

DETERMINACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN SUELO – MURO PARA EL
DIMENSIONAMIENTO DE MUROS DE CONTENCIÓN SOBRE SUELOS
ARENOSOS DE LA QUEBRADA PALMICHAL

PRESENTADO POR:

DWERLYS ARMESTO DUARTE

ID: 000241154

YEISER NICOLAS PINTO DE LUQUEZ

ID: 000240766

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD INGENIERÍA CIVIL

COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO

BUCARAMANGA

2018

DETERMINACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN SUELO – MURO PARA EL
DIMENSIONAMIENTO DE MUROS DE CONTENCIÓN SOBRE SUELOS
ARENOSOS DE LA QUEBRADA PALMICHAL

PRESENTADO POR:

DWERLYS ARMESTO DUARTE

ID: 000241154

YEISER NICOLAS PINTO DE LUQUEZ

ID: 000240766

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR

Ing. Msc. GERARDO BAUTISTA GARCIA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD INGENIERÍA CIVIL

COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO

BUCARAMANGA

2018

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, Octubre de 2018

DEDICATORIA

En primera instancia le dedicamos este proyecto de grado a Dios por brindarnos la oportunidad y la sabiduría de culminar esta etapa y permitirnos vivir y compartir gratas experiencias durante nuestro proceso de formación y cumplir poco a poco nuestros sueños y metas propuestas.

A nuestros padres por ser el pilar fundamental en todo lo que somos, en toda nuestra educación, tanto académica, como de vida, por su incondicionalidad, esfuerzo y dedicación para salir adelante y lograr junto a ellos nuestros objetivos.

A todas esas personas que de una u otra forma hicieron parte de nuestro proceso y desarrollo como profesionales.

AGRADECIMIENTOS

A Dios que es nuestro ser supremo y esta sobre todas las cosas. A nuestros padres por brindarnos la confianza, la compañía y darnos la oportunidad de cumplir nuestro sueño de ser personas profesionales.

Al ingeniero Msc. Gerardo Bautista García, nuestro director de tesis, que gracias a su acompañamiento nos guio académicamente en este proyecto y nos apoyó durante el proceso de desarrollo de este.

Al ingeniero Darío Ramírez quien fue la persona encargada de manejar el muro de reacción en el laboratorio de estructuras y nos colaboró durante este proceso.

A todas aquellas personas que con su trabajo y empeño estuvieron siempre presentes, comprometidos y dispuestos a colaborarnos.

Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS.....	14
1.1. Objetivo General	14
1.2. Objetivos Específicos	14
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
3. JUSTIFICACIÓN.....	16
4. ALCANCE	17
5. ANTECEDENTES.....	18
5.1. ANTECEDENTES NACIONALES	18
5.2. ANTECEDENTES INTERNACIONALES.....	19
6. MARCO TEÓRICO	20
6.1. TEORÍA DE RANKINE	20
6.1.1. Estado Activo.....	21
6.2. ARENAS	21
6.3. GRANULOMETRÍA.....	22
6.4. LÍMITES DE ATTERBERG	22
6.5. CLASIFICACIÓN DEL SUELO	23
6.5.1. Clasificación AASHTO.....	23
6.5.2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos	24
6.6. ENSAYO DE COMPACTACIÓN	25
6.7. ENSAYO DE CORTE DIRECTO.....	26
6.8. MUROS DE CONTENCIÓN.....	27
6.8.1. Muros de contención de gravedad.....	27
6.8.2. Muros de contención de semigravedad	28
6.8.3. Muros de contención en voladizo.....	28
6.8.4. Muros de contención con contrafuertes	29
7. METODOLOGÍA	30
7.1. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	30
7.2. BÚSQUEDA DEL MATERIAL	30
7.3. CLASIFICACIÓN DEL SUELO.....	30
7.4. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN.....	30
7.5. ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE .	30

7.6.	DIMENSIONAMIENTO DEL MURO DE CONTENCIÓN A ESCALA	30
7.7.	DISEÑO ESTRUCTURAL DEL MURO	31
7.8.	CONSTRUCCIÓN DEL MURO A ESCALA	31
7.9.	COMPACTACIÓN DEL SUELO DE FUNDACIÓN	31
7.10.	PRUEBAS EN EL MURO DE REACCIÓN	31
7.11.	ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	32
8.	RESULTADOS.....	33
8.1.	GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO CON LAVADO POR MALLA N° 200. 33	
8.2.	ENSAYO DE COMPACTACIÓN	36
8.3.	ENSAYO DE CORTE DIRECTO	38
8.4.	ENSAYOS SOBRE EL MURO A ESCALA	40
8.5.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MURO A ESCALA	41
8.5.1.	Dimensionamiento del muro de contención a escala	41
8.5.2.	Diseño estructural del muro de contención a escala	42
8.5.3.	Proceso constructivo del muro de contención a escala.....	49
8.6.	ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO .	53
9.	ANALISIS DE RESULTADOS.....	55
9.1.	CLASIFICACIÓN DEL SUELO	55
9.2.	ENSAYOS DE COMPACTACIÓN	56
9.3.	ENSAYOS DE CORTE DIRECTO	56
9.4.	ENSAYO SOBRE EL MURO A ESCALA	57
9.5.	COMPARACIÓN DEL EMPUJE ACTIVO TEÓRICO Y REAL	58
9.5.1.	Calculo del empuje activo teórico	58
9.5.2.	Empuje activo real	58
	CONCLUSIONES	59
	RECOMENDACIONES	61
	BIBLIOGRAFÍA	62
	ANEXOS.....	63

Lista de figuras

<i>Figura 1. Círculos de falla para diferentes estados</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2. Curva granulométrica.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3. Gráfica de plasticidad. Propiedades geotécnicas del suelo</i>	<i>25</i>
<i>Figura 4. Envolvente de falla de Mohr y criterio de rotura Mohr – Coulomb</i>	<i>26</i>
<i>Figura 5. Muros de gravedad</i>	<i>27</i>
<i>Figura 6. Muros de semigravedad.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 7. Muro en voladizo.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 8. Muro con contrafuertes</i>	<i>29</i>
<i>Figura 9. Grafica de los resultados granulométricos.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 10. Resultado de Compactación de la muestra 1.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 11. Resultado de Compactación de la muestra 2</i>	<i>37</i>
<i>Figura 12. Resultado de Compactación de la muestra 3.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 13. Envolvente de falla promedio para la máquina digital.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 14. Dimensiones.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 15. Modelo a escala.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 16. Vista superior del modelo a escala.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 17. Muro de contención.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 18. Encofrado y fundida de la base talón - punta.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 19. Encofrado y fundida de la escarpa.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 20. Muro a escala.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 21. Compactación del suelo de fundación.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 22. Compactación del suelo de relleno.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 23. Grafica esfuerzo vs deformación del acero.</i>	<i>54</i>

Lista de tablas

<i>Tabla 1. Sistema de clasificación de suelos de la AASTHO</i>	24
<i>Tabla 2. Resultados de la distribución granulométrica.</i>	33
<i>Tabla 3. Resultados de la distribución granulométrica.</i>	34
<i>Tabla 4. Resultados de la distribución granulométrica.</i>	34
<i>Tabla 5. Resumen de los resultados granulométricos.</i>	35
<i>Tabla 6. Resultados de compactación.</i>	38
<i>Tabla 7. Resumen de cortes directo.</i>	39
<i>Tabla 8. Resultados de fuerza horizontal máxima.</i>	40
<i>Tabla 9. Resultados de ensayos de corte directo.</i>	41
<i>Tabla 10. Resultados obtenidos del laboratorio.</i>	53
<i>Tabla 11. Resultados de coeficiente de uniformidad (Cu) y curvatura (Cc).</i>	55
<i>Tabla 12. Resultados promedios de propiedades físicas.</i>	56
<i>Tabla 13. Resultados ensayos de Empuje.</i>	57

Lista de ecuaciones

<i>Ecuación 1. Fuerza de rozamiento.....</i>	<i>17</i>
<i>Ecuación 2. Coeficiente de presión activa de tierras.....</i>	<i>21</i>
<i>Ecuación 3. Esfuerzo horizontal efectivo.....</i>	<i>21</i>
<i>Ecuación 4. Morh - Coulomb.....</i>	<i>26</i>
<i>Ecuación 5. Momento aplicado.....</i>	<i>42</i>
<i>Ecuación 6. Cuantía.....</i>	<i>43</i>
<i>Ecuación 7. Cuantía requerida.....</i>	<i>43</i>
<i>Ecuación 8. Área de refuerzo.....</i>	<i>44</i>
<i>Ecuación 9. Refuerzo a flexión.....</i>	<i>44</i>
<i>Ecuación 10. Separación entre varillas.....</i>	<i>45</i>
<i>Ecuación 11. Ángulo de fricción.....</i>	<i>57</i>

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DETERMINACIÓN DEL ANGULO DE FRICCIÓN SUELO - MURO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE MUROS DE CONTENCIÓN SOBRE SUELOS ARENOSOS DE LA QUEBRADA PALMICHAL.

AUTOR(ES): Dwerlys Armesto Duarte
Yeiser Nicolas Pinto De Luquez

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Ing. MSc. Gerardo Bautista Garcia

RESUMEN

El presente trabajo de grado se realizó con el fin de determinar el ángulo de fricción entre la base de un muro de contención en concreto reforzado y el suelo de fundación arenoso. Este ángulo tradicionalmente se ha calculado como un porcentaje del ángulo de fricción interna (normalmente entre el 50% y el 67%). El material escogido corresponde a una arena mal gradada proveniente de la quebrada Palmichal. Inicialmente se realizaron ensayos tales como granulometría, compactación y corte directo para obtener las propiedades físicas necesarias para dimensionar un muro de contención a escala. Una vez clasificado el suelo y obtenidas sus propiedades mecánicas, se procedió a dimensionar y diseñar el muro de contención estable al volteo, de tal forma que este fallara por deslizamiento. El muro fue construido en concreto reforzado en el laboratorio de estructuras de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga y sobre él se aplicaron fuerzas horizontales con la ayuda de un muro de reacción y un actuador mecánico. Durante las pruebas con dicho actuador, se generó una memoria de datos de las fuerzas horizontales que producían el deslizamiento. Finalmente se determinó el ángulo de fricción suelo-muro para el material estudiado, se analizaron los resultados y se elaboraron una serie de recomendaciones para trabajos similares posteriores.

PALABRAS CLAVE:

•Muro de contención, fricción, arenas, empuje, diseño.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: DETERMINATION OF THE SOIL FRICTION ANGLE - WALL FOR THE SIZING OF
CONTAINMENT WALLS ON SANDY SOILS OF THE PALMICHAL STREAM

AUTHOR(S): Dwerlys Armesto Duarte
Yeiser Nicolas Pinto De Luquez

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Ing. MSc. Gerardo Bautista Garcia

ABSTRACT

The present work was carried out in order to determine the angle of friction between the base of a retaining wall in reinforced concrete and the sandy foundation soil. This angle has traditionally been calculated as a percentage of the internal friction angle (usually between 50% and 67%). The material chosen corresponds to a badly graded sand from the Palmichal stream. Initially, tests were performed such as granulometry, compaction and direct cutting to obtain the physical properties necessary to size a retaining wall to scale. Once the soil was classified and its mechanical properties were obtained, we proceeded to size and design the retaining wall stable to the tipping, in such a way that it failed due to landslide. The wall was built in reinforced concrete at the structure's laboratory of the Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga and horizontal forces were applied to it with the help of a reaction wall and a mechanical actuator. During the tests with said actuator, a data memory was generated of the horizontal forces that produced the sliding. Finally, the ground-wall friction angle for the studied material was determined, the results were analyzed and a series of recommendations for similar later work were elaborated.

KEYWORDS:

- Retaining wall, friction, sands, thrust, design.

Vº Bº DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

Una de las obras más importantes de la ingeniería corresponde a los muros de contención, estos muros se diseñan para que sean estables al volteo y al deslizamiento, siendo el ángulo de fricción suelo – muro uno de los parámetros requeridos para su dimensionamiento. El presente trabajo de grado se realizó con el fin de obtener dicho ángulo, para lo cual se diseñó un muro que fallara por deslizamiento y fuera estable al volteo. Como suelo de fundación y de relleno se escogió una arena mal gradada tomada de la quebrada Palmichal frente a la cafetería campestre de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

Para dimensionar un muro de contención se deben tener en cuenta algunos factores dentro de los cuales están: el peso propio del muro, las propiedades físicas del suelo de relleno y las del suelo de fundación.

Para poder clasificar el tipo de suelo empleado y posteriormente conocer sus parámetros de compactación y propiedades geo mecánicas obtenidas en ensayos de corte directo sobre muestras compactadas con la humedad óptima. Una vez obtenidas las propiedades físicas de la arena escogida, se procedió a dimensionar un muro de contención a escala, el cual debería ser estable al volteo en el momento de su falla por deslizamiento. También se realizó su diseño estructural.

La construcción del muro de contención se realizó en el laboratorio de estructuras de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, tomando muestras del concreto fundido y del acero utilizado para verificar su resistencia.

El modelo a escala construido fue sometido a quince pruebas, en las cuales con la ayuda de un muro de reacción y un actuador se aplicaron empujes hasta iniciar el desplazamiento del muro. Vale la pena mencionar que, una vez realizadas estas pruebas, se tomaron muestras del suelo de fundación con el fin de ajustar los parámetros de resistencia del mismo a las condiciones con las cuales se compactó dicho suelo.

Finalmente se realizaron cálculos, se obtuvieron resultados, estos se analizaron y se elaboraron una serie de recomendaciones y conclusiones, estableciendo tendencias y comportamientos generales de los materiales usados en este trabajo.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

Determinar el ángulo de fricción entre la base de un muro de contención en concreto reforzado y el suelo de fundación arenoso proveniente de la quebrada Palmichal.

1.2. Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades físicas del material granular sobre el cual se apoyará el muro de contención, así como también las del acero y el concreto empleado para el diseño de dicho muro.
- Dimensionar un muro de contención estable al volteo, de tal forma que su falla se produzca por deslizamiento.
- Diseñar un muro de contención de tal forma que no se produzca una falla estructural del mismo.
- Comparar la fuerza que origina el desplazamiento del muro con la fuerza friccionante que se opone a dicho movimiento, con el fin de estimar el valor del ángulo de fricción suelo – muro y de esta forma verificar los valores propuestos por Terzaghi para dicho ángulo, los cuales deberían estar comprendidos entre $1/3$ y $2/3$ del ángulo de fricción interno.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los parámetros más importantes en el dimensionamiento de muros de contención es el ángulo de fricción entre suelo – muro (δ). Este ángulo delta (δ) se estima como un porcentaje del ángulo de fricción interna del suelo (ϕ), el porcentaje que ha sido utilizado por muchos años está comprendido entre un 50% y un 66%.

Por medio del presente trabajo de grado se pretende verificar el ángulo de fricción suelo – muro para la arena de la quebrada Palmichal sobre la cual se va a cimentar un muro de contención en concreto reforzado a escala.

Este trabajo corresponde a una etapa inicial de un proyecto mayor que realizará el director del presente trabajo de grado en el cual se pretende determinar el valor exacto del ángulo de fricción suelo – muro para diferentes arenas y establecer las variaciones de dicho ángulo de acuerdo con propiedades físicas del suelo, así como también analizar las variaciones del ángulo de acuerdo con la forma del muro.

