

**DISEÑO CONSTRUCCIÓN Y REVISIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE
UN MURO EN TIERRA ARMADA A ESCALA**

PRESENTADO POR:

PAULA JULIANA FARFÁN MANTILLA

RAFAEL ANDRES HINESTROZA MARTINEZ

DIRECTOR

Msc. GERARDO BAUTISTA GARCÍA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO

BUCARAMANGA

2020

**DISEÑO CONSTRUCCIÓN Y REVISIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE
UN MURO EN TIERRA ARMADA A ESCALA**

PRESENTADO POR:

PAULA JULIANA FARFÁN MANTILLA

RAFAEL ANDRES HINESTROZA MARTINEZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR

Msc. GERARDO BAUTISTA GARCÍA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO

BUCARAMANGA

2020

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, mayo 13 del 2020

Dedico este trabajo a...

A mis queridos padres, Carlos Farfán y Martha Mantilla quienes me enseñaron desde siempre a luchar por mis sueños y nunca desfallecer hasta verlos hechos realidad. ¡los amo!

A mi hermano, Jorge Andres quien me ha brindado toda su fortaleza, confianza y optimismo para seguir adelante con cada meta que me propongo y ha sido mi compañero en esta aventura llamada vida.

Paula Juliana Farfán Mantilla.

Dedico este trabajo de grado a...

A mis padres, Rafael Hinestroza Quintero y Jacqueline Martinez Camargo quienes me enseñaron afrontar y superar los retos que la vida me imponía con el fin de lograr mis sueños. A mi hermano Gustavo Hinestroza quien me brinda su confianza y apoyo en los momentos más difíciles.

A mis abuelitos Mary Luz y Noel Suarez quienes me brindaron su apoyo incondicional, sus sabios consejos y su amor.

Rafael Andres Hinestroza Martinez.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a la Virgen maría porque gracias a su amor y bondad, me permiten sonreír ante mis logros que son resultado del aprendizaje de cada prueba que afronto cada día para mejorar como ser humano y crecer de diferentes formas.

Gracias a mis padres por ser quienes me acompañaron en todo mi proceso educativo, siempre dispuestos a brindarme la confianza, fe y fortaleza necesarias para ayudarme a creer en mi misma y superar cada obstáculo que se presenta en mi vida. Les agradezco por cada palabra, consejo y enseñanzas las cuales me guiaron durante mi proceso de formación en todos los aspectos de mi vida.

Quiero exaltar la compañía, ánimo y esfuerzo de todos mis compañeros cercanos con los cuales reí, disfrute, sufrí y aprendí de las vivencias, caídas y logros siempre con la mejor energía y optimismo durante mi carrera universitaria de pregrado, ellos estuvieron presentes durante toda o la mayor parte de la realización y el desarrollo de este proyecto de grado.

Paula Juliana Farfán Mantilla.

AGRADECIMIENTOS

A Dios porque gracias a sus bendiciones he podido gozar de una vida plena en salud y he podido sonreír al cumplir mis logros, permitiéndome mejorar como un ser humano infundado en valores con el fin de servir a mi comunidad.

Le doy gracias a mis padres por ser el motor de mi vida, confiar en mis capacidades y sin duda alguna darme esta oportunidad de estudiar una carrera profesional. Por supuesto a mi hermano mayor Gustavo por ser mi inspiración a ser un profesional de calidad, íntegro y con ese gusto de querer aprender cada día más.

Quiero agradecer la compañía y las risas que compartí con mis amigos de la universidad, las noches desvelándonos para alcanzar las metas que tanto anhelábamos durante el desarrollo de nuestros semestres. A mi querida amiga Paula Farfán por compartir conmigo este reto universitario, lleno de sonrisas y anécdotas que sin duda alguna se quedaran en mi mente y corazón.

Finalmente quiero agradecer a el cuerpo docente de la universidad, gracias a ustedes por tener la valentía y el gusto de ser docentes, en ustedes esta la tarea de delegar a las futuras generaciones las riendas de nuestra sociedad, sin duda alguna puedo decir que vivir la experiencia con ustedes me inspiro cada día mas a ser un profesional de mi querida carrera ingeniería civil.

Rafael Andres Hinestroza Martinez.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
2. OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
2.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	16
3. JUSTIFICACIÓN.....	17
4. ALCANCE.....	18
5. ANTECEDENTES.....	19
6. MARCO CONCEPTUAL	21
6.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS	21
6.1.1 GRANULOMETRÍA.....	21
6.1.2 LÍMITES DE ATTERBERG	22
6.1.3 SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS.....	22
6.2 ENSAYO DE COMPACTACIÓN	23
6.3 ENSAYO DE CORTE DIRECTO.....	24
6.4 PRESIONES LATERALES DE TIERRAS	25
6.5 GEOTEXILES.....	26
7. METODOLOGÍA	28
7.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	28
7.2 BÚSQUEDA Y EXTRACCIÓN DEL MATERIAL.....	28
7.3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.....	29
7.3.1 CLASIFICACIÓN DEL SUELO	29
7.3.2 PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN.....	29
7.3.3 PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE	29
7.4 DISEÑO DEL MURO DE CONTENCIÓN REFORZADO CON GEOTEXTIL.....	29
7.5 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO	29
7.6 PRUEBAS EN EL MURO DE REACCIÓN	29
7.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	30
7.8 ELABORACIÓN DE INFORME FINAL	30
8. RESULTADOS.....	31
8.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.....	31
8.1.1 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULAS	31
8.1.2 ENSAYOS DE LIMITES DE ATTERBERG.....	33

8.2	PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN.....	36
8.2.1	ENSAYO DE COMPACTACIÓN.....	36
8.3	PARÁMETROS DE RESISTENCIA.....	40
8.3.1	ENSAYOS DE CORTE DIRECTO PARA EL DISEÑO	40
8.4	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MURO A ESCALA	41
8.4.1	SECUENCIA DE CALCULO.....	41
8.4.2	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO A ESCALA.....	43
8.5	ENSAYOS SOBRE EL MURO A ESCALA	45
8.6	AJUSTE DE LOS DISEÑOS.....	45
9.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	46
9.1	CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL.....	46
9.2	PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN.....	47
9.3	PARÁMETROS DE RESISTENCIA.....	47
9.3.1	PARA EL DISEÑO	47
9.3.2	PARA AJUSTES AL DISEÑO.....	48
9.4	ENSAYOS SOBRE EL MURO A ESCALA	48
9.5	AJUSTES AL DISEÑO.....	49
9.6	CONTROL DE COMPACTACIÓN	50
10.	CONCLUSIONES.....	52
11.	RECOMENDACIONES.....	53
	BIBLIOGRAFÍA	54
	ANEXOS	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva granulométrica de un suelo	21
Figura 2. Naturaleza del suelo	23
Figura 3. Carta de plasticidad	23
Figura 4. Envolvente de falla.....	25
Figura 5. Envolvente de falla Mohr-Coulomb.....	26
Figura 6. Metodología.	28
Figura 7. Curva resumen de distribución de tamaños de partículas.	33
Figura 8. Limite liquido (Muestra No.1).....	34
Figura 9. Limite liquido (Muestra No.2).....	35
Figura 10. Limite liquido (Muestra No.3).....	35
Figura 11. Curva de compactación Muestra No.1	37
Figura 12. Curva de compactación Muestra No.2	38
Figura 13. Curva de compactación Muestra No.3	39
Figura 14. Envolvente de falla promedio	41
Figura 15. Extracción del suelo de relleno y fundación.....	43
Figura 16. Modulación y compactación del suelo de fundación	44
Figura 17. Modulación y compactación del suelo de relleno	44
Figura 18. Carta de plasticidad	46

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Antecedentes	20
Tabla 2. Distribución granulométrica (Muestra No.1)	31
Tabla 3. Distribución granulométrica (Muestra No.2)	32
Tabla 4. Distribución granulométrica (Muestra No.1),	32
Tabla 5. Resumen distribución granulométrica.	33
Tabla 6. Limite líquido y plástico (Muestra No.1).	34
Tabla 7. Limite líquido y plástico (Muestra No.2)	34
Tabla 8. Limite líquido y plástico (Muestra No.3)	35
Tabla 9. Resultados limite líquido, plástico y índice de plasticidad.	36
Tabla 10. Proctor modificado Muestra No.1	37
Tabla 11. Proctor modificado Muestra No.2	38
Tabla 12. Proctor modificado Muestra No.3	39
Tabla 13. Resultados ensayos de compactación	40
Tabla 14. Resultados ensayo de corte directo.....	40
Tabla 15. Dimensiones del muro	41
Tabla 16. Resultados propiedades del suelo	42
Tabla 17. Resultados del despiece del muro.....	42
Tabla 18. Resultados fuerza horizontal máxima.....	45
Tabla 19. Resultados ensayos de corte directo	45
Tabla 20. Resistencia interna	47
Tabla 21. Propiedades físicas.....	48
Tabla 22. Rango de carga	49
Tabla 23. Valores de K encontrados	50
Tabla 24. Factores de seguridad.....	50
Tabla 25. Compactación promedio	51

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Criterio de falla Mohr-Coulomb	24
Ecuación 2. Fuerzas horizontales resistentes.....	48
Ecuación 3. Parámetro K.....	49

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y REVISIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE UN MURO EN TIERRA ARMADA A ESCALA

AUTOR(ES): Paula Juliana Farfán Mantilla
Rafael Andrés Hinestroza Martínez

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Ing. Msc. Gerardo Bautista García

RESUMEN

La finalidad del trabajo de grado que se presenta a continuación fue estimar el ángulo de fricción suelo-geotextil para cinco prototipos de muros de contención reforzados con geotextil. El suelo utilizado tanto para la construcción de los modelos a escala, así como también para el suelo de fundación correspondió a una arena arcillosa (SC) proveniente de la zona de parqueaderos de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. En la literatura técnica de diseño con geosintéticos se ha reportado que el ángulo de fricción suelo-geotextil varía entre 70% y 85% del valor del ángulo de fricción interna del suelo estudiado. El trabajo inicio con la clasificación del suelo y la obtención de las propiedades físicas requeridas para el diseño de los prototipos, la humedad optima y el peso específico seco máximo se obtuvieron en ensayos de compactación Proctor Modificado. Con la humedad optima y los elementos del ensayo Proctor Modificado se prepararon las muestras para el ensayo de corte directo, permitiendo así determinar los parámetros de resistencia al corte. Con la resistencia a la tensión del geotextil usado y las propiedades físicas de la arena arcillosa se procedió a realizar el diseño de los cinco prototipos. Una vez realizados los diseños, se construyeron los modelos y se llevaron a la falla aplicando fuerzas horizontales con la ayuda de un actuador en el muro de reacción. Por último, se analizaron los resultados obtenidos, los cuales permitieron calcular el ángulo de fricción suelo-geotextil para cada muro.

PALABRAS CLAVE:

Muro de contención, geotextil, diseño, ángulo de fricción, deslizamiento.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: DESIGN, CONSTRUCTION AND REVIEW OF THE SAFETY FACTORS
GEOTEXTILE – REINFORCED MSE WALLS OF MECHANICALLY STABILIZED
EARTH

AUTHOR(S): Paula Juliana Farfán Mantilla
Rafael Andrés Hinestroza Martinez

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Ing. Msc. Gerardo Bautista García

ABSTRACT

The purpose of this final project for graduation was to estimate the friction angle between the geotextile and soil for five prototypes of retaining walls reinforced with geotextile. The soil used both for the construction of the scale models, as well as for the foundation soil corresponded to clayey sand (SC) coming from the parking area of the Universidad Pontificia Bolivariana- Seccional Bucaramanga. In the technical literature on designing with Geosynthetics it has been reported that the friction angle between the geotextile and soil varies between 70% and 85% of the value of the internal friction angle of the soil of the material studied. The work began with the soil classification and obtaining the physical properties required for the design of the prototypes, the optimal soil moisture and the maximum specific dry weight were obtained in the Modified Proctor compaction test. With the optimal soil moisture and the elements of the Modified Proctor test, the samples were prepared for direct shear test parameters of shearing resistance. With the tensile strength of the used Geotextiles and the physical properties was carried out. Once the designs were made, the models were built and the failure was carried by applying horizontal forces with the help of an actuator on the reaction wall. Finally, the results obtained were analyzed, which allowed the calculation of the friction angle between the geotextile and soil for each retaining wall.

KEYWORDS:

Retaining wall, geotextile, design, friction angle, landslides.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

INTRODUCCIÓN

Los muros de contención reforzados con geotextil son soluciones técnico-económicas que permiten retener masas de suelos u otros materiales sueltos, manteniendo las pendientes que naturalmente no pueden conservarse, estos son diseñados para soportar fuerzas horizontales y verticales, evitando así posibles fallas por volcamiento, capacidad de soporte y deslizamiento. En este proyecto de grado se analizó el comportamiento de diferentes muros a escala, construidos bajo condiciones reales con el fin de determinar el ángulo de fricción suelo-geotextil, utilizando un material proveniente de los parqueaderos de la Universidad Pontificia Bolivariana -Seccional Bucaramanga.

Para el dimensionamiento de los muros es necesario tener en cuenta las propiedades físicas del suelo de fundación, el material de relleno y el valor de la resistencia a la tracción del geotextil empleado, en el presente trabajo de grado se utilizó un material arenoso tanto para el suelo de fundación como el material de construcción de los prototipos a escala.

El trabajo inicio tomando porciones de muestras con el fin de conocer el tipo de suelo, los parámetros de compactación y los parámetros de resistencia mediante ensayos de corte directo en muestras compactadas con la humedad optima del material. De acuerdo a estas propiedades físicas se procede a dimensionar los modelos con el uso de una hoja electrónica, facilitando así el despiece de las capas de geotextil.

Los muros de contención fueron construidos en el laboratorio de estructuras de la Universidad Pontificia Bolivariana -Seccional Bucaramanga, los cuales fueron sometidos a cinco pruebas destructivas donde un actuador dinámico simulaba una carga horizontal que actuaba a una distancia (medida desde la base) de un tercio de la altura total del muro, generando así un desplazamiento horizontal.

Con los resultados obtenidos en las pruebas destructivas, se calcularon los valores del Angulo de fricción suelo – geotextil correspondiente a cada prototipo.

Se espera que futuros estudiantes de la Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga retomen el trabajo contenido en el presente informe y analicen situaciones y variables que no se contemplaron.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para el diseño, construcción y dimensionamiento de un muro en tierra armada son necesarios ciertos parámetros relevantes como el ángulo de fricción entre el suelo de fundación y el geotextil (δ), el cual se calcula como un porcentaje del ángulo de fricción interna del suelo. Según la literatura técnica δ varía entre el 70% y el 85% del ángulo de fricción interna del suelo (ϕ). Este rango de variación debería estudiarse y adaptarse de acuerdo con el tipo de material utilizado.

En el presente trabajo de grado se obtuvo el rango de variación del ángulo de fricción suelo – geotextil para muros en tierra armada construidos y cimentados sobre una arena arcillosa.

Este trabajo abre la posibilidad de realizar otras pruebas de mayor envergadura, abriendo una línea de investigación experimental con este tipo de estructuras, brindando así confiabilidad a la hora de implementar este tipo de soluciones de contención.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la fuerza horizontal que provoca la falla de un muro en tierra armada mediante un muro de reacción y un actuador dinámico.

2.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS

2.2.1 Diseñar un muro en tierra armada de acuerdo con las propiedades físicas tanto del suelo de relleno como las del suelo de fundación y la resistencia a la tracción del geotextil escogido.

2.2.2 Materializar un modelo a escala que cumpla con las condiciones de diseño previamente calculadas.

2.2.3 Determinar el Angulo de fricción suelo-geotextil, comparando la fuerza horizontal que produce el desplazamiento con las fuerzas horizontales resistentes que se oponen a él.

3. JUSTIFICACIÓN

Colombia es uno de los países que cuenta con una de las topografías más complejas del continente americano, debido a que la atraviesan tres cordilleras que impiden el fácil acceso entre sus cabeceras municipales, por lo cual normalmente se busca como alternativa realizar obras civiles que mitiguen los deslizamientos de materia sólida en sus corredores viales, los muros de contención son de las obras más implementadas a la hora de mitigar los deslizamientos, estos deben diseñarse para que sean estables ante las fuerzas actuantes. Los muros de contención reforzados con geotextil son una buena solución desde el punto de vista técnico y económico a problemas de inestabilidad en la geotecnia vial. Por lo tanto, este proyecto tiene la finalidad de obtener los factores de seguridad y el ángulo de fricción suelo muro para un modelo a escala construido con un material arenoso con un porcentaje de finos superior al 12%.

El presente trabajo de grado pretende ser una primera etapa de una investigación más amplia sobre el tema de muros de contención reforzados con geotextil, ya que como se mencionó anteriormente este tipo de estructuras bajo ciertas condiciones son económicas. Además de cumplir con su función de contención los muros en tierra armada se usan para ampliar la sección de una vía.

4. ALCANCE

En el presente trabajo se pretende verificar el diseño del muro de contención reforzado con geotextil, los factores de seguridad para las posibles fallas del modelo a escala, en este caso por deslizamiento y volteo. Se estima realizar el diseño con una altura máxima de un metro, con el fin de facilitar las maniobras de construcción y las pruebas de carga, hay que tener en cuenta las características del material para así reflejar condiciones reales de una obra de contención compuesta por geotextil y suelo, para finalmente verificar el comportamiento del modelo matemático con modelo experimental.

Así mismo se pretende obtener el Angulo de fricción suelo-geotextil para los materiales empleados en el proyecto.

5. ANTECEDENTES

A continuación, se presentan fuentes de información relevantes para el Trabajo de Grado de manera análoga al planteamiento inicial con proyectos, investigaciones y artículos con similitud a lo planteado en los objetivos.

TITULO	AUTORES	TIPO	RESUMEN	FUENTE
Centrifuge Modeling of Geotextile-Reinforced Cohesive Soil Retaining Walls.	Porbaha A. Goodings D. J.	Artículo científico. Revista de Ingeniería Geotécnica	Se construyeron 24 modelos a escala de muros de suelo reforzados verticales y con pendiente utilizando caolín como relleno. Se analizó la estabilidad con el método de bishop, concluyendo que es un buen predictor del comportamiento en los factores de seguridad calculados.	INTERNACIONAL
Designing with Geosynthetics 6th Edition	Robert M. Koerner	Texto.	Este libro trata temas tales como, los tipos de geosintéticos, materiales poliméricos, la historia de los mismos, sus usos y metodología de diseño.	
Muro de contención en suelo reforzado "Solución alternativa a un muro tradicional de hormigón"	Curriel Andrés Forteza Arturo L.	Artículo científico. Memoria de trabajos de Difusión Científica y Técnica. 2007	Para un muro de contención se estudió una alternativa con el fin de reducir los costos que implicaba construir un muro de hormigón, se implementó un muro de contención con suelo reforzado, utilizando el mismo material excavado de la construcción del Casino del hotel Mantra, ubicado en Manantiales - Maldonado (Uruguay).	
Determinación del ángulo de fricción suelo-muro para el dimensionamiento de muros de contención sobre suelos arenosos de la quebrada palmichal	Dwerlys Armesto Duarte Yeiser Nicolás Pinto de Luquez	Proyecto de grado. Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. 2018	Para un muro de contención a escala, cimentado sobre una arena mal gradada de la quebrada Palmichal se obtuvo el ángulo de fricción suelo-concreto con la ayuda de un muro de reacción, este ángulo de fricción está entre el 76% y el 83% del ángulo de fricción interna del suelo estudiado.	LOCAL
Documentación de técnicas	Higuera Pino, María Lucia	Proyecto de grado, Universidad	Este trabajo de grado plantea las diferentes técnicas constructivas en tierra que se implementan en el	

constructivas en tierra		Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga, 2013	departamento de Santander, incluye reseña histórica, proceso constructivo, ventajas y desventajas de la implementación de cada método.	
Determinación de parámetros para el dimensionamiento de muros de contención sobre suelos arenosos mal gradados (SP) de la quebrada agua blanca.	Juan José Parra Gómez, Zamid Tajan Melón.	Proyecto de grado. Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. 2018,	Para un muro de contención a escala, cimentado sobre una arena mal gradada de la quebrada Agua blanca se obtuvo el ángulo de fricción suelo-concreto con la ayuda de un muro de reacción, este ángulo de fricción está entre el 82% y el 86% del ángulo de fricción interna del suelo estudiado.	
Determinación del ángulo de fricción suelo-muro para el dimensionamiento de muros de contención sobre suelos arenosos de la quebrada Zapamanga	Julián Camilo Navarro García, Arnold Ricardo Hernández Ayala	Proyecto de grado. Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. 2019,	Para un muro de contención a escala, cimentado sobre una arena-limosa bien gradada de la quebrada Zapamanga se obtuvo el ángulo de fricción suelo-concreto con la ayuda de un muro de reacción, este ángulo de fricción está entre el 88% y el 94% del ángulo de fricción interna del suelo estudiado.	
Guía de manejo e instalación de geosintéticos para estructuras en suelo reforzado	Geomatrix	Manual de instalación de geosintéticos Bogotá-Colombia	Esta guía establece una serie de recomendaciones para el manejo, transporte, y almacenamiento de los materiales geosintéticos. Para así brindar una correcta instalación en la construcción de estructuras en suelo mecánicamente estabilizado con geosintéticos.	
Manual y software de diseño	Geosoft Pavco	Manual de diseño con geosintéticos. Departamento de ingeniería	Este manual establece las pautas necesarias para el diseño e implementación de los diversos tipos de geosintéticos implementados el mundo de la construcción y edificación.	

