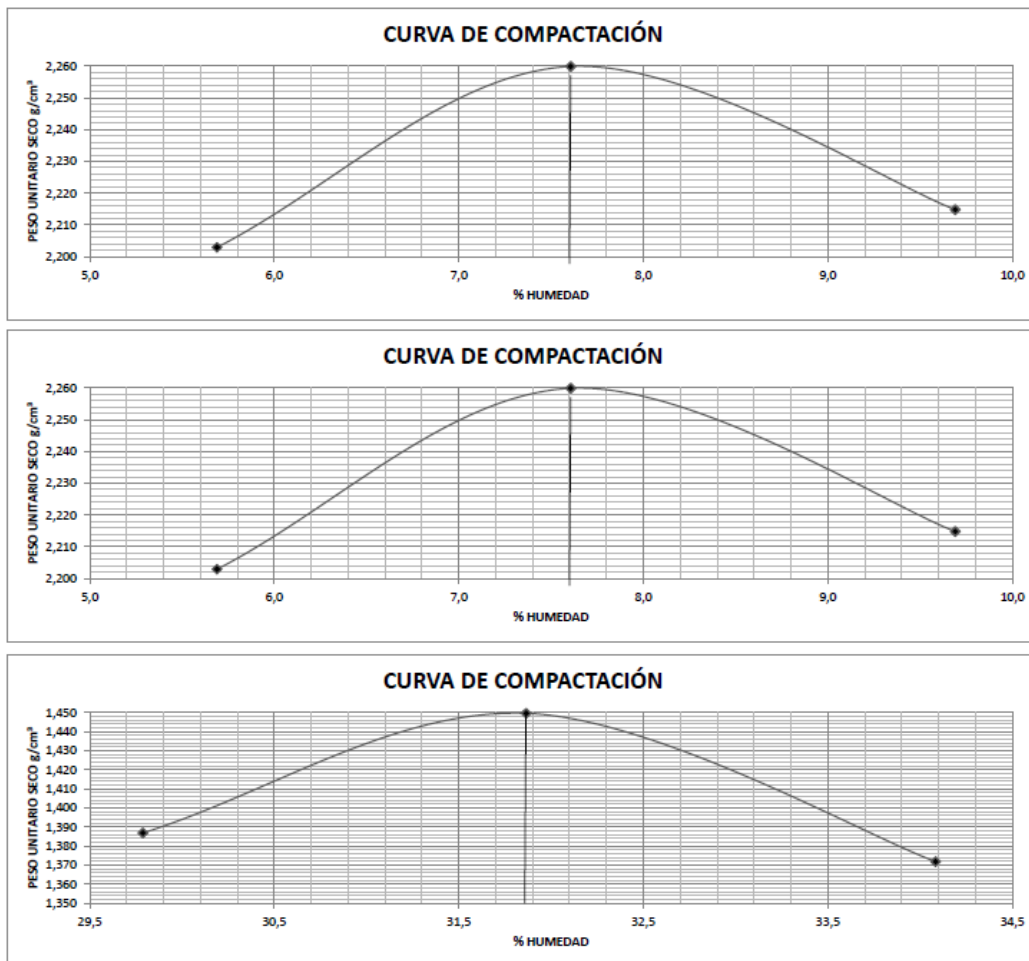


Figura 30. Graficos de curvas de compactación resultados de la prueba de proctor modificado para el diseño del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.

Tabla 5. Características promedio de pruebas de límites de Atterberg y corte directo para el diseño del muro MSE con geosintéticos para recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca.

Limite liquido (%)	39,4
Limite plástico (%)	23,9
Índice de plasticidad (%)	15,5
Φ de diseño (°)	32

6. INSTRUMENTACION PARA MEDIR DEFORMACIONES RELATIVAS INTERNAS

Las soluciones de ingeniería que corresponde a la construcción de estructuras de contención o taludes de alta pendiente ha provocado el desarrollo de nuevas técnicas para dichos trabajos. En Colombia las estructuras en suelo mecánicamente estabilizados con geosintéticos (MSE) data que se vienen empleando desde el inicio de los años 90, gracias a las ventajas que representa al trabajar con este tipo de estructuras. (GEOMATRIX)

Lo cual genera un campo de estudio para así poder analizar el comportamiento de estas estructuras y poder evaluar características puntuales como son las posibles deformaciones internas que se presentan en dichas estructuras.

A continuación se presenta un instrumento que tiene como objetivo medir las deformaciones internas presentes en el muro de tierra a medida que se va ejecutando su construcción. El principal objetivo de este instrumento es poder determinar las deformaciones internas relativas del muro con respecto a la cara trasera del mismo a medida que se va construyendo el muro. Deformaciones que dependen principalmente, del material de relleno con el cual se está armando el muro, del geotextil con el que se está confinando el material de relleno, de la calidad de ejecución de proyecto y finalmente de la precipitación que se presenta en la zona.

El fin de este instrumento es medir las deformaciones de la estructura de tal manera que mediante este control se evalué la estabilidad interna del muro y se pueda tomar a tiempo las medidas correctivas ante una eventual situación de inestabilidad.

A continuación presentamos el modelo desarrollado para cumplir con el objetivo de monitoreo de deformaciones internas de la estructura:

6.1 Descripción del instrumento para medir deformaciones horizontales internas

Dado que una de las prioridades es elaborar un instrumento que sea de bajo costo, para ello se desarrolló un diseño de un equipo con la capacidad de medir las variaciones horizontales internas sobre su propio eje de acción. El instrumento lo conforman tres módulos cada uno contruidos con tubos de PVC (Policloruro de vinilo) comerciales, de 1/2" y 3/4" que se unen entre sí por medio de una caja la cual cuenta con dos tubos que sirven de anclaje de 1/2" perpendiculares al alineamiento de los dos tubos nombrados anteriormente (un tubo a cada lado de la caja), formando una "cruceta" de tres tubos de 1/2" y un tubo de 3/4". Al interior de esta caja nace una guaya que entra por el tubo de 3/4" creando así uno de los tres módulos que van a medir desplazamientos horizontales en el punto y zona aferente donde quedo dicha cruceta, este cable métrico entra nuevamente por el tubo de 1/2" del siguiente modulo que también cuenta con un cable métrico independiente y se encuentra traslapado al módulo anterior, uno dentro del otro (tubo de 1/2" dentro del tubo de 3/4") permitiendo así desplazamientos entre sí de los módulos, estos traslapos son de aproximadamente de 1,5 m para tener así un buen funcionamiento del sistema y poder así garantizar que no van a desacoplarse. Las guayas que viajan dentro de los tubos de todos los módulos que atraviesa de forma longitudinal y sale a la parte frontal del muro, nos permitirá leer los desplazamientos del punto donde se anclo la caja que une los tubos.

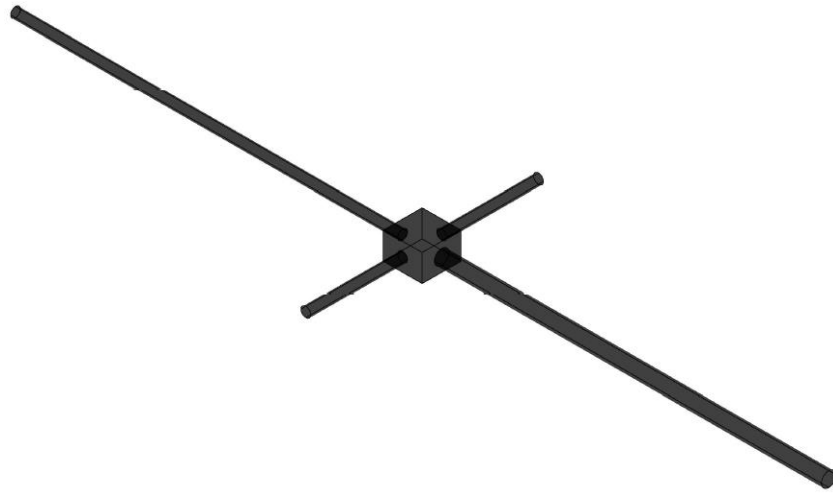


Figura 31. Instrumentación para medir deformaciones (un solo módulo)

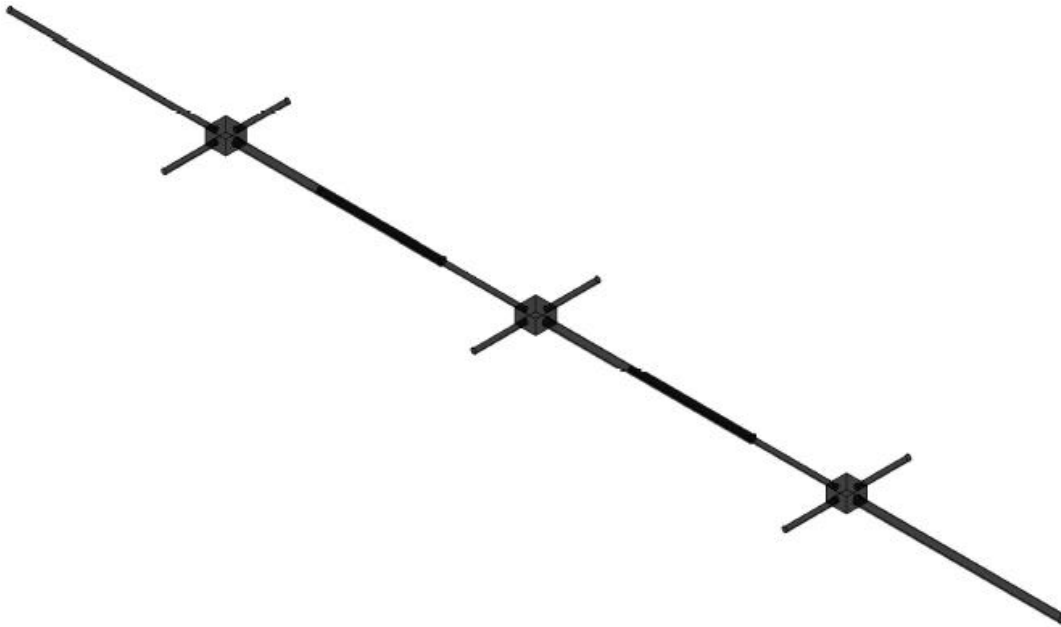


Figura 32. Instrumentación para medir deformaciones (módulos traslapados)

Para este caso en particular y de acuerdo a las dimensiones del muro MSE con geosintéticos construido para la recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca, se tomaron tres módulos, de los cuales dos eran exactamente iguales (modulo tipo 1) y otro con dimensiones de tubos diferentes (modulo tipo 2).