3. JUSTIFICACIÓN

En este proyecto de grado se busca calcular de manera verídica y efectiva el ángulo de fricción que se origina en la base de un muro de contención apoyado sobre una arena extraída de la quebrada Palmichal ubicada en la Universidad Pontificia Bolivariana km 7 vía Piedecuesta, y buscar su falla por deslizamiento,

Al momento de diseñar un muro de contención es de suma importancia conocer las propiedades físicas y mecánicas del suelo donde este será construido y a su vez del suelo que generará empujes horizontales sobre este, para hallar dichas propiedades se debe hacer un estudio del suelo en el cual se obtenga la humedad de compactación, cohesión, ángulo de fricción interna y el peso específico.

En la práctica, el ángulo de fricción entre un muro de contención y su respectivo suelo de fundación está dado por valores sugeridos por Terzaghi los cuales se encuentran entre 0.5ϕ y 0.67ϕ (ϕ es el ángulo de fricción interna).

El presente trabajo de grado consiste en el cálculo del ángulo de fricción entre un suelo granular y el muro de contención a construir, para así obtener un resultado real que nos demuestre si estos valores están comprendidos en los predeterminados por Terzaghi.

Para el desarrollo de dicho proyecto de grado se utilizará el muro de reacción que posee la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, con el cual se aplicarán los empujes que provoquen la falla por deslizamiento del muro a escala que se va a utilizar.

4. ALCANCE

El presente trabajo de grado pretende establecer los valores particulares del ángulo de fricción suelo – muro para la arena de la quebrada Palmichal sobre la cual se va a cimentar un muro de contención de concreto reforzado.

El dimensionamiento del muro se hará de tal manera que la falla se produzca por deslizamiento y no por volteo. La altura máxima del muro será de un metro y el empuje estimado que producirá la falla por deslizamiento, deberá estar dentro del rango de fuerzas con el cual trabaja el muro de reacción del laboratorio de estructuras

Dentro de las fuerzas que se oponen al deslizamiento de un muro está la fuerza debida a la cohesión, pero en este caso dicha fuerza es despreciable ya que el suelo de fundación corresponde a una arena puramente friccionante.

Debido a que el suelo de fundación corresponde a un suelo puramente friccionante y que no se colocará un relleno pasivo frente al muro, la única fuerza horizontal resistente será la fuerza de rozamiento, la cual puede estimarse mediante la siguiente ecuación:

$$F_{Hr} = N * TAN(\delta)$$

Ecuación 1. Fuerza de rozamiento.

Dónde:

F_{Hr} : Fuerza de rozamiento

N: Suma de fuerzas verticales

δ : $K * \phi$

ϕ : Angulo de fricción interna del suelo

K: Coeficiente (tradicionalmente se ha usado valores comprendidos entre $\frac{1}{2}$ y $\frac{2}{3}$)

Por facilidad en la construcción del muro de contención a escala y el mecanismo de aplicación de la carga, su espalda será vertical y el relleno arenoso será de superficie horizontal.

5. ANTECEDENTES

Para la elaboración de este proyecto de grado se tuvo en cuenta la teoría de Rankine, quien desarrolla sus estudios sobre las condiciones de esfuerzos que se generan en los suelos activos y pasivos.

5.1. ANTECEDENTES NACIONALES

Se tomó como antecedente local el trabajo de grado realizado en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga por parte de las estudiantes Erika Lizeth Estupiñan y María Del Pilar Sánchez, cuyo objetivo era hallar la influencia de la cohesión en el dimensionamiento de muros de contención cimentados sobre arena arcillosa.

En el trabajo de grado mencionado anteriormente, el suelo estudiado tuvo un ángulo de fricción interna promedio de 35.9° , una cohesión promedio de 2.4 T/m^2 y una densidad promedio de 1.93 T/m^3 , datos que se obtuvieron de la arena arcillosa utilizada en dicho proyecto.

Con el resultado de la cohesión del suelo de fundación se concluyó que los muros de contención cumplieron con los valores mínimos de los factores de seguridad por volteo, deslizamiento y capacidad portante recomendados por la norma NSR-10 y en general la literatura disponible. En ese proyecto se vio en la necesidad de aumentar las dimensiones del muro propuestas inicialmente ya que se observó que al despreciar la cohesión del suelo de fundación disminuye el factor de seguridad por deslizamiento, lo cual tiene por consecuencia un muro inestable. Además, concluye que al comparar volúmenes de concreto adicionales de los muros tanto de espalda recta como inclinada, se puede decir que los muros de espalda inclinada se afectan menos si se desprecia la cohesión.

También se tuvo en cuenta el proyecto de grado de Ginna Ivonne Montoya Suarez realizado en la Universidad Pontificia Javeriana en Bogotá D.C. en el año 2013 donde su objetivo fue determinar los parámetros de resistencia al corte en la interfaz recebo – concreto, donde a lo largo de ese trabajo de grado se realizaron ensayos de corte directo en las interfaces suelo – suelo y suelo – concreto y se pudo analizar que el ángulo de fricción interna obtenido varía en aproximadamente 7.47 % menos que el ángulo de resistencia obtenido en la interfaz suelo – suelo, además la variación de la cohesión es de 0.33 kg/cm^2 por encima de la obtenida en la interfaz suelo – suelo.

Con los resultados nombrados anteriormente se llegó a la conclusión que el ángulo de resistencia al corte en la interfaz suelo – concreto varía entre el 0.75 y 0.89 veces el ángulo de resistencia de la interfaz suelo – suelo.

Un proyecto similar fue el de la estudiante Carroll Solano, 2014. Cuyo objetivo fue determinar la influencia de la cohesión en el dimensionamiento de muros de contención cimentados sobre limos inorgánicos de baja comprensibilidad, donde se obtuvo un peso específico máximo de 1.97 T/m^3 con una humedad de 11.9%. El ángulo de fricción interna del suelo estudiado en este trabajo de grado fue de 27.31° y su cohesión de 0.69 Kg/cm^2 . Teniendo en cuenta la cohesión se obtuvieron muros tanto de espalda vertical como de espalda inclinada estables, cumpliendo con los factores de seguridad permitidos por la NSR-10.

Pineda y Colmenares (2011), en esta investigación se analizaron parámetros de resistencia al corte en interfaces arcilla – concreto en los problemas de estructura geotécnicas en el medio lacustre de Bogotá. Dichos parámetros se obtuvieron mediante pruebas de corte directo los cuales fueron analizados en paralelo con el coeficiente de rugosidad con el fin de estudiar su influencia sobre los parámetros de resistencia al corte. Al obtener los resultados experimentales se encuentra que la relación $\delta = (2/3) \phi$ no cumple para los materiales de las interfaces usadas si no que varía entre 0.85 y 1.00, teniendo en cuenta que el principal mecanismo de las interfaces es la adhesión.

5.2. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

No se encuentra mucha información relacionada con el tema, pero hay un artículo que se llama Design Diagrams for the Analysis of Active Pressure on Retaining Walls with the Effect of Line Surcharge. El cual habla sobre Diagramas de diseño para el análisis de la presión activa en muros de contención con el efecto del recargo de línea que fue publicado en el año 2017 en Irán realizado por Ahmadabadi Mojtaba y Faghirizadeh Mohammad Karimeste, este estudio propuso una formulación para calcular la presión sobre la pared y determinar la cuña del ángulo de falla en función del método de equilibrio límite. La formulación mencionada es capaz de calcular el coeficiente de presión activa, la culminación de las fuerzas en la superficie de falla y la distribución de presión en la pared con el efecto del recargo de la línea. En este estudio, el efecto de las propiedades del suelo y el recargo en la cantidad de coeficiente de presión activa ha sido investigado y la conclusión fue que el aumento el ángulo de fricción interna y el ángulo de fricción entre el suelo y la pared y la distancia del recargo de la pared reducirá el coeficiente de presión activa; sin embargo, al aumentar la línea recargo, el valor del coeficiente de presión activa incrementará. Por otra parte, aumentar el ángulo de la fricción interna reducirá la distribución de la tensión y presión de estrés resultante en la pared con el efecto de la línea recargo donde se revierte el efecto del recargo de línea en el proceso.

6. MARCO TEÓRICO

6.1. TEORÍA DE RANKINE

La teoría de Rankine establece que a partir del estado de reposo se puede llegar a la falla de dos maneras:

- ✓ Disminuyendo la presión horizontal hasta que esta alcanza su valor mínimo posible, en este caso se habrá logrado el estado activo.
- ✓ Aumentando la presión horizontal hasta que esta alcanza su valor máximo posible, en este caso se habrá logrado el estado pasivo.

La siguiente figura muestra los tres estados mencionados atrás así:

- ✓ El círculo de Mohr 1 corresponde al estado de reposo, por lo tanto, este está por debajo de la envolvente de falla.
- ✓ El círculo 2 corresponde al estado activo, en el cual esta toca tangencialmente a la envolvente de falla después de disminuir la presión horizontal.
- ✓ El círculo 3 corresponde al estado pasivo, en el cual esta toca tangencialmente a la envolvente de falla después de aumentar la presión horizontal.

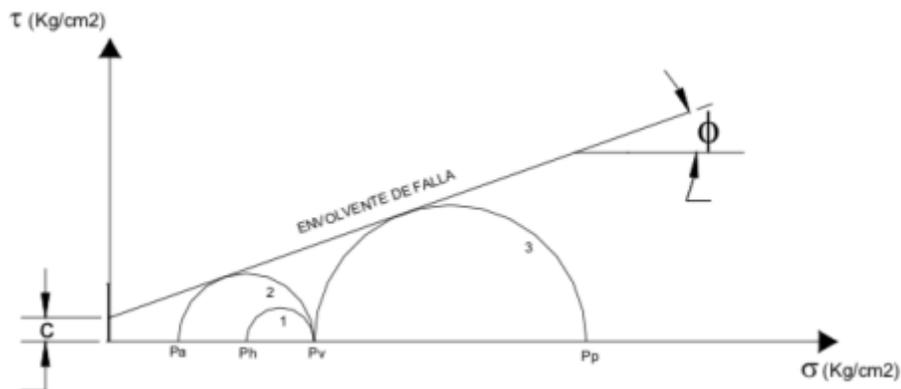


Figura 1. Círculos de falla para diferentes estados
Fuente. Juárez Badillo, Eulalio. 2005

6.1.1. Estado Activo

El estado activo se da cuando el muro se mueve hacia su frente alejándose del relleno, en este caso la presión horizontal va a disminuir con respecto a la que tenía en el estado de reposo

De acuerdo con la teoría de Rankine el coeficiente de presión activas de tierras K_a se puede estimar a partir de la siguiente ecuación

$$K_a = \frac{\sigma'_v}{\sigma'_h} = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)$$

Ecuación 2. Coeficiente de presión activa de tierras.

En un suelo con cohesión y fricción la ecuación para calcular el esfuerzo horizontal efectivo es:

$$\sigma'_h = \sigma'_v K_a - 2c\sqrt{K_a}$$

Ecuación 3. Esfuerzo horizontal efectivo.

El empuje activo ejercido por el relleno sobre el muro corresponde al área del diagrama de presiones horizontales totales, incluyendo presión efectiva, sobrecarga, efectos sísmicos, nivel freático, etc. (Bowles, 1997)

6.2. ARENAS

Por su elevado rozamiento interno y baja compresibilidad se considera como suelo ideal para los ingenieros civiles. Además, ciertas arenas presentan asientos progresivos y constantes, que para el caso de obras urbanas no son muy recomendadas. Las excavaciones de este tipo de suelo por debajo del nivel freático son peligrosas pues se convierten en inestables. (Moreno, 2012)

Se considera que un suelo es grueso si más del 50% en peso de una muestra representativa no pasa por el tamiz N° 200. A su vez los suelos gruesos se dividen en gravas y arenas siendo la frontera entre ellas el tamiz N° 4. Las arenas son suelos gruesos en los cuales más del 50% de su fracción gruesa pasa por el tamiz N° 4.

Se considera que las arenas tienen un escaso contenido de finos si este es inferior al 5% (como la estudiada en el presente trabajo de grado), en tal caso solo es importante juzgar su gradación por medio de los coeficientes de uniformidad y curvatura. Se considera que una arena es bien gradada (SW) sí su coeficiente de uniformidad es superior a 6 y coeficiente de curvatura está entre 1 y 3, en caso de

no cumplirse con una o las dos condiciones anteriores la arena se considera mal gradada (SP). (Berry, 1998)

6.3. GRANULOMETRÍA

Un análisis granulométrico se realiza para separar a una muestra de suelo en fracciones según sus tamaños. Esta separación se realiza por medio de una prueba de tamizado con lavado por la malla N° 200. El lavado se realiza para eliminar la fracción fina para que no se formen grumos y después de realizado este, el material se seca, para finalmente realizar con él el cribado a través de una serie de tamices dispuestos en orden decreciente de aberturas.

Los resultados se presentan en forma de curva en la cual en el eje de las abscisas se coloca la abertura del tamiz y en el eje de las ordenadas el porcentaje de material que pasa por cada malla (Juarez Badillo, 2005). Ver figura 1.

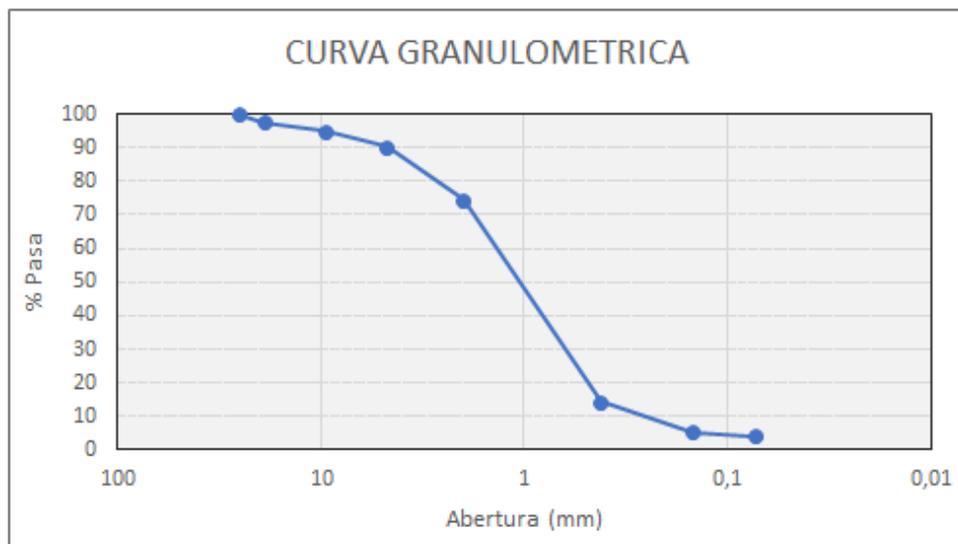


Figura 2. Curva granulométrica.
Fuente. Propia.

6.4. LÍMITES DE ATTERBERG

Atterberg estableció las fronteras entre los diferentes estados de consistencia y las denominó límites de consistencia, dentro de los límites de consistencia se destacan el límite líquido y el límite plástico, los cuales definen el rango de humedades dentro del cual el suelo se comporta plásticamente.