Tabla 1. Antecedentes
Fuente: Elaboración propia.

6. MARCO CONCEPTUAL

Para la modelación, construcción y ejecución del muro en tierra reforzada es necesario tener información clara acerca de los materiales, el modelo matemático, construcción del muro y los tipos de carga a las cuales va a estar sometidas, a continuación, se puede observar información clave para su desarrollo.

6.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

Para clasificar un suelo es necesario conocer la distribución del tamaño de partículas y la naturaleza de la fracción más fina, esta información se obtiene a partir de los resultados de los ensayos de granulometría por tamizado y los límites de Atterberg.

6.1.1 GRANULOMETRÍA

La granulometría se define como la distribución de diferentes tamaños de las partículas del suelo. Esta distribución normalmente se plasma gráficamente en la curva granulométrica, esta curva rinde información con respecto al tipo de material estudiado, es así como curvas con alta pendiente corresponden a suelos mal gradados en los cuales predomina un solo tamaño de partículas, mientras que curvas que van de extremo a extremo corresponden a suelos bien gradados en los cuales existen gran variedad de tamaño de partículas. La figura 1, muestra una curva granulométrica, en la cual el eje de las abscisas corresponde al tamaño de las partículas (escala logarítmica y orden inverso) y el eje de las ordenadas corresponde al porcentaje de material que pasa por cada tamiz usado (escala aritmética). (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005)

Según la norma **INV-E 213-13** el material debe ser lavado por el tamiz No.200 para eliminar la fracción fina del suelo, posterior al lavado se procede a realizar un secado en el horno de 24 horas aproximadamente para finalmente cernir el material por una serie de tamices con diferentes aberturas ubicados de forma decreciente.

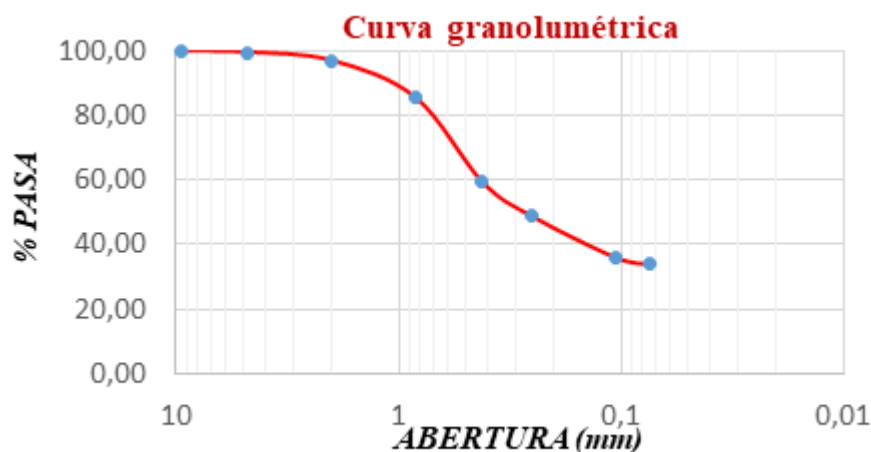


Figura 1. Curva granulométrica de un suelo
Fuente: Elaboración propia.

6.1.2 LÍMITES DE ATTERBERG

Los límites de Atterberg y los índices de plasticidad se basan en el concepto de que el suelo existe solamente en cinco estados de consistencia el cual varia a según el contenido de humedad. Estos estados se dividen en estado sólido, semisólido, plástico, semilíquido y líquido. Los límites de consistencia son las fronteras entre los diferentes estados de consistencia, dentro de ellos se destacan el límite líquido, el límite plástico y el límite de contracción. (Lambe & Whitman, 1997)

Límite líquido LL

El límite líquido corresponde a la frontera entre el estado semilíquido y el estado plástico. Según la norma **INV-E-125-13** el ensayo consiste en medir el contenido de humedad a medida que se cierra la ranura hecha sobre la muestra previamente elaborada con material que pasa el tamiz No. 40, se toman varios puntos de humedad según el número de golpes que se obtengan en la cazuela de Casagrande, tomando como límite líquido el contenido de humedad para el cual la ranura se cierra a los 25 golpes.

Límite plástico LP

El límite plástico corresponde a la frontera entre el estado plástico y el estado semisólido. Según la norma **INV-E-126-13** el límite plástico se obtiene formado varios cilindros de 3mm de diámetro, con material que pasa el tamiz No.40, el límite plástico corresponde a la humedad para la cual los cilindros comienzan a fisurarse y desmoronarse.

Índice de plasticidad IP

El índice de plasticidad corresponde a la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, es decir a el rango de humedades dentro del cual el suelo se comporta plásticamente. (Invías, 2013)

6.1.3 SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

El SUCS fue propuesto en una primera versión por A. Casagrande para usos en obras aeroportuarias. Posteriormente el sistema se modificó y es usado en la actualidad en cualquier proyecto geotécnico. (Das, 2012)

Su clasificación depende del tamaño de partículas y de la plasticidad de su fracción fina. El sistema divide a los suelos en dos grandes grupos divididos por la abertura del tamiz No.200 (0.074 mm), siendo estos dos grupos los gruesos y los finos. (Juárez Badillo & Rico Rodrigéz, 2005)

Un material se considera grueso si más del 50% en peso no pasa por el tamiz No.200 y se considera que el suelo es fino si más del 50% pasa por dicho tamiz.

Los materiales gruesos se subdividen en gravas y arenas, divididos por el tamiz No.4 (4.75 mm), las gravas se simbolizan con la letra G y los suelos arenosos con la letra S. Tanto las gravas como las arenas, de acuerdo con su contenido de finos se clasifican en tres subgrupos tal como se muestra en la figura 2.

Si el contenido de finos es inferior al 5%, entonces a la grava o arena solamente se le juzgara su gradación si es buena o mala, resultando los grupos: GW, GP, SW y SP.

Si el contenido de finos es superior al 12%, no se considera importante la gradación y en su lugar se juzga la plasticidad de la fracción de material que pase por la malla No.40, resultando los grupos: GC, GM, SC y SM.

Si el contenido de finos esta entre el 5%-12%, se considera que el suelo grueso pertenece a un caso frontera y se juzgan tanto su gradación como la naturaleza de su fracción fina, resultando los grupos: GP-GM, GP-GC, GW-GM, GW-GC, SP-SM, SP-SC, SW-SM y SW-SC.

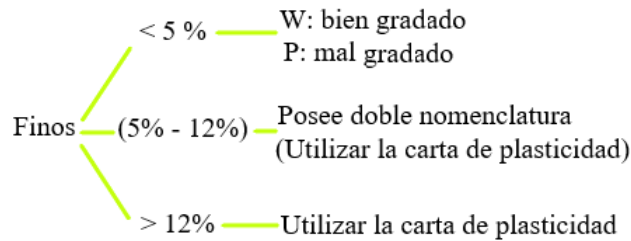


Figura 2. Naturaleza del suelo
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con su ubicación en la carta de plasticidad de casa grande, los suelos finos se dividen en arcillas inorgánicas, limos inorgánicos y suelos orgánicos, los cuales a su vez se subdividen de acuerdo a si su compresibilidad es baja o alta, resultando los grupos CL, CH, ML, MH, OL y OH. A demás existe un grupo especial de suelos orgánicos con límites líquidos muy altos e índices de plasticidad muy altos, este grupo se denomina Pt (turba) ver figura 3.

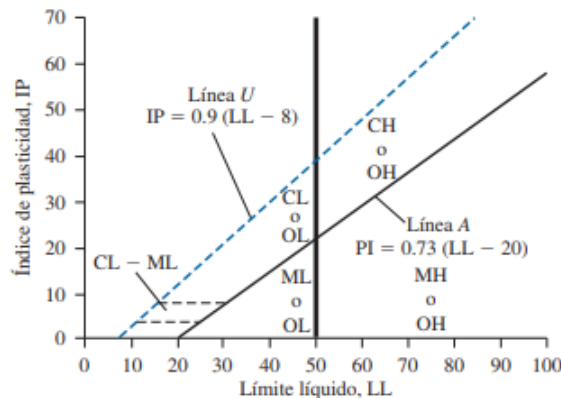


Figura 3. Carta de plasticidad
Fuente: (Das, 2012)

6.2 ENSAYO DE COMPACTACIÓN

La compactación consiste en el aumento del peso específico del suelo, mediante la reducción de vacíos para lo cual se aplica una determinada energía, el grado de compactación se calcula en función de su peso específico seco, el agua que se le adiciona al suelo en el proceso de

compactación facilita que las partículas se deslicen entre si logrando una mayor densificación, siempre y cuando no se haya alcanzado la humedad óptima. La prueba de laboratorio usada generalmente para hallar estas características es el ensayo tipo Proctor. (Das, 2012)

Hacia la década de los años 30's del siglo XX el ingeniero Ralph R. Proctor diseñó una prueba que simulaba las condiciones de compactación que los equipos de la época le transmitían al suelo (prueba Proctor Estándar). Con la aparición de equipos más pesados en la década de los 40's, se modificó el ensayo cambiando las dimensiones del molde y del martillo utilizados, de tal forma que se simularan las nuevas condiciones de campo (prueba Proctor Modificada). (Bowles, 1981)

6.3 ENSAYO DE CORTE DIRECTO

La prueba de corte directo es importante en el ámbito del cualquier estudio de suelos ya que permite determinar los parámetros de resistencia (cohesión y ángulo de fricción interna), dichos parámetros son necesarios para el diseño estructuras soportadas en el suelo como obras de contención y cimentación.

Mohr presento una teoría sobre la ruptura de los materiales, donde un material falla por la combinación critica de esfuerzo cortante y esfuerzo normal. (Das, 2012)

La ley de falla de Mohr-Coulomb se expresa mediante la ecuación 1.

$$\tau_f = c' + \sigma \tan(\phi')$$

Ecuación 1. Criterio de falla Mohr-Coulomb

Fuente: (Das, 2012)

Donde:

τ_f = Esfuerzo de resistencia al corte

c' = Cohesión efectiva del suelo

σ =Esfuerzo normal

ϕ' = Ángulo efectivo de fricción interna

El ensayo de corte directo consiste en tomar una muestra compactada de suelo e introducirla en un cajón metálico ya sea de forma circular o cuadrada, el cajón se dispone en la máquina. Dentro del cajón la muestra es cortada en dos partes a lo largo de un plano horizontal aplicando esfuerzos de corte a una velocidad controlada, la cual depende del tiempo de consolidación de la misma.

La prueba de corte directo normalmente se realiza con tres muestras, a cada una de las cuales se le aplican diferentes esfuerzos normales y las cuales fallan con determinados esfuerzos cortantes. Con los esfuerzos normales usados para cada muestra y los esfuerzos cortantes máximos, se construye la envolvente de falla en un plano de esfuerzos ver figura 4.

El ensayo de corte directo es utilizado en tres condiciones de acuerdo con las propiedades del material y la condición in situ estas son el ensayo consolidado drenado (CD), consolidado no drenado (CU) y no consolidado no drenado (UU) permitiendo así definir los parámetros de cohesión y el ángulo de fricción interna para cada material.

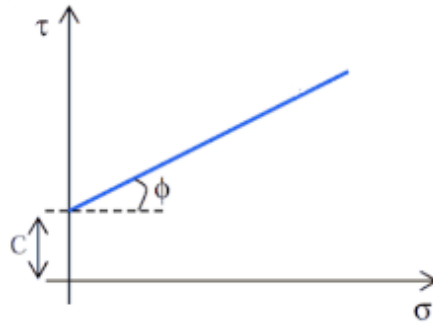


Figura 4. Envolvente de falla
Fuente: (Vaca & Oyola-Guzmán, 2018)

6.4 PRESIONES LATERALES DE TIERRAS

Con el paso del tiempo han surgido diversas estructuras de contención las cuales suplen las necesidades de cualquier obra ingenieril dichas estructuras se concentran en la ingeniería de cimentaciones y soporte de grandes masas de tierra, por lo que se requiere un conocimiento pleno acerca de las fuerzas laterales que actúan en las estructuras de contención y la masa de suelo que son retenidas (Das, 2012), para proceder a realizar el diseño y construcción apropiado para estructuras de contención como muros masivos rígidos, muros masivos flexibles, estructuras en tierra reforzada y estructuras ancladas. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005) . Dentro de las teorías más usadas para estimar las presiones laterales de tierras se encuentran la de Rankine y la de Coulomb. En el presente trabajo de grado las presiones laterales de tierras se estimaron de acuerdo a la teoría de Rankine, por esta razón solamente se hablará de ella.

TEORÍA DE RANKINE

A mediados del siglo XIX, Rankine desarrolla su teoría teniendo en cuenta o asumiendo que el suelo de relleno es homogéneo e isotrópico, la superficie de falla es llana, en su modelo matemático el suelo de relleno que se encuentra por encima del talón se incorpora al muro y no existe un ángulo de fricción entre el suelo y la parte posterior del suelo. (Sivakugan, 2009)

A partir del estado de reposo la falla se puede alcanzar de dos formas:

- a. Disminuyendo el esfuerzo horizontal hasta el momento en que el círculo de Mohr toque a la envolvente de falla, de esta forma se habrá llegado a un estado de falla inminente denominado estado activo (ver círculo 2 de la figura 5).
- b. Aumentando esfuerzo horizontal hasta el momento en que el círculo de Mohr toque la envolvente de falla, de esta forma se habrá llegado a un estado de falla inminente denominado estado pasivo (ver círculo 3 de la figura 5).

Al seleccionar unas dimensiones apropiadas para los muros de contención se deben tener en cuenta que estos sean estables al volteo y deslizamiento y además que el suelo de fundación soporte con suficiencia las presiones verticales transmitidas por el muro.

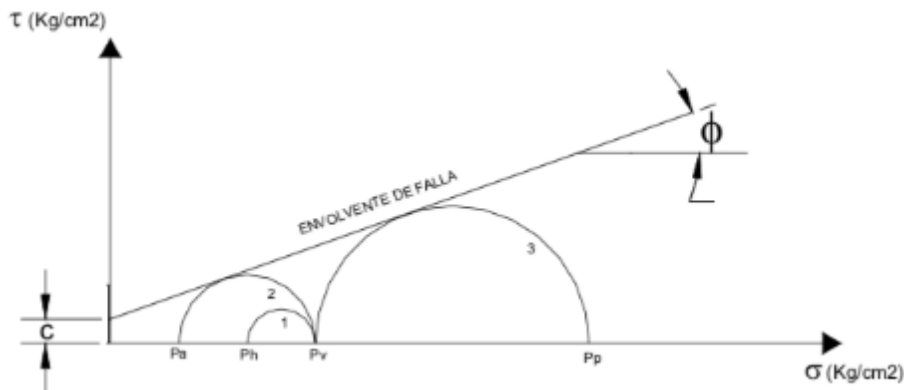


Figura 5. Envolvente de falla Mohr-Coulomb
Fuente: (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005)

6.5 GEOTEXTILES

Los geotextiles son un producto que se encuentra dentro del grupo de los geosintéticos, el cual se define como un material textil plano, permeable, polimérico, ya sea sintético o natural que posee diferentes usos para obras de construcción en el ámbito de la Ingeniería Civil con aplicaciones geotécnicas según su método de fabricación y producción. Dentro de la clasificación del geotextil se encuentra el geotextil tejido y el no tejido. (PAVCO, 2012)

Geotextiles tejidos

Su método de fabricación consta entre cruzar cintas de urdimbre en sentido longitudinal y de trama en sentido transversal, de esta forma su estructura es plana y la resistencia a la tracción es tipo biaxial. (PAVCO, 2012) Los geotextiles tejidos se emplean en el ámbito de la construcción ejerciendo la función de separación y refuerzo, normalmente se emplean en muros de contención o la estabilización de suelos blandos. (Geotexan, 2017)

Geotextiles No tejidos

La técnica de elaboración se basa en superponer fibras o filamentos en forma laminar consolidando esta estructura según la metodología de unir las fibras o filamentos, gracias a estos sistemas los geotextiles no tejidos se clasifican en: geotextiles no tejidos unidos de forma mecánica, térmica y química. (PAVCO, 2012) Los geotextiles no tejidos cumplen la función de drenaje y filtración permitiendo el flujo del agua y la retención de finos. (Geotexan, 2017)

Los muros de contención son estructuras cuya función es retener masa de suelos u otros materiales sueltos, proporcionando soporte lateral, existen diversos tipos de muros de contención, entre ellos los muros en tierra armada reforzados con geosintéticos. (Das, 2012)

Actualmente los muros de contención han venido empleando el sistema de geosintéticos con éxito, debido al desarrollo e innovación de nuevos materiales, los cuales aumentan el soporte en condiciones de alcalinidad dentro del suelo y humedad. A nivel internacional los muros de

contención con geosintéticos se han convertido en las alternativas convenientes, primordialmente en la capacidad portante del terreno y un factor económico, la cual puede ser realizada en las mismas condiciones constructivas y geotécnicas, se estima una reducción de costos entre un 30% y un 60%, de acuerdo con las condiciones particulares de cada proyecto, esta reducción se debe a la posibilidad de emplear los materiales encontrados in situ. (PAVCO, 2012)

El suelo empleado para realizar el muro de contención básicamente tiene la capacidad de resistir los esfuerzos de compresión en mayor escala que los esfuerzos de tensión, puesto que al introducir el geotextil se brindará la resistencia a la tensión, aumentando los esfuerzos friccionantes resistentes dentro de la masa de suelo. (PAVCO, 2012).

7. METODOLOGÍA

A continuación, se presenta el respectivo diagrama con las fases de la metodología que se llevó a cabo para el planteamiento, ejecución y análisis del prototipo a escala.

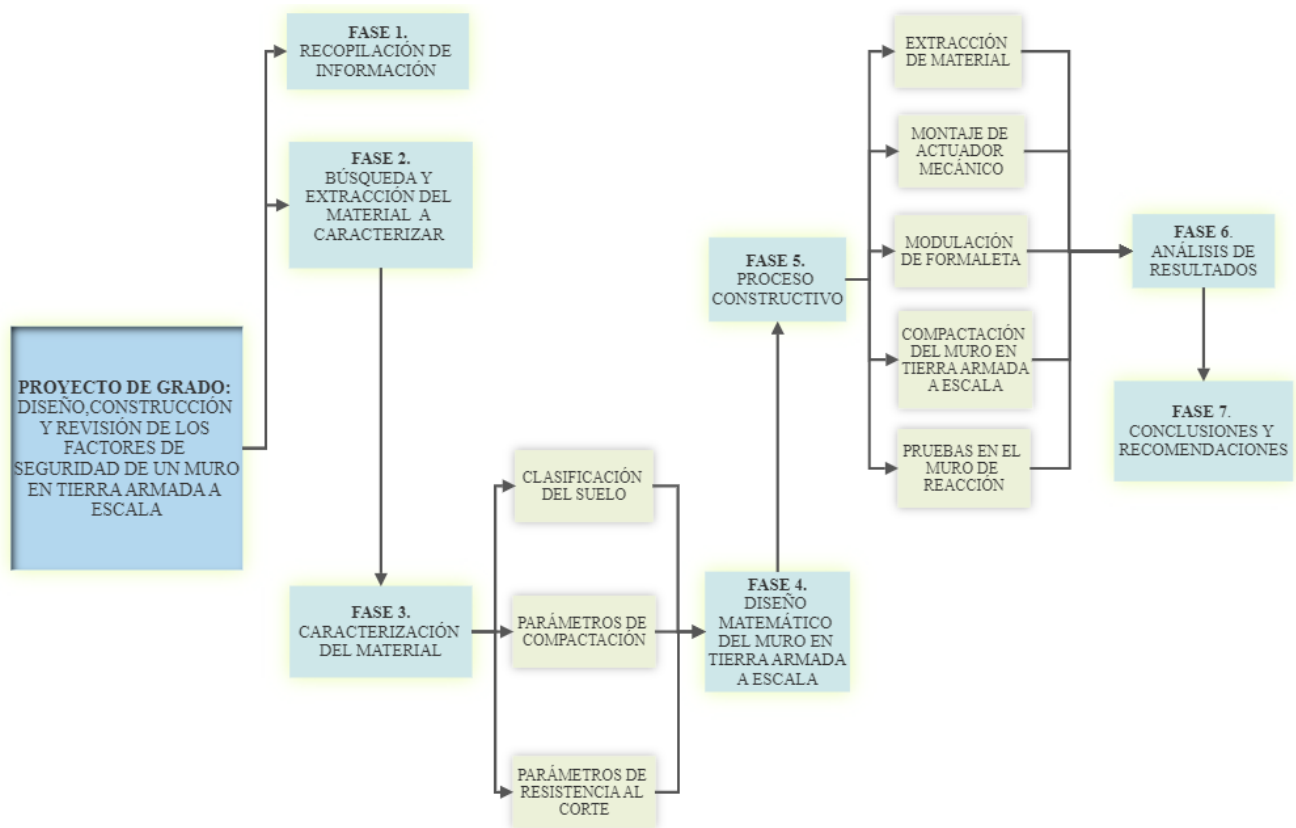


Figura 6. Metodología.
Fuente: Elaboración propia.