Módulo tipo 1:

- Caja metálica de 0,1 x 0,1 m
- tubos PVC de 1/2" por 0,5 m
- 1 tubo PVC de 1/2" por 2,7 m
- 1 tubo PVC de 3/4" por 3,0 m
- 1 guaya que va desde la caja hasta 1 metro más de la cara del muro (15,3 m y 3,7 m)

Módulo tipo 2:

- Caja metálica de 0,1 x 0,1 m
- tubos PVC de 1/2" por 0,5 m
- 1 tubo PVC de 1/2" por 4,0 m
- 1 tubo PVC de 3/4" por 4,0 m
- 1 guaya que va desde la caja hasta 1 metro más de la cara del muro (9 m)

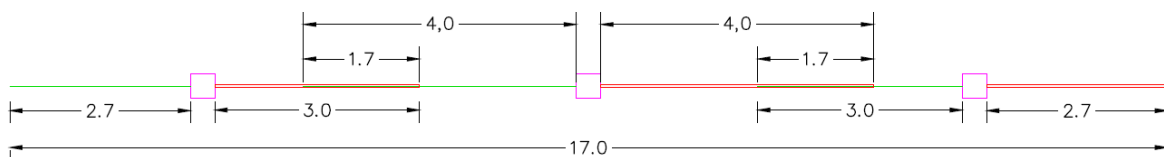


Figura 33. Esquema dimensional de instrumento para medir deformaciones.

Finalmente una vez ensamblados estos módulos entre sí, se debe anclar una placa de acero rígida de 0.3 x 0.3 m, en la parte trasera del muro, con una guaya de 18 m que viaja por el interior del sistema de módulos para poder tener referencia de medida y poder determinar los desplazamientos internos relativos del muro con respecto a la parte trasera de este.

Es de resaltar que las cajas están enumerada desde la cara frontal hacia atrás, siendo la caja N° 1 la más cercana a la cara frontal, la caja 2° la siguiente y así sucesivamente hasta enumerar todas las cajas.

Ahora bien, una vez determinadas las dimensiones de los módulos solo queda ensamblar e instalar el instrumento en campo.

Se instalaron dos instrumentos, uno de ellos se instaló en la cota N = 1516,25 (6.25 metros de altura del muro) y el segundo fue instalado en la cota N = 1521,00 (11.00 metros de altura del muro), los cuales medirán la deformación en dicha cota a medida que vaya ganando altura la estructura y a su vez generando Presiones Efectivas de Rankine.



Figura 34. Colocación del instrumento para medir deformación.

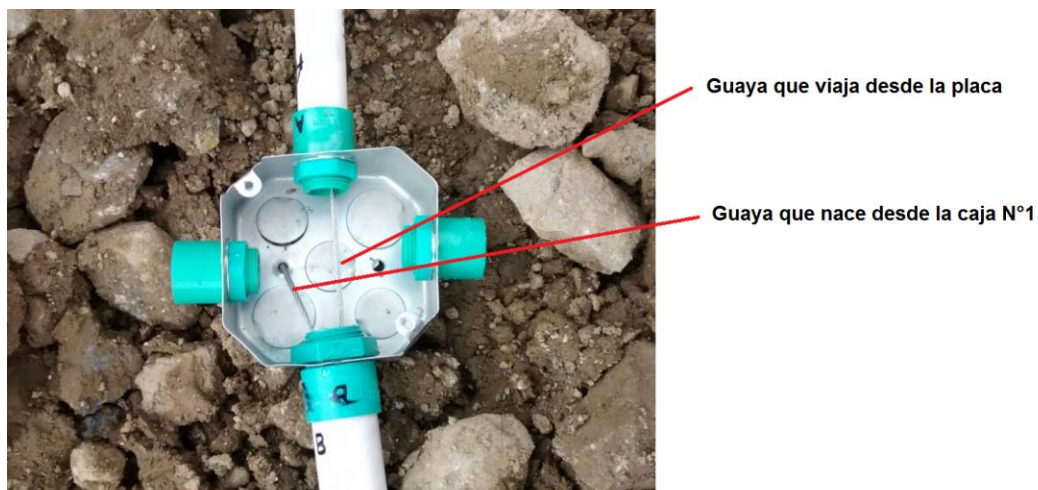


Figura 35. Detalle de guayas en caja N° 1.



Figura 36. Placa rígida que fue anclada en la parte trasera del muro.

6.2 Metodología toma de datos Instrumento para medir deformaciones horizontales internas

La toma de datos con los instrumentos, consiste en que cada vez que el muro adquiera altura bajo los estándares de calidad constructivos o se presenten fuertes precipitaciones, posteriores a esto se mida la variación relativa que tuvieron las guayas que nacen de cada uno de las cajas con respecto a la guaya que viene desde la parte trasera del muro, teniendo como valor de referencia el primer dato que se toma una vez es instalado el instrumento.

Una vez instalado el Instrumento para medir deformaciones, en la cara frontal del muro se tiene un tubo con guayas que sobresalen de él, tal como lo muestra la siguiente fotografía tomada del proyecto.



Figura 37. Instrumento N°1 instalado en el nivel 1516,25 (cara frontal del muro)

Para fines prácticos se supondrá que el instrumento cuenta con solo dos cajas, lo cual equivale a tener dos guayas, más la guaya que viaja desde la cara trasera del muro, como lo que se presenta a continuación:

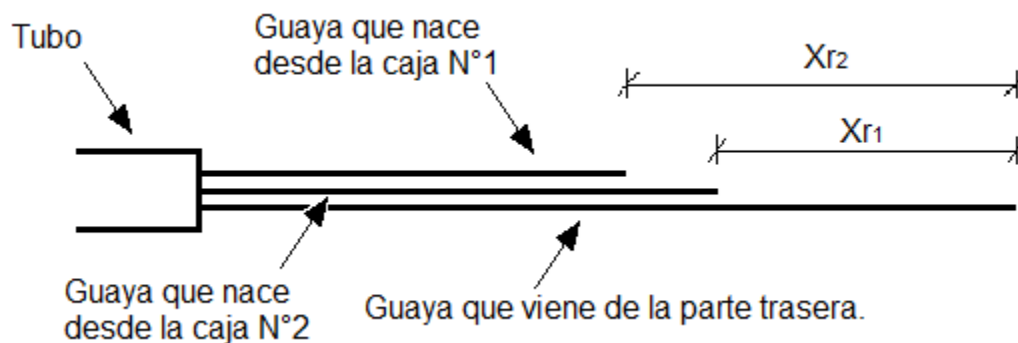


Figura 38. Esquema grafico del instrumento para medir deformaciones en la cara frontal del muro.

La toma de los datos se ejecuta con ayuda de una regla o cinta métrica, tomando el valor X_{r1} y X_{r2} los cuales serán nuestro valores de referencia (cada dato debe ser tomado tres veces para sacar un dato promedio), estos se miden desde el final de la guaya que está sujeta a la cara trasera del muro hasta la parte final de las guayas que nacen desde las cajas N°1 y N°2. Cabe resaltar que la numeración de las guayas deben quedar muy bien marcadas o diferenciadas en campo puesto que están expuestas a la intemperie, para la próximas tomas de datos.

Estos primeros valores serán usados como referencias para así determinar las deformaciones que se presentaron en el área aferente de la cruceta compuesta por la caja de la cual nace cada guaya, para ello se debe implementa la Tabla 6 donde debe ir anotando la información tomada en campo, para su posterior análisis.

Como se observa en la Tabla 6 además de los datos medidos en campo, es necesario anotar la cota a la cual se tomó el dato, además de resaltar en forma de observación las dificultades o razones por la cual se tomó el dato, puesto que como se mencionaba anteriormente, se debe de medir las guayas cada que el muro avance en altura o se presenten precipitaciones que puedan afectar la estabilidad mismo.

Tabla 6. Tabla que debe ser implementada para anotar los datos de medición tomados en campo.