El límite líquido se obtiene con la ayuda de la copa de Casagrande y corresponde a la humedad para la cual una ranura hecha sobre una muestra de material que pasa por la malla N° 40, se cierra con 25 golpes.

El límite plástico corresponde a la humedad para la cual un rollo de 1/8" construido con material que pasa por la malla N° 40 se desmorona o agrieta después de rodados consecutivos con los cuales el contenido de agua disminuye.

En el presente trabajo de grado no se realizaron los ensayos de límites de plasticidad debido a la plasticidad nula del material estudiado. (Crespo Villalaz, 2004)

6.5. CLASIFICACIÓN DEL SUELO

Los sistemas de clasificación de suelos sirven para que el ingeniero tenga una idea del suelo con el cual va a tratar y en caminar la investigación posterior al tipo de material encontrado. Estos sistemas dividen a los suelos en grupos y subgrupos de acuerdo con la distribución de tamaños de partículas y con la plasticidad de su fracción más fina. Los sistemas de clasificación más usados son el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos y el Sistema American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (Bowles, Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil, 1978)

6.5.1. Clasificación AASHTO

El Sistema de clasificación de suelos de la AASHTO es uno de los métodos más antiguos, este sistema divide a los materiales en dos grandes grupos:

- ✓ Materiales granulares: Se caracterizan por tener un contenido de finos igual o menor al 35%. De acuerdo con la cantidad de material que pase por los tamices N° 10, N° 40 y N° 200 y de sus límites de plasticidad el suelo pertenecerá a alguno de los subgrupos A-1, A-2 y A-3.
- ✓ Materiales limo – arcillosos: Se considera que un material es de este tipo si más del 35% de este pasa por el tamiz N° 200. De acuerdo con los límites de plasticidad, el suelo pertenecerá a uno de los siguientes subgrupos A-4, A-5, A-6 y A-7.
- ✓ Suelos altamente orgánicos: Son suelos finos que pertenecen al grupo A-8 y se identifican mediante inspección visual (Das, 2016).

Tabla 1. Sistema de clasificación de suelos de la AASTHO

Clasificación General	Materiales Granulares (35% o menos del total pasa el tamiz No 200)							Materiales limo-arcillosos (más del 35% del total pasa el tamiz No 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Clasificación de Grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
	Porcentaje de material que pasa el tamiz No10 No40 No200	50max 30max 15max	50max 25max	51max 10max	35 max	35 max	35 max	35 max	36min	36min	36min
Características de la fracción que pasa el tamiz No 40 Limite Liquido, ω Índice Plástico, Ip	6 max		NP	40max 10max	41min 10max	40max 11min	41min 11min	40max 10max	41min 10max	40max 11min	41min 11min
Índice de Grupo	0		0	0		4 max		8 max	12 max	16 max	20 max

Fuente. Josep, Bowles. 1978.

6.5.2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

Este sistema fue inicialmente propuesto por A. Casagrande en 1942, dicho sistema clasifica los suelos en dos grandes grupos según el porcentaje de material que pasa por la malla N° 200. Estos dos grandes grupos son: los suelos gruesos y finos, donde el material se considera grueso si se retiene más del 50% en el tamiz N° 200 y los suelos finos en los cuales más del 50% pasa por el tamiz N° 200.

Dentro de los suelos gruesos se encuentran dos subgrupos, gravas y arenas, estas se separan con la malla N° 4, de manera que un suelo pertenece al grupo de gravas si más del 50% de su fracción gruesa es retenida en dicha malla, de lo contrario pertenece a una arena. Las gravas se simbolizan con la letra G y las arenas con la letra S. Subgrupos adicionales de gravas y arenas se tienen de acuerdo con su gradación (W: bien gradado, P: mal gradado) y con la plasticidad de su fracción fina (C: arcilloso, M: limos).

Los suelos finos se subdividen de acuerdo con su ubicación en la carta de plasticidad según su límite líquido y su índice de plasticidad. Los grupos de suelos finos son: CL, ML, OL, CH, MH, OH y Pt. (Juarez Badillo, 2005)

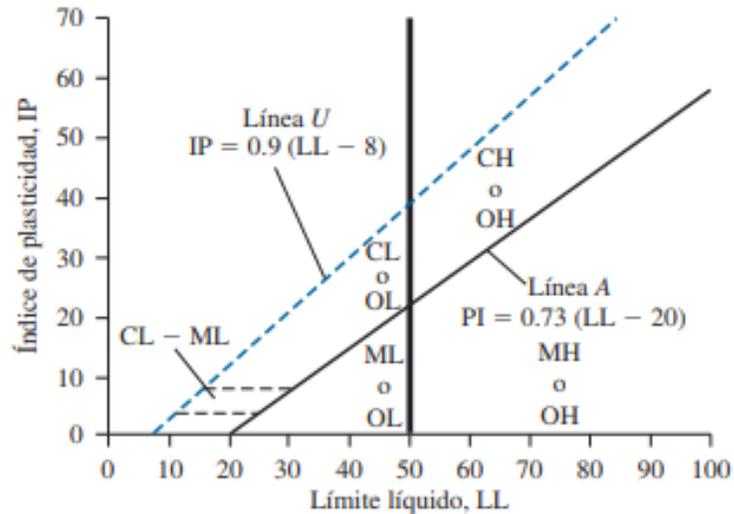


Figura 3. Gráfica de plasticidad. Propiedades geotécnicas del suelo
Fuente. Das, Braja M. 2012.

6.6. ENSAYO DE COMPACTACIÓN

En un ensayo de compactación se determinan dos parámetros: el peso específico seco máximo y la humedad con la cual este se alcanza, llamada humedad óptima. Las pruebas más usadas en la actualidad para determinar estos parámetros son ensayos tipo Proctor.

En la década de los 30's del siglo 20 R.R. Proctor diseñó un ensayo de laboratorio (Prueba estándar) con el fin de reproducir las densidades que se obtenían con los equipos de aquella época, estas densidades se obtenían con una energía de compactación de aproximadamente 600 kJ/m^3 . Esta energía de compactación se logra usando las dimensiones y peso apropiados de un molde y un martillo, así como también un número determinado de capas y golpes por capa.

Años más tarde aparecieron en la industria equipos de compactación nuevos con los cuales se pueden obtener densidades mucho mayores, razón por la cual se modificaron las dimensiones y peso del molde y el martillo a fin de obtener mayores energías de compactación en el laboratorio. (Bowles, Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil, 1978)

6.7. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

El ensayo de corte directo es muy importante en cualquier estudio de suelos ya que en él se determinan los parámetros de resistencia (cohesión y ángulo de fricción interna) con los cuales se diseñan obras de contención y cimentación (zapatas, pilotes, muros, etc.).

Mohr propuso una teoría, la cual sostiene que un material falla a la combinación del esfuerzo normal y el esfuerzo cortante lo cual expreso con la siguiente ecuación:

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

Ecuación 4. Mohr - Coulomb.

c' = cohesión

ϕ' = ángulo de fricción interna para esfuerzos efectivos

σ' = esfuerzo normal efectivo

En un ensayo de corte directo los esfuerzos normales son establecidos por las normas y a partir de ellos se fallan testigos circulares o cuadrados en planos horizontales de esfuerzo cortante. Esto permite definir la relación entre los esfuerzos cortantes y las deformaciones horizontales en el plano de falla para cada muestra. Finalmente se obtiene la envolvente de falla del material ensayado con los esfuerzos cortantes máximos de cada muestra y el esfuerzo normal usado, la cual permite definir la cohesión y el ángulo de fricción interna de dicho material.

De acuerdo con el material y condición que este tenga en campo existen tres modalidades de la prueba de corte directo: ensayo consolidado drenado (CD), ensayo consolidado no drenado (CU) y ensayo no consolidado no drenado (UU). (Das, 2016)

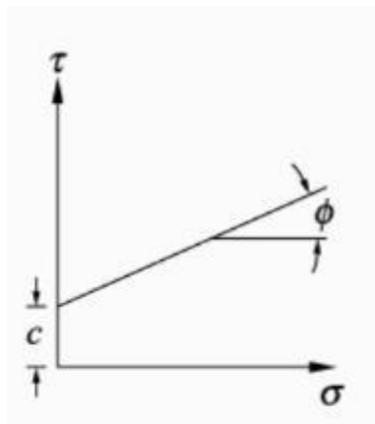


Figura 4. Envolvente de falla de Mohr y criterio de rotura Mohr – Coulomb
Fuente. Debashis Moitra, 2017

6.8. MUROS DE CONTENCIÓN

Los muros de contención son elementos constructivos y su función principal es soportar los esfuerzos horizontales producidos por el empuje de tierra. (Das B. , 2012)

Los muros de contención convencionales se clasifican como:

- ✓ Muros de contención de gravedad
- ✓ Muros de contención de semigravedad
- ✓ Muros de contención en voladizo
- ✓ Muros de contención con contrafuertes

6.8.1. Muros de contención de gravedad

Este tipo de muros dependen de su propio peso y de cualquier suelo que descansa sobre la mampostería para su estabilidad. Para muros altos este tipo de construcciones son costosas, además se construyen con concreto simple o con mampostería. (Das B. , 2012)

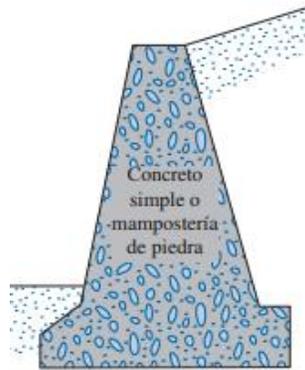


Figura 5. Muros de gravedad
Fuente. Das, Braja M. 2012

6.8.2. Muros de contención de semigravedad

Son muros en los cuales se utilizan pequeñas cantidades de acero para su construcción y así minimizando el tamaño de las secciones del muro. (Das B. , 2012)

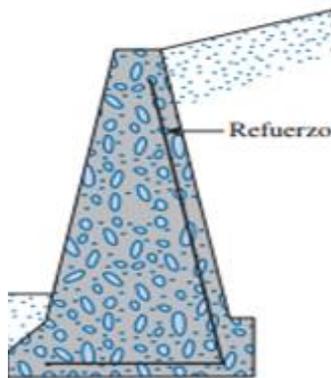


Figura 6. Muros de semigravedad

Fuente. Das, Braja M. 2012

6.8.3. Muros de contención en voladizo

Este tipo de muros están contruidos con concreto reforzado y constan de un tallo delgado y una losa de base, es económico hasta una altura aproximada de ocho metros (8m). (Das B. , 2012)

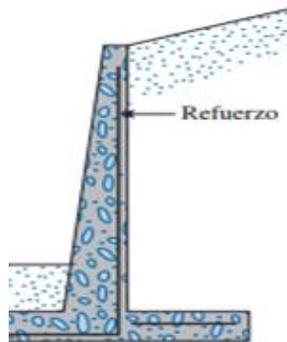


Figura 7. Muro en voladizo

Fuente. Das, Braja M. 2012

6.8.4. Muros de contención con contrafuertes

Son similares a los muros en voladizo. Sin embargo, estos tienen losas delgadas de concreto que conectan entre sí el muro con la losa de la base. Su propósito es reducir la fuerza cortante y los momentos flexionantes. (Das B. , 2012)

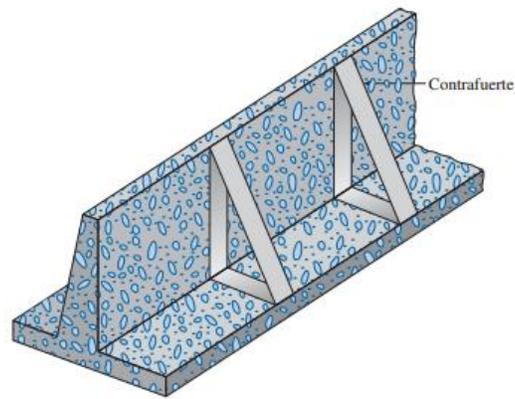


Figura 8. Muro con contrafuertes
Fuente. Das, Braja M. 2012

7. METODOLOGÍA

7.1. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Se buscó información respecto a trabajos previos, teorías para el cálculo de presiones laterales de tierra, dimensionamiento de muros de contención, diseño estructural, procesos constructivos y tipos de muros.

7.2. BÚSQUEDA DEL MATERIAL

Se extrajo un material arenoso de la quebrada Palmichal ubicada en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga que cumpliera con las características y especificaciones requeridas para llevar a cabo este proceso investigativo, del cual se sacaron 48 bultos de arena.

7.3. CLASIFICACIÓN DEL SUELO

Para hallar la clasificación del material extraído de la quebrada Palmichal, se realizaron tres pruebas de ensayo granulométrico por medio de tamizado especificado por la norma INV-E-123 – 2013, el cual se llevó a cabo en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.

7.4. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN

Después de obtenida la clasificación del suelo, se procedió a la determinación de la humedad óptima y el peso específico del material extraído a través de tres ensayos de Proctor modificado siguiendo su respectivo procedimiento según la norma INV-E-142 – 2013.

7.5. ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE

Se determinó el ángulo de fricción interna, la cohesión y la densidad del material compactado por medio de tres ensayos de corte directo siguiendo la norma INV-E-154 – 2013.

7.6. DIMENSIONAMIENTO DEL MURO DE CONTENCIÓN A ESCALA

Se determinaron las dimensiones de un muro de contención que fuera estable al volteo y que su falla se produzca por deslizamiento, y así

determinar el ángulo de fricción que se genera entre un muro que se está deslizando con respecto a su base y dicho material.

7.7. DISEÑO ESTRUCTURAL DEL MURO

Después de determinar las dimensiones del muro el cuál se diseñó para que fuera estable al volteo y potencialmente inestable al deslizamiento, se realizó el diseño estructural del mismo con la ayuda del programa SAP 2000 y a su vez se calcularon las cantidades de material como el concreto y el acero.

7.8. CONSTRUCCIÓN DEL MURO A ESCALA

Luego de obtener las dimensiones y propiedades físicas del concreto y el acero utilizados en la construcción del muro, se llevó a cabo su respectiva construcción en la zona de trabajo del laboratorio de estructuras de la Universidad Pontificia Bolivariana y para tener un control de calidad se realizaron ensayos de tensión en la maquina universal para el acero y se tomaron muestras de cilindros de concreto para la verificación de su resistencia.

7.9. COMPACTACIÓN DEL SUELO DE FUNDACIÓN

Se extrajo material proveniente de la quebrada Palmichal para formar el relleno, el cual se preparó con su respectiva humedad óptima para ser compactado por medio de pisón. En este relleno se apoyó el muro de contención construido el cual fue trasladado por medio de la torre grúa que posee el laboratorio de estructuras de la Universidad Pontificia Bolivariana hasta el muro de reacción donde se realizaron los respectivos ensayos.

7.10. PRUEBAS EN EL MURO DE REACCIÓN

Se realizaron 15 ensayos aplicando cargas horizontales por medio del actuador en el muro de reacción hasta el momento en el que se registró un desplazamiento de la base del muro sobre el suelo en el cual se apoyó, de esta manera se lograron obtener los resultados de la falla por deslizamiento, más no un daño estructural del muro con el fin de que pueda ser utilizado para futuros proyectos de grado.