7.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Se recopiló información de los diferentes materiales bibliográficos existentes tales como: trabajos de grado, artículos, reseñas, ponencias referentes a muros de contención reforzados con geotextil, para cumplir el alcance del proyecto; así mismo se llevaron a cabo consultas del material presente en la biblioteca de la Universidad Pontificia Bolivariana junto a las diferentes instituciones educativas del Área Metropolitana de Bucaramanga.

7.2 BÚSQUEDA Y EXTRACCIÓN DEL MATERIAL

Los materiales requeridos para poder desarrollar el presente trabajo de grado fueron extraídos del campus de la Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga. Se encontró un material de relleno para el muro de contención y el suelo de fundación, que contara con una fricción y

cohesión significativa para el cumplimiento de los requisitos mínimos y así poder materializar los modelos a escala.

7.3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

7.3.1 CLASIFICACIÓN DEL SUELO

La clasificación del material se realizó con el fin de conocer la distribución del tamaño de las partículas y la naturaleza de su fracción fina, estableciendo la viabilidad de construcción por medio de diversos ensayos tales como: Ensayo de granulometría **INV E-123-13**, Límites líquido y plástico **INV E-125-13** y **INV E-126-13**.

7.3.2 PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN

El grado de compactación se determinará por medio del ensayo de Relación humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo proctor modificado de compactación) **INV E-142-13**, para mayor confiabilidad se realizaron 3 veces el mismo ensayo. Se implementaron como parámetros de compactación de diseño el promedio de estos teniendo en cuenta que los datos no presentan una gran dispersión.

7.3.3 PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE

Para determinar los parámetros de resistencia al corte (Angulo de fricción interna y cohesión) es necesario conocer la resistencia pico del suelo a utilizar para determinado valor de esfuerzo normal, para una mejor caracterización geotécnica del modelo a escala se realizaron pruebas consolidadas drenadas (CD), descritos en la norma **INV E-154-13**.

7.4 DISEÑO DEL MURO DE CONTENCIÓN REFORZADO CON GEOTEXTIL

Se diseñó un muro de contención reforzado con geotextil a escala de 1 metro de altura. La única fuerza horizontal actuante del modelo fue la impuesta por el actuador del muro de reacción y el momento de volteo o deslizamiento será el que dicha fuerza genere la metodología de cálculo considera que la superficie de falla formara un Angulo de $45 + \phi/2$ con la horizontal (Plano en el cual actúa el esfuerzo principal mayor), se aclara que ϕ es el ángulo de fricción interna del suelo de relleno del muro.

7.5 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

Para la construcción del prototipo fue pertinente el conocimiento de las dimensiones, la separación entre capas, el tipo de geotextil, la guía de instalación del geotextil, sus longitudes de desarrollo, los parámetros de compactación. Así mismo, se determinó previamente el tipo de herramienta de compactación para realizar los ajustes al diseño.

7.6 PRUEBAS EN EL MURO DE REACCIÓN

El número de ensayos aplicando cargas horizontales por medio del actuador del muro de reacción estará condicionado al tipo de falla del modelo a escala así:

Si la falla es por volteo o deslizamiento, se realizarán 5 (Cinco) Pruebas.

7.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez obtenidas las cargas de falla del modelo a escala, se procedió a calcular los factores de seguridad por deslizamiento, volteo y capacidad portante y a partir de dichos factores, realizar el cálculo del ángulo de fricción suelo-geotextil y de esta forma determinar si los resultados del modelo matemático coincidieron con el modelo experimental.

7.8 ELABORACIÓN DE INFORME FINAL

Después de analizar los resultados obtenidos en las pruebas realizadas al prototipo, se tomó como base la literatura técnica del área de suelos y geotecnia, para así poder realizar las conclusiones respectivas en base a los resultados obtenidos y brindar las recomendaciones adecuadas para futuras investigaciones.

8. RESULTADOS

8.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

El material a utilizar en este proyecto de grado proviene de la zona de parqueaderos ubicado en la Universidad Pontificia Bolivariana-Seccional Bucaramanga, de dicha zona se extrajo material suficiente para realizar los ensayos de clasificación y caracterización pertinentes, cabe destacar que tanto el suelo de relleno como el suelo de fundación a utilizar en el ensayo provienen del mismo sitio.

8.1.1 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULAS

Se determinó el tamaño de partículas siguiendo el procedimiento descrito en la norma **INV E 123-13**. A continuación, se presentan las respectivas tablas y graficas de los ensayos realizados.

MUESTRA No.1				
PESO SECO ANTES DEL LAVADO (g)	2500			
PESO SECO DESPUÉS DEL LAVADO (g)	1671			
MALLA No.	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO PARCIAL	% PASA
3/8"	9,52	4,11	0,16	100,00
No 4	4,75	10,44	0,42	99,58
10	2,00	63,41	2,54	97,05
20	0,840	286,51	11,46	85,59
40	0,420	654,86	26,19	59,39
60	0,250	267,00	10,68	48,71
140	0,106	316,16	12,65	36,06
200	0,074	54,49	2,18	33,89
FONDO	-----	840,84	33,63	0,25
	SUMA	2497,82	99,91	

Tabla 2. Distribución granulométrica (Muestra No.1)

Fuente: Elaboración Propia.

MUESTRA No.2				
PESO SECO ANTES DEL LAVADO (g)	2500			
PESO SECO DESPUÉS DEL LAVADO (g)	1623			
MALLA No.	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO PARCIAL	% PASA
3/8"	9.52	1.65	0.07	100.00
No 4	4.75	24.94	1.00	99.00
10	2.00	77.75	3.11	95.89
20	0.840	307.37	12.29	83.60
40	0.420	591.28	23.65	59.95
60	0.250	241.02	9.64	50.31
140	0.106	313.88	12.56	37.75
200	0.074	51.25	2.05	35.70
FONDO	-----	890.26	35.61	0.09
	SUMA	2499.40	99.98	

Tabla 3. Distribución granulométrica (Muestra No.2)
Fuente: Elaboración Propia.

MUESTRA No.3				
PESO SECO ANTES DEL LAVADO (g)	2500			
PESO SECO DESPUÉS DEL LAVADO (g)	1696			
MALLA No.	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO PARCIAL	% PASA
3/8"	9,52	5,37	0,21	100,00
No 4	4,75	21,84	0,87	99,13
10	2,00	62,81	2,51	96,61
20	0,840	272,56	10,90	85,71
40	0,420	647,45	25,90	59,81
60	0,250	272,96	10,92	48,90
140	0,106	337,84	13,51	35,38
200	0,074	57,15	2,29	33,10
FONDO	-----	821,10	32,84	0,25
	SUMATORIA	2499,08	99,96	

Tabla 4. Distribución granulométrica (Muestra No.1),
Fuente: Elaboración Propia.

Con el fin de asegurar una determinación exacta del tamaño de partículas, se hicieron tres análisis granulométricos del suelo en estudio, cuyos resultados se pueden apreciar en la tabla 5. En dicha tabla se pueden observar los porcentajes de gravas, arenas y finos encontrados en cada ensayo, así como también sus promedios.

RESUMEN DE PORCENTAJES				
FRACCIONES	Muestra No.1	Muestra No.2	Muestra No.3	PROMEDIO
GRAVAS (%)	0,42	1,00	0,87	0,76
ARENAS (%)	65,95	63,39	66,28	65,21
FINOS (%)	33,63	35,61	32,84	34,03

Tabla 5. Resumen distribución granulométrica.
Fuente: Elaboración Propia.

Con los resultados expuestos en las tablas 2-3-4. del análisis mecánico se procedió a elaborar las curvas de distribución granulométrica, las cuales se pueden apreciar en la Figura 7.

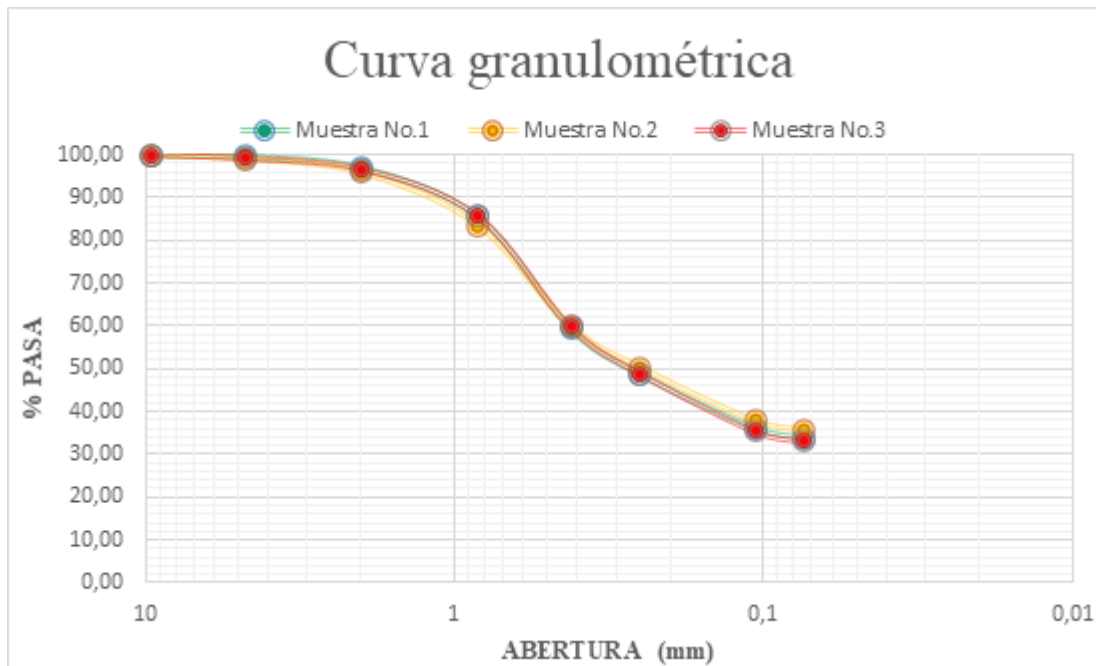


Figura 7. Curva resumen de distribución de tamaños de partículas.
Fuente: Elaboración propia.

8.1.2 ENSAYOS DE LIMITES DE ATTERBERG

Debido a que el material de estudio además de ser arenoso presenta un contenido de finos superior al 12%, es necesario determinar sus límites de plasticidad para encontrar el nombre exacto de dicho material. La determinación del límite líquido y el límite plástico se realizó siguiendo los lineamientos de las normas INV E 125-13 y INV E 126-13 respectivamente, los resultados se presentan en las tablas 6-7-8 y figuras 8-9-10.

MUESTRA No.1								
PRUEBA	CAPSULA N°	GOLPES N°	PESO CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (g)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (g)	PESO AGUA (g)	PESO DE LA CÁPSULA (g)	PESO DEL SUELO SECO (g)	HUMEDAD (%)
LIMITE LIQUIDO								
1	2	31	48,41	41,04	7,37	18,42	22,62	32,58
2	20	22	46,63	39,5	7,13	18,14	21,36	33,38
3	24	17	50,4	41,99	8,41	18,53	23,46	35,85
LIMITE PLÁSTICO								
1	29		25,6	24,34	1,26	18,57	5,77	21,84
2	41		16,5	15,54	0,96	10,8	4,74	20,25
3	4		27,7	26,15	1,55	18,7	7,45	20,81

Tabla 6. Limite líquido y plástico (Muestra No.1).

Fuente: Elaboración propia.

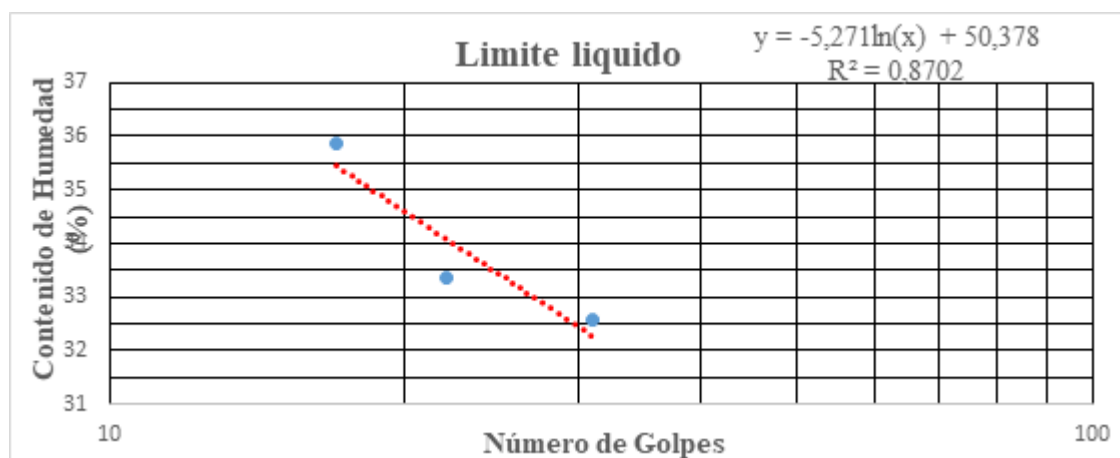


Figura 8. Limite líquido (Muestra No.1)

Fuente: Elaboración propia.

MUESTRA No.2								
PRUEBA	CAPSULA N°	GOLPES N°	PESO CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (g)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (g)	PESO AGUA (g)	PESO DE LA CÁPSULA (g)	PESO DEL SUELO SECO (g)	HUMEDAD (%)
LIMITE LIQUIDO								
1	2	32	36,72	32,52	4,2	18,41	14,11	29,77
2	27	24	34,63	30,67	3,96	18,04	12,63	31,35
3	24	18	42,18	36,17	6,01	18,54	17,63	34,09
LIMITE PLÁSTICO								
1	41		15,35	14,54	0,81	10,73	3,81	21,26
2	50		17,92	17,04	0,88	12,68	4,36	20,18
3	1		23,55	22,61	0,94	18,1	4,51	20,84

Tabla 7. Limite líquido y plástico (Muestra No.2)

Fuente: Elaboración propia.

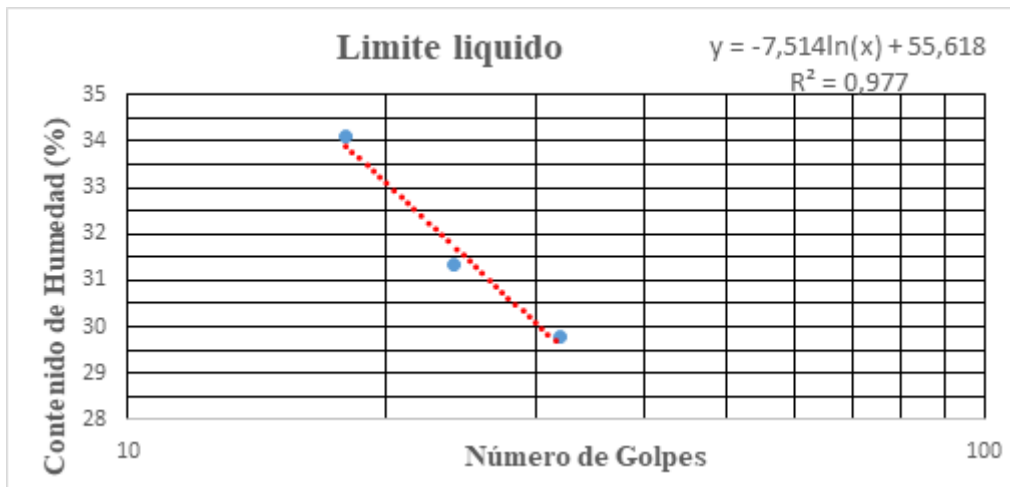


Figura 9. Limite liquido (Muestra No.2).

Fuente: Elaboración propia.

MUESTRA No.3								
PRUEBA	CAPSULA N°	GOLPES N°	PESO CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (g)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (g)	PESO AGUA (g)	PESO DE LA CAPSULA (g)	PESO DEL SUELO SECO (g)	HUMEDAD (%)
LIMITE LIQUIDO								
1	20	31	39.39	34.51	4.88	18.14	16.37	29.81
2	52	24	30.4	25.54	4.86	10.47	15.07	32.25
3	47	19	30.23	25.83	4.4	12.95	12.88	34.16
LIMITE PLÁSTICO								
1	43		16.61	15.54	1.07	10.6	4.94	21.66
2	51		20.96	19.57	1.39	13.02	6.55	21.22
3	4		24.69	23.66	1.03	18.7	4.96	20.77

Tabla 8. Limite líquido y plástico (Muestra No.3)

Fuente: Elaboración propia.

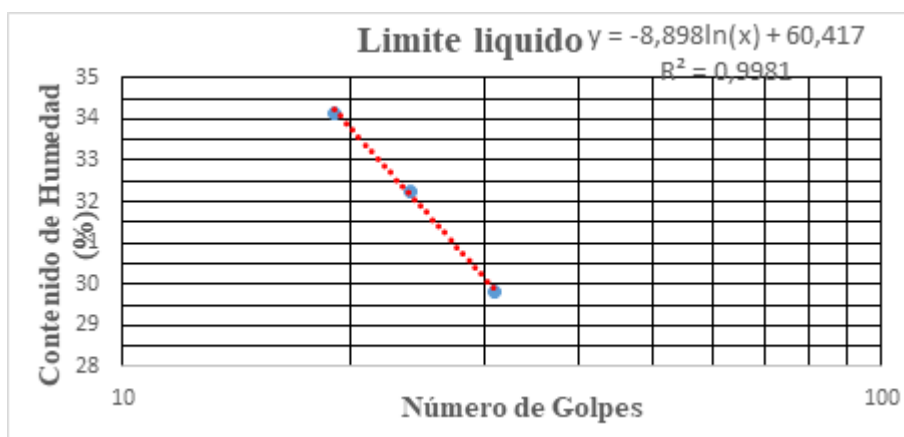


Figura 10. Limite liquido (Muestra No.3).

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 9 muestra los límites de Atterberg encontrados en cada una de las tres muestras ensayadas, así como también su promedio. Estos resultados son materia prima para realizar la correcta clasificación del material por medio del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

RESUMEN DE RESULTADOS			
MUESTRA	LL (%)	LP (%)	IP
No.1	42,50	20,97	21,53
No.2	43,65	20,72	22,93
No.3	45,14	21,44	23,70
PROMEDIO	43,76	21,04	22,72

Tabla 9. Resultados límite líquido, plástico y índice de plasticidad.
Fuente: Elaboración propia.

8.2 PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN

Los parámetros de compactación son la humedad óptima y el peso específico seco máximo. Su determinación en el laboratorio se realiza mediante ensayos tipo Proctor, dicho ensayo tiene como finalidad disminuir la relación de vacíos del material al aplicar una energía mecánica.

Dichos parámetros obtenidos se usaron para compactar tanto el suelo de fundación, así como también los muros construidos.

8.2.1 ENSAYO DE COMPACTACIÓN

La determinación actual de la humedad óptima y el peso específico máximo se realiza de acuerdo con los lineamientos establecidos por la norma INV E 142-13. Con base en los resultados de las pruebas de granulometría por tamizado con lavado por la malla N° 200 se estableció que el tipo de ensayo Proctor modificado a realizar es el A. Los resultados de dichos ensayos se presentan en las tablas 10-11-12 y figuras 11-12-13.