Dato #	Guaya N° 1 (mm)	Guaya N° 2 (mm)	Cota (msnm)	Observacion
1	X_{r1}	X_{r2}	C_r	1° dato
2	X_1	X_4	C_1	Aumento altura
3	X_2	X_5	C_2	Aumento altura
4	X_3	X_6	C_3	Fuertes lluvias
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-

Una vez obtenido los datos, se debe proceder a realizar el respectivo análisis de los mismos, con los cual se logra determinar las deformaciones (ϵ) que ha presentado el muro bajo un estado de esfuerzo denominado como las Presiones Efectivas de Rankine (σ) , para ello, se deben calcular de la siguiente manera:

$$\epsilon_i = x_i - x_r \quad [Ecu 1].$$

Una vez calculada la variación entre el dato tomado x_i con relación al dato de referencia x_r , se calcula la Presión Efectiva de Rankine (σ), la cual era la ejercida sobre el instrumento para medir deformaciones a la hora de ser tomado el dato.

$$\sigma = (c_1 - c_r) * \gamma \quad [Ecu 2].$$

Siendo γ el valor del peso específico del material de relleno del muro MSE con geosintéticos.

Finalmente teniendo así los datos para completar la siguiente Tabla 7, con la cual se tienen los datos para poder analizar las deformaciones con respecto a las Presiones Efectivas de Rankine.

Tabla 7. Tabla con los datos obtenidos a partir de la información recogida en campo.

Dato #	Guaya N° 1 (mm)	Guaya N° 2 (mm)	Guaya N° 3 (mm)	Cota (msnm)	ϵ_1 (mm)	ϵ_2 (mm)	ϵ_3 (mm)	σ (kg/m2)	Observacion

7.MONITOREO A PARTIR DE DEFORMACIONES HORIZONTALES INTERNAS DEL MURO MSE CON GEOSINTÉTICOS

Como bien se ha mencionado a lo largo del trabajo, el monitoreo de las estructuras geotécnicas se ha venido desarrollando generando un nuevo campo en el área de la tecnología, con el objetivo de determinar el comportamiento de

estas estructuras, y así poder tener un mayor control sobre las posibles afectaciones que puede presentar dichas estructuras.

Para este trabajo se determinó realizar monitoreo del muro MSE con geosintéticos para la recuperación vial Uribe-Sevilla en el sector la Cristalina municipio de Sevilla, Valle del Cauca, con el instrumento para medir deformaciones internas descrito en el capítulo anterior y comparándolo finalmente con el resultado obtenido al finalizar el proyecto con relación al levantamiento topográfico.

A continuación presentamos los resultados obtenidos durante dicho monitoreo:

7.1 Monitoreo con instrumentación para medir deformaciones

Como se nombró anteriormente, para el monitorio del muro MSE con geosintéticos en estudio, se lograron instalar dos ejemplares del instrumento para medir deformaciones internas, los cuales fueron instalados en las cotas 1517,5 y 1521.0 respectivamente.

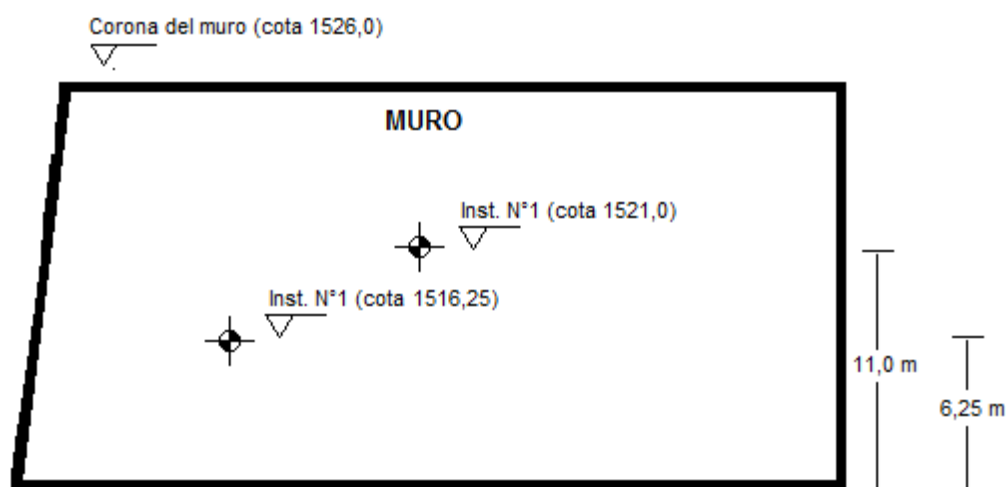


Figura 39. Localización (altura y posición) donde fueron instalados los instrumentos para medir deformaciones.

Una vez instalados los instrumentos, se tomaron datos tal como se describió en el capítulo anterior, hasta llegar a la altura máxima del muro 18,0 m (cota 1526,0). Obteniendo así los siguientes resultados:

Tabla 8. Resultado del instrumento N°1 (cota 1516,25)

Instrumento N°1 (cota 1516,25)									
Dato #	Guaya N° 1 (cm)	Guaya N° 2 (cm)	Guaya N° 3 (cm)	Cota (msnm)	ε_1 (mm)	ε_2 (mm)	ε_3 (mm)	σ (kg/m ²)	Observacion
1	17,5	30	25,6	1516,25	0,00	0,00	0,00	0,00	altura
2	17,5	30	25,6	1517,50	0,00	0,00	0,00	2737,50	altura
3	17,3	30,3	26	1518,00	-2,00	3,00	4,00	3832,50	altura/lluvias
4	16,9	30,8	26,3	1518,50	-6,00	8,00	7,00	4927,50	altura
5	16,4	30,4	26,8	1519,50	-11,00	4,00	12,00	7117,50	altura/lluvias
6	16,7	30,1	27,2	1520,00	-8,00	1,00	16,00	8212,50	lluvias
7	16,3	30	27	1521,00	-12,00	0,00	14,00	10402,50	altura
8	16	29,7	27,7	1521,00	-15,00	-3,00	21,00	10402,50	altura
9	15,2	29,3	28,4	1521,50	-23,00	-7,00	28,00	11497,50	altura
10	15,4	29,3	28,5	1522,00	-21,00	-7,00	29,00	12592,50	altura/lluvias
11	14,9	28,7	27	1523,50	-26,00	-13,00	14,00	15877,50	altura
12	14,4	28,3	26,6	1524,00	-31,00	-17,00	10,00	16972,50	altura
13	13,7	28	26,2	1524,50	-38,00	-20,00	6,00	18067,50	altura/lluvias
14	12,9	27,4	25,5	1525,00	-46,00	-26,00	-1,00	19162,50	altura/lluvias
15	11,1	26,5	24,4	1525,50	-64,00	-35,00	-12,00	20257,50	altura/lluvias
16	9,2	25,2	22,6	1526,00	-83,00	-48,00	-30,00	21352,50	altura

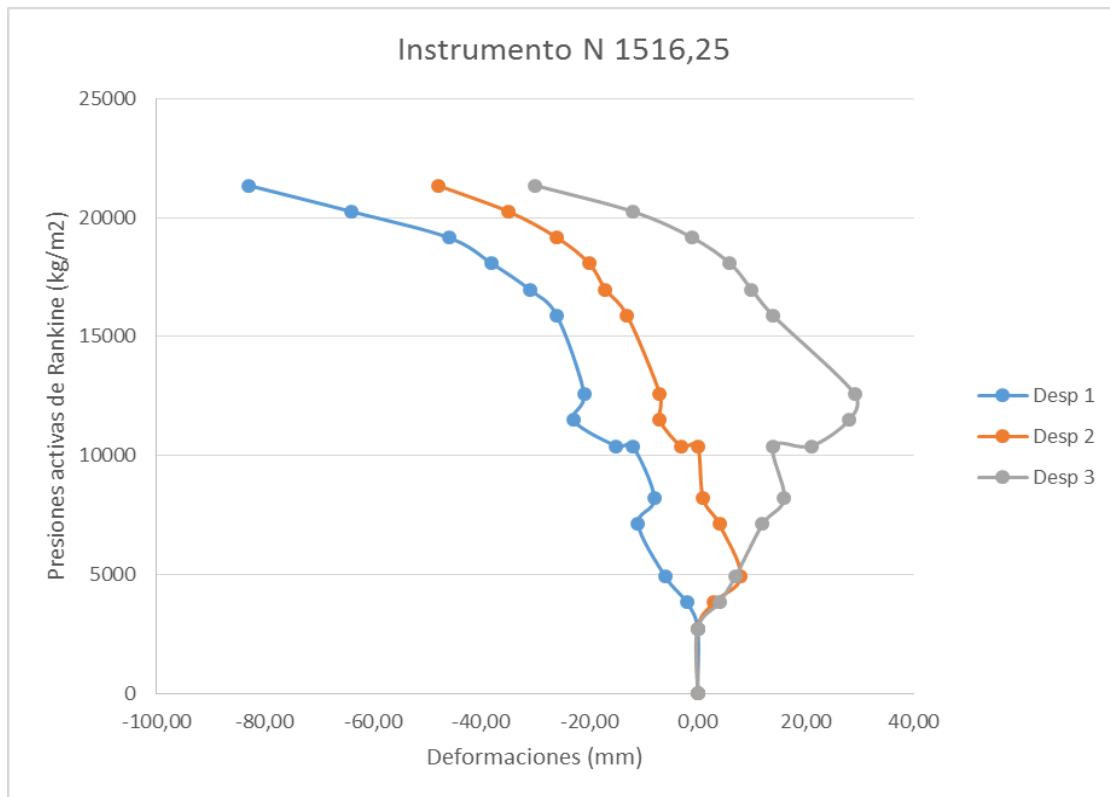


Figura 40. Grafica presiones activas de Rankine vs. Deformaciones (Instrumento N°1 - cota (1516,25)).