7.11. ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez obtenidos los datos de la carga que desplaza al muro construido sobre el suelo en que se apoyó, se procedió a estimar el valor del ángulo de fricción suelo – muro y se comparó con los valores encontrados en la literatura técnica en el área de geotecnia.

Finalmente se realizó un informe dando a conocer de forma clara y concisa unas conclusiones con respecto a los hallazgos significativos encontrados y se hicieron recomendaciones técnicas para futuras investigaciones en este campo.

8. RESULTADOS

8.1. GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO CON LAVADO POR MALLA N° 200.

Para el presente trabajo de grado se escogió como material de estudio las arenas provenientes de la quebrada Palmichal, en frente de la cafetería campestre de la Universidad Pontificia Bolivariana, de allí se tomaron muestras para realizar ensayos de clasificación y caracterización de dicho material.

Por cuarteos sucesivos se tomaron las muestras para los ensayos de granulometría y límites. Primero se realizaron tres ensayos de granulometría por tamizado con lavado por la malla N° 200, sin embargo, no fue necesario realizar los ensayos de límite de plasticidad debido a que la arena estudiada tiene un contenido de finos inferior al 5%.

Las tablas 2,3 y 4 muestran los resultados obtenidos para los tres ensayos de granulometría realizados.

Tabla 2. Resultados de la distribución granulométrica.

MUESTRA 1.				
Peso seco antes del lavado	1882,44	gr		
Peso seco después del lavado	1845,46	gr		
MALLA	ABERTURA	PESO RETENIDO	% RETENIDO	%
No	(mm)	(g)	PARCIAL	PASA
3/4"	19,05	10,2	0,54	100
3/8"	9,52	81,3	4,32	95,68
No 4	4,75	105,39	5,60	90,08
10	2	295,67	15,71	74,38
40	0,42	1191,96	63,32	11,06
100	0,149	137,32	7,29	3,76
200	0,074	22,71	1,21	2,55
FONDO	-----	37,89	2,01	0,54
	$\Sigma=$	1882,44		

Fuente: Propia.

Tabla 3. Resultados de la distribución granulométrica.

MUESTRA 2.				
Peso seco antes del lavado	1888,01 gr			
Peso seco después del lavado	1852,44 gr			
MALLA No	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO PARCIAL	% PASA
1"	25	37,12	1,97	100
3/4"	19,05	45,62	2,42	97,58
3/8"	9,52	103,51	5,48	92,10
No 4	4,75	100,72	5,33	86,77
10	2	290,38	15,38	71,39
40	0,42	1101,83	58,36	13,03
100	0,149	150,56	7,97	5,05
200	0,074	22,1	1,17	3,88
FONDO	-----	36,17	1,92	1,97
	$\Sigma=$	1888,01		

Fuente: Propia.

Tabla 4. Resultados de la distribución granulométrica.

MUESTRA 3.				
Peso seco antes del lavado	1883,35 gr			
Peso seco después del lavado	1849,1 gr			
MALLA No	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO PARCIAL	% PASA
1"	25	42,8		100
3/4"	19,05	44,68	2,37	97,63
3/8"	9,52	52,1	2,77	94,86
No 4	4,75	85,44	4,54	90,32
10	2	297,38	15,79	74,53
40	0,42	1133,08	60,16	14,37
100	0,149	171,55	9,11	5,26
200	0,074	21,53	1,14	4,12
FONDO	-----	34,79	1,85	2,27
	$\Sigma=$	1883,35		

Fuente: Propia.

Los resultados anteriores se encuentran resumidos en la tabla 5, donde se presentan las fracciones de grava, arena y finos que contiene cada una de las muestras ensayadas.

Tabla 5. Resumen de los resultados granulométricos.

RESUMEN DE RESULTADOS			
ENSAYOS	GRAVAS (%)	ARENAS (%)	FINOS (%)
1	9,92	88,07	2,01
2	13,23	84,85	1,92
3	9,68	88,48	1,85
PROMEDIO	10,94	87,13	1,93

Fuente: Propia.

Con los porcentajes de material que pasa por cada uno de los tamices de la serie utilizada y la abertura de los mismos se procedió a dibujar la curva granulométrica correspondiente a cada ensayo, estas curvas se muestran en la figura 5.

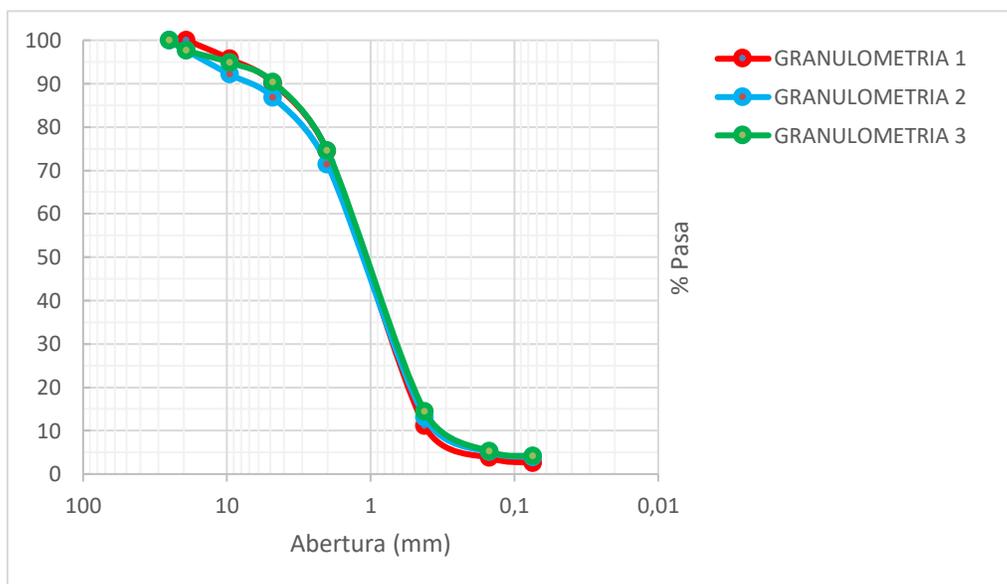


Figura 9. Grafica de los resultados granulométricos.

Fuente: Propia.

8.2. ENSAYO DE COMPACTACIÓN

Para conocer la humedad con la cual debe compactarse tanto el suelo de fundación, así como también el relleno detrás del muro a escala, se hizo necesario realizar ensayos de compactación Proctor modificado. En total se hicieron tres pruebas de compactación para promediar sus resultados, siguiendo los lineamientos de la norma (INV-E-142 – 2013).

Las figuras 6, 7 y 8 muestran las curvas de compactación obtenidas en los tres ensayos realizados sobre muestras de la arena de la quebrada Palmichal.

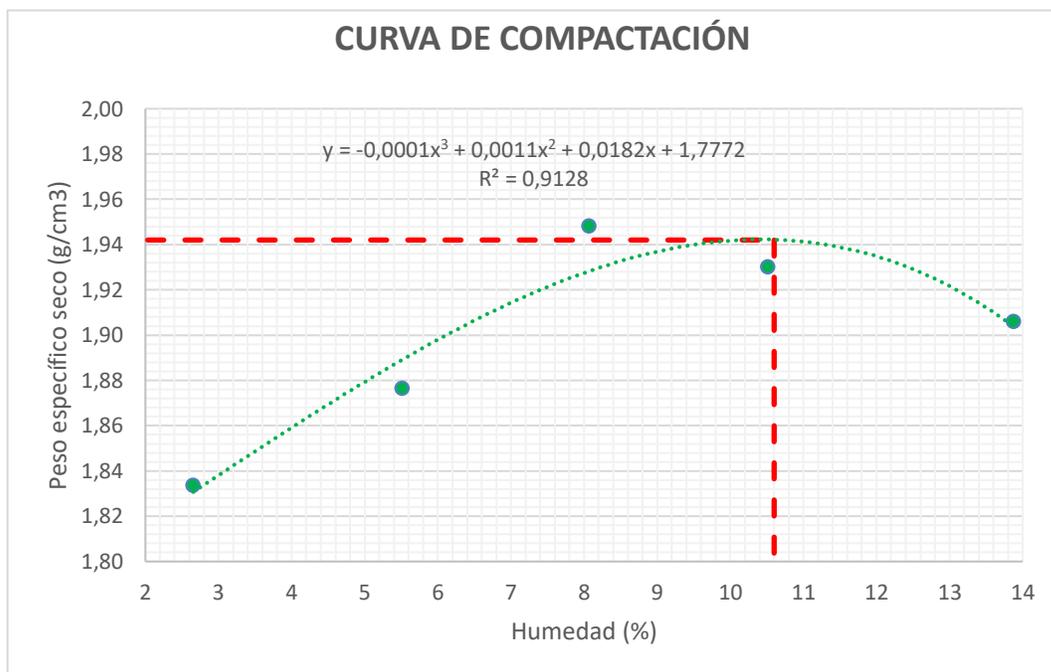


Figura 10. Resultado de Compactación de la muestra 1.
Fuente: Propia.

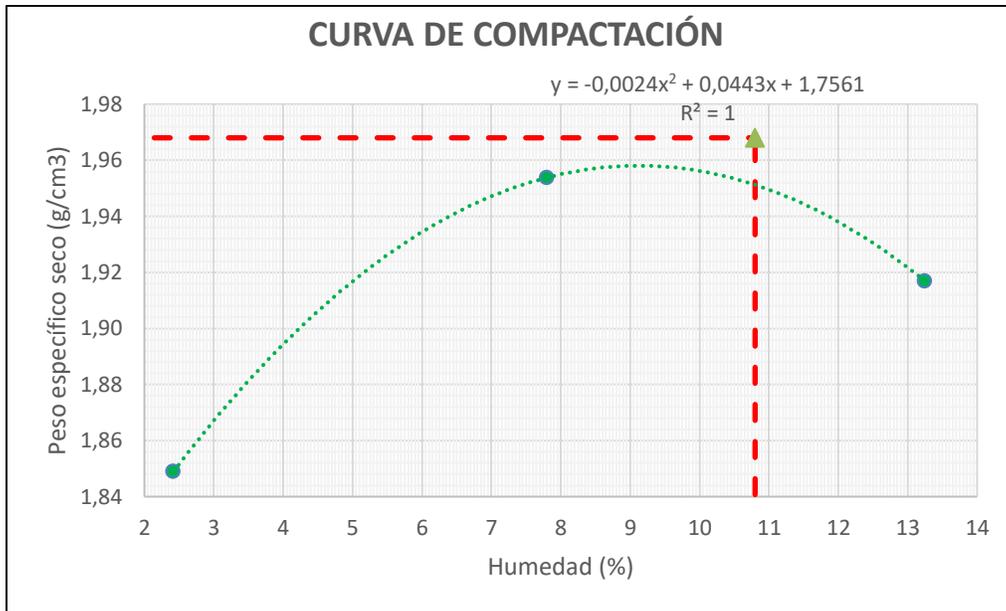


Figura 11. Resultado de Compactación de la muestra 2
Fuente: Propia

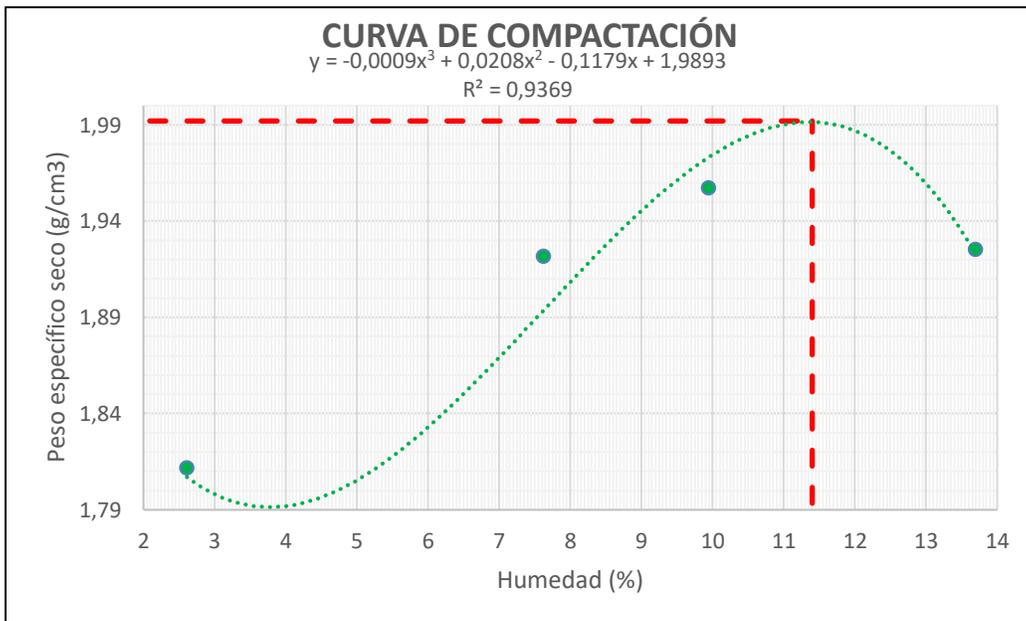


Figura 12. Resultado de Compactación de la muestra 3.
Fuente: Propia.

La tabla 6 muestra un resumen del peso específico seco máximo y la humedad óptima obtenidos en cada una de las tres pruebas, así como también los valores promedios de dichos parámetros.

Tabla 6. Resultados de compactación.

ENSAYOS	γ_d (g/cm ³)	ω (%)
1	1,942	10,6
2	1,958	9,3
3	1,992	11,4
PROMEDIO	1,964	10,43

Fuente: Propia.

8.3. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Antes de diseñar el muro a escala se realizaron tres ensayos de corte directo sobre muestras compactadas con la humedad óptima en moldes del ensayo Proctor modificado. Con base en la cohesión y el ángulo de fricción obtenidos en estos tres ensayos se dimensionó el muro a escala, teniendo en cuenta que el muro debería ser mucho más estable al volteo que al deslizamiento.

Una vez diseñado y construido el muro, se tomaron muestras del suelo de fundación de dicho muro y con ellas se hicieron otros tres ensayos de corte directo, con el fin de ajustar los factores de seguridad correspondientes al muro construido y al suelo compactado.

Todos los ensayos de corte directo se realizaron siguiendo los lineamientos de la norma (INV-E-154 – 2013).

En la tabla 7 se muestran los valores de los esfuerzos normales utilizados en cada prueba, los esfuerzos cortantes en la falla de cada muestra, en ángulo de fricción interna y la cohesión estimados en cada ensayo, así como también los valores promedios de dichos parámetros. Se aclara que en las tablas mencionadas solo se muestran los resultados obtenidos en los tres ensayos cuyas muestras se tomaron directamente del suelo de fundación del muro a escala.

Tabla 7. Resumen de cortes directo.

ENSAYOS	σ (Kg/ cm ²)	τ (Kg/cm ²)	Θ Angulo de fricción interna	C (Cohesión) Kg/cm ²	γ (KN/m3)	HUMEDAD
1	0	0,2101	34,40	0,210	16,340	10,130
	0,5	0,6053				
	1	0,8158				
	2	1,6060				
2	0	0,1305	33,92	0,131	16,520	10,530
	0,5	0,4677				
	1	0,8016				
	2	1,4760				
3	0	0,1132	33,96	0,11	17,29	9,55
	0,5	0,4648				
	1	0,7645				
	2	1,4675				
PROMEDIO			34,09	0,151	16,72	10,07

Fuente. Propia.