CARACTERÍSTICAS DEL MOLDE				
DIÁMETRO DEL MOLDE (cm)	10,12			
ALTURA DEL MOLDE (cm)	11,64			
PESO DEL MOLDE (g)	3790		MUESTRA No.1	
VOLUMEN DEL MOLDE (cm ³)	936,28		w _{opt} (%)	10,8
			gd _{max} (g/cm ³)	1,95
DETERMINACIÓN				
	1	2	3	4
PESO MOLDE + SUELO HÚMEDO (g)	5510	5630	5800	5610
PESO MOLDE (g)	3790	3790	3790	3790
PESO SUELO HÚMEDO (g)	1720	1840	2010	1820
PESO ESPECÍFICO HÚMEDO (g/cm ³)	1,84	1,97	2,15	1,94
HUMEDAD				
CAPSULA NO	40	17	53	19
PESO CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (g)	77,49	75,36	80,12	75,72
PESO CÁPSULA + SUELO SECO (g)	74,37	72,64	74	70,74
PESO CÁPSULA (g)	31,73	40,75	20,94	32,09
PESO AGUA (g)	3,12	2,72	6,12	4,98
PESO SUELO SECO (g)	42,64	31,89	53,06	38,65
HUMEDAD (%)	7,32	8,53	11,53	12,88
PESO ESPECÍFICO SECO				
PESO ESPECIFICO SECO (g/cm ³)	1,71	1,81	1,92	1,72

Tabla 10. Proctor modificado Muestra No.1

Fuente: Elaboración propia.

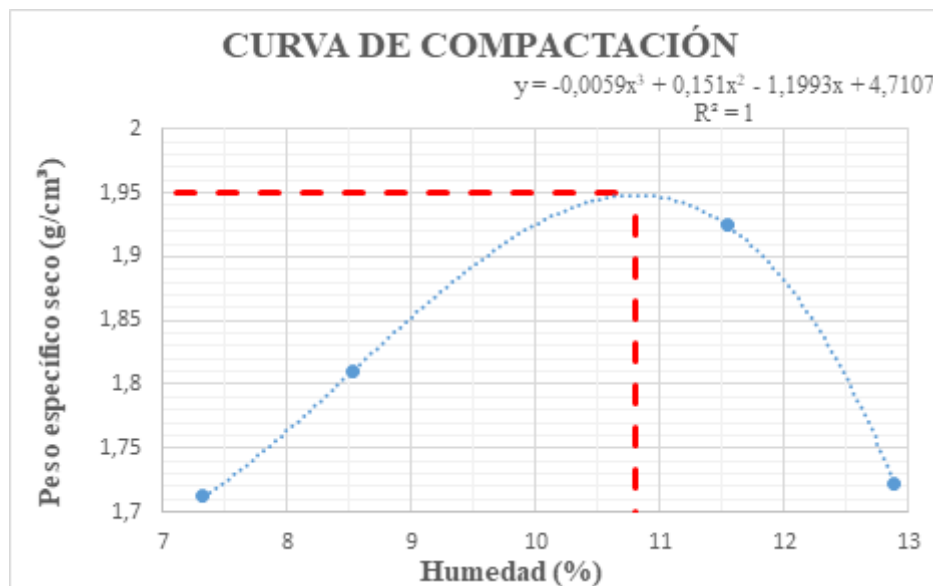


Figura 11. Curva de compactación Muestra No.1

Fuente: Elaboración propia.

CARACTERÍSTICAS DEL MOLDE				
DIÁMETRO DEL MOLDE (cm)	10,15			
ALTURA DEL MOLDE (cm)	11,66			
PESO DEL MOLDE (g)	3690		MUESTRA No.2	
VOLUMEN DEL MOLDE (cm ³)	943,45		w _{opt} (%)	11,50
			gd _{max} (g/cm ³)	1,95
DETERMINACIÓN				
	1	2	3	4
PESO MOLDE + SUELO HÚMEDO (g)	5510	5660	5740	5720
PESO MOLDE (g)	3690	3690	3690	3690
PESO SUELO HÚMEDO (g)	1820	1970	2050	2030
PESO ESPECÍFICO HÚMEDO (g/cm ³)	1,93	2,09	2,17	2,15
HUMEDAD				
CAPSULA NO	59	108	23	40
PESO CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (g)	51,93	73,68	66,9	83,67
PESO CÁPSULA + SUELO SECO (g)	49,43	68,87	61,75	77,38
PESO CÁPSULA (g)	21,32	20,86	21,1	31,74
PESO AGUA (g)	2,5	4,81	5,15	6,29
PESO SUELO SECO (g)	28,11	48,01	40,65	45,64
HUMEDAD (%)	8,89	10,02	12,67	13,78
PESO ESPECÍFICO SECO				
PESO ESPECIFICO SECO (g/cm ³)	1,77	1,90	1,93	1,89

Tabla 11. Proctor modificado Muestra No.2

Fuente: Elaboración propia.

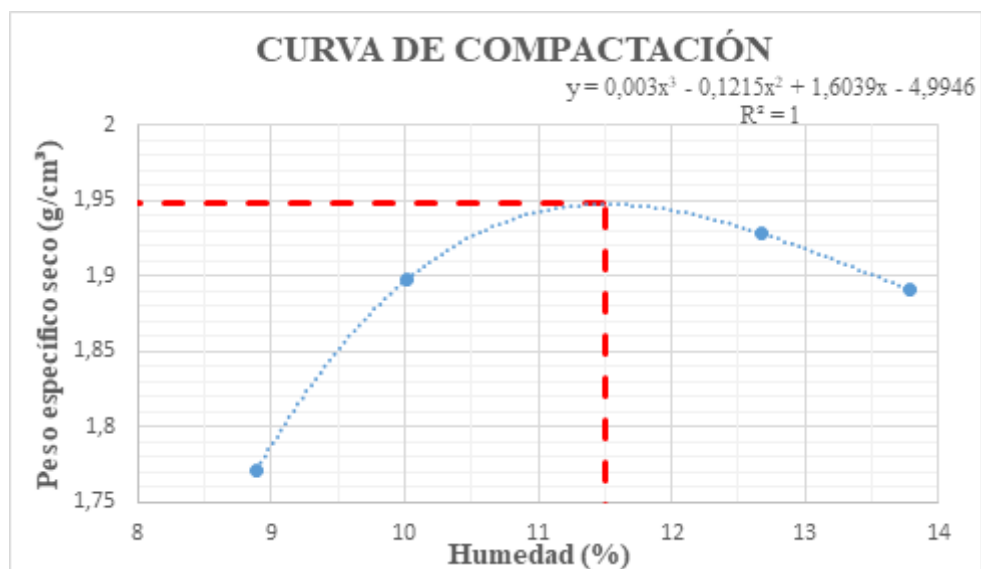


Figura 12. Curva de compactación Muestra No.2

Fuente: Elaboración propia.

CARACTERÍSTICAS DEL MOLDE				
DIÁMETRO DEL MOLDE (cm)	10,15			
ALTURA DEL MOLDE (cm)	11,68			
PESO DEL MOLDE (g)	3610		MUESTRA No.3	
VOLUMEN DEL MOLDE (cm ³)	945,07		w_{opt} (%)	12,30
			gd_{max} (g/cm ³)	1,88
DETERMINACIÓN				
	1	2	3	4
PESO MOLDE + SUELO HÚMEDO (g)	5430	5510	5610	5592
PESO MOLDE (g)	3610	3610	3610	3610
PESO SUELO HÚMEDO (g)	1820	1900	2000	1982
PESO ESPECÍFICO HÚMEDO (g/cm ³)	1,93	2,01	2,12	2,10
HUMEDAD				
CAPSULA NO	333	9	09	58B
PESO CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (g)	77,11	68,94	84,11	54,58
PESO CÁPSULA + SUELO SECO (g)	73,13	65,24	77,67	50,14
PESO CÁPSULA (g)	26,69	27,21	26,96	21,34
PESO AGUA (g)	3,98	3,7	6,44	4,44
PESO SUELO SECO (g)	46,44	38,03	50,71	28,8
HUMEDAD (%)	8,57	9,73	12,70	15,42
PESO ESPECÍFICO SECO				
PESO ESPECIFICO SECO (g/cm ³)	1,77	1,83	1,88	1,82

Tabla 12. Proctor modificado Muestra No.3

Fuente: Elaboración propia.

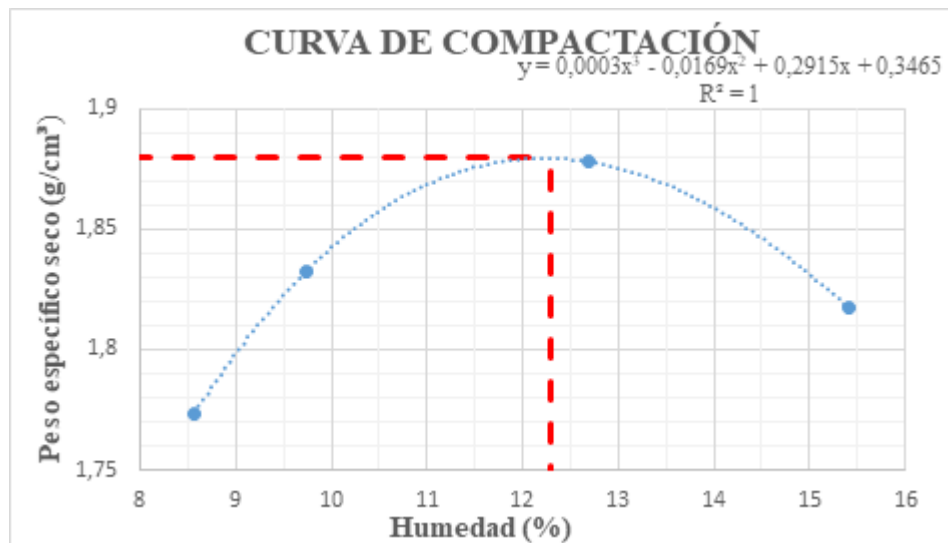


Figura 13. Curva de compactación Muestra No.3

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 13 muestra los parámetros de compactación obtenidos en los tres ensayos realizados, así como también sus valores promedio. Estos valores promedio fueron utilizados en la preparación de los testigos del ensayo de corte directo y también se tomaron como referencia en el proceso constructivo, tanto del suelo de fundación como del modelo a escala.

RESUMEN DE RESULTADOS		
MUESTRA	w _{opt} (%)	γ _{dmax} (g/cm ³)
No.1	10,8	1,95
No.2	11,50	1,95
No.3	12,30	1,88
PROMEDIO	11,53	1,93

Tabla 13. Resultados ensayos de compactación
Fuente: Elaboración propia.

8.3 PARÁMETROS DE RESISTENCIA

Los parámetros de resistencia al corte de un suelo son el ángulo de fricción interna y la cohesión. Estos parámetros unidos al peso específico del material se requieren para el diseño de los muros de contención reforzados con geotextil objeto de este trabajo. Los ensayos de corte directo se realizaron siguiendo los lineamientos de la norma INV E 154-13, las muestras para los ensayos fueron compactadas con la humedad optima promedio, tal como se mencionó en el numeral 8.2

8.3.1 ENSAYOS DE CORTE DIRECTO PARA EL DISEÑO

A continuación, se presentan los resultados y el promedio obtenidos en los ensayos de corte directo junto con la envolvente de falla promedio. Los valores promedio de los parámetros geotécnicos, unidos a las propiedades físicas del geotextil utilizado se usaron para hacer un diseño inicial del muro a escala.

RESUMEN DE RESULTADOS				
MUESTRA	φ (°)	C (Kg/cm ²)	ω (%)	γ (g/cm ³)
No.1	29.3	0.081	11.6	1.66
No.2	27.4	0.066	11.5	1.7
No.3	28	0.075	11.5	1.75
PROMEDIO	28.23	0.07	11.53	1.70

Tabla 14. Resultados ensayo de corte directo
Fuente: Elaboración propia

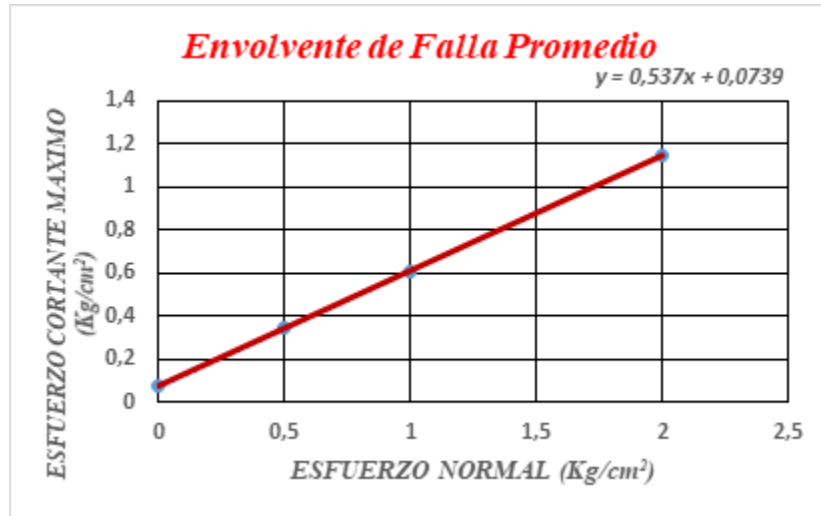


Figura 14. Envolverte de falla promedio
Fuente: Elaboración propia

8.4 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MURO A ESCALA

Para realizar el diseño preliminar del modelo a escala se utilizaron los parámetros de resistencia al corte y el peso específico de la arena arcillosa usada, estos parámetros se obtuvieron en ensayos de corte directo. Además, se hizo necesario conocer la resistencia a la tracción del geotextil T1700, la cual se obtuvo de los catálogos de la empresa fabricante.

El diseño realizado consta del despiece de las capas, análisis de estabilidad externa (volteo, deslizamiento y capacidad portante)

8.4.1 SECUENCIA DE CALCULO

- El diseño comenzó estableciendo la geometría del modelo a escala, para lo cual se tuvo en cuenta la facilidad constructiva. Las dimensiones escogidas se exponen en la tabla 15.

GEOMETRIA MURO	
H(m)	1
L(m)	1
B(m)	1

Tabla 15. Dimensiones del muro
Fuente: Elaboración propia.

- Una vez definida la geometría del muro se procedió a diseñarlo, para lo cual se tuvieron en cuenta las propiedades físicas tanto del suelo de relleno, como el suelo de fundación, así como también la resistencia a la tensión del geotextil T1700 utilizado. Estos parámetros requeridos para el diseño se pueden apreciar en la tabla 16.

PROPIEDADES RELLENO		SUELO DE FUNDACIÓN	
C(T/m ²)	0,74	C(T/m ²)	0,74
φ(°)	28,23	φ(°)	28,23
γ(T/m ³)	1,70	γ(T/m ³)	1,70
Ka	0,36	D (m)	0,00
δ(°)	24,00		

Tabla 16. Resultados propiedades del suelo
Fuente: Elaboración propia.

La resistencia a la tensión del geotextil empleado es de 25kN/m, como se mencionó anteriormente este valor fue obtenido de los catálogos del fabricante.

- **Despiece:** Utilizando un modelo de cálculo presentado en el libro Designing with geosynthetics de Robert M. Koerner se estimaron las longitudes de desarrollo de las capas, cuyos resultados se muestran en la tabla 17.

DESPIECE														
CAPA No.	z (m)	σ _{hs} (T/m2)	σ _{hq} (T/m2)	σ _{hl} (T/m2)	σ _{hd} (T/m2)	σ _h (T/m2)	S _v calc (m)	S _v (m)	s _v (T/m2)	Le (m)	Le Usada (m)	Lo (m)	Lr (m)	Lcalculada (m)
1	0,25	0,152	0,000	0	0	0,15	4,2976	0,25	0,43	0,0278	0,55	1	0,45	2,25
2	0,50	0,304	0,000	0	0	0,30	2,1488	0,25	0,85	0,0458	0,70	1	0,30	2,25
3	0,75	0,456	0,000	0	0	0,46	1,4325	0,25	1,28	0,0585	0,85	1	0,15	2,25
4	1,00	0,608	0,000	0	0	0,61	1,0744	0,25	1,70	0,0678	1,00	1	0	2,25

Tabla 17. Resultados del despiece del muro
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en el despiece, las longitudes de empotramiento obtenidas para las cuatro capas varían entre 3cm y 7cm, por facilidad constructiva se optó por ajustar estas longitudes de tal forma que el geotextil llegara hasta la espalda del muro.

- **Estabilidad externa:** Desde un comienzo se definió que los modelos a escala deberían fallar por deslizamiento. Para el cálculo de los factores de seguridad por volteo y deslizamiento se utilizó la teoría de Rankine.

El criterio establecido para que suceda una falla por deslizamiento es cuando las fuerzas horizontales resistentes son igualadas por las fuerzas horizontales actuantes, en cuyo caso el factor de seguridad por deslizamiento será de 1.0 (Falla inminente). Como fuerza horizontal actuante se tiene la transmitida por el actuador del muro de reacción y como única fuerza horizontal resistente se tiene aquella generada por el contacto suelo-geotextil.

Para prediseños de muros en suelo reforzado en baja altura y sometidos a cargas muertas menores se puede tomar un valor de δ entre 0.7φ y 0.85 φ, siendo 0.7 φ el valor más conservador (PAVCO, 2012). De acuerdo con este criterio se establecieron las cargas mínima y máxima con las cuales debería fallar el modelo a escala. Para los parámetros del suelo obtenidos en los primeros ensayos de corte directo realizados sobre muestras recuperadas de material compactado con la humedad

óptima en moldes del ensayo proctor modificado, se obtuvo que las cargas del actuador que deberían producir la falla por deslizamiento deberían estar entre 13.24 Ton y 14.72 Ton. Así mismo los factores de seguridad por volteo deberían estar entre 1.7 y 1.89, en ambos casos el factor de seguridad por capacidad portante obtenido por medio del método de Terzaghi es 24.47.

8.4.2 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO A ESCALA

De acuerdo con el despiece obtenido, las propiedades físicas tanto del suelo y teniendo en cuenta un porcentaje de expansión de 30 se calculó un volumen total a utilizar de 2m³ de arena arcillosa.

8.4.2.1 LOCALIZACIÓN Y REPLANTEO

El material a utilizar se extrajo de las instalaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana - Seccional Bucaramanga, exactamente en la zona de parqueaderos con coordenadas **7.039841 N - 73.072426 S**, el material de la zona cumplió con los requerimientos previamente establecidos. En la figura 15. Muestra el sitio donde se extrajo el material de estudio del presente trabajo.



Figura 15. Extracción del suelo de relleno y fundación
Fuente: Elaboración propia

El material fue almacenado en el laboratorio de estructuras, donde se realizó un proceso de cribado del material debido a que en condiciones in-situ dicho material presentaba sobre tamaños de partículas, las cuales no eran aptas para la construcción del modelo a escala.

8.4.2.2 MODULACIÓN Y COMPACTACIÓN DEL SUELO DE FUNDACIÓN

Con las herramientas suministradas en el laboratorio de estructuras se adecuó el actuador en el muro de reacción, se moduló la formaleta del suelo de fundación con dimensiones (1.20m x 1.20m x 0.6m). Una vez terminada la alineación con el muro de reacción (con la finalidad de que el actuador quedara a H/3), se agregó una capa de 20cm de grava y 30cm del material areno-arcilloso tal como se muestra en la figura 16.



Figura 16. Modulación y compactación del suelo de fundación
Fuente: Elaboración propia.

8.4.2.3 INSTALACIÓN DE GEOTEXTIL Y COMPACTACIÓN DEL MURO A ESCALA

Una vez finalizada la compactación del suelo de fundación se procedió a modular la formaleta del modelo a escala, dentro de la cual se compactaron 4 capas de 25 cm de espesor. Cada capa de geotextil tenía una longitud 2.25m, los cuales incluyen la longitud de empotramiento, la longitud geométrica hasta la zona de falla, la separación vertical y el doblez superior. Como se mencionó anteriormente la longitud de empotramiento de cada capa se llevó hasta la espalda por razones constructivas y técnicas (para tener una mayor superficie de contacto geotextil-suelo de fundación).

Con el fin de garantizar una distribución uniforme sobre toda la espalda del muro de la fuerza transmitida por el actuador, se usó una platina de acero con dimensiones (40cm x 70cm x 2cm).



Figura 17. Modulación y compactación del suelo de relleno
Fuente: Elaboración propia.

Se aclara que las pruebas de los muros fueron destructivas, por lo que en cada falla se procedía a desmontar el muro, así como la remoción de los primeros 15cm del suelo de fundación. Antes de remover el suelo de fundación se tomaron muestras para el ensayo de corte directo con el fin de realizar ajustes al diseño de cada muro.

8.5 ENSAYOS SOBRE EL MURO A ESCALA

Dentro del alcance del presente trabajo de grado, se estableció realizar pruebas destructivas sobre cinco muros a escala. Las cargas máximas que ocasionaron la falla por deslizamiento de cada modelo se presentan en la tabla 18.

MURO	CARGA MÁX (Kn)
1	11,7
2	11,4
3	11,7
4	11,5
5	11,4
PROMEDIO	11,54
DES. ESTANDAR	0,15
COEF. VARIACIÓN	1,31%

Tabla 18. Resultados fuerza horizontal máxima

Fuente: Elaboración propia.