Tabla 9. Resultado del instrumento N°1 (cota 1532,0)

Instrumento N°2 (cota 1521,0)									
Dato #	Guaya N° 1 (cm)	Guaya N° 2 (cm)	Guaya N° 3 (cm)	Cota (msnm)	ε_1 (mm)	ε_2 (mm)	ε_3 (mm)	σ (kg/m ²)	Observacion
1	35,0	39,0	37,5	1521,00	0,00	0,00	0,00	0,00	lluvias
2	34,8	39,2	37,5	1521,50	-2,00	2,00	0,00	1095,00	altura
3	34,7	38,9	38,0	1522,00	-3,00	-1,00	5,00	2190,00	altura
4	34,5	38,7	37,3	1523,50	-5,00	-3,00	-2,00	5475,00	altura
5	33,8	38,4	36,5	1524,00	-12,00	-6,00	-10,00	6570,00	altura/lluvias
6	33,4	38,1	35,5	1524,50	-16,00	-9,00	-20,00	7665,00	altura
7	32,9	38,0	34,9	1525,00	-21,00	-10,00	-26,00	8760,00	altura
8	32,5	37,6	34,0	1525,50	-25,00	-14,00	-35,00	9855,00	altura/lluvias
9	31,7	37,1	33,8	1526,00	-33,00	-19,00	-37,00	10950,00	altura/lluvias

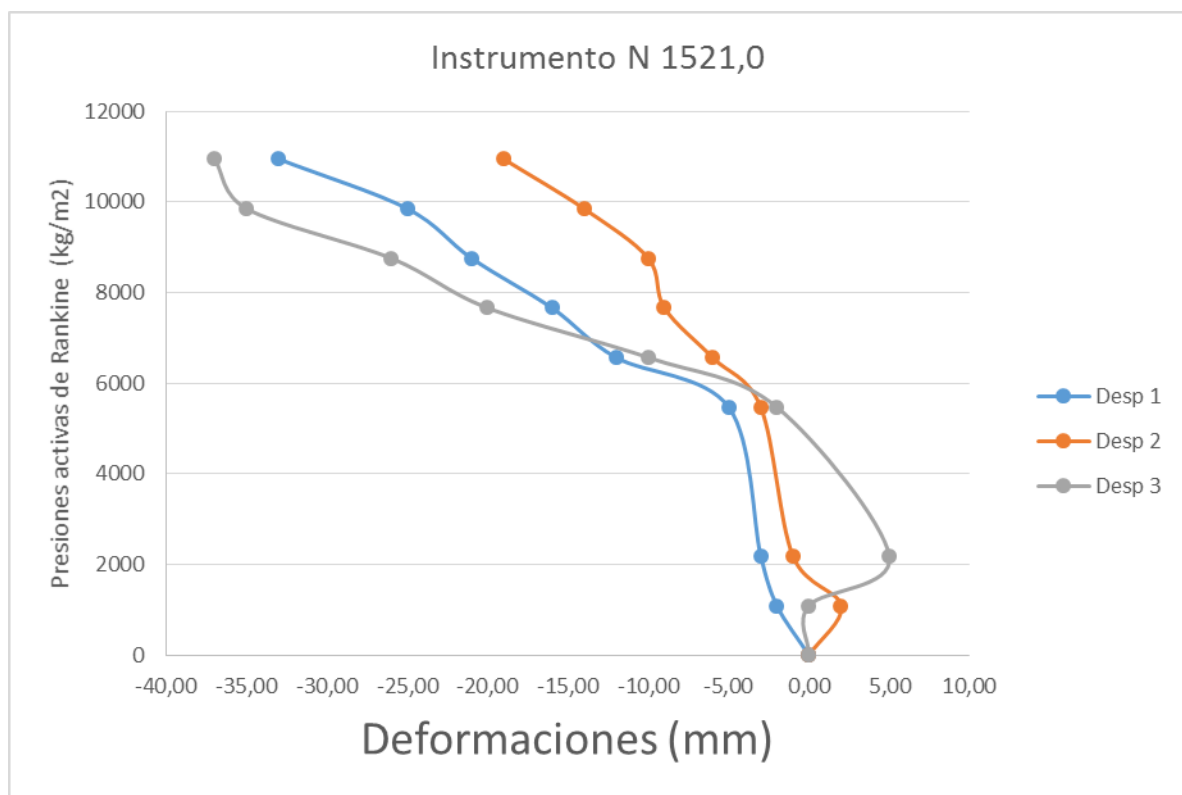


Figura 41. Grafica presiones activas de Rankine vs. Deformaciones (Instrumento N°2 - cota 1521).

Resumiendo, para la implementación y monitoreo de deformaciones internas relativas del muro se debe implementar la siguiente metodología:

1. De acuerdo al número de puntos de control que se quieren monitorear, se determina la misma cantidad de módulos, los cuales tendrán que dimensionarse de acuerdo a las recomendaciones dadas en el capítulo 6.1.
2. Fabricación de los módulos de instrumento, de acuerdo a las características determinadas en el punto anterior.
3. Ensamble e Instalación del instrumento en campo, incluyendo la placa de acero que debe ir anclada en la cara trasera del muro. La orientación es acorde con dirección en la se quieren medir las deformaciones.
4. Cubrir inicialmente de forma manual el instrumento con el material de relleno, cerciorándose que los puntos de control queden alineados entre sí. Una vez se cubren manualmente, se toman las medidas iniciales (valores de referencia) de las guayas que sobresalen en la cara frontal del muro.
5. Se toman datos, medida de caga guaya respecto a la de referencia, de acuerdo al capítulo 6.2 cada vez que se agregue una capa de material de relleno o cuando se crea conveniente, consignando en su respectivo formato. (Tabla 6.).

8.MONITOREO DE DEFORMACONES VERTICALES DEL MURO

Para determinar deformaciones verticales del muro, se realizó un monitoreo topográfico una vez se llegó a la corona del muro (cota N+1526,0) localizando 12 puntos de control, con los cuales se registraron los posibles asentamientos que podría presentar la estructura, puesto la carga que ejerce la estructura, tanto en el suelo, como en sí misma.

A continuación presentamos una vista en planta donde fueron localizados los 12 puntos de control sobre la corona del muro, los cuales quedaron separados entre sí aproximadamente 11,0 m, estos puntos se localizaron el 25 de mayo de 2017. Ver Figura 38.

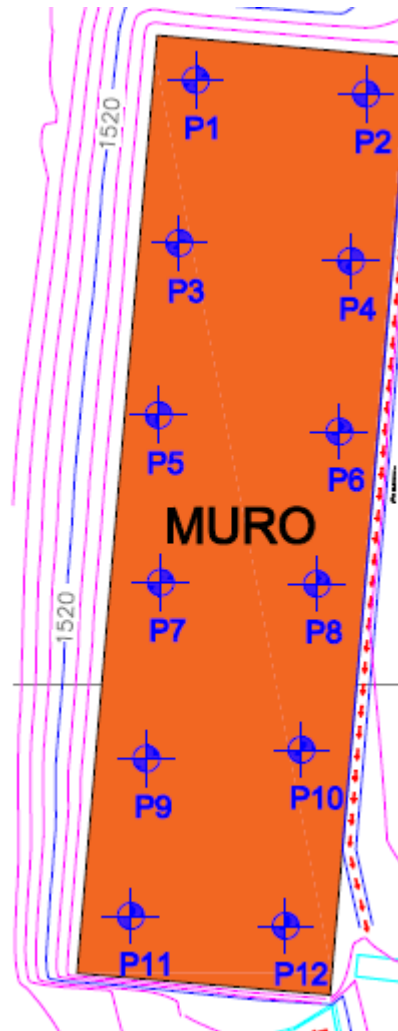


Figura 42. Localización de puntos de control en corona del muro para control de niveles.

Transcurrido dos meses y una semana después de haberse localizado los puntos, se tomaron los registros de variación de cotas, obteniendo así los siguientes resultados:

Tabla 10. Variación de nivel topográfico en corona del muro transcurrido dos meses y una semana.

Punto	Lectura inicial	Lectura nivel final	Dif.
P1	1525,95	1525,41	0,54
P2	1526,06	1525,54	0,52
P3	1526,11	1525,61	0,5
P4	1526,04	1525,59	0,45
P5	1526,01	1525,58	0,43
P6	1525,96	1525,54	0,42
P7	1526,01	1525,62	0,39

P8	1525,96	1525,57	0,39
P9	1525,98	1525,61	0,37
P10	1526,04	1525,71	0,33
P11	1525,93	1525,64	0,29
P12	1525,92	1525,66	0,26

9.ANALISIS DE RESULTADOS

9.1 Análisis y resultados del sistema constructivo

Si bien es claro, que durante el proceso constructivo se desarrollaron las actividades de acuerdo a los manuales de instalación y construcción de muros MSE reforzados con geosintéticos, también es necesario resaltar que el producto final en cuanto a geometría del muro no es tal cual estaba pactado en el diseño inicial dado para su construcción. Esto es claro observarlo en el resultado final obtenido en el levantamiento topográfico del muro. Teniendo variaciones de hasta 2,34 m en la corona del muro y 2,27 m en la pata del mismo con relación al diseño.