La figura 9 muestra la envolvente de falla construida con los valores promedio de los esfuerzos obtenidos en los tres ensayos realizados después de compactado el suelo de fundación del muro.

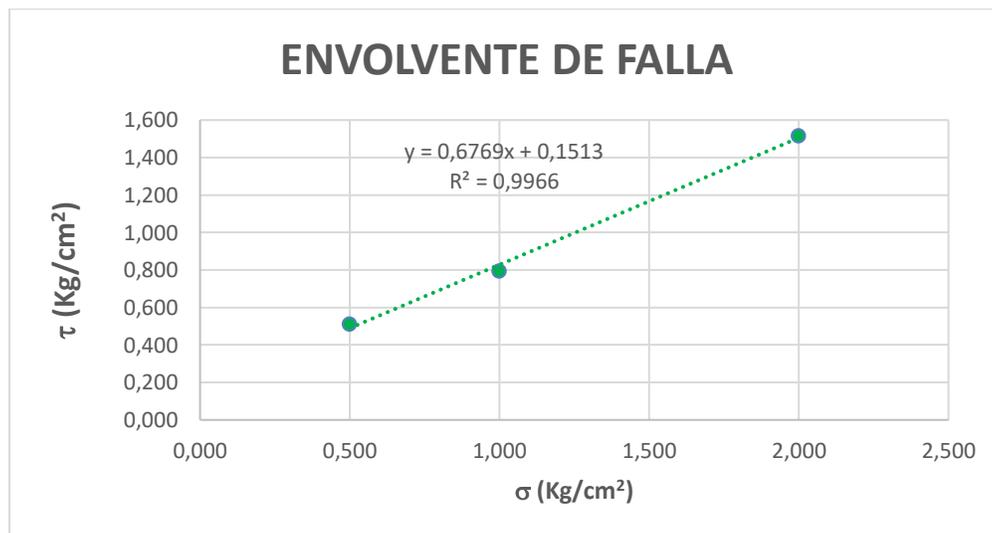


Figura 13. Envolvente de falla promedio para la máquina digital.

Fuente: Propia.

8.4. ENSAYOS SOBRE EL MURO A ESCALA

En la tabla 8 se presentan los valores de la fuerza horizontal máxima obtenida en cada uno de los 15 ensayos que se realizaron sobre el muro de contención a escala. Se puede observar en esta tabla que los valores de la fuerza que desplazo al muro están comprendidos entre 10,5 y 11,7 kN con un valor promedio de 11.11 kN, una desviación estándar de 0,38 kN y un coeficiente de variación del 3.43 %

Tabla 8. Resultados de fuerza horizontal máxima.

ENSAYOS	CARGA MAX (KN)
1	11,7
2	11,2
3	11,2
4	11,7
5	11
6	10,9
7	11
8	11,1
9	10,8
10	11,5
11	10,5
12	11,4
13	11,4
14	10,5
15	10,8
PROMEDIO	11,11
DES. ESTANDAR	0,38
COEF. VARIACIÓN	3,43%

Fuente: Propia.

8.5. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MURO A ESCALA

8.5.1. Dimensionamiento del muro de contención a escala

Después de realizar los ensayos de granulometría, Proctor y corte directo se procedió a dimensionar el muro de contención a escala de acuerdo con la siguiente secuencia:

- ✓ Utilizando los valores promedio del peso específico y ángulo de fricción interna obtenidos en los ensayos de corte directo para la arena escogida en este proyecto de grado, se calcularon las fuerzas horizontales y verticales y los factores de seguridad por volteo y deslizamiento por medio del método de Rankine. Vale la pena aclarar que el peso específico y el ángulo de fricción interna se ajustaron después de realizados los ensayos en el muro de reacción sobre el modelo a escala, esto con el fin de evaluar los factores de seguridad en el momento de la falla. La tabla 9 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 9. Resultados de ensayos de corte directo.

ENSAYOS DE CORTE DIRECTO				
ENSAYO	1	2	3	PROMEDIO
γ (KN/m ³)	19,89	18,41	18,21	18,84
Θ Angulo de fricción interna	38,68	37,54	38,55	38,26
HUMEDAD %	10,41	11,17	11,04	10,87

Fuente: Propia.

- ✓ Una vez definidas las propiedades del relleno y suelo de fundación, se determinó que el ángulo de fricción suelo – muro sería estimado como las dos terceras partes del ángulo de fricción interna (Terzaghi sugiere tomar entre la mitad y las dos terceras partes).
- ✓ Finalmente, se probaron diferentes dimensiones para el muro a escala y se escogieron aquellas que produjeran un muro mucho más estable al volteo que al deslizamiento, ya que precisamente se buscó provocar una falla por deslizamiento, todo esto con el fin de evitar daños estructurales en el modelo y poder utilizarlo varias veces. Las dimensiones del muro a escala seleccionado se pueden observar en la figura 10.

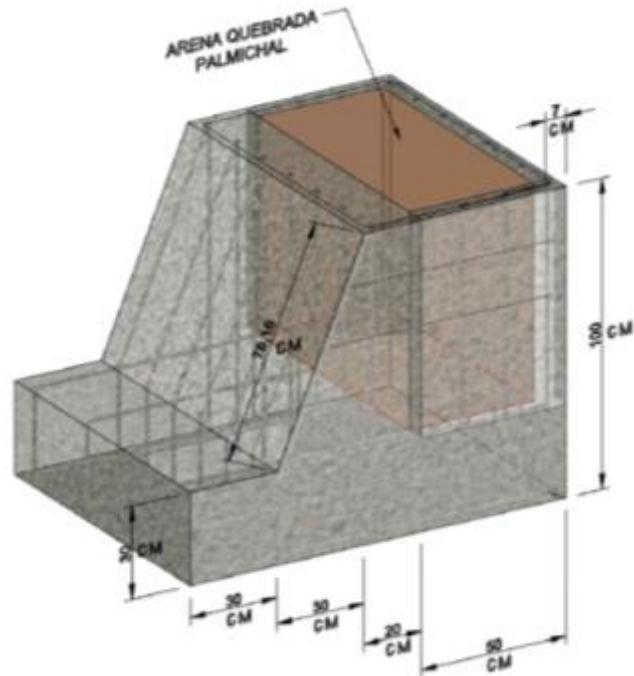


Figura 14. Dimensiones.
Fuente. Propia

8.5.2. Diseño estructural del muro de contención a escala

Se estimó el momento aplicado sobre el muro de contención para realizar el diseño estructural del mismo, este fue calculado como:

$$M_u = P * h$$

Ecuación 5. Momento aplicado.

Donde

P: Fuerza teórica estimada que genera fallo al deslizamiento al muro

h: Distancia de aplicación de la fuerza medida desde la base del muro

$$P = 11.56 \text{ kN}$$

$$h = 0.33 \text{ m}$$

$$M_u = 11.56 \times 0.33$$

$$M_u = 3.85 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

A partir del término k se procedió a calcular la cuantía de la siguiente manera:

$$K = \frac{M_u}{\phi b d^2}$$

Ecuación 6. Cuantía.

Donde

ϕ : Factor de reducción de resistencia

b: Ancho del muro

d: Espesor o altura efectiva del muro medida en la base

$$\phi = 0.9$$

$$b = 1.0 \text{ m}$$

$$d = 0.415 \text{ m}$$

$$K = \frac{3.85}{0.9 * 1.0 * 0.415^2}$$

$$K = 24.83 \text{ Kpa}$$

Luego, se calcula la cuantía requerida

$$0.59 \frac{f_y^2}{f_c} \rho^2 - f_y \rho + \frac{K}{1000} = 0$$

Ecuación 7. Cuantía requerida.

Dónde:

f_y : resistencia nominal a la fluencia en el acero de refuerzo

f_c : resistencia nominal del concreto a la compresión

ρ : Cuantía del refuerzo

Se resuelve la formula anterior y se obtiene

$$F_y = 420 \text{ MPa}$$

$$f'_c = 21 \text{ MPa}$$

$$0.59 \frac{420^2}{21} \rho^2 - 420 \rho + \frac{24.83}{1000} = 0$$

$$\rho = 0.000005$$

La norma NSR-10 en el titulo c, capítulo 7 incisos 12.2 estipula que la cuantía mínima debe ser 0.0018 y la obtenida en este trabajo de grado es menor a la requerida, entonces se calcula el área de refuerzo A_s a partir de la cuantía mínima dada por la norma.

$$A_s (\text{cm}^2) = \rho \min b d$$

Ecuación 8. Área de refuerzo.

$$\rho_{\min} = 0.0018$$

$$b = 100 \text{ cm}$$

$$d = 41 \text{ cm}$$

$$A_s = 0.0018 * 100 * 41$$

$$A_s = 7.38 \text{ cm}^2$$

El cálculo de refuerzo a flexión se logra mediante la relación entre el área de refuerzo requerida y el área transversal de la barra, para el caso de este proyecto se asumió barras de hacer con diámetro de ½ de pulgada.

$$\text{Ref} = \frac{A_s}{A_b}$$

Ecuación 9. Refuerzo a flexión.

$$A_b = 1.29 \text{ cm}^2$$

$$\text{Ref} = \frac{7,38}{1.29}$$

$$\text{Ref} = 5.72 \approx 6 \text{ barras}$$

Para la profundidad del cuerpo del muro se realiza la separación entre varillas, se descuenta el recubrimiento que en este caso fue de 5 cm.

$$\text{Sep} = \frac{L}{\text{Ref}-1}$$

Ecuación 10. Separación entre varillas.

L (cm): Longitud de repartición

$$L = 90 \text{ cm}$$

$$\text{Sep} = \frac{90}{6-1}$$

$$\text{Sep} = 18 \text{ cm}$$

Así que, la disposición final del refuerzo a flexión fue:

$$\#4 @ 18 \text{ cm}$$

El refuerzo de retracción de fraguado y temperatura se calculó de la misma manera.

Para la base del muro también se utilizó la cuantía mínima.

El área de refuerzo requerida A_s se calculó como:

$$A_s (\text{cm}^2) = \rho_{\min} b * d$$

b: Ancho de la base del muro

d: Altura de la base del muro

$$\rho_{\min} = 0.0018$$

$$b = 130 \text{ cm}$$

$$d = 30 \text{ cm}$$

$$A_s = 0.0018 * 130 * 30$$

$$A_s = 7.02 \text{ cm}^2$$

Como se mencionó anteriormente, para determinar la alternativa de refuerzo a flexión es calculada mediante la relación entre el área de refuerzo requerida y el área transversal de la barra, para el caso de este proyecto se asumió como barras de hacer de diámetro ½ de pulgada.

$$\text{Ref} = \frac{A_s}{Ab}$$

$$Ab = 1.29 \text{ cm}^2$$

$$\text{Ref} = \frac{7.02}{1.29}$$

$$\text{Ref} = 5.44 \approx 6 \text{ Varrilas}$$

Para el ancho de la base del muro, se realiza la separación entre varillas descontando un recubrimiento de 5 cm.

$$\text{Sep} = \frac{L}{\text{Ref}-1}$$

L (cm): Longitud de repartición.

$$L = 120 \text{ cm}$$

$$\text{Sep} = \frac{120}{6-1}$$

$$\text{Sep} = 24$$

Por lo tanto, el refuerzo queda como:

$$\#4 @ 24 \text{ cm}$$

Refuerzo de retracción y fraguado de la base del muro

Calculamos el área de refuerzo longitudinal A_s como:

$$A_s (\text{cm}^2) = \rho_{\min} b * d$$

$$\rho_{\min} = 0.0018$$

$$b = 100 \text{ cm}$$

$$d = 30 \text{ cm}$$

$$A_s = 0.0018 * 100 * 30$$

$$A_s = 5.4 \text{ cm}^2$$

En este caso también se asumió barras de hacer de diámetro ½ de pulgada.

$$\text{Ref} = \frac{A_s}{A_b}$$

$$A_b = 1.29 \text{ cm}^2$$

$$\text{Ref} = \frac{5.4}{1.29}$$

$$\text{Ref} = 4.19 \approx 5 \text{ barras}$$

La separación entre varillas se realiza para la profundidad de la base del muro y también se descuenta un recubrimiento de 5 cm.

$$\text{Sep} = \frac{L}{\text{Ref}-1}$$

L (cm): Longitud de repartición.

$$L = 90 \text{ cm}$$

$$\text{Sep} = \frac{90}{5-1}$$

$$\text{Sep} = 22.5 \approx 23 \text{ cm}$$

El refuerzo queda:

$$\#4 @ 23 \text{ cm}$$

Además, se construyó una pantalla de concreto reforzado la cual se consideró con una cuantía mínima porque las cargas generadas sobre la misma eran muy bajas. El objetivo de construir dicha pantalla era almacenar el suelo y simular las condiciones reales de un muro. Ésta se extendió sobre el perímetro del talón del muro considerando un espesor de 7 cm. Como se observa en las figuras 11 y 12.