8.6 AJUSTE DE LOS DISEÑOS

Debido a que las propiedades físicas de los suelos dependen de múltiples variables, dentro de las cuales se destacan la compacidad y la humedad, se decidió realizar ajustes al diseño para cada muro. Los parámetros geotécnicos (ángulo de fricción interna, cohesión y peso específico) requeridos para realizar estos ajustes se obtuvieron de los ensayos de corte directo sobre muestras extraídas del suelo de fundación de cada muro. La tabla 19 muestra las propiedades físicas obtenidas en cada ensayo.

RESUMEN DE RESULTADOS				
MURO	ϕ (°)	C (Kg/cm ²)	ω (%)	γ (g/cm ³)
1	24,4	0,059	11,65	1,56
2	24,6	0,066	11,95	1,55
3	27,9	0,055	11,66	1,62
4	26,1	0,054	11,64	1,62
5	27,7	0,058	11,63	1,59
PROMEDIO	26,14	0,0584	11,706	1,588

Tabla 19. Resultados ensayos de corte directo

Fuente: Elaboración propia.

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

9.1 CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL

Como el porcentaje de material que pasa por el tamiz No.200 es inferior al 50% (34.03%), entonces el suelo estudiado corresponde a un material grueso. Ya sabiendo que el suelo es grueso, se mira el contenido de gravas y arenas, los cuales son 0.76% y 65.21% respectivamente, por lo tanto, el material corresponde a una arena. A los suelos gruesos que tienen un contenido de finos superior al 12% (este es el caso) solamente se les juzga la plasticidad de su fracción fina, por lo tanto, se debe determinar si la arena en estudio es limosa o arcillosa, para esto se estiman el límite líquido y el límite plástico.

En el capítulo 8 se calcularon el límite líquido (43.76%) y el índice de plasticidad (22.72%), con estos datos se ingresa a la carta de Casagrande y tal como se ve en la figura 18, la fracción de material que pasa por la malla No. 40 es de naturaleza arcillosa, es decir que de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el material usado para la construcción del modelo a escala y del suelo de fundación del mismo corresponde a una **Arena Arcillosa (SC)**.

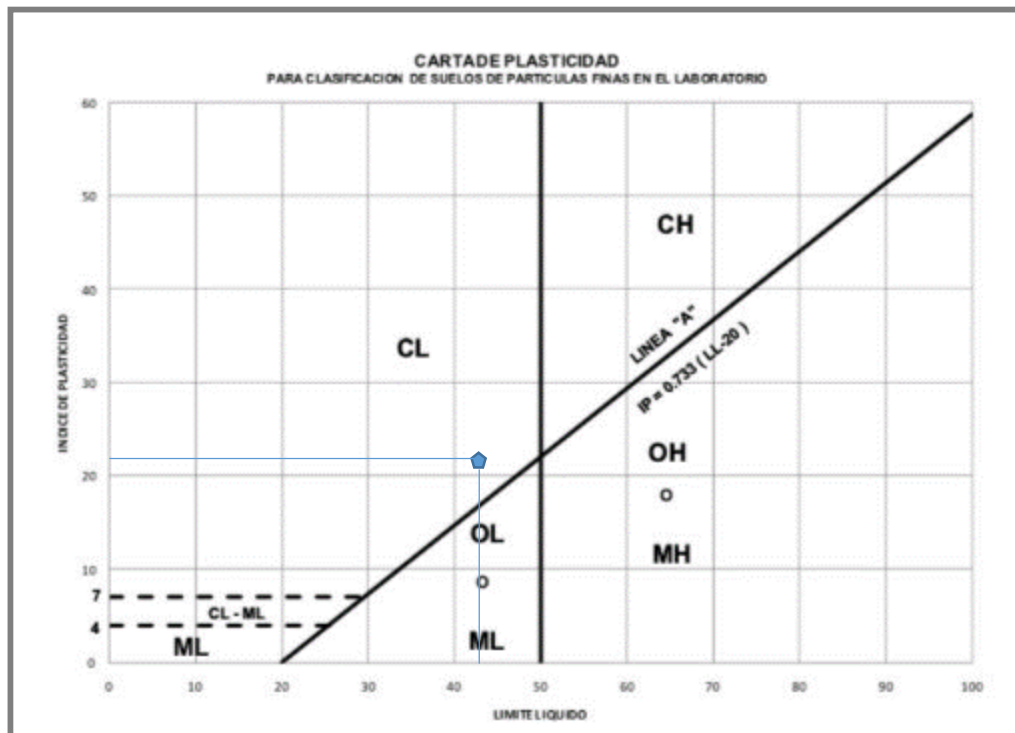


Figura 18. Carta de plasticidad
Fuente: Elaboración propia.

9.2 PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN

De acuerdo con el tipo de suelo que se encontró, se determinó que el tipo de método a utilizar para determinar los parámetros de compactación debería ser el A de acuerdo con los lineamientos de la norma INV E- 142-13. Una vez realizados 3 ensayos de compactación se obtuvo una humedad óptima promedio de 11.53% y un peso específico seco máximo de 1.93 g/cm³

La humedad óptima fue empleada para preparar las muestras para los ensayos de corte directo (a partir de los cuales se determinaron los parámetros geotécnicos requeridos para el diseño del muro), también se usó para compactar el suelo de fundación y compactar el muro a escala. El peso específico seco máximo se utilizó para determinar el grado de compactación del suelo de fundación.

9.3 PARÁMETROS DE RESISTENCIA

9.3.1 PARA EL DISEÑO

Una vez determinada la humedad óptima, se compactó material en los moldes del ensayo proctor modificado usando dicha humedad. De estos moldes se extrajeron muestras para realizar tres ensayos de corte directo con el fin de obtener los parámetros físicos requeridos para diseñar el muro a escala, los promedios de las propiedades del suelo se pueden apreciar en la tabla 20.

PROPIEDADES DEL SUELO			
ϕ (°)	C (Kg/cm ²)	ω (%)	γ (g/cm ³)
28.23	0.07	11.53	1.70

Tabla 20. Resistencia interna
Fuente: Elaboración propia.

Con los parámetros físicos mostrados en la tabla anterior, junto con la resistencia a la tensión del geotextil (tomada de los manuales del fabricante) se hizo el diseño del modelo a escala, el cual incluye las longitudes de desarrollo de cada una de las capas y la separación entre las mismas, así como también las revisiones de estabilidad y estimación de la carga del actuador que llevaría a la falla.

Inicialmente se había previsto que los modelos a escala fallarían con cargas horizontales que podrían variar entre 12.85 y 14.22 kN. vale la pena mencionar que esta estimación se realizó asumiendo que el grado de compactación tanto de las capas del muro, como del suelo de fundación sería superior al 95%.

Al realizar el primer ensayo con el muro de reacción, la carga que llevo a la falla por deslizamiento al modelo estuvo por fuera del rango estimado. Esta situación estaba prevista ya que el proceso de compactación se hizo de manera manual con un pisón, es por esta razón que se decidió tomar muestras para corte directo y con los resultados alimentar nuevamente al modelo matemático para recalcular la fuerza horizontal máxima esperada.

9.3.2 PARA AJUSTES AL DISEÑO

Dado que los parámetros de resistencia varían de acuerdo con la humedad y la energía de compactación empleada, se decidió tomar muestras para realizar tres ensayos de corte directo una vez cada muro fallara por deslizamiento. De estos ensayos se obtuvieron los parámetros físicos particulares para cada muro y con ellos se recalculó la fuerza horizontal que teóricamente debería provocar la falla por deslizamiento de cada uno de los 5 muros.

MURO	ϕ (°)	C (g/cm ³)	ω (%)	γ (g/cm ³)
1	24,4	0,059	11,65	1,56
2	24,6	0,066	11,95	1,55
3	27,9	0,055	11,66	1,62
4	26,1	0,054	11,64	1,62
5	27,7	0,058	11,63	1,59
PROMEDIO	26,14	0,0584	11,706	1,588

Tabla 21. Propiedades físicas

Fuente: Elaboración propia

La tabla 21 muestra los parámetros físicos promedio obtenidos para cada uno de los 5 muros, los cuales se utilizaron para estimar las fuerzas horizontales teóricas máximas.

Como era de esperarse los parámetros físicos que se obtuvieron de muestras recuperadas del suelo de fundación de cada uno de los modelos a escala, son menores que aquellos que se compactaron en moldes del ensayo Proctor modificado, ya que en estos últimos la energía suministrada fue menor.

9.4 ENSAYOS SOBRE EL MURO A ESCALA

El parámetro K es el factor que relaciona el ángulo de fricción suelo-geotextil con la fricción interna, este valor de K varía según el tipo de muro, por tal razón el parámetro tiene incidencia en la toma de decisiones con respecto al proyecto de grado, se estimó un diseño que posee las características de baja altura y las cargas muertas son bajas. En la tabla 22. Se presenta el rango de carga esperada para valores de K comprendidos entre 0.70 y 0.85 ϕ , según lo establecido en el manual de diseño con geosintéticos (PAVCO, 2012).

Dado que no se colocó un relleno pasivo frente al muro y además toda la base del muro se reforzó, la fuerza horizontal resistente se calculó por medio de la ecuación 2.

$$FHR = (C + \sigma_{vb} * \tan \delta) * Le_b$$

Ecuación 2. Fuerzas horizontales resistentes.

Fuente: (PAVCO, 2012)

Donde:

C= Cohesión del suelo de fundación

σ_{vb} = Presión vertical en la base

δ = Ángulo de fricción suelo-geotextil. $\delta = k\phi$

ϕ = Ángulo de fricción interna del suelo de fundación

Leb= Longitud de empotramiento en la base

RESUMEN DE RESULTADOS					
MURO	CARGA FALLA (kN)	CARGA ESPERADA (kN)		Cumplimiento	% Error
		Min	Max		
1	11,7	10,5	11,6	-	1,00
2	11,4	11,2	12,3	OK	0
3	11,7	11,0	12,4	OK	0
4	11,5	10,5	11,8	OK	0
5	11,4	11,2	12,5	OK	0

Tabla 22. Rango de carga
Fuente: Elaboración propia.

Los valores esperados de la carga máxima que se muestran en la tabla anterior se calcularon con la ecuación 2, reemplazando en ella los parámetros físicos obtenidos en los ensayos de corte directo ejecutados sobre muestras del suelo de fundación. En esta tabla puede apreciarse que en cuatro de los cinco muros la fuerza horizontal que provocó la falla del modelo a escala estuvo dentro de los rangos esperados, solamente en el muro uno la fuerza horizontal en la falla fue ligeramente superior al valor máximo del rango previsto (1%).

9.5 AJUSTES AL DISEÑO

Despejando K de la ecuación 2 se obtiene la siguiente ecuación 3.

$$k = \frac{\tan^{-1}\left(\frac{\left(\frac{FHR}{Leb} - C\right)}{\sigma_{vb}}\right)}{\phi}$$

Ecuación 3. Parámetro K
Fuente: Elaboración propia.

Donde:

FHR= Fuerza horizontal resistente

Leb= Longitud de empotramiento en la base

C= Cohesión

ϕ = Ángulo de fricción interna del suelo de fundación

σ_{vb} = Presión vertical en la base

Con el ángulo de fricción interna y la cohesión del suelo de fundación de cada prototipo, además de la presión vertical en la base, la longitud de empotramiento de la misma y la fuerza horizontal

que provocó la falla en cada muro, se calcularon los valores de K, los cuales se pueden apreciar en la tabla 23.

MURO	ϕ (°)	δ (°)	K
1	24,4	20,98	0,86
2	24,6	17,99	0,73
3	27,9	20,37	0,73
4	26,1	21,14	0,81
5	27,7	20,22	0,73
PROMEDIO	26,14	20,14	0,772

Tabla 23. Valores de K encontrados

Fuente: Elaboración propia.

A pesar de realizar un proceso de compactación con pisón y no con vibro compactadores mecánicos, los valores obtenidos de K estuvieron dentro del rango definido por la literatura técnica de diseño con geosintéticos (0.70-0.85), solamente en uno de los prototipos el valor de K fue ligeramente superior a 0.85 (0.86) y obteniendo un valor promedio para todos los modelos de 0.77.

La tabla 24 muestra los factores de seguridad por deslizamiento, volteo y capacidad portante para cada uno de los cinco modelos ensayados.

MURO	FS. Deslizamiento	FS. Volteo	FS. Capacidad portante
1	1	1.96	15.43
2	1	2	15.58
3	1	2.12	19.36
4	1	2.07	16.43
5	1	2.05	20.45

Tabla 24. Factores de seguridad

Fuente: Elaboración propia.

Como puede apreciarse en la tabla anterior todos los muros fallaron por deslizamiento, en ese instante el factor de seguridad por volteo de cada uno de ellos estaba muy cerca de 2.0 (1.96-2.12), es decir que los muros estuvieron lejos de fallar por volcamiento. Algo similar puede afirmarse respecto a la capacidad portante ya que los factores de seguridad variaban entre 15.43 y 20.45 en el momento en que se daba la falla por deslizamiento.

9.6 CONTROL DE COMPACTACIÓN

Los modelos a escala fueron elaborados por medio de un pisón metálico y compactados por la misma persona, esto con el fin de asegurar la misma carga dinámica ejercida por el equipo de compactación en todas las capas del muro.

La tabla 25 muestra el grado de compactación obtenido para cada muro, como se puede apreciar estos valores oscilaron entre un 72% y 75%, obteniendo un valor promedio de 74% y un peso específico seco promedio de 1.42 g/cm³.

MURO	γd (g/cm ³)	% Compactación
1	1,40	72%
2	1,38	72%
3	1,45	75%
4	1,45	75%
5	1,42	74%
PROMEDIO	1,42	74%

Tabla 25. Compactación promedio

Fuente: Elaboración propia.

Como era de esperarse ninguno de los muros alcanzo un grado de compactación que llegara hasta el 95% (requisito de las especificaciones técnicas para rellenos del INVIAS), esta afirmación se hace debido al tipo de compactación manual que se realizó.

10. CONCLUSIONES

- Las propiedades físicas del suelo cumplieron con las condiciones deseadas para la materialización del prototipo a escala, ya que el suelo tenía la suficiente fricción y un contenido de arcilla considerable para facilitar las maniobras de construcción y la determinación de las fuerzas horizontales que inducirían a la falla.
- Con las propiedades del suelo y los valores de k reportados en la literatura técnica de diseño con geosintéticos ($0.7-0.85 \phi$), se estimó un rango de valores de las fuerzas horizontales que podrían hacer fallar el muro y estas fueron comparadas con las fuerzas horizontales reales.
- Con la ayuda del muro de reacción y el actuador dinámico se realizaron 5 simulaciones de cargas horizontales donde se pudo establecer un rango de fuerzas entre (11.4-11.7) kN, las cuales inducirían la falla de los modelos a escala.
- De acuerdo con las propiedades de resistencia al corte y tracción del geotextil se realizó el diseño y construcción de 5 prototipos a escala, simulando las condiciones previamente calculadas para la realización de cada ensayo.
- Se determinó que el grado de compactación del suelo de fundación de cada prototipo se encontraba en un rango entre 72% y 75%, es decir que con el método de compactación manual no es lo más apropiado para llegar a un grado de compactación superior al 95%, el cual es el recomendado por el Capítulo 2 Art. 220 Explanaciones – Terraplenes.
- Durante los ensayos de los muros a escala se tuvo la necesidad de adecuar las velocidades de corte directo con la velocidad del actuador dinámico, ya que las pruebas de los muros simulaban un corte directo a mayor escala y los datos no tendrían una congruencia válida para realizar los análisis de resultados.
- El parámetro K corresponde a la relación que hay entre el ángulo de fricción suelo-geotextil (δ) y el ángulo de fricción interna del suelo (ϕ). En el presente trabajo de grado el valor de K presentó una variación entre 0.73 y 0.86, el cual se considera aceptable, ya que en la literatura técnica se encuentra que dicho rango varía entre 0.70 y 0.85, de los 5 prototipos ensayados solamente uno de ellos se salió de este rango en un 1%.
- Durante la construcción del modelo a escala fue indispensable el uso de una platina con dimensiones que permitieran la distribución uniforme de la carga generada por el actuador dinámico, evitando así una falla local o punzonamiento en la superficie de contacto entre la espalda del muro y el brazo del actuador.
- De acuerdo con los cálculos realizados para el diseño del modelo a escala y corroborados con las pruebas de carga, se puede afirmar que las fallas por volcamiento y capacidad de soporte estuvieron lejos de darse.

11. RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones con muros en tierra armada se recomienda el uso de maquinaria que permita alcanzar una compactación del 95% y facilite las maniobras de construcción dentro del laboratorio de estructuras, tales como una rana vibro compactadora o bien un apisonador compactador tipo canguro, permitiendo así el estudio de la variación del parámetro K con el grado de compactación usando los equipos manuales y mecánicos.

Realizar una simulación de carga estática con elementos que brinden un peso considerable al modelo y así aprovechar la fabricación de vigas o cilindros que se hacen durante los ensayos programados por las clases de resistencia de materiales de los semestres anteriores, generando así una posible comparación con el modelo del presente trabajo de grado y un aprovechamiento de elementos que normalmente son transportados y depositados en botaderos de escombros.

En próximos trabajos de grados de grado similares a este, se sugiere modificar las dimensiones del modelo o aumentar la altura del brazo de la fuerza suministrada por el actuador, de tal forma que se provoquen fallas bien sea internas o fallas externas por volteo.

Para trabajos similares, se recomienda utilizar diferentes tipos de suelo o geotextiles con diferente resistencia a la tracción para comparar la incidencia de estas variables en la obtención del ángulo de fricción suelo-geotextil.

Diseñar y materializar prototipos a escala con mayores dimensiones que permitan obtener fuerzas horizontales resistentes, tanto en la zona reforzada de la base, así como también en la zona no reforzada para comparar los ángulos de fricción suelo-geotextil en una u otra condición.

BIBLIOGRAFÍA

- Armesto Duarte, D., & Pinto de Luquez, Y. N. (2018). *Determinación del ángulo de fricción suelo-muro para el dimensionamiento de muros de contención sobre suelos arenosos de la quebrada palmichal*. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana.
- blogs, I. C. (5 de Noviembre de 2010). Suelos-Prueba de Corte Directo. Obtenido de <http://ingenieriaciviltips.blogspot.com/2011/05/suelos-prueba-de-corte-directo.html>
- Bowles, J. (1981). *Manual de LABORATORIO DE SUELOS en Ingeniería Civil*. Bogota: McGRAW-HILL.
- Das, B. (2012). *Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones* (Septima ed.). Mexico: Cengage Learning Editores, S.A de C.V.
- Geotexan, g. d. (27 de Abril de 2017). Diferencia entre los geotextiles tejidos y no tejidos . Obtenido de <https://geotexan.com/diferencia-entre-geotextiles-tejidos-y-no-tejidos/>
- Invías, I. N. (2013). Documentos técnicos. En M. d. Transporte. Colombia: Gobierno de Colombia. Recuperado el 28 de Junio de 2019, de <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos>
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodriguez, A. (2005). *Mecánica de suelos* (Vol. 2). México: Limusa S.A de C.V.
- Koerner, R. M. (2012). *Designing with Geosynthetics* (6th ed., Vol. 2).
- Lambe, T. W. (1951). *Soil testing for engieneers*. New york: John wiley and sons.
- Lambe, T., & Whitman, R. V. (1997). *Mecánica de suelos*. México, D. F.: Limusa Noriega editores.
- Liu, C., & Evett, J. B. (2018). *Soils and Foundations* (Octava ed.). New jersey, Estados unidos de norte america: Person Education .
- Navarro García, J. C., & Hernández Ayala, A. R. (2019). *Determinación del ángulo de fricción suelo-muro para el dimensionamiento de muros de contención sibre suelos arenosos de la quebrada Zapamanga*. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Parra Gómez, J., & Tajan Melón, Z. (2018). *Determinación de parámetros para el dimensionamiento de muros de contención sobre suelos arenosos mal gradados (SP) de la quebrada agua blanca*. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana.
- PAVCO, G. (2012). *MANUAL DE DISEÑO CON GEOSINTÉTICOS* (NOVENA ed.). Bogotá D.C: Diseño y Diagramación Norte Grafico. Obtenido de <http://www.geosoftpavco.com/manualvirtual/document.pdf>
- Sivakugan, N. (2009). *Empujes de tierra y muros de contención*. Primavera. Recuperado el 12 de Junio de 2019, de [file:///C:/Users/PERSONAL/Downloads/3_Empujes_de_tierra%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/PERSONAL/Downloads/3_Empujes_de_tierra%20(2).pdf)
- Vaca, O. L., & Oyola-Guzmán, R. D. (2018). Uso de la teoría de Mohr-Coulomb para explicar el mejoramiento de suelos mediante el proceso de compactación. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 12.