Es necesario resaltar que esta variación en su geometría fue condicionada durante el proceso constructivo puesto que durante su ejecución, la infiltración de aguas y los efectos de desequilibrio generados por el movimiento de tierra de la ladera, lograron desplazar la parte inferior de muro (pata) al inicio de la construcción. No obstante, este desplazamiento no afectó la estabilidad del muro en general, dado que durante la ejecución del proyecto, se tomaron las medidas correctivas para poder avanzar teniendo en cuenta los criterios de diseño para estabilización interna y externa del muro.

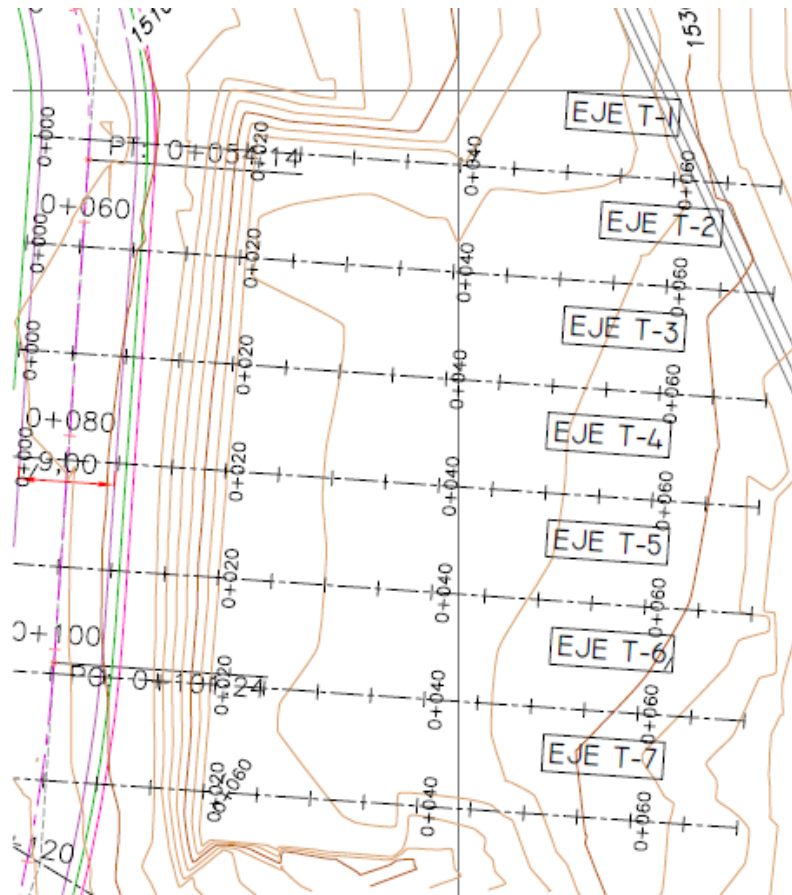


Figura 43. Vista en planta de topografía final del muro.

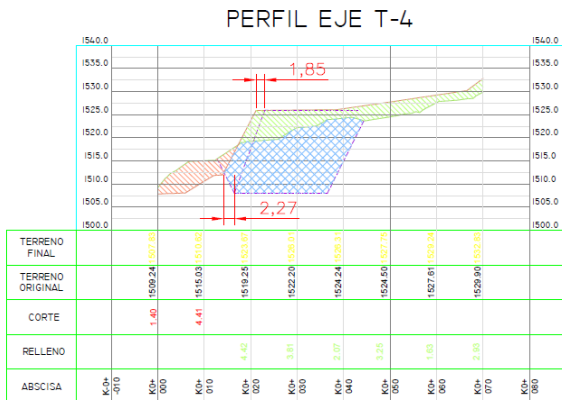
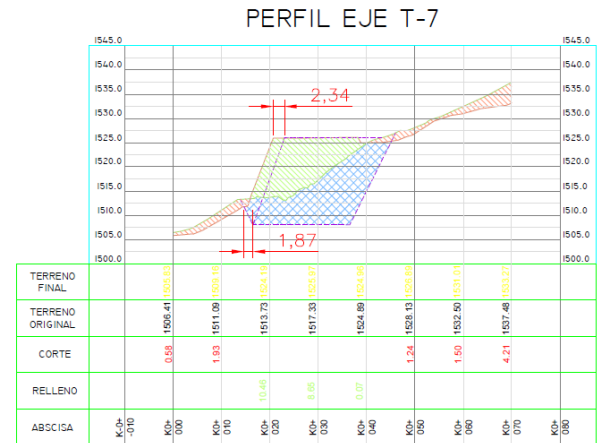
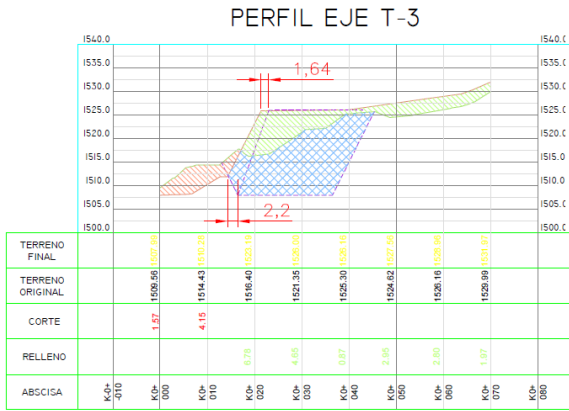
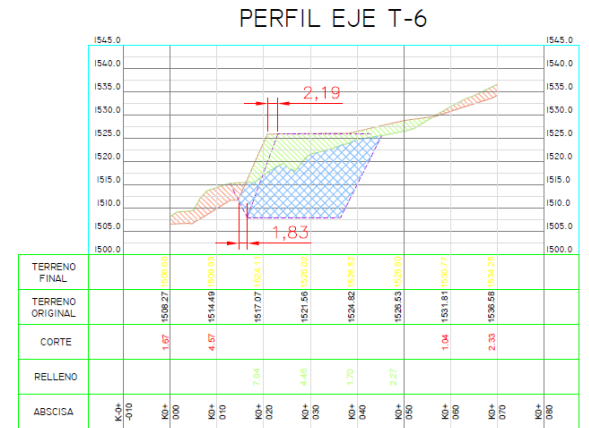
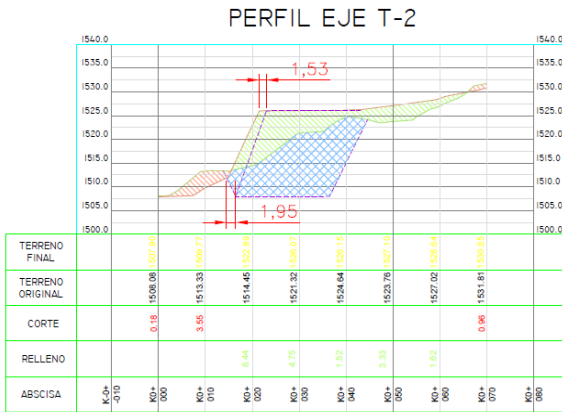
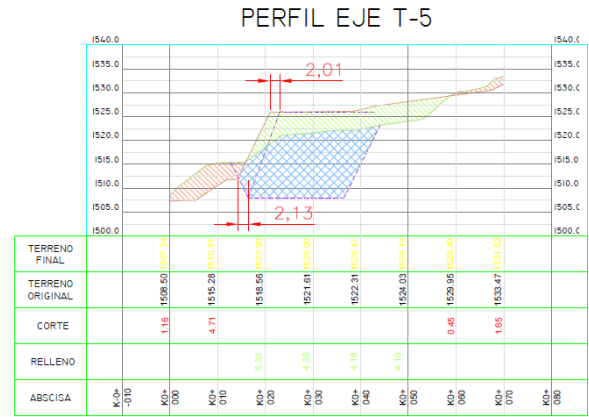
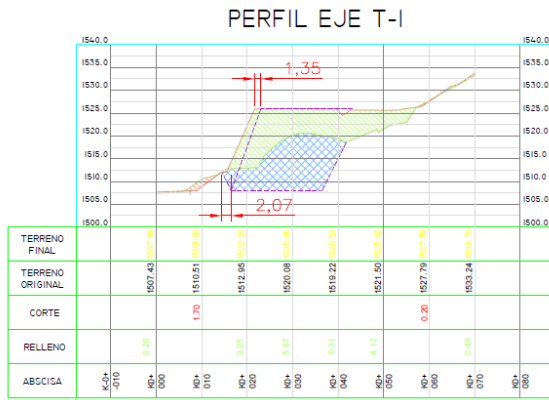


Figura 44. Cortes longitudinales del muro.