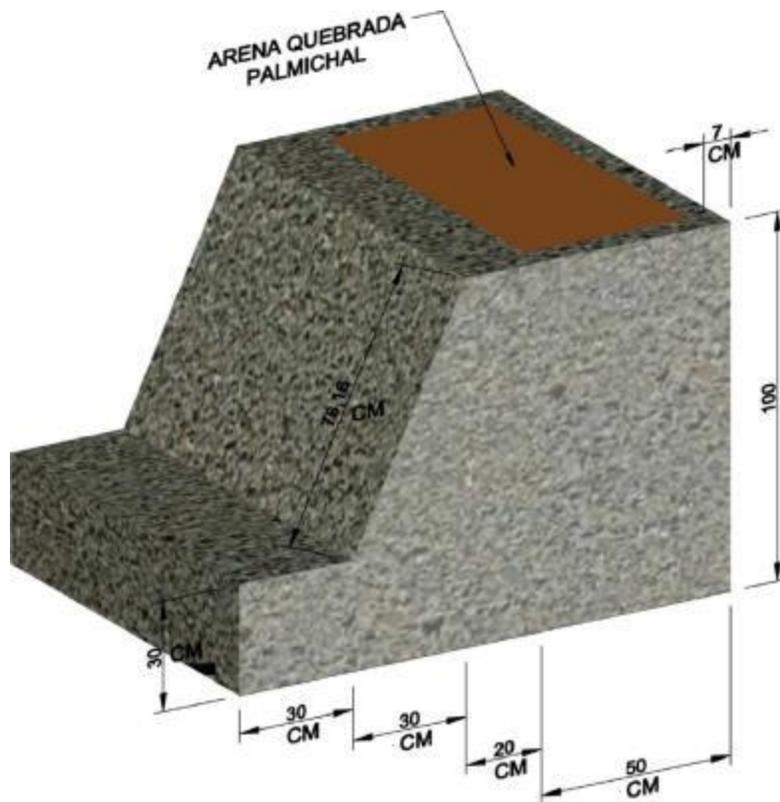


Figura 15. Modelo a escala.
Fuente. Propia

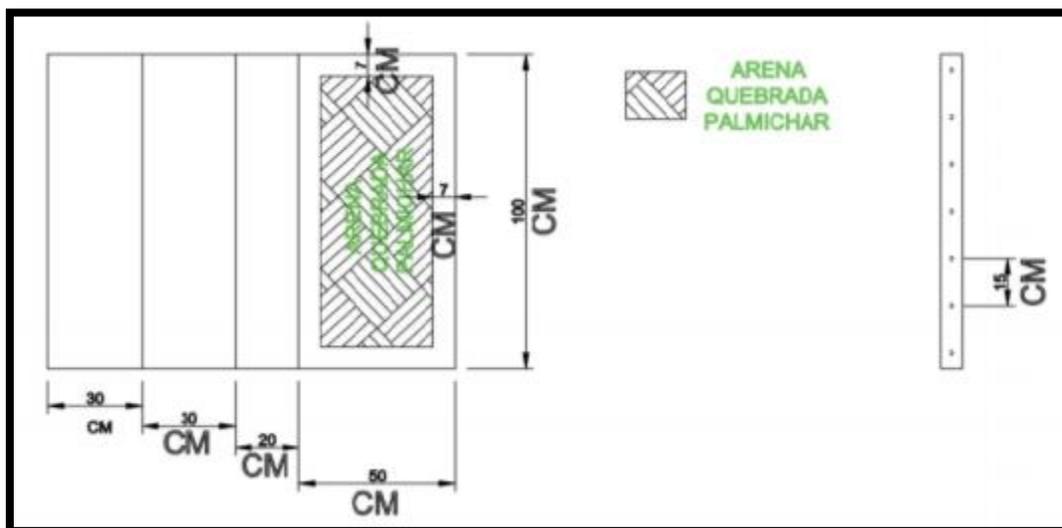


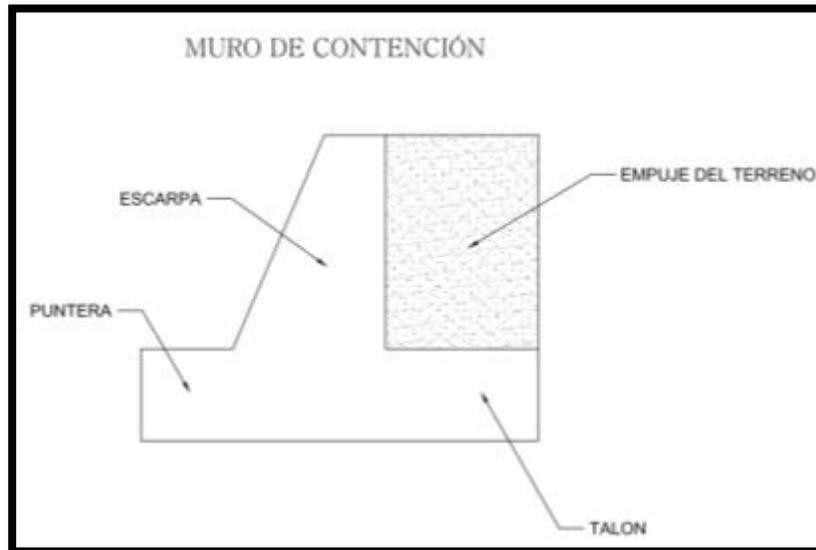
Figura 16. Vista superior del modelo a escala.
Fuente. Propia.

8.5.3. Proceso constructivo del muro de contención a escala

Para llevar a cabo la construcción del muro de contención a escala se realizó y se tuvo en cuenta una serie de procedimientos realizados en los laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga descritos a continuación.

- **Armado del acero estructural**

Como se indicó en el numeral 9.5.2 se utilizaron 14 varillas de $\frac{1}{2}$ " con una medida de 6 metros cada una, las cuales fueron cortadas con distintas dimensiones para el armado de las parrillas del talón, la punta, el acero estructural de la escarpa y flejes diseñados para un cajón de relleno al espaldar del muro.



*Figura 17. Muro de contención.
Fuente. Propia*

- **Encofrado y fundida de la base (talón y punta)**

Para el encofrado se utilizó la formaleta del laboratorio de construcción de la Universidad Pontificia Bolivariana. El proceso de fundida del muro se llevó a cabo en dos etapas, primero se armó la formaleta de la base (talón – punta) y en seguida se vació el concreto en dicha formaleta. Cabe recalcar que el concreto fue preparado In situ siguiendo las especificaciones técnicas de la norma INV E-402-07 y utilizando un diseño de mezcla de 3000 psi de acuerdo con las tablas de dosificación proporcionadas por la revista y sitio web construdata“.



Figura 18. Encofrado y fundida de la base talón - punta.
Fuente. Propia.

- **Encofrado y fundida de la escarpa del muro**

Luego de esperar 7 días de la fundida de la base (talón – punta) para su respectivo curado, se colocaron las formaletas y tablas de madera medidas y cortadas de acuerdo a las dimensiones necesitadas para la inclinación de la escarpa del muro y para darle forma al cajón de confinamiento del relleno detrás del muro de contención, como se muestra en la figura 15, para lo cual el concreto fue preparado en In situ con la misma dosificación utilizada para la base.



Figura 19. Encofrado y fundida de la escarpa.
Fuente. Propia.

- **Desencofrado**

Finalmente se procedió a desencofrar el muro a los dos días de terminado el procedimiento de la fundida de la escarpa, dejándolo así curar durante un mes.



Figura 20. Muro a escala.

Fuente. Propia.

- **Compactación de suelo de fundación y relleno**

Después de desencofrado y curado el muro de contención, se procedió a compactar el suelo de fundación dentro de un cajón con medidas de 1.20 m. por 1.80 m., construido con formaletas metálicas y encima del suelo compactado se colocó el muro a escala. Finalmente se compactó el relleno atrás del muro. Tanto el suelo de fundación como de relleno fueron compactados con pisón.

Cabe aclarar que con el fin de establecer las propiedades físicas del suelo para recalcular factores de seguridad y hallar con más precisión el ángulo de fricción suelo – muro se tomaron muestras de corte directo después de realizados los ensayos al modelo a escala en el muro de reacción.



Figura 21. Compactación del suelo de fundación.
Fuente. Propia.



Figura 22. Compactación del suelo de relleno.
Fuente. Propia

8.6. ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO

En el momento de la construcción del muro se tomaron muestras con el fin de hacer un seguimiento a la evolución de la resistencia a la compresión del concreto fundido in situ. En total se tomaron 9 muestras, de las cuales tres se ensayaron a los 7 días, tres a los 14 días y tres a los 28 días. Los resultados de los ensayos realizados sobre dichas muestras se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados obtenidos del laboratorio.

RESISTENCIA A LA COMPRESION				
DIAS	MUESTRAS	RESISTENCIA		
		MPA	PSI	%
7	1	12,18	1766,56	58
	2	12,81	1857,64	61
	3	11,34	1644,73	54
14	1	17,85	2588,93	84
	2	18,06	2619,39	86
	3	16,38	2375,72	78
28	1	19,11	2771,69	91
	2	19,53	2803,58	93
	3	18,9	2741,22	90

Fuente: Propia.

8.7. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DEL ACERO

También se realizó un ensayo de resistencia a la tracción con un testigo que tenía las dimensiones apropiadas para dicha prueba, los resultados se pueden apreciar en la figura 19.

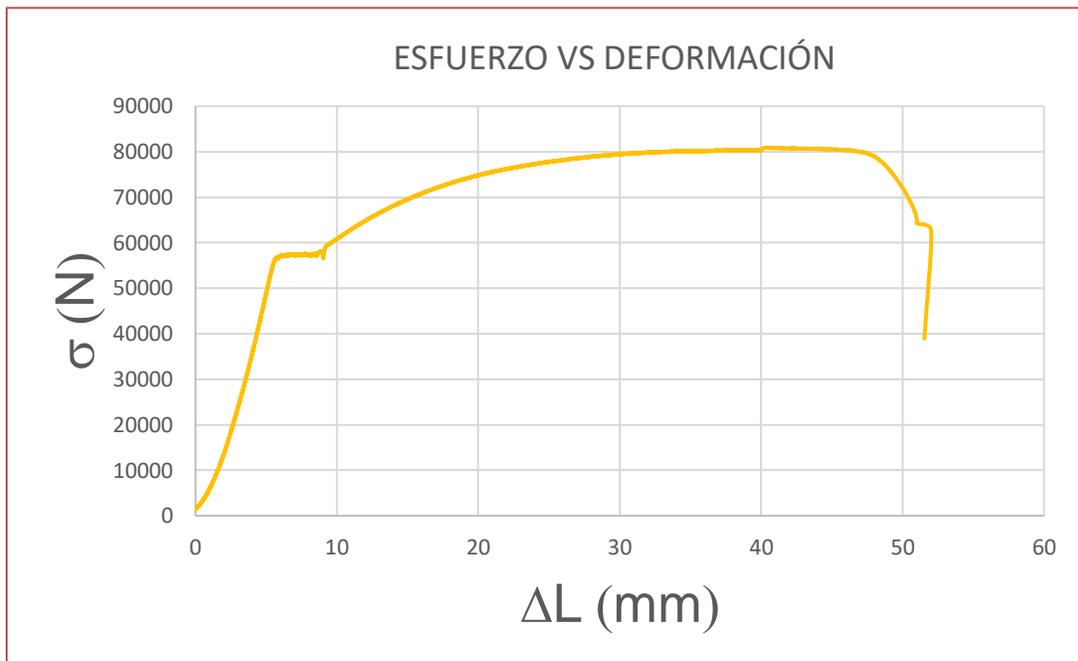


Figura 23. Grafica esfuerzo vs deformación del acero.
Fuente: Propia.

9. ANALISIS DE RESULTADOS

9.1. CLASIFICACIÓN DEL SUELO

Tal como se presentó en el capítulo 9 el material de la quebrada Palmichal, frente a la cafetería campestre tiene una cantidad de gravas del 10,94 %, de arenas del 87,13% y de finos del 1,93 %. Dado que la cantidad de material que queda retenida en el tamiz N° 200 es de 98,07 % (superior al 50 %), el suelo estudiado es un suelo grueso. Ya sabiendo que el suelo es grueso, se procede a determinar si este corresponde a una arena o una grava, en este caso se trata de una arena ya que la cantidad de la misma es muy superior a las de las gravas.

Como la arena objeto de estudio en el presente trabajo de grado contiene un porcentaje de finos inferior al 5, la arena según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelo será bien o mal gradada (SW o SP), para ello es necesario calcular los coeficientes de uniformidad y curvatura, si el coeficiente de uniformidad es superior a 6 y el coeficiente de curvatura está entre 1 y 3 la arena será bien gradada. Los coeficientes de uniformidad y curvatura (tal como se mencionó en el capítulo 7) se calculan con base en los diámetros efectivos D10, D30 y D60, los cuales se obtienen de la curva granulométrica.

Los valores de D10, D30 y D60 obtenidos en las curvas granulométricas de los tres ensayos realizados y los coeficientes de uniformidad y curvatura calculados a partir de ellos, se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Resultados de coeficiente de uniformidad (Cu) y curvatura (Cc).

ENSAYO	D10 (mm)	D30 (mm)	D60 (mm)	Cu	Cc
1	0,42	0,71	1,47	3,50	0,82
2	0,38	0,70	1,65	4,34	0,78
3	0,27	0,63	1,47	5,44	1,00
PROMEDIO	0,36	0,68	1,53	4,43	0,87

Fuente: Propia.

Como la arena estudiada no cumple con los requisitos de gradación mencionado atrás, está corresponde según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelo a una arena mal gradada (SP).

9.2. ENSAYOS DE COMPACTACIÓN

Después de clasificar el suelo, se realizaron los ensayos de compactación tipo Proctor siguiendo los lineamientos exigidos por la norma (INV-E-142 – 2013). Tal como se mencionó en el capítulo 9, se realizaron tres pruebas para las cuales el peso específico seco máximo promedio fue de 1.964 g/cm³ y la humedad óptima promedio fue de 10.43%.

Estos parámetros se usaron para preparar las muestras de los ensayos de corte directo, con los cuales se estimaron el peso específico y el ángulo de fricción interna de la arena, con el fin de dimensionar el muro a escala y de realizar el control de compactación del suelo de fundación de dicho muro.

9.3. ENSAYOS DE CORTE DIRECTO

La tabla 12 presenta algunas de las propiedades físicas promedio de la arena obtenida en los 6 ensayos de corte directo realizados. Las muestras denominadas tipo I se obtuvieron en los moldes de compactación para el ensayo Proctor modificado y fueron compactados con la humedad óptima. Las muestras denominadas tipo II fueron obtenidas del suelo de fundación compactado con la humedad óptima en el momento de realizar los ensayos sobre el modelo a escala en el laboratorio de estructuras.

Tabla 12. Resultados promedios de propiedades físicas.

PROPIEDADES	TIPO I	TIPO II
γ (KN/m ³)	18,84	16,72
Φ (°)	38,26	34,09
HUMEDAD %	10,87	10,07

Fuente: Propia.

En la tabla 12 puede observarse que la humedad en ambos casos corresponde a la misma ya que ese era el propósito. Pero también se puede apreciar que el peso específico es algo menor en las muestras tipo II, así como también el ángulo de fricción interna, lo cual se explica en que a pesar de tener la misma humedad, las muestras tipo I fueron compactadas en el laboratorio utilizando los moldes y martillos correspondientes al ensayo Proctor modificado, mientras que las muestras tipo II se obtuvieron del suelo de fundación compactado en laboratorio de estructuras con pisón en el momento de realizar los ensayos sobre el muro a escala,

es decir que a las muestras tipo I se les aplicó una mayor energía de compactación que a las muestras tipo II.

9.4. ENSAYO SOBRE EL MURO A ESCALA

La tabla 13 presenta los valores obtenidos del ángulo de fricción suelo – muro correspondiente a cada uno de los ensayos, así como también su valor promedio, dicho ángulo se estimó de la siguiente manera.

$$\delta = \text{TAN}^{-1} \left(\frac{\text{CARGA}}{N} \right)$$

Ecuación 11. *Ángulo de fricción.*

Dónde:

CARGA: Fuerza que produce el desplazamiento del muro.

N: Suma de fuerzas verticales.

Esta ecuación se utilizó debido a que además de tratarse de un suelo puramente friccionante, el muro ensayado no estaba sometido a un empuje pasivo.

Tabla 13. *Resultados ensayos de Empuje.*

ENSAYOS	CARGA MAX (KN)	δ	θ	K
1	11,7	28,38	34,09	0,83
2	11,2	27,34	34,09	0,80
3	11,2	27,34	34,09	0,80
4	11,7	28,38	34,09	0,83
5	11	26,92	34,09	0,79
6	10,9	26,71	34,09	0,78
7	11	26,92	34,09	0,79
8	11,1	27,13	34,09	0,80
9	10,8	26,50	34,09	0,78
10	11,5	27,97	34,09	0,82
11	10,5	25,86	34,09	0,76
12	11,4	27,76	34,09	0,81
13	11,4	27,76	34,09	0,81
14	10,5	25,86	34,09	0,76
15	10,8	26,50	34,09	0,78
PROMEDIO	11,11	27,16	34,09	0,80
DES. ESTANDAR	0,38	0,80	0,00	0,02
COEF. VARIACIÓN	3,43%	2,94%	0,00%	2,94%

Fuente: Propia.