ANEXOS

ANEXO A
REGISTRO FOTOGRÁFICO

BÚSQUEDA DEL MATERIAL



Fotografía 1. Extracción del suelo de fundación y de relleno

ENSAYOS DE GRANULOMETRÍA



Fotografía 2. Lavado granulométrico por la malla No. 200

ENSAYOS DE LIMITES LÍQUIDO Y PLÁSTICO



Fotografía 3. Material tamizado por la malla No.40



Fotografía 4. Prueba de limite liquido

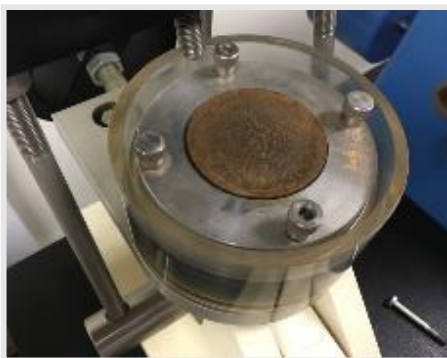


Fotografía 5. Prueba de limite plástico



Fotografía 6. Toma de humedades

ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN



Fotografía 7. Consolidómetro de anillo fijo.



Fotografía 8. Consolidómetro

ENSAYOS DE COMPACTACIÓN



Fotografía 9. Equipo de compactación



Fotografía 10. Muestra de suelo seco



Fotografía 11. Incorporación de humedad



Fotografía 12. Compactación del suelo (Método A)



Fotografía 13. Nivelación de muestra



Fotografía 14. Muestra compactada

ENSAYO DE CORTE DIRECTO



Fotografía 15. Espécimen preparado en molde proctor modificado



Fotografía 16. Caja de corte directo



Fotografía 17. Toma de datos en máquina de corte directo



Fotografía 18. Muestra ensayada

MODULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL MURO A ESCALA



Fotografía 19. Actuador dinámico anclado en el muro de reacción.



Fotografía 20. Toma de humedades naturales para estimación de la humedad óptima de compactación



Fotografía 21. Modulación de la formaleta para el suelo de fundación.



Fotografía 22. Modulación de formaleta para el suelo de fundación como el prototipo a escala.



Fotografía 23. Dosificación del material con la humedad óptima.



Fotografía 24. Corte del geotextil.



Fotografía 25. Compactación del suelo de fundación



Fotografía 26. Nivelación del suelo de fundación



Fotografía 27. *Instalación del geotextil*



Fotografía 28. *Instalación del geotextil y separación entre capas*



Fotografía 29. *Ajuste y nivelación del actuador dinámico para iniciar el ensayo*



Fotografía 30. *Nivelación y ajuste del deformímetro*



Fotografía 31. *Implementación y alineación de platina metálica*



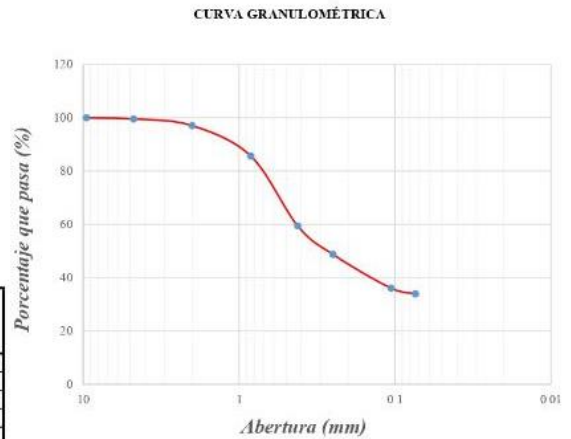
Fotografía 32. *Falla por deslizamiento*

ANEXO B
ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

PROYECTO	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y REVISIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE UN MURO EN TIERRA ARMADA A ESCALA	FECHA DE ENSAYO	AGOSTO 15 DE 2019
LOCALIZACIÓN	UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		

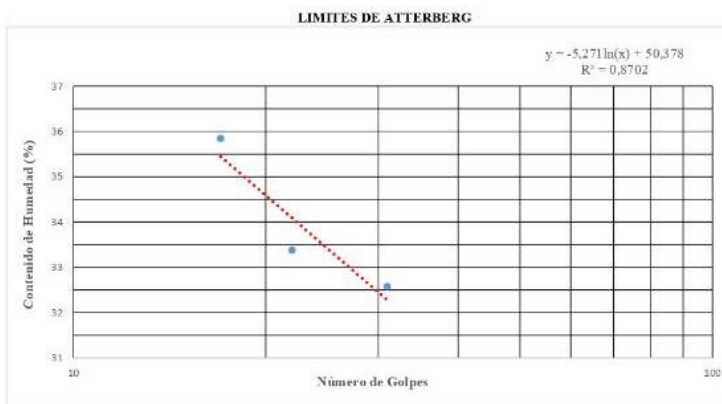
CONTENIDOS DE HUMEDAD	
PESO DEL MATERIAL SECO ANTES DEL LAVADO (g)	2500
PESO SECO DESPUÉS DEL LAVADO (g)	1671
PESO SECO DESPUÉS DEL LAVADO + TAZA (g)	1869
PESO DEL RECIPIENTE (g)	198
CONTENIDO DE FINOS PERDIDOS EN EL LAVADO (g)	829

MALLA No.	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO PARCIAL	% PASA
3/8"	9.52	4.11	0.16	100.00
No 4	4.75	10.44	0.42	99.58
10	2.00	63.41	2.54	97.05
20	0.840	286.51	11.46	85.59
40	0.420	654.86	26.19	59.39
60	0.250	267.00	10.68	48.71
140	0.106	316.16	12.65	36.06
200	0.074	54.49	2.18	33.89
FONDO	-----	840.84	33.63	0.25
	SUMA	2497.82	99.91	



RESUMEN DE PORCENTAJES		
GRAVAS	0.42	%
ARENAS	65.95	%
FINOS	33.63	%

PRUEBA	CAPSULA N°	GOLPES N°	PESO CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (g)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (g)	PESO AGUA (g)	PESO DE LA CÁPSULA (g)	PESO DEL SUELO SECO (g)	HUMEDAD (%)
LÍMITE LÍQUIDO								
1	2	31	48.41	41.04	7.37	18.42	22.62	32.58
2	20	22	46.63	39.5	7.13	18.14	21.36	33.38
3	24	17	50.4	41.99	8.41	18.53	23.46	35.85
LÍMITE PLÁSTICO								
1	29		25.6	24.34	1.26	18.57	5.77	21.84
2	41		16.5	15.54	0.96	10.8	4.74	20.25
3	4		27.7	26.15	1.55	18.7	7.45	20.81



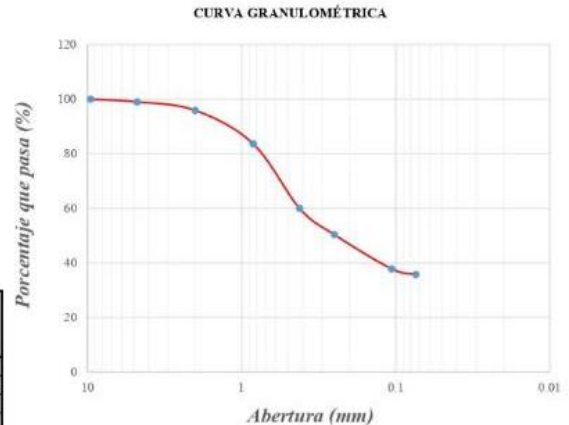
LÍMITE LÍQUIDO (LL)	42.50	%
LÍMITE PLÁSTICO (LP)	20.97	%
ÍNDICE DE PLASTICIDAD (IP)	21.53	%

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	Arena con un porcentaje apreciable de partículas finas (arcillas), baja plasticidad, de color amarillento con tonalidades de color blanco. (SC)
--------------------------	---

PROYECTO	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y REVISIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE UN MURO EN TIERRA ARMADA A ESCALA	FECHA DE ENSAYO	AGOSTO 20 DE 2019
LOCALIZACIÓN	UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		

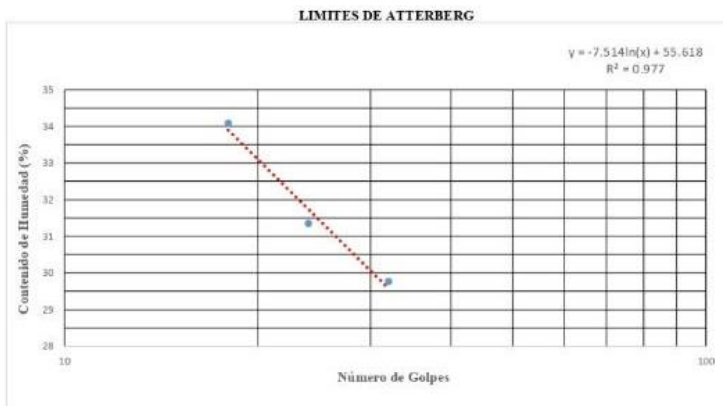
CONTENIDOS DE HUMEDAD	
PESO DEL MATERIAL SECO ANTES DEL LAVADO (g)	2500
PESO SECO DESPUÉS DEL LAVADO (g)	1623
PESO SECO DESPUÉS DEL LAVADO + TAZA (g)	1815
PESO DEL RECIPIENTE (g)	192
CONTENIDO DE FINOS PERDIDOS EN EL LAVADO (g)	877

MALLA No.	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO PARCIAL	% PASA
3/8"	9.52	1.65	0.07	100.00
No 4	4.75	24.94	1.00	99.00
10	2.00	77.75	3.11	95.89
20	0.840	307.37	12.29	83.60
40	0.420	591.28	23.65	59.95
60	0.250	241.02	9.64	50.31
140	0.106	313.88	12.56	37.75
200	0.074	51.25	2.05	35.70
FONDO	-----	890.26	35.61	0.09
SUMA		2499.40	99.98	



RESUMEN DE PORCENTAJES		
GRAVAS	1.00	%
ARENAS	63.39	%
FINOS	35.61	%

PRUEBA	CAPSULA N°	GOLPES N°	PESO CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (g)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (g)	PESO AGUA (g)	PESO DE LA CAPSULA (g)	PESO DEL SUELO SECO (g)	HUMEDAD (%)
LIMITE LIQUIDO								
1	2	32	36.72	32.52	4.2	18.41	14.11	29.77
2	27	24	34.63	30.67	3.96	18.04	12.63	31.35
3	24	18	42.18	36.17	6.01	18.54	17.63	34.09
LIMITE PLÁSTICO								
1	41		15.35	14.54	0.81	10.73	3.81	21.26
2	50		17.92	17.04	0.88	12.68	4.36	20.18
3	1		23.55	22.61	0.94	18.1	4.51	20.84



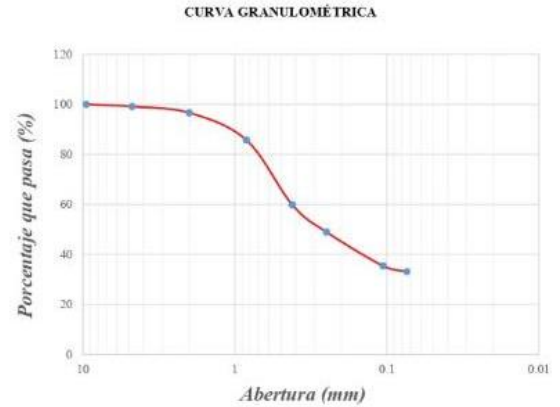
LÍMITE LIQUIDO (LL)	43.65	%
LÍMITE PLÁSTICO (LP)	20.72	%
ÍNDICE DE PLASTICIDAD (IP)	22.93	%

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	Arena con un porcentaje apreciable de partículas finas (arcillas), baja plasticidad, de color amarillento con tonalidades de color blanco. (SC)
--------------------------	---

PROYECTO	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y REVISIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE UN MURO EN TIERRA ARMADA A ESCALA	FECHA DE ENSAYO	AGOSTO 23 DE 2019
LOCALIZACIÓN	UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		

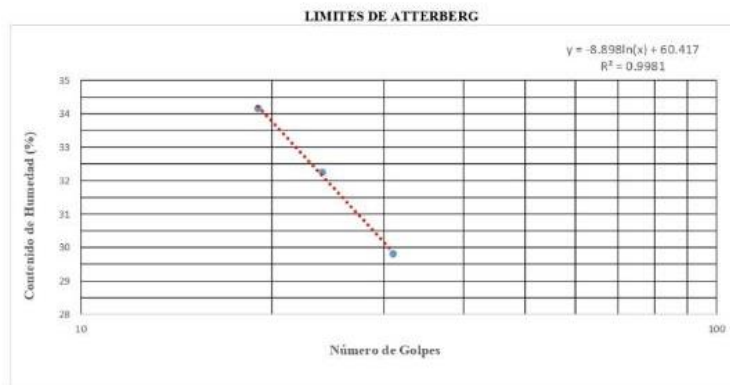
CONTENIDOS DE HUMEDAD	
PESO DEL MATERIAL SECO ANTES DEL LAVADO (g)	2500
PESO SECO DESPUÉS DEL LAVADO (g)	1696
PESO SECO DESPUÉS DEL LAVADO + TAZA (g)	1881
PESO DEL RECIPIENTE (g)	185
CONTENIDO DE FINOS PERDIDOS EN EL LAVADO (g)	804

MAJILLA No.	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO PARCIAL	% PASA
3/8"	9.52	5.37	0.21	100.00
No 4	4.75	21.84	0.87	99.13
10	2.00	62.81	2.51	96.61
20	0.840	272.56	10.90	85.71
40	0.420	647.45	25.90	59.81
60	0.250	272.96	10.92	48.90
140	0.106	337.84	13.51	35.38
200	0.074	57.15	2.29	33.10
FONDO	-----	821.10	32.84	0.25
	SUMA	2499.08	99.96	



RESUMEN DE PORCENTAJES		
GRAVAS	0.87	%
ARENAS	66.28	%
FINOS	32.84	%

PRUEBA	CAPSULA N°	GOLPES N°	PESO CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (g)	PESO CÁPSULA + SUELO SECO (g)	PESO AGUA (g)	PESO DE LA CÁPSULA (g)	PESO DEL SUELO SECO (g)	HUMEDAD (%)
LIMITE LIQUIDO								
1	20	31	39.39	34.51	4.88	18.14	16.37	29.81
2	52	24	30.4	25.54	4.86	10.47	15.07	32.25
3	47	19	30.23	25.83	4.4	12.95	12.88	34.16
LIMITE PLÁSTICO								
1	43		16.61	15.54	1.07	10.6	4.94	21.66
2	51		20.96	19.57	1.39	13.02	6.55	21.22
3	4		24.69	23.66	1.03	18.7	4.96	20.77



LÍMITE LIQUIDO (LL)	45.14	%
LÍMITE PLÁSTICO (LP)	21.44	%
ÍNDICE DE PLASTICIDAD (IP)	23.70	%

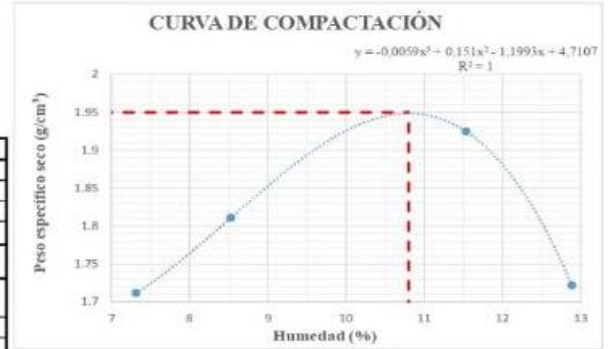
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	Arena con un porcentaje apreciable de partículas finas (arcillas), baja plasticidad, de color amarillento con tonalidades de color blanco. (SC)
--------------------------	---

ANEXO C
ENSAYOS DE COMPACTACIÓN

PROYECTO	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y REVISIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE UN MURO EN TIERRA ARMADA A ESCALA	FECHAS DE ENSAYOS	SEPTIEMBRE 12 DE 2019 SEPTIEMBRE 16 DE 2019 SEPTIEMBRE 18 DE 2019
LOCALIZACIÓN	UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		

CARACTERÍSTICAS DEL MOLDE	
DIÁMETRO DEL MOLDE (cm)	10.12
ALTURA DEL MOLDE (cm)	11.64
PESO DEL MOLDE (g)	3790
VOLUMEN DEL MOLDE (cm ³)	936.28

DETERMINACIÓN	1	2	3	4
PESO MOLDE + SUELO HÚMEDO (g)	5510	5630	5800	5610
PESO MOLDE (g)	3790	3790	3790	3790
PESO SUELO HÚMEDO (g)	1720	1840	2010	1820
PESO ESPECÍFICO HÚMEDO (g/cm ³)	1.84	1.97	2.15	1.94
HUMEDAD				
CAPSULA NO	40	17	53	19
PESO CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (g)	77.49	75.36	80.12	75.72
PESO CÁPSULA + SUELO SECO (g)	74.37	72.64	74	70.74
PESO CÁPSULA (g)	31.73	40.75	20.94	32.09
PESO AGUA (g)	3.12	2.72	6.12	4.98
PESO SUELO SECO (g)	42.64	31.89	53.06	38.65
HUMEDAD (%)	7.32	8.53	11.53	12.88
PESO ESPECÍFICO SECO				
PESO ESPECIFICO SECO (g/cm ³)	1.71	1.81	1.92	1.72



w_{opt}	10.8	%
$\gamma_{d_{max}}$	1.95	g/cm ³

CARACTERÍSTICAS DEL MOLDE	
DIÁMETRO DEL MOLDE (cm)	10.15
ALTURA DEL MOLDE (cm)	11.66
PESO DEL MOLDE (g)	3690
VOLUMEN DEL MOLDE (cm ³)	943.45

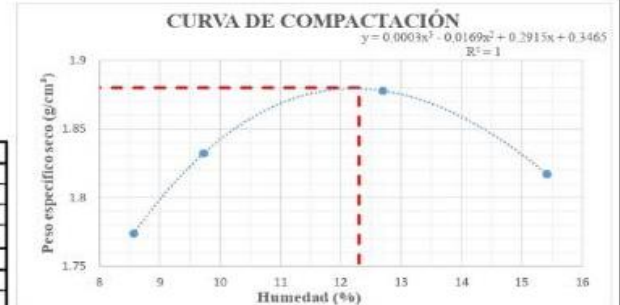
DETERMINACIÓN	1	2	3	4
PESO MOLDE + SUELO HÚMEDO (g)	5510	5660	5740	5720
PESO MOLDE (g)	3690	3690	3690	3690
PESO SUELO HÚMEDO (g)	1820	1970	2050	2030
PESO ESPECÍFICO HÚMEDO (g/cm ³)	1.93	2.09	2.17	2.15
HUMEDAD				
CAPSULA NO	59	108	23	40
PESO CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (g)	51.93	73.68	66.9	83.67
PESO CÁPSULA + SUELO SECO (g)	49.43	68.87	61.75	77.38
PESO CÁPSULA (g)	21.32	20.86	21.1	31.74
PESO AGUA (g)	2.5	4.81	5.15	6.29
PESO SUELO SECO (g)	28.11	48.01	40.65	45.64
HUMEDAD (%)	8.89	10.02	12.67	13.78
PESO ESPECÍFICO SECO				
PESO ESPECIFICO SECO (g/cm ³)	1.77	1.90	1.93	1.89



w_{opt}	11.50	%
$\gamma_{d_{max}}$	1.95	g/cm ³

CARACTERÍSTICAS DEL MOLDE	
DIÁMETRO DEL MOLDE (cm)	10.15
ALTURA DEL MOLDE (cm)	11.68
PESO DEL MOLDE (g)	3610
VOLUMEN DEL MOLDE (cm ³)	945.07

DETERMINACIÓN	1	2	3	4
PESO MOLDE + SUELO HÚMEDO (g)	5430	5510	5610	5592
PESO MOLDE (g)	3610	3610	3610	3610
PESO SUELO HÚMEDO (g)	1820	1900	2000	1982
PESO ESPECÍFICO HÚMEDO (g/cm ³)	1.93	2.01	2.12	2.10
HUMEDAD				
CAPSULA NO	333	9	09	58B
PESO CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (g)	77.11	68.94	84.11	54.58
PESO CÁPSULA + SUELO SECO (g)	73.13	65.24	77.67	50.14
PESO CÁPSULA (g)	26.69	27.21	26.96	21.34
PESO AGUA (g)	3.98	3.7	6.44	4.44
PESO SUELO SECO (g)	46.44	38.03	50.71	28.8
HUMEDAD (%)	8.57	9.73	12.70	15.42
PESO ESPECÍFICO SECO				
PESO ESPECIFICO SECO (g/cm ³)	1.77	1.83	1.88	1.82



w_{opt}	12.30	%
$\gamma_{d_{max}}$	1.88	g/cm ³

ANEXO D
ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN

PROYECTO	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y REVISIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE UN MURO EN TIERRA ARMADA A ESCALA	FECHA DE ENSAYO	SEPTIEMBRE 23 DE 2019
LOCALIZACIÓN	UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		