9.2 Análisis de resultados laboratorios

9.2.1 Propiedades Índice

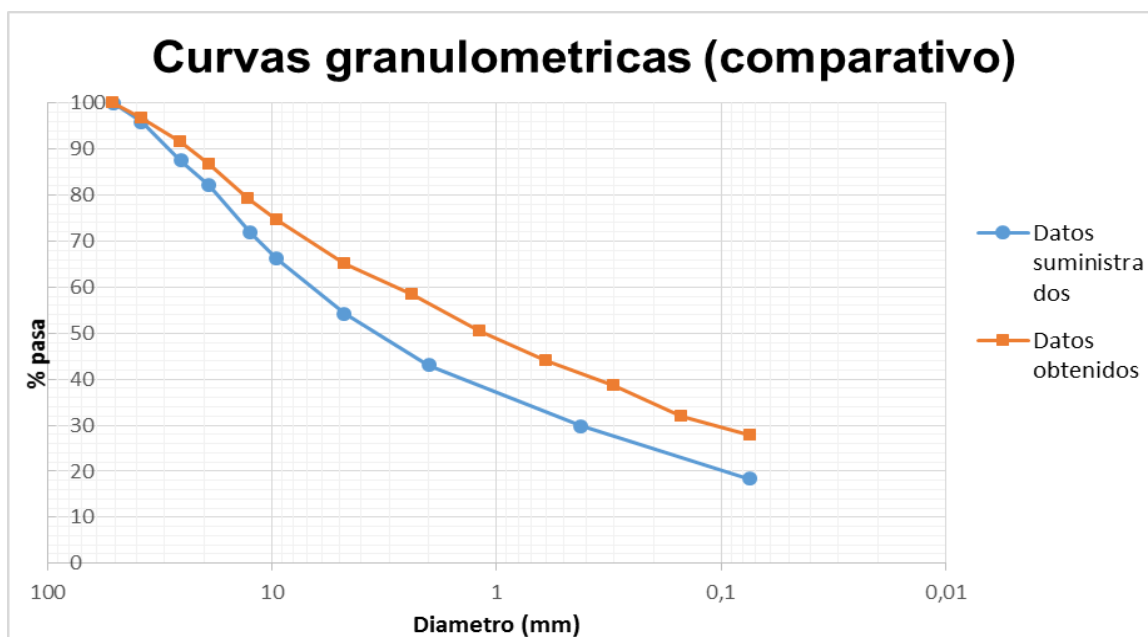


Figura 45. Grafica comparativa de curvas granulométricas.

Se observa al comparar la curva granulométrica suministrada por el contratista, ejecutor del proyecto, y la curva obtenida durante la investigación, estas son semejantes en cuanto a su distribución granulométrica, siendo más grueso el material analizado inicialmente por el contratista.

Es de resaltar, que de acuerdo al artículo 683, numeral 683.2.3 “Material de Relleno” de las especificaciones generales de construcción de carreteras dice: “Los documentos del proyecto definirán los requisitos que deberá cumplir el material de relleno, el cual podrá ser: material granular tipo SNB (Artículo 610, numeral 610.2.3), material granular tipo BG (Artículo 610.2.3), o un material de características diferentes, definidas en el documento del proyecto” (INVE-2012). Las especificaciones particulares del proyecto, exigían que el material de relleno

del muro, se hiciera con el material de la ladera, basta solo con la clasificación del material para tomar las características granulométricas del material usado.

En términos generales, el material de relleno utilizado para la construcción del muro, cuenta con esta propiedad índice de “buena calidad” ya que como se observa en las curvas, que este es un suelo con predominante fracción granular, lo cual ayuda al drenaje del muro y al no ser un suelo cohesivo se espera que tenga un ángulo de fricción interna adecuado considerado para el diseño del muro.

Tabla 11. Comparativo de resultados de pruebas de Límites de Atterberg.

Comparativo		
	Tesis	Proyecto
Límite líquido (%)	27,4	39,4
Límite plástico (%)	16,3	23,9
Índice de plasticidad (%)	11,1	15,5

Los finos presentes en las muestras analizadas corresponden a arcillas de baja plasticidad (CL).

Al analizar los resultados de granulometría y límites de Atterberg a las muestras anteriormente citadas, la suministrada por el contratista presenta una menor cantidad de finos, partículas de diámetro inferior a 74,7 micras: 18% respecto al 29% obtenido para los muestreos ejecutados para la presente investigación. La fracción gruesa conformada por 56% y 49% de gravas respectivamente. La clasificación USCS obtenida es de Grava areno arcillosa (GC) para la enviada y Arena Arcillosa con grava (SC) para la ejecutada.

Finalmente, podemos observar en cuanto a los resultados obtenidos en el ensayo para determinar el peso unitario máximo seco y la humedad óptima, se obtiene un valor similar con una diferencia del 0.18 g/cm³ y 6,4% respectivamente, lo cual indica que los valores empleados para el diseño del muro y el empleado en campo, específicamente para la compactación del material de relleno estuvieron acorde

entre sí, lo cual garantiza un buen funcionamiento en la estabilidad interna del muro.

Tabla 12. Comparativo resultado de ensayo de Proctor Modificado.

Comparativo		
	Tesis	Promedio Proyecto
Peso unitario seco máximo (g/cm ³)	2,19	2,01
Contenido óptimo de humedad (%)	9,2	15,7

9.2.2 Propiedades geomecánicas

Tabla 13. Comparativo de resultados de pruebas de corte directo.

Comparativo		
	Tesis	Proyecto
Φ	38	32

De acuerdo a la Tabla 11, se aprecia que el resultado del ángulo de fricción interna suministrado por el contratista es menor que el obtenido por las pruebas realizadas para esta investigación (32° y 38° respectivamente).

En resumen, los ensayos geotécnicos realizadas a las muestras tomadas para el desarrollo este proyecto varían sensiblemente con las ejecutadas por el contratista, dicha variación pudo haberse debido a la variación en la mezcla de los tres materiales presentes en el talud que posteriormente sirvieron como cuerpo del muro re forzado con geosintéticos.

9.3 Análisis de monitoreo con instrumentación para medir deformaciones internas

9.3.1 Análisis de resultados

De acuerdo a los resultados obtenidos en el capítulo de “Monitoreo a partir de deformaciones horizontales internas del muro MSE con geosintéticos” se logra apreciar en las gráficas de las Figuras 37 y 38 y las Tablas 8 y 9, las deformaciones finales medidas internamente sobre el eje del instrumento se reportaron en un rango de 19 a 83 mm, lo cual indicaría que la estabilidad interna del muro no debería presentar riesgos. Esto se puede atribuir a que el geosintético usado para la construcción del muro fue el adecuado sumado a las labores constructivas ejecutadas, principalmente en la labor de compactación al 95% de la densidad seca máxima del proctor modificado.

A continuación se presentan tablas y gráficos obtenidos a partir de los datos tomados con los instrumentos para medir deformaciones internas, donde se logra apreciar que las guayas que midieron mayores desplazamientos fueron las guayas N° 1 y N° 3 de cada uno de los instrumentos, dejando claro que son estos los puntos que mayor presentan deformaciones, puesto su localización, ya que a comparación de la guaya N° 2, esta se encuentra confinada por mayor cantidad de material de relleno en la dirección que mide las deformaciones los instrumentos.

De igual forma en las Tablas 12 y 13 y en las Figuras 43 y 44, podemos observar que los desplazamientos medidos, están relacionados de alguna forma con las presiones efectivas, ya que hay una semejanza en los datos atribuidos en los dos instrumentos para cada presión efectiva, presentando desplazamientos de 5,3 mm en promedio para presiones cercanas a los 10000 kg/m² (98 kPa).

También es de resaltar en los resultados (Tablas 14 y 15 y Figuras 43 y 44) que a mayores presiones efectivas mayores desplazamientos presentados.

Tabla 14. Diferencias absolutas de medidas entre los datos obtenidos. Instrumentos N°1 (cota 1516,25).

Diferencia entre datos - Instrumento N°1 (cota 1516,25)				
Dato #	Guaya N° 1 (mm)	Guaya N° 2 (mm)	Guaya N° 3 (mm)	σ (kg/m2)
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	2737,50
3	2,00	3,00	4,00	3832,50
4	4,00	5,00	3,00	4927,50
5	5,00	4,00	5,00	7117,50
6	3,00	3,00	4,00	8212,50
7	4,00	1,00	2,00	10402,50
8	3,00	3,00	7,00	10402,50
9	8,00	4,00	7,00	11497,50
10	2,00	0,00	1,00	12592,50
11	5,00	6,00	15,00	15877,50
12	5,00	4,00	4,00	16972,50
13	7,00	3,00	4,00	18067,50
14	8,00	6,00	7,00	19162,50
15	18,00	9,00	11,00	20257,50
16	19,00	13,00	18,00	21352,50

Tabla 15. Diferencias absolutas de medidas entre los datos obtenidos. Instrumentos N°2 (cota 1521,00).

Diferencia entre datos - Instrumento N°2 (cota 1521,00)				
Dato #	Guaya N° 1 (mm)	Guaya N° 2 (mm)	Guaya N° 3 (mm)	σ (kg/m2)
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	2,00	2,00	0,00	2737,50
3	1,00	3,00	5,00	3832,50
4	2,00	2,00	7,00	4927,50
5	7,00	3,00	8,00	7117,50
6	4,00	3,00	10,00	8212,50
7	5,00	1,00	6,00	10402,50
8	4,00	4,00	9,00	10402,50
9	8,00	5,00	2,00	11497,50

Tabla 16. Valor acumulado de desplazamientos absolutos presentados. Instrumentos N°1 (cota 1516,25).