La tabla 13 también muestra el valor de K, el cual corresponde a la relación entre el ángulo de fricción suelo – muro y al ángulo de fricción interna de la arena usada como suelo de fundación. Además, muestra que el ángulo de fricción suelo – muro (δ) para la arena usada y el muro diseñado en el presente trabajo de grado, varía entre el 76 % y el 83% del valor del ángulo de fricción interna (ϕ)

Los valores sugeridos por Terzaghi para el ángulo de fricción suelo – muro pueden variar entre el 50% y el 66% del ángulo de fricción interna. En investigaciones similares a las del presente trabajo de grado realizado por Ginna Ivonne Montoya Suarez en la Universidad Pontificia Javeriana en Bogotá D.C. se encontraron resultados por fuera del rango sugerido por Terzaghi, pero similares a los del presente trabajo de grado.

9.5. COMPARACIÓN DEL EMPUJE ACTIVO TEÓRICO Y REAL

9.5.1. Calculo del empuje activo teórico

Utilizando las propiedades físicas del suelo estudiado ($\gamma=16.72 \text{ kN/m}^3$ y $\phi=34.09^\circ$), obtenidas sobre muestras recuperadas después de los ensayos sobre el muro a escala en el laboratorio de estructuras; se estimó el empuje máximo con el cual el modelo debería fallar por deslizamiento. Se aclara que se usó el método de Rankine para calcular el empuje activo y además como ángulo de fricción suelo – muro (δ) se utilizó dos tercios del ángulo de fricción interna (ϕ).

De acuerdo con estas condiciones el muro debería haber fallado por deslizamiento con una fuerza horizontal de 9 kN y en ese momento el factor de seguridad por volteo tendría que ser de 5.47.

9.5.2. Empuje activo real

Con las propiedades físicas del suelo estudiado después de la ejecución de los ensayos del modelo a escala en el muro de reacción se obtuvo (como ya se mostró atrás) una fuerza horizontal máxima de 11.11 kN que produjo el deslizamiento del muro.

Con estas propiedades físicas del suelo y la fuerza horizontal máxima obtenida, se estimó que el valor de K promedio es de 0.80 y el factor de seguridad por volteo en el momento en el que fallo el muro fue de 4.48.

Los resultados obtenidos muestran que los valores sugeridos por Terzaghi para K son algo conservadores (por lo menos para el suelo estudiado), ya que la fuerza horizontal que provocó la falla fue 2.11 kN superior a la obtenida siguiendo la recomendación de Terzaghi.

CONCLUSIONES

- Una vez obtenidos los resultados de los ensayos de granulometría se determinó que el suelo estudiado pertenece a una arena mal gradada con porcentajes de finos inferiores al 5%, dicha arena no cumplió con los requisitos de gradación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelo. La idea de escoger una arena con muy bajo contenido de finos se soporta en que se deseaba que la única fuerza que contrarreste el deslizamiento fuera aportada por la fricción, para garantizar esto, además no se aplicó un empuje pasivo sobre el modelo a escala.
- Para dimensionar el muro de contención a escala, se hizo necesario primero determinar la humedad óptima y el peso específico seco máximo del suelo de fundación por medio de ensayos Proctor modificado obteniendo los siguientes valores: humedad óptima promedio de 10.93% y peso específico seco máximo de 1.967 g/cm³. Una vez determinados estos parámetros, se prepararon muestras compactadas en esas condiciones con el fin de obtener mediante pruebas de corte directo el ángulo de fricción interna y el peso específico de la arena de la quebrada Palmichal usada como suelo de fundación, el ángulo de fricción interna promedio fue de 38.26° y el peso específico de 18.84 kN/m³. Con estos dos valores se dimensionó y diseñó un muro de contención a escala con una estabilidad al volteo alta en el momento de la falla por deslizamiento, sin sufrir daños estructurales.
- Ya que de antemano se sabía que la energía de compactación aplicada sobre el suelo de fundación iba a ser diferente a la aplicada en ensayos tipo Proctor y por lo tanto la densidad y ángulo de fricción no serían iguales, se decidió tomar muestras del suelo de fundación en el momento de realizar las pruebas sobre el modelo a escala en el muro de reacción. Con estas muestras nuevamente se realizaron ensayos de corte directo obteniendo un ángulo de fricción interna promedio de 34.69° y un peso específico de 16.72 kN/m³, con estos valores se estimaron el ángulo de fricción interna suelo – muro (δ) y se recalculó el empuje activo teórico con el cual debió fallar el muro para compararlo con el real.
- Por medio la teoría de Rankine y usando un ángulo de fricción suelo – muro igual a las dos terceras partes del ángulo de fricción interna de la arena (el cual está dentro de los límites sugeridos por Terzaghi), se estimó que el modelo a escala debería fallar por deslizamiento con una fuerza horizontal de 9 kN. Al realizar las pruebas sobre dicho modelo en el muro de reacción

se obtuvo una fuerza horizontal promedio máxima de 11.11 kN, es decir, que el modelo falló por deslizamiento con una fuerza horizontal 2.11 kN superior a la inicialmente calculada. De esto se puede concluir que los valores del ángulo de fricción suelo – muro sugeridos por Terzaghi son algo conservadores.

- Definiendo el parámetro K como la relación entre ángulo de fricción suelo – muro (δ) y el ángulo de fricción interna de la arena (ϕ), en el presente trabajo se obtuvo una variación de dicho parámetro entre 0.76 y 0.83, es decir que el ángulo de fricción suelo muro varía entre el 76% y el 83% del ángulo de fricción interna de la arena estudiada. El rango de variación de δ sugerido por Terzaghi está entre un 50% y un 66% de ϕ . Es decir que los valores del rango de variación de δ obtenidos en el presente trabajo son algo superiores a los del rango de Terzaghi, sin embargo, son parecidos a los de trabajos similares realizados en otras universidades, por lo tanto, se concluye que el rango de variación de K propuesto por Terzaghi es algo conservador.
- En el momento de dimensionar el muro de contención a escala se usaron valores de la densidad y el ángulo de fricción interna obtenida en ensayos de corte directo, cuyas muestras se tomaron de moldes tipo Proctor modificado compactadas con la humedad óptima. En estas condiciones se estimó que en el momento de la falla por deslizamiento el factor de seguridad por volteo debería ser de 5.47. Como ya se ha mencionado varias veces en este informe, se tomaron muestras del suelo de fundación con las cuales se realizaron nuevas pruebas de corte directo y a partir de ellas se estimaron el ángulo de fricción interna y la densidad de la arena, con estos parámetros ajustados se obtuvo un factor de seguridad por volteo de 4.48 al momento de la falla. Lo anterior permite concluir que el muro diseñado estuvo siempre lejos de fallar por volteo y fallar estructuralmente.
- Mediante la ejecución de los ensayos del modelo a escala en el muro de reacción, se pudo determinar qué, entre mejor compactación tenga el suelo de fundación más alta es la fuerza ejercida por el actuador.

RECOMENDACIONES

- Para garantizar que los parámetros del suelo de fundación sean similares a los obtenidos por medio de muestras compactadas con la humedad óptima y el peso específico seco máximo, se sugiere que, para próximos trabajos similares, el suelo de fundación se compacte con un vibro compactador mecánico que suministre una energía de compactación cercana a la usada en ensayos tipo Proctor
- Cuando se trabaje con suelos arenosos con muy bajo contenido de finos (o nulo) se recomienda que, para obtener los parámetros de resistencia por medio de ensayos de corte directo, dichas pruebas se realicen inmediatamente después de terminar la compactación del material en los moldes tipo Proctor. Lo anterior se sugiere debido a la alta permeabilidad de los suelos gruesos.
- Si se van a realizar varias pruebas sobre estructuras cimentadas sobre suelos arenosos con pocos finos y compactadas con la humedad óptima, es importante revisar constantemente el contenido de agua después de cada prueba ya que este va a disminuir debido a la alta permeabilidad del material grueso.
- Se recomienda emplear otros tipos de suelo (por ejemplo, arcillas) para determinar cómo puede variar el ángulo de fricción suelo – muro con respecto al ángulo de fricción interna, ya que, en el presente proyecto de grado, la relación entre δ y ϕ es algo superior a la establecida por Terzaghi.
- Para futuros proyectos de grado se recomienda hacer variaciones a la geometría del muro, por ejemplo, construirlo con la espalda inclinada, además debería modificarse la inclinación del relleno.

BIBLIOGRAFÍA

- Estupiñán Erika & Sánchez María del Pilar. (2016). *Influencia de la cohesión en el dimensionamiento de muros de contención cimentados sobre arena arcillosa*. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Montoya Ginna (2013). *Parámetros de resistencia al corte en la interfaz suelo concreto*. Bogotá: Universidad Pontificia Javeriana.
- O'NEAL, TS; HAGERTY, D. *Earth pressures in confined cohesionless backfill against tall rigid walls - a case history*. *Canadian Geotechnical Journal*. 48, 8, 1188-1197, Aug. 2011. ISSN: 00083674.
- Pineda Jorge & Colmenares Julio (2011). *Peak and residual shear strength parameters of soft clay-concrete interfaces*. La Salle University, Bogota, Colombia & National University of Colombia, Bogotá, Colombia.
- Solano, Carroll (2014). *Influencia de la cohesión en el dimensionamiento de muros de contención cimentados sobre limos inorgánicos de baja compresibilidad*. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Debashis Moitra, 2017. *Geotechnical Engineering: Universities press*.
- Berry, P. (1998). *Mécanica de suelos*. Mc Grow Hill .
- Bowles, J. (1978). *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*. Bog: Mc Graw Hill.
- Bowles, J. (1997). Mc Graw Hill.
- Bowles, J. (1997). *Foundation analysis and design*. Mc Grow Hill.
- Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. México: Limusa.
- Das, B. (2012). *Principios de ingeniería de cimentaciones*. Cengage Learning Editores, S.A.
- Das, B. M. (2016). *Fundamentos de ingeniería de fundaciones* . México: Cengage Learning .
- Juarez Badillo, E. (2005). *Mécanica de suelos*. Mexico: Limusa.
- Moreno, D. &. (2012). *Mejoramiento del ángulo de fricción interna en arenas arcillosas mediante la adición de geotextil tejido T-2400*. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana.

ANEXOS

ANEXO A
REGISTRO FOTOGRÁFICO.

Ensayos de la arena de la quebrada Palmichal



Ensayos de granulometría.



Ensayos de Compactación.



Ensayos de corte directo.

Construcción del muro a escala



Armado del acero.



Preparación de la mezcla.



Armado formaleta de la base.



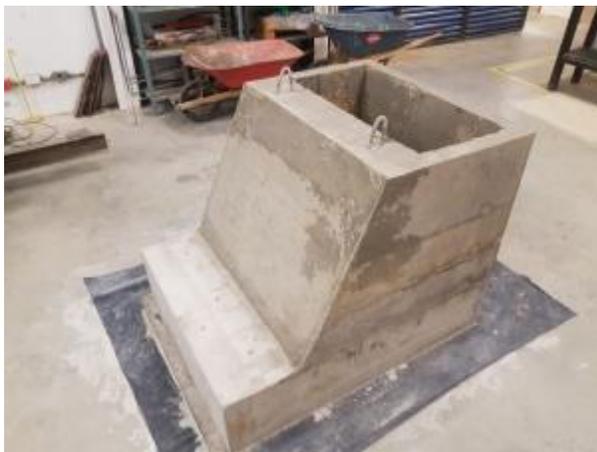
Fundida de la base.



Armado formaleta de la escarpa.



Fundida de la escarpa.



Muro a escala.

Ensayos sobre el muro de reacción



Armado formaleta para el suelo de fundación.



Compactación del suelo de fundación.



Compactación del suelo de relleno.



Montaje del muro sobre el suelo de fundación.



Ensayos en el muro de reacción.



Elaboración de cilindros en concreto.



Cilindros en curado.



Ensayos de compresión.



Ensayos de tracción del acero.

ANEXO B

**ENSAYOS DE GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO CON
LAVADO POR LA MALLA N° 200.**

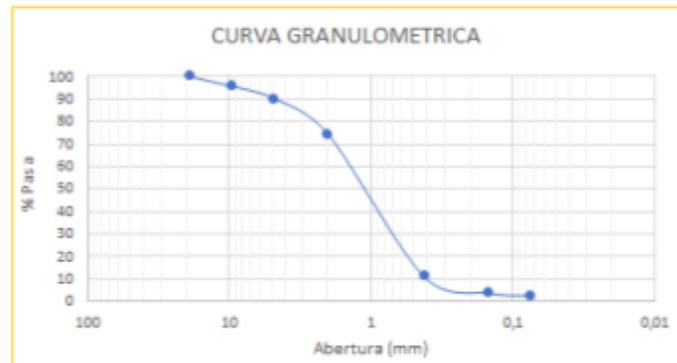
Muestra 1.

MUESTRA 1.				
Peso seco antes del lavado	1882,44 gr			
Peso seco después del lavado	1845,46 gr			
MALLA	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO PARCIAL	% PASA
No	(mm)	(g)		
3/4"	19,05	10,2	0,54	100
3/8"	9,52	81,3	4,32	95,68
No 4	4,75	105,39	5,60	90,08
10	2	295,67	15,71	74,38
40	0,42	1191,96	63,32	11,06
100	0,149	137,32	7,29	3,76
200	0,074	22,71	1,21	2,55
FONDO	-----	37,89	2,01	0,54
	$\Sigma=$	1882,44		

GRAVAS:	9,92	%
ARENAS:	88,07	%
FINOS:	2,01	%

D60=	1,47	mm
D30=	0,71	mm
D10=	0,42	mm

Cu=	3,50
Cc=	0,82



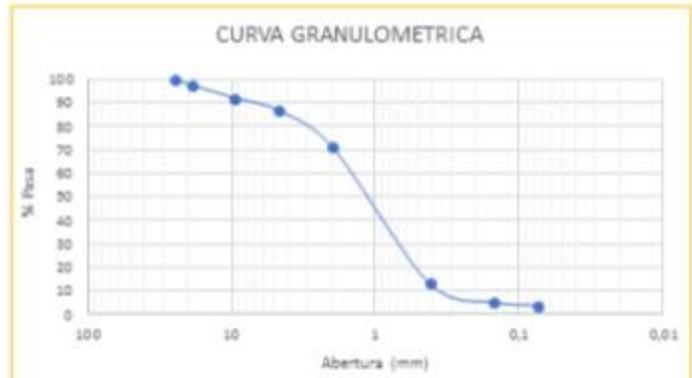
Muestra 2.

MUESTRA 2.				
Peso seco antes del lavado	1888,01	gr		
Peso seco después del lavado	1852,44	gr		
MALLA	ABERTURA	PESO RETENIDO	% RETENIDO	%
No	(mm)	(g)	PARCIAL	PASA
1"	25	37,12	1,97	100
3/4"	19,05	45,62	2,42	97,58
3/8"	9,52	103,51	5,48	92,10
No 4	4,75	100,72	5,33	86,77
10	2	290,38	15,38	71,39
40	0,42	1101,83	58,36	13,03
100	0,149	150,56	7,97	5,05
200	0,074	22,1	1,17	3,88
FONDO	-----	36,17	1,92	1,97
	$\Sigma=$	1888,01		

GRAVAS:	13,23	%
ARENAS:	84,85	%
FINOS:	1,92	%

D60 _a	1,65	mm
D30 _a	0,7	mm
D10 _a	0,38	mm

C _u	4,34
C _c	0,78



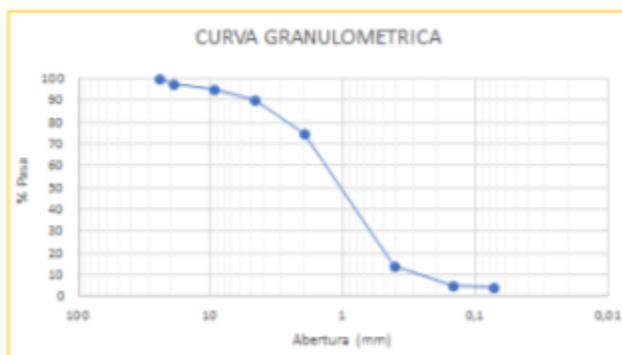
Muestra 3.