PERIODOS	TIEMPO (min)	RAÍZ TIEMPO	DEFORMACIÓN (mm)
6seg	0.10	0.32	0.156
15seg	0.25	0.50	0.156
30seg	0.50	0.71	0.156
1min	1.00	1.00	0.156
2min	2.00	1.41	0.156
4min	4.00	2.00	0.156
8min	8.00	2.83	0.156
15min	15.00	3.87	0.156
30min	30.00	5.48	0.156
1 hora	60.00	7.75	0.156
2horas	120.00	10.95	0.156
4horas	240.00	15.49	0.157
8 horas	480.00	21.91	0.168
16 horas	960.00	30.98	0.172
24 horas	1440.00	37.95	0.172
32 horas	1920.00	43.82	0.172
64 horas	3840.00	61.97	0.172



PERIODOS	TIEMPO (min)	RAÍZ TIEMPO	DEFORMACIÓN (mm)
6seg	0.10	0.32	0.199
15seg	0.25	0.50	0.200
30seg	0.50	0.71	0.202
1min	1.00	1.00	0.203
2min	2.00	1.41	0.204
4min	4.00	2.00	0.205
8min	8.00	2.83	0.206
15min	15.00	3.87	0.207
30min	30.00	5.48	0.208
1 hora	60.00	7.75	0.209
2horas	120.00	10.95	0.209
4horas	240.00	15.49	0.211
8 horas	480.00	21.91	0.215
16 horas	960.00	30.98	0.218
24 horas	1440.00	37.95	0.230
32 horas	1920.00	43.82	0.261
64 horas	3840.00	61.97	0.261



PERIODOS	TIEMPO (min)	RAÍZ TIEMPO	DEFORMACIÓN (mm)
6seg	0.10	0.32	0.345
15seg	0.25	0.50	0.348
30seg	0.50	0.71	0.349
1min	1.00	1.00	0.350
2min	2.00	1.41	0.350
4min	4.00	2.00	0.351
8min	8.00	2.83	0.352
15min	15.00	3.87	0.352
30min	30.00	5.48	0.352
1 hora	60.00	7.75	0.352
2horas	120.00	10.95	0.352
4horas	240.00	15.49	0.352
8 horas	480.00	21.91	0.355
16 horas	960.00	30.98	0.357
24 horas	1440.00	37.95	0.357
32 horas	1920.00	43.82	0.357
64 horas	3840.00	61.97	0.357



DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo a la norma (INVE 154 -13, numeral 8.10.3), los datos para el máximo incremento de consolidación no satisfacen los requerimientos de los muerales 8.10.1 y 8.10.2, se deberá computar valores por defecto del tiempo para alcanzar la falla, a partir del coeficiente de consolidación del suelo normalmente consolidado. De acuerdo a la Clasificación del suelo analizado (SC), se escoge un valor de $t_f = 200$ [min] y un valor de $df = 5$ [mm] para suelo fino normalmente consolidado o ligeramente pre-consolidado. Se determina la velocidad de desplazamiento máxima apropiada mediante la siguiente fórmula:

$$Rd = \frac{df}{t_f} = \frac{5 \text{ mm}}{200 \text{ min}} = 0.025 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \quad [8.10.5]$$

ANEXO E
ENSAYOS DE CORTE DIRECTO (CD) PARA EL DISEÑO

PROYECTO	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y REVISIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE UN MURO EN TIERRA ARMADA A ESCALA	FECHA DE ENSAYO	FEBRERO 3 DE 2020
LOCALIZACIÓN	UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		

MUESTRA N°	1	2	3
VEL. ENSAYO [mm/min]	1		
AREA MUESTRA [cm ²]	36.50	31.83	31.73
ALTURA MUESTRA [cm]	2.50	2.51	2.52
PESO MOLDE [g]	69.15	87.14	77.48
PESO MUESTRA + MOLDE	212.33	212.17	200.65
σ [kg/cm ²]	0.5	1	2

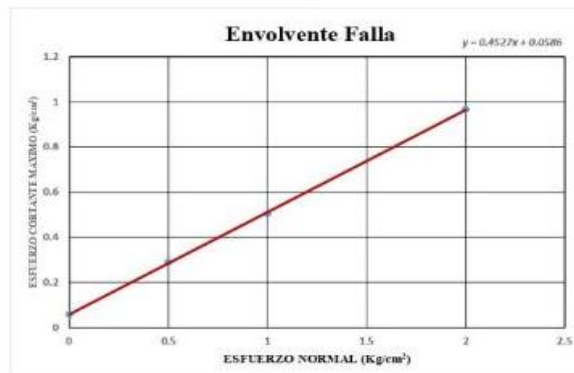
MUESTRA N°	1	2	3
CAPSULA N°	6	52	8
PESO CAPSULA [g]	10.86	20.93	18.68
PESO SUELO HUMEDO + CAPSULA [g]	39.64	64.58	56.07
PESO SUELO SECO + CAPSULA [g]	36.67	59.99	52.08

σ	0.5	1	2			
TIEMPO (mm)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)
0	0	0	0	0	0	0
0.25	38.1	0.192	57.6	0.043	65.3	0.007
0.5	53.9	0.403	85.1	0.159	120.2	0.127
0.75	67.9	0.656	113.2	0.350	175.2	0.334
1	77.8	0.854	136.3	0.573	213.7	0.547
1.25	87.7	1.196	150	0.797	244.5	0.773
1.5	92.4	1.323	157.1	1.056	267.9	1.011
1.75	99.7	1.583	157.4	1.296	283.7	1.251
2	103.7	1.798	154.4	1.543	296.4	1.494
2.25	102.4	2.197	149	1.793	300.7	1.742
2.5	99.8	2.304	144.3	2.039	299.4	1.986
2.75			137	2.291	295	2.230
REACCIÓN MÁXIMA [N]	103.70	157.40	390.7			

MUESTRA N°	1	2	3
CONTENIDO DE HUMEDAD	11.51%	11.75%	11.95%
γ [g/cm ³]	1.567	1.567	1.540
γ_s [g/cm ³]	1.405	1.402	1.376
τ Máx [N]	0.290	0.504	0.966



RESULTADO CORTE DIRECTO N°		
VEL. ENSAYO	1	mm/min
CARGA	τ Máx	CONTENIDO DE HUMEDAD
0.5	0.290	11.51%
1	0.504	11.75%
2	0.966	11.95%
ϕ	29.3	°
C	0.081	Kg/cm ²
ω	12%	%
γ	1.66	g/cm ³
γ_s	1.39	g/cm ³



PROYECTO	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y REVISIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE UN MURO EN TIERRA ARMADA A ESCALA	FECHA DE ENSAYO	FEBRERO 3 DE 2020
LOCALIZACIÓN	UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		

MUESTRA Nº	1	2	3
VEL. ENSAYO [mm/min]	1		
AREA MUESTRA [cm ²]	36.42	31.83	31.73
ALTURA MUESTRA [cm]	2.56	2.50	2.50
PESO MOLDE [g]	72.9	69.18	88.02
PESO MUESTRA + MOLDE	208.4	198.85	213.05
σ [kg/cm ²]	0.5	1	2

MUESTRA Nº	1	2	3
CAPSULA Nº	40	61	20
PESO CAPSULA [g]	31.68	20.40	18.15
PESO SUELO HUMEDO + CAPSULA [g]	88.56	78.50	66.02
PESO SUELO SECO + CAPSULA [g]	82.31	72.31	60.97

σ	0.5	1	2			
TIEMPO (min)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)
0	0	0.000	0	0.000	0	0.000
0.25	29.2	0.043	28.5	0.084	106.5	0.131
0.5	56.9	0.252	51.9	0.329	150.7	0.347
0.75	71.7	0.480	66.6	0.569	188.2	0.563
1	83.7	0.718	78.4	0.806	221.7	0.789
1.25	96.4	0.954	89.4	1.050	251.2	1.033
1.5	110.2	1.193	98.8	1.293	275.3	1.263
1.75	121.9	1.420	106.2	1.534	295.4	1.491
2	128.6	1.676	112.5	1.773	308.4	1.746
2.15	130.9	2.164	118.9	2.018	316.1	1.987
2.5	129.3	2.425	122.9	2.262	315.1	2.210
2.75	126.4	2.672	125.9	2.520	312.8	2.476
3	122.5	2.938	127.6	2.774	308.4	2.731
3.25	-	-	128.9	3.013	305.1	2.996
3.5	-	-	130.3	3.299	301.1	3.248
3.75	-	-	130.9	3.540	-	-
4	-	-	131.3	3.802	-	-
4.25	-	-	130.9	4.064	-	-
4.5	-	-	130.6	4.307	-	-
REACCIÓN MÁXIMA [N]	130.90		131.30		316.1	

MUESTRA Nº	1	2	3
CONTENIDO DE HUMEDAD	12%	11.92%	11.79%
γ [g/cm ³]	1.453	1.627	1.576
γ_d [g/cm ³]	1.293	1.454	1.410
τ_{Max} [N]	0.364	0.421	1.016



RESULTADO CORTE DIRECTO Nº		
VEL. ENSAYO	1	mm/min
CARGA	τ_{Max}	CONTENIDO DE HUMEDAD
0.5	0.364	12.34%
1	0.421	11.92%
2	1.016	11.79%
ϕ	27.4	°
C	0.066	Kg/cm ²
ω	11.5%	%
γ	1.70	g/cm ³
γ_d	1.45	g/cm ³



PROYECTO	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y REVISIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE UN MURO EN TIERRA ARMADA A ESCALA	FECHA DE ENSAYO	FEBRERO 3 DE 2020
LOCALIZACIÓN	UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		

MUESTRA Nº	1	2	3
VEL. ENSAYO [mm/min]	1		
AREA MUESTRA [cm ²]	36.42	31.83	31.73
ALTURA MUESTRA [cm]	2.56	2.50	2.50
PESO MOLDE [g]	72.9	69.18	88.02
PESO MUESTRA + MOLDE	208.4	198.85	213.05
σ [kg/cm ²]	0.5	1	2

MUESTRA Nº	1	2	3
CAPSULA Nº	40	61	20
PESO CAPSULA [g]	31.68	20.40	18.15
PESO SUELO HUMEDO + CAPSULA [g]	88.56	78.50	66.02
PESO SUELO SECO + CAPSULA [g]	82.31	72.31	60.97

σ	0.5	1	2			
TIEMPO (min)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)
0	0	0.000	0	0.000	0	0.000
0.25	28.2	0.043	28.5	0.084	106.5	0.131
0.5	55.9	0.252	51.9	0.329	150.7	0.347
0.75	70.7	0.480	66.6	0.569	188.2	0.563
1	82.7	0.718	78.4	0.806	221.7	0.789
1.25	95.4	0.954	89.4	1.050	251.2	1.033
1.5	109.2	1.193	98.8	1.293	275.3	1.263
1.75	120.9	1.420	106.2	1.534	295.4	1.491
2	127.6	1.676	112.5	1.773	308.4	1.746
2.15	129.9	2.164	118.9	2.018	316.1	1.987
2.5	128.3	2.425	122.9	2.262	315.1	2.210
2.75	125.4	2.672	125.9	2.520	312.8	2.476
3	120.5	2.938	127.6	2.774	308.4	2.731
3.25	-	-	128.9	3.013	305.1	2.996
3.5	-	-	130.3	3.299	301.1	3.248
3.75	-	-	130.9	3.540	-	-
4	-	-	131.3	3.802	-	-
4.25	-	-	130.9	4.064	-	-
4.5	-	-	130.6	4.307	-	-
REACCIÓN MÁXIMA [N]	129.90	131.30	316.1			

MUESTRA Nº	1	2	3
CONTENIDO DE HUMEDAD	12.34%	11.92%	11.79%
γ [g/cm ³]	1.453	1.627	1.576
γ_d [g/cm ³]	1.293	1.454	1.410
c Máx [N]	0.364	0.421	1.016



RESULTADO CORTE DIRECTO Nº		
VEL. ENSAYO	1	mm/min
CARGA	c Máx	CONTENIDO DE HUMEDAD
0.5	0.364	12.34%
1	0.421	11.92%
2	1.016	11.79%
ϕ	28.0	°
C	0.075	Kg/cm ²
ω	11.5%	%
γ	1.75	gr/cm ³
γ_d	1.50	gr/cm ³



ANEXO F
ENSAYOS SOBRE EL MURO DE REACCIÓN

PROYECTO	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y REVISIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE UN MURO EN TIERRA ARMADA A ESCALA	FECHAS DE ENSAYO	ENERO 20 DE 2020
LOCALIZACIÓN	UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		ENERO 23 DE 2020
			ENERO 27 DE 2020
			ENERO 30 DE 2020
			FEBRERO 3 DE 2020



ESFUERZO MÁXIMO
11.70



ESFUERZO MÁXIMO
11.4



ESFUERZO MÁXIMO
11.7



ESFUERZO MÁXIMO
11.5



ESFUERZO MÁXIMO
11.4

ANEXO G
ENSAYOS DE CORTE DIRECTO PARA AJUSTES AL DISEÑO

PROYECTO	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y REVISIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE UN MURO EN TIERRA ARMADA A ESCALA	FECHA DE ENSAYO	ENERO 20 DE 2020
LOCALIZACIÓN	UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		

MUESTRA N°	1	2	3
VEL. ENSAYO [mm/min]	1		
AREA MUESTRA [cm ²]	36.50	31.83	31.73
ALTURA MUESTRA [cm]	2.5	2.51	2.52
PESO MOLDE [g]	69.15	87.1	77.48
PESO MUESTRA + MOLDE	212.33	212.17	200.65
σ [kg/cm ²]	0.5	1	2

MUESTRA N°	1	2	3
CAPSULA N°	6	52	8
PESO CAPSULA [g]	10.86	20.93	18.68
PESO SUELO HUMEDO + CAPSULA [g]	39.64	64.48	56.07
PESO SUELO SECO + CAPSULA [g]	36.67	59.99	52.08

σ	0.5	kg/cm ²	1	kg/cm ²	2	kg/cm ²
TIEMPO (min)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)
0	0	0	0	0	0	0
0.25	38.1	0.192	85.1	0.159	65.3	0.007
0.5	53.9	0.403	113.2	0.35	120.2	0.127
0.75	67.9	0.656	136.3	0.573	175.2	0.334
1	77.8	0.854	150	0.797	213.7	0.547
1.25	87.7	1.196	157.1	1.056	244.5	0.773
1.5	92.4	1.323	157.4	1.296	267.9	1.011
1.75	99.7	1.583	154.4	1.543	283.7	1.251
2	103.7	1.798	149	1.793	296.4	1.494
2.25	102.4	2.197	144.3	2.039	300.7	1.732
2.5	99.8	2.304	137	2.291	299.4	1.986
2.75	-	-	-	-	295	2.23
REACCIÓN MÁXIMA [N]	103.70		157.40		300.7	

MUESTRA N°	1	2	3
CONTENIDO DE HUMEDAD	11.51%	11.50%	11.95%
γ [g/cm ³]	1.567	1.567	1.540
γ_d [g/cm ³]	1.405	1.406	1.376
τ Máx [N]	0.290	0.504	0.966



RESULTADO CORTE DIRECTO N°		
VEL. ENSAYO	1	mm/min
CARGA	τ Máx	CONTENIDO DE HUMEDAD
0.5	0.2897	11.51%
1	0.5043	11.50%
2	0.9664	11.95%
ϕ	24.4	°
C	0.059	Kg/cm ²
α	12%	%
γ	1.56	gr/cm ³
γ_d	1.40	gr/cm ³



PROYECTO	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y REVISIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE UN MURO EN TIERRA ARMADA A ESCALA	FECHA DE ENSAYO	ENERO 27 DE 2020
LOCALIZACIÓN	UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		

MUESTRA N°	1	2	3
VEL. ENSAYO [mm/min]	1		
AREA MUESTRA [cm ²]	36.75	31.83	31.73
ALTEZA MUESTRA [cm]	2.46	2.50	2.52
PESO MOLDE [g]	85.1	87.5	77.87
PESO MUESTRA + MOLDE	219.26	223.22	210.66
σ [kg/cm ²]	0.5	1	2

MUESTRA N°	1	2	3
CAPSULA N°	61	15	45
PESO CAPSULA [g]	21.70	18.19	10.90
PESO SUELO HUMEDO + CAPSULA [g]	79.52	68.09	44.41
PESO SUELO SECO + CAPSULA [g]	73.38	62.88	40.97

σ	0.5	kg/cm ²	1	kg/cm ²	2	kg/cm ²
TIEMPO (min)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)
0	0	0	0	0	0	0
0.25	40.5	0.238	47.2	0.252	105.2	0.169
0.5	67.3	0.449	67.6	0.476	152.7	0.389
0.75	97.1	0.692	85.4	0.711	193.8	0.6
1	116.2	0.943	105.8	0.955	235.4	0.83
1.25	115.4	1.18	126.6	1.182	269.9	1.064
1.5	105.9	1.624	147.7	1.413	303.1	1.298
1.75	102.3	1.868	164.1	1.654	328.9	1.534
2	-	-	174.5	1.895	344.3	1.766
2.25	-	-	179.8	2.146	346.6	2.021
2.5	-	-	180.8	2.396	336.6	2.278
2.75	-	-	179.5	2.651	323.5	2.534
3	-	-	175.1	2.91	310.4	2.804
3.25	-	-	169.1	3.172	301.1	3.067
3.5	-	-	162.8	3.436	-	-
3.75	-	-	156.1	3.792	-	-
REACCIÓN MÁXIMA [N]	116.20		180.80		346.6	

MUESTRA N°	1	2	3
CONTENIDO DE HUMEDAD	11.88%	11.66%	11.44%
w [g/cm]	1.483	1.706	1.659
γ_d [g/cm ³]	1.325	1.528	1.489
t Max [N]	0.322	0.579	1.114



RESULTADO CORTE DIRECTO N°		
VEL. ENSAYO	1	mm/min
CARGA	τ Máx	CONTENIDO DE HUMEDAD
0.5	0.3223	11.88%
1	0.5792	11.66%
2	1.1139	11.44%
ϕ	27.9	°
c	0.055	Kg/cm ²
w	12%	%
γ	1.62	gr/cm ³
γ_d	1.45	gr/cm ³



PROYECTO	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y REVISIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE UN MURO EN TIERRA ARMADA A ESCALA	FECHA DE ENSAYO	ENERO 23 DE 2020
LOCALIZACIÓN	UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		

MUESTRA N°	1	2	3
VEL. ENSAYO [mm/min]	1		
AREA MUESTRA [cm ²]	36.42	31.83	31.73
ALTURA MUESTRA [cm]	2.56	2.50	2.50
PESO MOLDE [g]	72.9	69.18	88.02
PESO MUESTRA + MOLDE	208.4	198.85	213.05
σ [kg/cm ²]	0.5	1	2

MUESTRA N°	1	2	3
CAPSULA N°	40	61	20
PESO CAPSULA [g]	31.68	20.40	18.15
PESO SUELO HUMEDO + CAPSULA [g]	88.56	78.50	66.02
PESO SUELO SECO + CAPSULA [g]	82.31	72.41	60.97

σ	0.5	1	2			
TIEMPO (min)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)
0	0	0	0	0	0	0
0.25	28.2	0.043	28.5	0.084	106.5	0.131
0.5	55.9	0.252	51.9	0.329	150.7	0.347
0.75	70.7	0.480	66.6	0.569	188.2	0.563
1	82.7	0.718	78.4	0.806	221.7	0.789
1.25	95.4	0.954	89.4	1.05	251.2	1.033
1.5	109.2	1.193	98.8	1.293	275.3	1.263
1.75	120.9	1.420	106.2	1.534	295.4	1.491
2	127.6	1.676	112.5	1.773	308.4	1.746
2.25	129.9	1.899	118.9	2.018	316.1	1.987
2.5	128.3	2.164	122.9	2.262	315.1	2.21
2.75	125.4	2.426	125.9	2.52	312.8	2.476
3	120.5	2.672	127.6	2.774	308.4	2.731
3.25	-	-	128.9	3.013	305.1	2.996
3.5	-	-	130.3	3.299	301.1	3.248
3.75	-	-	130.9	3.54	-	-
4	-	-	131.3	3.802	-	-
4.25	-	-	130.9	4.064	-	-
4.5	-	-	130.6	4.307	-	-
REACCIÓN MÁXIMA [N]	129.90		98.80		316.1	

MUESTRA N°	1	2	3
CONTENIDO DE HUMEDAD	12.34%	11.71%	11.79%
γ [g/cm ³]	1.453	1.627	1.576
γ_d [g/cm ³]	1.293	1.457	1.430
e Max [N]	0.364	0.421	1.016