Sumatoria de desplazamientos relativos - Instrumento N°1 (cota 1516,25)				
Dato #	Guaya N° 1 (mm)	Guaya N° 2 (mm)	Guaya N° 3 (mm)	σ (kg/m2)
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	2737,50
3	2,00	3,00	4,00	3832,50
4	6,00	8,00	7,00	4927,50
5	11,00	12,00	12,00	7117,50
6	14,00	15,00	16,00	8212,50
7	18,00	16,00	18,00	10402,50
8	21,00	19,00	25,00	10402,50
9	29,00	23,00	32,00	11497,50
10	31,00	23,00	33,00	12592,50
11	36,00	29,00	48,00	15877,50
12	41,00	33,00	52,00	16972,50
13	48,00	36,00	56,00	18067,50
14	56,00	42,00	63,00	19162,50
15	74,00	51,00	74,00	20257,50
16	93,00	64,00	92,00	21352,50

Tabla 17. Valor acumulado de desplazamientos absolutos presentados. Instrumentos N°2 (cota 1521,00).

Sumatoria de desplazamientos relativos - Instrumento N°1 (cota 1521,00)				
Dato #	Guaya N° 1 (mm)	Guaya N° 2 (mm)	Guaya N° 3 (mm)	σ (kg/m2)
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	2,00	2,00	0,00	2737,50
3	3,00	5,00	5,00	3832,50
4	5,00	7,00	12,00	4927,50
5	12,00	10,00	20,00	7117,50
6	16,00	13,00	30,00	8212,50
7	21,00	14,00	36,00	10402,50
8	25,00	18,00	45,00	10402,50
9	33,00	23,00	47,00	11497,50

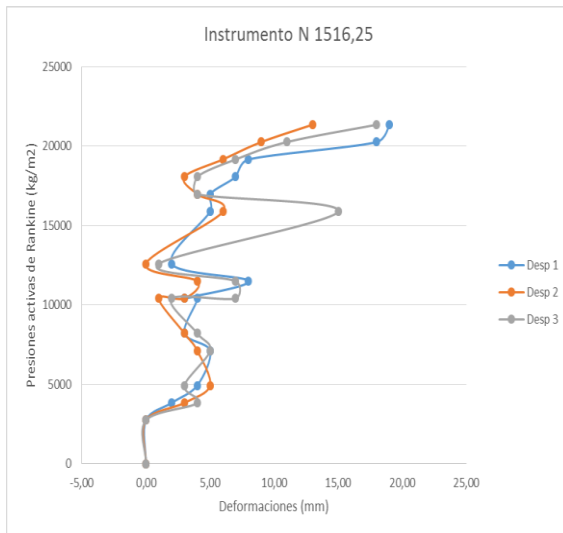


Figura 46. Diferencias absolutas de medidas entre los datos obtenidos. Instrumentos N°1 (cota 1516,25).

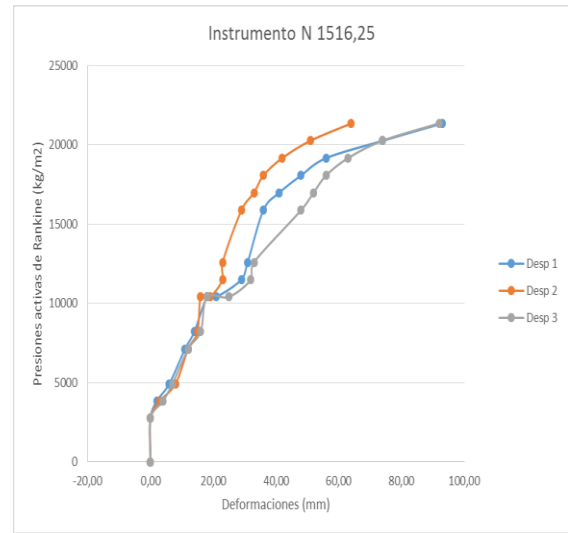


Figura 48. Valor acumulado de desplazamientos absolutos presentados. Instrumentos N°1 (cota 1516,25).

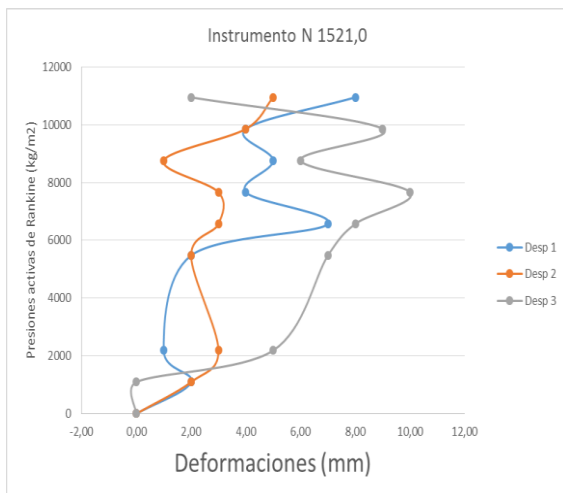


Figura 47. Diferencias absolutas de medidas entre los datos obtenidos. Instrumentos N°2 (cota 1521,00).

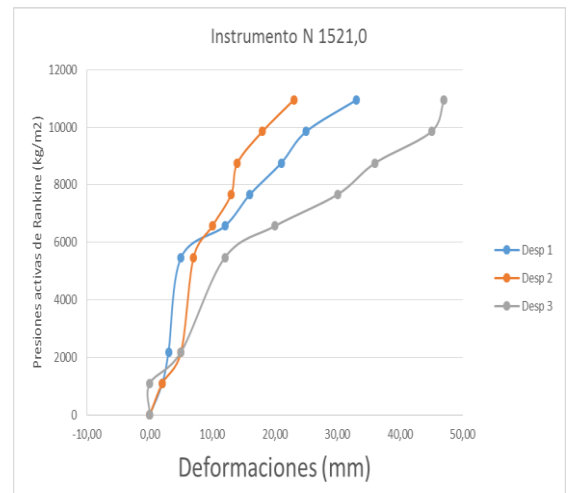


Figura 49. Valor acumulado de desplazamientos absolutos presentados. Instrumentos N°2 (cota 1521,00).

9.3.2 Análisis funcionamiento del equipo.

Como bien se logra apreciar en los resultados obtenidos de la instrumentación para medir deformaciones, es claro que los resultados obtenidos son de acuerdo a los esperados, con relación al comportamiento determinado para la estructura, ya que el instrumentos nos permite tener una vista clara de las deformaciones presentadas en los “puntos de control” los cuales están de acuerdo a la teoría.

9.4 Análisis de deformaciones verticales

De acuerdo a los resultados obtenidos logramos apreciar que la estructura del muro presento deformaciones verticales una vez transcurrido dos meses y una semana en un rango entre 2,6 y 5,4 cm, observando así que los mayores desplazamiento se presentaron sobre el extremo izquierdo del muro, deformaciones la cuales se pueden considerar mínimas, dado la carga que genera la estructura sobre el suelo.

10.DISEÑO DE VERIFICACIÓN DEL MURO MSE REFORZADO CON GESOSINTETICO PARA LA RECUPERACIÓN VIAL DE LA CARRETERA CONOCIDA COMO LA VÍA URIBE – SEVILLA

De acuerdo a los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas para la elaboración de este trabajo de grado, y en base a los criterios de diseño para muros MSE reforzados con geosintéticos, se realizó un diseño de verificación usando como material de refuerzo, con referencias de las geomallas, usadas para la ejecución del proyecto. Determinando así, si chequea o no la estabilidad del muro.

Para dicha evaluación, se usó una herramienta computacional brindada por Geomatrix. Con la cual solo se chequea el cuerpo del muro sin considerar el empotramiento. Puesto que esta investigación está orientada directamente al material de relleno del muro dicha estabilidad.

A continuación presentamos un esquema del muro y la tabla de resumen donde se verifica que la geomalla usada para cada una de las cotas, cumpla con los requerimientos para soportar los esfuerzos que genera la estructura sobre la misma.

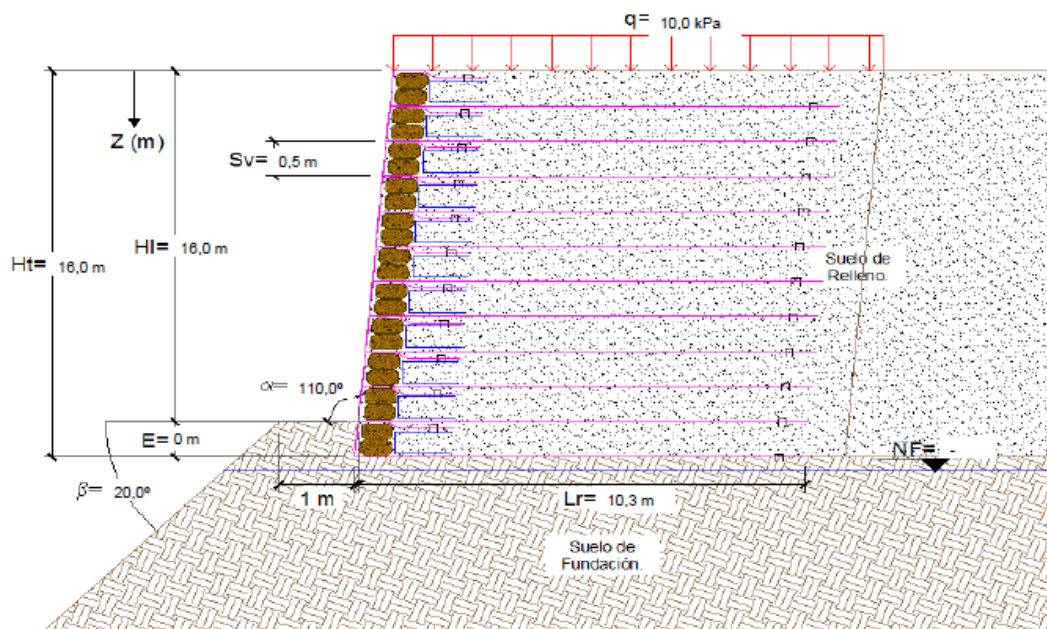


Figura 50. Geometría de muro para diseño de verificación.

Tabla 18. Verificación de geomalla usada en la ejecución del proyecto.

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD INTERNA				
N° de capa	z[m]	σ_{HT} [kPa]	Tipo de Geosintético	Verificación
1	0,5	0,84	FORTGRID UX-100	OK
2	1,0	1,48	FORTGRID UX-100	OK
3	1,5	2,18	FORTGRID UX-100	OK
4	2,0	2,89	FORTGRID UX-100	OK
5	2,5	3,61	FORTGRID UX-100	OK
6	3,0	4,33	FORTGRID UX-100	OK
7	3,5	5,06	FORTGRID UX-100	OK
8	4,0	5,78	FORTGRID UX-100	OK
9	4,5	6,51	FORTGRID UX-100	OK
10	5,0	7,24	FORTGRID UX-100	OK
11	5,5	7,96	FORTGRID UX-100	OK
12	6,0	8,69	FORTGRID UX-100	OK
13	6,5	9,42	FORTGRID UX-100	OK
14	7,0	10,14	FORTGRID UX-165	OK
15	7,5	10,87	FORTGRID UX-165	OK
16	8,0	11,60	FORTGRID UX-165	OK
17	8,5	12,33	FORTGRID UX-165	OK
18	9,0	13,06	FORTGRID UX-165	OK
19	9,5	13,78	FORTGRID UX-165	OK
20	10,0	14,51	FORTGRID UX-165	OK
21	10,5	15,24	FORTGRID UX-165	OK
22	11,0	15,97	FORTGRID UX-165	OK
23	11,5	16,70	FORTGRID UX-165	OK
24	12,0	17,42	FORTGRID UX-165	OK
25	12,5	18,15	FORTGRID UX-165	OK
26	13,0	18,88	FORTGRID UX-165	OK
27	13,5	19,61	FORTGRID UX-165	OK
28	14,0	20,34	FORTGRID UX-165	OK
29	14,5	21,06	FORTGRID UX-165	OK
30	15,0	21,79	FORTGRID UX-165	OK
31	15,5	22,52	FORTGRID UX-165	OK
32	16,0	23,25	FORTGRID UX-165	OK

Para el diseño de verificación se usaron los factores de seguridad mínimos requeridos para este tipo de estructuras tal como se presenta a continuación:

Estabilidad externa

Al deslizamiento	F.S. ≥ 1.5 para muros, F.S. ≥ 1.3 para taludes reforzados
Excentricidad e en la base	$\leq L/6$ en suelo, $L/4$ en roca (L profundidad del muro)
Capacidad portante	F.S. ≥ 2.5
Estabilidad por asentamientos	F.S. ≥ 1.3
Estabilidad bajo sismos	F.S. $\geq 75\%$ de los F.S. estáticos en todos los modos de falla

Estabilidad interna

Resistencia al pull-out	F.S. ≥ 1.5
Estabilidad interna para muros	F.S. ≥ 1.3

Figura 51. Factores de seguridad para diseño de muros reforzados.

De igual forma en el anexo 2 y en el anexo 3, se adjunta la memoria de cálculo del chequeo realizado con el software MSEW “Mechanically Stabilized Earth Walls” y las fichas técnicas de las geomallas de refuerzo del muro.

11.CONCLUSIONES

El diseño, fabricación e implementación del instrumento para medir deformaciones relativas internas en un muro, funciono satisfactoriamente arrojando resultados muy confiables.

Los resultados de los ensayos de laboratorios realizados, arrojaron que el material de relleno usado para la construcción del muro tiene un ángulo de fricción interna $\phi=38^\circ$, una clasificación del suelo según el sistema de clasificación unificado de suelos (USCS) es un SC, arena arcillosa con presencia de finos tipo arcilla de baja plasticidad (CL) y que el peso unitario seco máximo es de 2.19 gr/cm^3 y un contenido óptimo de humedad del 9,2%.

Al realizar el diseño de verificación del muro con respecto al diseño inicial este chequea, lo cual indica un buen funcionamiento del sistema plasmado en campo.

La metodología e instrumentación implementada para la determinación de deformaciones relativas internas de la estructura presenta resultados satisfactorios. Dejando al descubierto que dichos desplazamientos se presentan bajo las condiciones esperadas inicialmente, como lo es el aumento de esfuerzos por el incremento de carga para cada capa colocada durante el proceso constructivo.

El monitoreo topográfico empleado para medir deformaciones verticales en la corona del muro, arrojaron valores entre 1,0 y 2,0 pulgadas tomados dos meses y una semana después de finalizada la construcción.

Al hacer el análisis durante la ejecución de la obra y los procesos de control de la interventoría, si bien es cierto que se presentaron problemas durante la construcción como lo fue el desplazamiento de la pata del muro al inicio (dificultad que tuvo una respuesta oportuna), y los problemas inherentes a las altas precipitaciones de la zona, en general el Constructor y la Interventoría lograron que la obra se desarrollara y se entregara bajo altos estándares de calidad.

12.RECOMENDACIONES

Para este tipo de proyecto como lo es la construcción de un muro de tierra armado de gran magnitud, es necesario contar con un grupo de profesionales expertos en el área de geotecnia y afines, ya que al ejecutar este tipo de proyecto, se pueden presentar diversos problemas lo cuales no están contemplados dentro del planteamiento inicial, lo cual se puede reflejar en sobre costos para el proyecto.

Al evaluar el estudio geotécnico inicial del proyecto se logra apreciar una variación en los resultados de los ensayos realizados durante la ejecución del mismo, lo cual indica que se debe hacer un control durante todo el desarrollo del proyecto con el fin de llevar un registro comparativo de los resultados y de ser el caso tomar las medidas necesarias para hacer correcciones en el diseño inicial del muro o uso del material.

Para este tipo de proyectos, donde se está realizando el relleno del muro de tierra armada con material proveniente de la ladera a estabilizar, se debe tener un control espacial de la misma, con el fin de garantizar la estabilidad y evitar así problemas de equilibrio como se presentaron durante la etapa inicial de este proyecto.

De acuerdo a las especificaciones dadas para el diseño de muros MSE, en Colombia se vienen desarrollando proyectos de este tipo, los cuales siguen presentado deformaciones considerables, lo cual indica que debemos perfeccionar esta área de la ingeniería colombiana para el desarrollo de este tipo de proyectos.

13.REFERENCIAS

[1] Alpizar Barquero, Alicia & Sanz Bermejo (2013). *Monitoreo del Terreno Mediante Instrumentación Geotécnica*, en memorias del Congreso de Ingeniería y de Arquitectura de Costa Rica. San José, Costa Rica.

[2] Moreno, J. M., Rosa, D. D. L., & Zazo, C. (2005). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*. España. Ministerio de Medio Ambiente.

[3] Centro Nacional de Prevención de Desastres de México (2001). *Inestabilidad de Laderas*. Coyoacán, México. 2da Edición, 3-7 pp.

[4] Ferrer, M. (1995). Los movimientos de ladera en España. *Reducción de Riesgos Geológicos en España. ITGE, Madrid*. 69-82 pp.

[5] Universidad del Cauca (2003). *Muros de contención reforzados con geotextil*. Popayán, Colombia, 31 pp. Recuperado de:
http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/12_2_riesgos_naturales_2_tcm7-12430.pdf

[6] Marienco (Sin fecha). Introducción a los Geotextiles. Capítulo 1, 1-2 pp. Recuperado de: <http://marienco.com/doc/Introduccion%20Geostextiles.pdf>

[7] Suarez, J. (2009). Deslizamientos: análisis geotécnico. Colombia. Editorial Universidad Industrial de Santander, UIS..

[8] El Tiempo (2016), “<http://www.eltiempo.com/colombia/medellin/derrumbe-en-la-autopista-medellin-bogota/16735369>” Medellín Colombia, 2016.

[9] Bowles, J. E., ARRIETA, T. A., & TAMAYO, R. J. (1981). *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*. McGraw-Hill.

[10] GEOMATRIX. Conceptos Básicos para Estructuras en Suelo Reforzado, Aplicación de Geotextiles de alto módulo FORTEX y Geomallas FORTGRID

[11] Suarez, J. Muros reforzados con geosintéticos, La Practica en Colombia frente a la Normatividad Internacional. *UIS, Bucaramanga, Colombia*.

[12] INVE – 2012. Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Instituto Nacional de Vías. *Ministerio de Transporte, Colombia*.

[13] Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (23 de 09 de 2017). www.idiger.gov.co. Obtenido de <http://www.idiger.gov.co/rmovmasa>

ANEXO 1

PRUEBAS DE LABORATORIO.

ANEXO 1.1

RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS.

ANEXO 1.2

RESULTADOS DADOS POR EL CONSTRUCTOR.

ANEXO 2
MEMORIA DE CALCULO DE
DISEÑO DE VERIFICACION DEL
MURO.

ANEXO 3

FICHAS TECNICAS DE LAS GEOMALLAS