RESULTADO CORTE DIRECTO N°		
VEL. ENSAYO	τ Max	CONTENIDO DE HUMEDAD
0.5	0.3637	12.34%
1	0.4706	11.71%
2	1.0159	11.79%
ϕ	24.6	"
C	0.066	Kg/cm ²
σ	12%	%
γ	1.55	g/cm ³
γ_d	1.39	g/cm ³



PROYECTO	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y REVISIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE UN MURO EN TIERRA ARMADA A ESCALA	FECHA DE ENSAYO	ENERO 30 DE 2020
LOCALIZACIÓN	UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		

MUESTRA N°	1	2	3
VEL. ENSAYO [mm/min]	1		
AREA MUESTRA [cm ²]	36.42	31.83	31.73
ALTURA MUESTRA [cm]	2.56	2.50	2.52
PESO MOLDE [g]	88.01	69.13	77.91
PESO MUESTRA + MOLDE	224.47	197.95	220.12
σ [kg/cm ²]	0.5	1	2

MUESTRA N°	1	2	3
CAPSULA N°	61	13	1
PESO CAPSULA [g]	21.70	18.41	18.10
PESO SUELO HUMEDO + CAPSULA [g]	66.46	42.82	65.93
PESO SUELO SECO + CAPSULA [g]	61.75	40.29	60.96

σ	0.5	kg/cm ²	1	kg/cm ²	2	kg/cm ²
TIEMPO (min)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)
0	0	0	0	0	0	0
0.25	41.7	0.141	56.3	0.118	119.6	0.134
0.5	69.9	0.362	105.5	0.312	168.8	0.327
0.75	87.2	0.589	148.4	0.524	213.7	0.536
1	93.3	0.814	175.5	0.739	253.5	0.768
1.25	99.7	1.049	179.5	0.992	284.7	0.998
1.5	98.3	1.269	162.4	1.245	310.8	1.235
1.75	96.4	1.518	135.6	1.527	318.8	1.486
2	90.3	1.816	119.6	1.799	306.4	1.731
2.25	-	-	-	-	291.7	1.994
2.5	-	-	-	-	277	2.26
2.75	-	-	-	-	262.2	2.511
3	-	-	-	-	250.2	2.79
3.25	-	-	-	-	238.1	3.049
REACCIÓN MÁXIMA [N]	99.70		162.40		318.8	

MUESTRA N°	1	2	3
CONTENIDO DE HUMEDAD	11.76%	11.56%	11.60%
γ [g/cm ³]	1.463	1.617	1.776
γ_d [g/cm ³]	1.309	1.449	1.592
t Max [N]	0.279	0.575	1.025



RESULTADO CORTE DIRECTO N°		
VEL. ENSAYO	1	mm/min
CARGA	τ Max	CONTENIDO DE HUMEDAD
0.5	0.2791	11.76%
1	0.5751	11.56%
2	1.0246	11.60%
ϕ	26.1	°
c	0.054	Kg/cm ²
m	1.2%	%
γ	1.62	g/cm ³
γ_d	1.45	g/cm ³



PROYECTO	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y REVISIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE UN MURO EN TIERRA ARMADA A ESCALA	FECHA DE ENSAYO	FEBRERO 3 DE 2020
LOCALIZACIÓN	UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		

MUESTRA N°	1	2	3
VEL. ENSAYO [mm/min]	1		
AREA MUESTRA [cm ²]	36.42	31.83	31.73
ALTURA MUESTRA [cm]	2.56	2.50	2.50
PESO MOLDE [g]	73	77.85	86.53
PESO MUESTRA + MOLDE	224.16	210.79	216.16
σ [kg/cm ²]	0.5	1	2

MUESTRA N°	1	2	3
CAPSULA N°	541	45	39
PESO CAPSULA [g]	21.76	10.90	11.84
PESO SUELO HUMEDO + CAPSULA [g]	60.54	40.20	33.96
PESO SUELO SECO + CAPSULA [g]	56.63	37.16	31.57

σ	0.5	1	2			
TIEMPO (min)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)	LECTURA DE CARGA (N)	DEF. HORIZONTAL (mm)
0	0	0	0	0	0	0
0.25	48.2	0.205	74.3	0.271	135	0.174
0.5	74.7	0.426	112.2	0.484	174.1	0.393
0.75	83.7	0.667	147.4	0.703	202.3	0.612
1	88.7	0.922	175.2	0.942	226.7	0.837
1.25	84.3	1.176	198.6	1.18	248.2	1.083
1.5	81.7	1.423	211.3	1.418	267.2	1.32
1.75	74.3	1.684	216	1.651	281.3	1.556
2	-	-	214	1.915	294.4	1.801
2.25	-	-	205.3	2.176	304.1	2.049
2.5	-	-	194.3	2.428	315.1	2.281
2.75	-	-	182.2	2.717	322.2	2.53
3	-	-	-	-	328.2	2.781
3.25	-	-	-	-	331.9	3.033
3.5	-	-	-	-	332.6	3.269
3.75	-	-	-	-	333.6	3.517
4	-	-	-	-	332.2	3.78
4.25	-	-	-	-	329.9	4.033
4.5	-	-	-	-	326.9	4.309
REACCIÓN MÁXIMA [N]	88.70		216.00		333.6	

MUESTRA N°	1	2	3
CONTENIDO DE HUMEDAD	11.21%	11.58%	12.11%
γ [g/cm ³]	1.621	1.668	1.634
γ_d [g/cm ³]	1.457	1.495	1.458
τ Max [N]	0.348	0.692	1.072



RESULTADO CORTE DIRECTO N°		
VEL. ENSAYO	1	mm/min
CARGA	τ Max	CONTENIDO DE HUMEDAD
0.5	0.3483	11.21%
1	0.6920	11.58%
2	1.0721	12.11%
ϕ	27.7	°
C	0.058	Kg/cm ²
ω	11.63%	%
γ	1.64	g/cm ³
γ_d	1.47	g/cm ³



ANEXO F
AJUSTES AL DISEÑO



Universidad Pontificia Bolivariana

SECCIONAL BUCARAMANGA
Vigilada Mineducación

AJUSTES AL DISEÑO DE MUROS A ESCALA MURO N°1

PROYECTO	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y REVISIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE UN MURO EN TIERRA ARMADA A ESCALA	FECHA DE ELABORACIÓN	ENERO 21 DE 2020
LOCALIZACIÓN	UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		

PROPIEDADES RELLENO	
$C(T/m^2)$	0.59
$\phi(^{\circ})$	24.4
$\gamma(T/m^3)$	1.56
K_a	0.415
$\delta(^{\circ})$	20.984
GEOTEXTIL	

SUELO FUNDACIÓN	
$C(T/m)$	0.59
$\gamma(T/m^3)$	1.56
$\phi(^{\circ})$	24.4
$D(m)$	0

PROPIEDADES REFUERZO	
$T_{ult}(kN/m)$	25
$T_{ult}(T/m)$	2.55
FR_{DI}	1.5
FR_{FL}	2
FR_{DB}	1
FR_{DC}	1
FS	1.3
FR_{TOTAL}	3.00
$T_{ADM}(T/m)$	0.849

CALCULO DE FACTORES DE SEGURIDAD POR VOLTEO Y DESLIZAMIENTO

$\sigma_{vb}(T/m^2)$	1.56
$L_{eb}(m)$	1.00
$\tau_1(T/m^2)$	1.30
$B-L_{eb}(m)$	0.00
$FH_{R1}(T/m)$	0.00

$\tau_2(T/m^2)$	1.19
$L_{eb}(m)$	1.00
$FH_{R2}(T/m)$	1.19

$\Sigma FH_R(T/m)$	1.19
--------------------	------

$FH_1(T/m)$	1.193	$d(m)$	0.33	$MH_1(T-m/m)$	0.398	$MW(T-m/m)$	0.78
$FH_2(T/m)$	0	$d(m)$	0.50	$MH_2(T-m/m)$	0	$Mq(T-m/m)$	0
$FH_3(T/m)$	0	$d(m)$	0.55	$MH_3(T-m/m)$	0		
$FH_4(T/m)$	0	$d(m)$	0.67	$MH_4(T-m/m)$	0		

$\Sigma FH_R(T/m)$	1.19
--------------------	------

$\Sigma M_R(T-m/m)$	0.40
---------------------	------

$\Sigma M_R(T-m/m)$	0.78
---------------------	------

CALCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD POR CAPACIDAD PORTANTE

$q(T/m^2)$	0.00
a	2.64
N_q	11.91
N_c	24.05
N_γ	9.02

Coeeficientes de Terzaghi	
S_c	1.3
S_g	0.8
K_{pg}	33.8

$q_{ult}(T/m^2)$	24.07
------------------	-------

RESUMEN FACTORES DE SEGURIDAD PARA MODELO A ESCALA

$FS_{DESILIZ}$	1.00	X	FS_{VOLTEO}	1.96		FS_{CP}	15.43	
----------------	------	---	---------------	------	--	-----------	-------	--



**Universidad
Pontificia
Bolivariana**

SECCIONAL BUCARAMANGA
Vigilada Mineducación

AJUSTES AL DISEÑO DE MUROS A ESCALA MURO N°2

PROYECTO	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y REVISIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE UN MURO EN TIERRA ARMADA A ESCALA	FECHA DE ELABORACIÓN	ENERO 21 DE 2020
LOCALIZACIÓN	UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		

PROPIEDADES RELLENO	
$C(T/m^2)$	0.66
$\phi(^{\circ})$	24.60
$\gamma(T/m^3)$	1.55
K_a	0.41
$\delta(^{\circ})$	17.96
GEOTEXTIL	

SUELO FUNDACIÓN	
$C(T/m)$	0.59
$\gamma(T/m^3)$	1.56
$\phi(^{\circ})$	24.4
$D(m)$	0

PROPIEDADES REFUERZO	
$T_{ult}(kN/m)$	25
$T_{ult}(T/m)$	2.55
FR_{D1}	1.5
FR_{FL}	2
FR_{DB}	1
FR_{DCL}	1
FS	1.3
FR_{TOTAL}	3.00
$T_{ADM}(T/m)$	0.849

CALCULO DE FACTORES DE SEGURIDAD POR VOLTEO Y DESLIZAMIENTO

$\sigma_{vb}(T/m^2)$	1.55
$L_{eb}(m)$	1.00
$\tau_1(T/m^2)$	1.37
$B-L_{eb}(m)$	0.00
$FH_{R1}(T/m)$	0.00

$\tau_2(T/m^2)$	1.16
$L_{eb}(m)$	1.00
$FH_{R2}(T/m)$	1.16

$\Sigma FH_R(T/m)$	1.16
--------------------	------

$FH_3(T/m)$	1.162	$d(m)$	0.33	$MH_3(T-m/m)$	0.387	$MW(T-m/m)$	0.78
$FH_4(T/m)$	0	$d(m)$	0.50	$MH_4(T-m/m)$	0	$Mq(T-m/m)$	0
$FH_5(T/m)$	0	$d(m)$	0.55	$MH_5(T-m/m)$	0		
$FH_6(T/m)$	0	$d(m)$	0.67	$MH_6(T-m/m)$	0		

$\Sigma FH_R(T/m)$	1.16
--------------------	------

$\Sigma M_A(T-m/m)$	0.39
---------------------	------

$\Sigma M_R(T-m/m)$	0.78
---------------------	------

CALCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD POR CAPACIDAD PORTANTE

$q(T/m^2)$	0.00
a	2.64
Nq	11.91
Nc	24.05
$N\gamma$	9.13

Coeeficientes de Terzaghi	
S_c	1.3
S_g	0.8
K_{pg}	34.2

$q_{ult}(T/m^2)$	24.14
------------------	-------

RESUMEN FACTORES DE SEGURIDAD PARA MODELO A ESCALA

$FS_{DESILIZ}$	1.00	X	FS_{VOLTEO}	2.00		FS_{CP}	15.58
----------------	------	---	---------------	------	--	-----------	-------

AJUSTES AL DISEÑO DE MUROS A ESCALA MURO N°3

PROYECTO	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y REVISIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE UN MURO EN TIERRA ARMADA A ESCALA	FECHA DE ELABORACIÓN	ENERO 21 DE 2020
LOCALIZACIÓN	UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		

PROPIEDADES RELLENO	
$C(T/m^2)$	0.55
$\phi(^{\circ})$	27.9
$\gamma(T/m^3)$	1.64
K_a	0.362
$\delta(^{\circ})$	20.367
GEOTEXTIL	

SUELO FUNDACIÓN	
$C(T/m)$	0.55
$\gamma(T/m^3)$	1.56
$\phi(^{\circ})$	27.9
$D(m)$	0

PROPIEDADES REFUERZO	
$T_{ult}(kN/m)$	25
$T_{ult}(T/m)$	2.55
FR_{DI}	1.5
FR_{FL}	2
FR_{DB}	1
FR_{DC}	1
FS	1.3
FR_{TOTAL}	3.00
$T_{ADM}(T/m)$	0.849

CALCULO DE FACTORES DE SEGURIDAD POR VOLTEO Y DESLIZAMIENTO

$\sigma_{vb}(T/m^2)$	1.64
$L_{eb}(m)$	1.00
$\tau_1(T/m^2)$	1.42
$B-L_{eb}(m)$	0.00
$FH_{r1}(T/m)$	0.00

$\tau_2(T/m^2)$	1.16
$L_{eb}(m)$	1.00
$FH_{r2}(T/m)$	1.16

$\Sigma FH_r(T/m)$	1.16
--------------------	------

$FH_s(T/m)$	1.162	$d(m)$	0.33	$MH_s(T-m/m)$	0.387	$MW(T-m/m)$	0.82
$FH_q(T/m)$	0	$d(m)$	0.50	$MH_q(T-m/m)$	0	$Mq(T-m/m)$	0
$FH_l(T/m)$	0	$d(m)$	0.55	$MH_l(T-m/m)$	0		
$FH_d(T/m)$	0	$d(m)$	0.67	$MH_d(T-m/m)$	0		

$\Sigma FH_h(T/m)$	1.16
--------------------	------

$\Sigma M_h(T-m/m)$	0.39
---------------------	------

$\Sigma M_q(T-m/m)$	0.82
---------------------	------

CALCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD POR CAPACIDAD PORTANTE

$q(T/m^2)$	0.00
a	3.06
N_q	17.61
N_c	31.36
N_γ	14.94

Coeeficientes de Terzaghi	
S_c	1.3
S_g	0.8
K_{pg}	44.86

$q_{ult}(T/m^2)$	31.75
------------------	-------

RESUMEN FACTORES DE SEGURIDAD PARA MODELO A ESCALA

FS_{DESLIZ}	1.00	X	FS_{VOLTEO}	2.12		FS_{CP}	19.36
---------------	------	---	---------------	------	--	-----------	-------



**Universidad
Pontificia
Bolivariana**

SECCIONAL BUCARAMANGA
Vigilada Mineducación

AJUSTES AL DISEÑO DE MUROS A ESCALA MURO N°4

PROYECTO	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y REVISIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE UN MURO EN TIERRA ARMADA A ESCALA	FECHA DE ELABORACIÓN	ENERO 21 DE 2020
LOCALIZACIÓN	UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		

PROPIEDADES RELLENO	
$C(T/m^2)$	0.54
$\phi(^{\circ})$	26.1
$\gamma(T/m^3)$	1.62
K_a	0.389
$\delta(^{\circ})$	21.141
GEOTEXTIL	

SUELO FUNDACIÓN	
$C(T/m)$	0.54
$\gamma(T/m^3)$	1.62
$\phi(^{\circ})$	26.1
$D(m)$	0

PROPIEDADES REFUERZO	
$T_{ult}(kN/m)$	25
$T_{ult}(T/m)$	2.55
FR_{DI}	1.5
FR_{FL}	2
FR_{DB}	1
FR_{DCL}	1
FS	1.3
FR_{TOTAL}	3.00
$T_{ADM}(T/m)$	0.849

CALCULO DE FACTORES DE SEGURIDAD POR VOLTEO Y DESLIZAMIENTO

$\sigma_{vb}(T/m^2)$	1.62
$L_{eb}(m)$	1.00
$\tau_s(T/m^2)$	1.33
$B-L_{eb}(m)$	0.00
$FH_{R1}(T/m)$	0.00

$\tau_s(T/m^2)$	1.17
$L_{eb}(m)$	1.00
$FH_{R2}(T/m)$	1.17

$\Sigma FH_R(T/m)$	1.17
--------------------	------

$FH_s(T/m)$	1.172	$d(m)$	0.33	$MH_s(T-m/m)$	0.391	$MW(T-m/m)$	0.81
$FH_q(T/m)$	0	$d(m)$	0.50	$MH_q(T-m/m)$	0	$Mq(T-m/m)$	0
$FH_l(T/m)$	0	$d(m)$	0.55	$MH_l(T-m/m)$	0		
$FH_d(T/m)$	0	$d(m)$	0.67	$MH_d(T-m/m)$	0		

$\Sigma FH_A(T/m)$	1.17
--------------------	------

$\Sigma M_A(T-m/m)$	0.39
---------------------	------

$\Sigma M_R(T-m/m)$	0.81
---------------------	------

CALCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD POR CAPACIDAD PORTANTE

$q(T/m^2)$	0.00
a	2.84
N_q	14.37
N_c	27.29
N_γ	11.52

Coeficientes de Terzaghi	
Sc	1.3
Sg	0.8
K_{pg}	38.74

$q_{ult}(T/m^2)$	26.62
------------------	-------

RESUMEN FACTORES DE SEGURIDAD PARA MODELO A ESCALA

FS_{DESILZ}	1.00	X	FS_{VOLTEO}	2.07		FS_{CP}	16.43
---------------	------	---	---------------	------	--	-----------	-------



**Universidad
Pontificia
Bolivariana**

SECCIONAL BUCARAMANGA
Vigilada Mineducación

AJUSTES AL DISEÑO DE MUROS A ESCALA MURO N°5

PROYECTO	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y REVISIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DE UN MURO EN TIERRA ARMADA A ESCALA	FECHA DE ELABORACIÓN	ENERO 21 DE 2020
LOCALIZACIÓN	UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA		

PROPIEDADES RELLENO	
$C(T/m^2)$	0.58
$\phi(^{\circ})$	27.7
$\gamma(T/m^3)$	1.59
K_a	0.365
$\delta(^{\circ})$	20.221
GEOTEXTIL	

SUELO FUNDACIÓN	
$C(T/m)$	0.58
$\gamma(T/m^3)$	1.59
$\phi(^{\circ})$	27.7
$D(m)$	0

PROPIEDADES REFUERZO	
$T_{UR}(kN/m)$	25
$T_{ult}(T/m)$	2.55
FR_{D1}	1.5
FR_{FL}	2
FR_{D0}	1
FR_{DQ}	1
FS	1.3
FR_{TOTAL}	3.00
$T_{ADM}(T/m)$	0.849

CALCULO DE FACTORES DE SEGURIDAD POR VOLTEO Y DESLIZAMIENTO

$\sigma_{vb}(T/m^2)$	1.59
$L_{eb}(m)$	1.00
$\tau_1(T/m^2)$	1.41
$B-L_{eb}(m)$	0.00
$FH_{R1}(T/m)$	0.00

$\tau_2(T/m^2)$	1.17
$L_{ub}(m)$	1.00
$FH_{R2}(T/m)$	1.17

$\Sigma FH_R(T/m)$	1.17
--------------------	------

$FH_s(T/m)$	1.162	$d(m)$	0.33	$MH_s(T-m/m)$	0.387	$MW(T-m/m)$	0.8
$FH_q(T/m)$	0	$d(m)$	0.50	$MH_q(T-m/m)$	0	$Mq(T-m/m)$	0
$FH_k(T/m)$	0	$d(m)$	0.55	$MH_k(T-m/m)$	0		
$FH_a(T/m)$	0	$d(m)$	0.67	$MH_a(T-m/m)$	0		

$\Sigma FH_R(T/m)$	1.16
--------------------	------

$\Sigma M_A(T-m/m)$	0.39
---------------------	------

$\Sigma M_R(T-m/m)$	0.8
---------------------	-----

CALCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD POR CAPACIDAD PORTANTE

$q(T/m^2)$	0.00
a	3.03
Nq	17.21
Nc	30.87
$N\gamma$	14.53

Coeeficientes de Terzaghi	
S_c	1.3
S_g	0.8
K_{pg}	44.18

$q_{ult}(T/m^2)$	32.52
------------------	-------

RESUMEN FACTORES DE SEGURIDAD PARA MODELO A ESCALA

$FS_{DESILIZ}$	1.00	X	FS_{VOLTEO}	2.05		FS_{CP}	20.45
----------------	------	---	---------------	------	--	-----------	-------