MUESTRA 3.				
Peso seco antes del lavado	1883,35	gr		
Peso seco después del lavado	1849,1	gr		
MALLA	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO PARCIAL	% PASA
No				
1"	25	42,8		100
3/4"	19,05	44,68	2,37	97,63
3/8"	9,52	52,1	2,77	94,86
No 4	4,75	85,44	4,54	90,32
10	2	297,38	15,79	74,53
40	0,42	1133,08	60,16	14,37
100	0,149	171,55	9,11	5,26
200	0,074	21,53	1,14	4,12
FONDO	-----	34,79	1,85	2,27
	$\Sigma=$	1883,35		

GRAVAS:	9,68	%
ARENAS:	88,48	%
FINOS:	1,85	%

D60=	1,47	mm
D30=	0,63	mm
D10=	0,27	mm

Cu=	5,44
Cc=	1,00



ANEXO C
ENSAYOS DE COMPACTACIÓN.

Diámetro molde (cm)= 15,25

Altura molde (cm)= 11,78

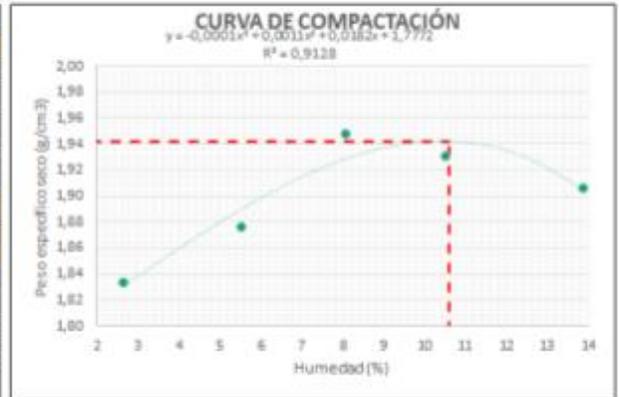
Peso molde (g)= 5870

Volumen molde (cm³) 2151,67

DETERMINACIÓN	1	2	3	4	5
Peso molde + suelo húmedo (g)	9920	10130	10400	10460	10540
Peso molde (g)	5870	5870	5870	5870	5870
Peso suelo húmedo (g)	4050	4260	4530	4590	4670
Peso específico húmedo (g/cm ³)	1,88	1,98	2,11	2,13	2,17
HUMEDAD					
Capsula No	46	52	178	1001	112
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	35,7	22,84	25,12	31,07	45,8
Peso cápsula + suelo seco (g)	34,95	22,01	23,87	28,77	41,08
Peso cápsula (g)	6,7	6,96	8,38	6,91	7,07
Peso agua (g)	0,75	0,83	1,25	2,3	4,72
Peso suelo seco (g)	28,25	15,05	15,49	21,86	34,01
Humedad (%)	2,65	5,51	8,07	10,52	13,88
PESO ESPECÍFICO SECO					
Peso específico seco (g/cm ³)	1,83	1,88	1,95	1,93	1,91

w_{opt} = 10,6 %

$\gamma_{d_{max}}$ = 1,942 g/cm³



Muestra 1.

Muestra 2.

Diámetro molde (cm)=	15,33
Altura molde (cm)=	11,73
Peso molde (g)=	5840

Volumen molde (cm³)= 2165,07

DETERMINACIÓN	1	3	5
Peso molde + suelo húmedo (g)	9940	10400	10540
Peso molde (g)	5840	5840	5840
Peso suelo húmedo (g)	4100	4560	4700
Peso específico húmedo (g/cm ³)	1,89	2,11	2,17
HUMEDAD			
Capsula No	5	169	176
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	52,16	53,65	73,56
Peso cápsula + suelo seco (g)	51,09	50,26	65,71
Peso cápsula (g)	6,85	6,79	6,45
Peso agua (g)	1,07	3,39	7,85
Peso suelo seco (g)	44,24	43,47	59,26
Humedad (%)	2,42	7,80	13,25
PESO ESPECÍFICO SECO			
Peso específico seco (g/cm ³)	1,85	1,95	1,92

w_{opt} =	10,8	%
$\gamma_{d_{max}}$ =	1,968	g/cm ³



Muestra 3.

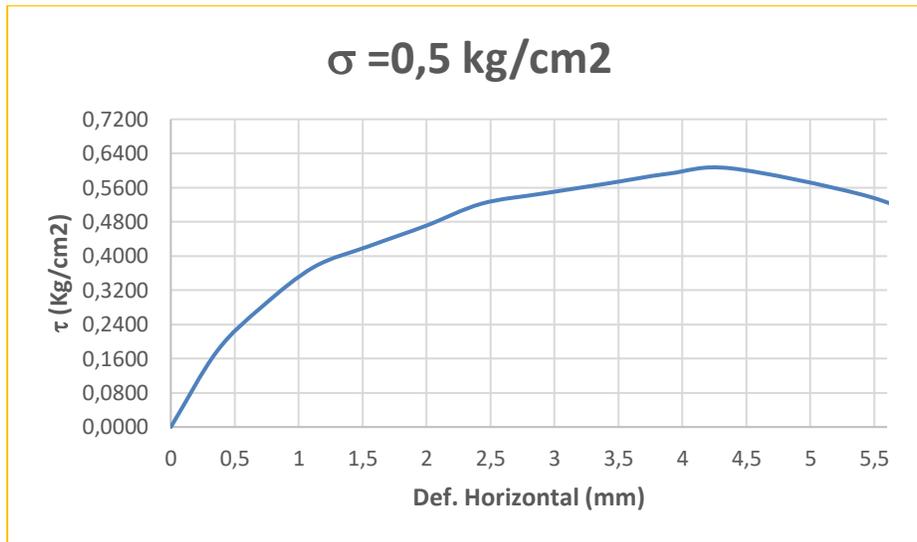
ANEXO D
ENSAYOS DE CORTE DIRECTO.

Muestras tomadas del suelo de fundación.

Datos iniciales			
Sondeo o Apique		Peso muestra + Molde (g)	252,6
Profundidad		Peso del molde (g)	133,8
# Muestra		Altura de la muestra (cm)	1,96
Área de la muestra (cm ²)	36	Vel. Ensayo (mm/min)	1
		σ (Kg/ cm ²)	0,5
Contenido de humedad			
Capsula No.		144	
Peso capsula (g)		21,1	
Peso suelo humedo + Capsula (g)		76,8	
Peso suelo seco + Capsula (g)		71,62	
Peso agua (g)		5,18	
Peso suelo seco (g)		50,52	
Humedad (%)		10,25	

CORTE 1.

Muestra 1.

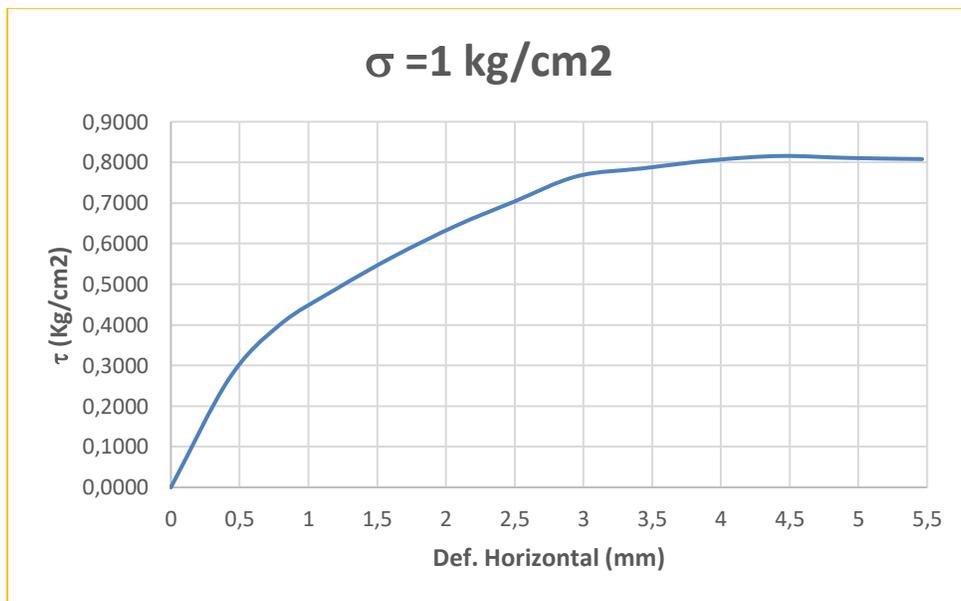


Datos iniciales			
Sondeo o Apique		Peso muestra + Molde (g)	262,8
Profundidad		Peso del molde (g)	143,8
# Muestra		Altura de la muestra (cm)	1,96

Tiempo (min)	Lectura de carga (N)	Def. Horizontal (mm)	τ (Kg/cm ²)	Lectura de carga en (kg-f)
0,0	0,00	0	0,0000	0,0000
0,5	62,60	0,361	0,1773	6,3834
1,0	99,50	0,714	0,2818	10,1461
1,5	132,30	1,121	0,3747	13,4908
2,0	149,40	1,549	0,4232	15,2345
2,5	166,40	1,999	0,4713	16,9680
3,0	184,50	2,43	0,5226	18,8137
3,5	192,90	2,911	0,5464	19,6702
4,0	200,90	3,398	0,5691	20,4860
4,5	209,30	3,894	0,5928	21,3426
5,0	213,70	4,377	0,6053	21,7912
5,5	192,20	5,393	0,5444	19,5988
6,0	171,50	5,933	0,4858	17,4880

Muestra 2.

Tiempo (min)	Lectura de carga (N)	Def. Horizontal (mm)	τ (Kg/cm ²)	Lectura de carga en (kg-f)
0	0	0	0,0000	0,0000
0,5	94,8	0,425	0,2685	9,6669
1	141,3	0,792	0,4002	14,4085
1,5	171,8	1,193	0,4866	17,5186
2	200,6	1,619	0,5682	20,4554
2,5	227,4	2,074	0,6441	23,1882
3	248,2	2,493	0,7030	25,3092
3,5	270,3	2,951	0,7656	27,5628
4	277,3	3,432	0,7855	28,2766
4,5	284,3	3,938	0,8053	28,9904
5	288	4,428	0,8158	29,3677
5,5	286,3	4,932	0,8110	29,1943
6	285,3	5,463	0,8081	29,0924

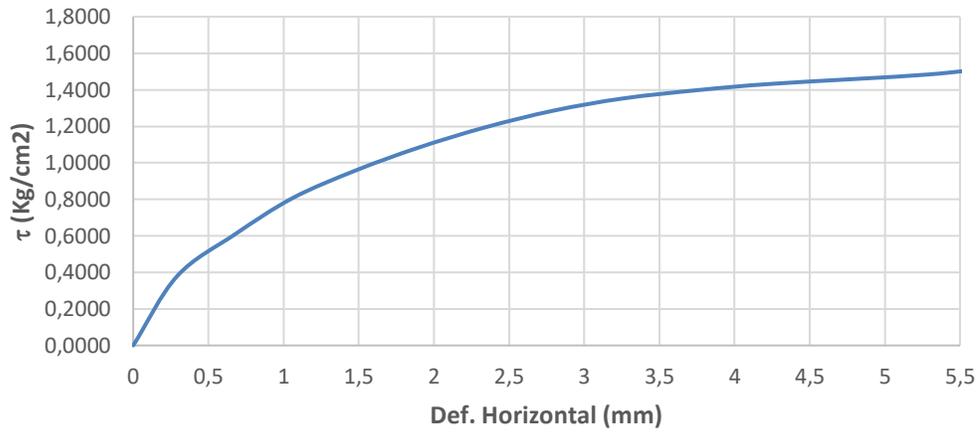


Muestra 3.

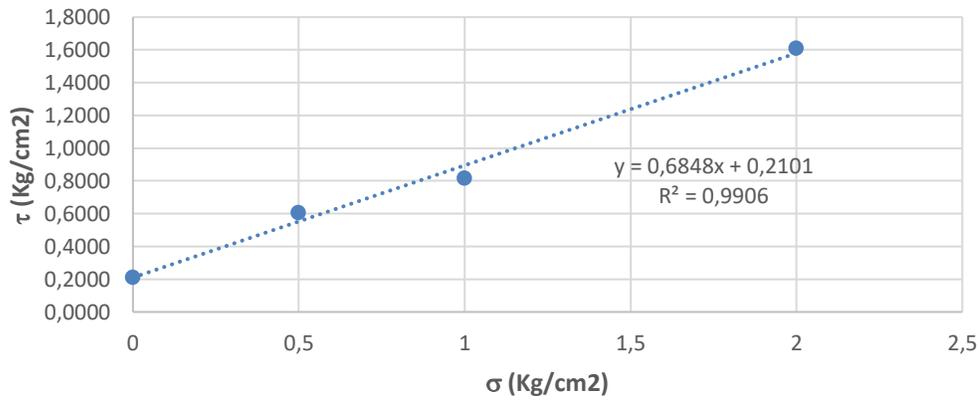
Datos iniciales			
Sondeo o Apique		Peso muestra + Molde (g)	255,3
Profundidad		Peso del molde (g)	141,2
# Muestra		Altura de la muestra (cm)	1,95
Área de la muestra (cm ²)	36	Vel. Ensayo (mm/min)	1
		σ (Kg/cm ²)	2
Contenido de humedad			
Capsula No.		734	
Peso capsula (g)		21	
Peso suelo humedo + Capsula (g)		70,1	
Peso suelo seco + Capsula (g)		65,62	
Peso agua (g)		4,48	
Peso suelo seco (g)		44,62	
Humedad (%)		10,04	

Tiempo (min)	Lectura de carga (N)	Def. Horizontal (mm)	τ (Kg/cm ²)	Lectura de carga en (kg-f)
0	0	0	0,0000	0,0000
0,5	134,3	0,293	0,3804	13,6947
1	214,3	0,674	0,6070	21,8524
1,5	284,7	1,059	0,8064	29,0312
2	338,2	1,479	0,9580	34,4866
2,5	382,5	1,898	1,0834	39,0039
3	421,6	2,341	1,1942	42,9910
3,5	454,1	2,799	1,2863	46,3051
4	477,6	3,26	1,3528	48,7014
4,5	494	3,77	1,3993	50,3737
5	506	4,26	1,4333	51,5974
5,5	523,8	5,286	1,4837	53,4125
6	539,9	5,782	1,5293	55,0542
6,5	554,3	6,294	1,5701	56,5226
7	565	6,823	1,6004	57,6137
7,5	567	7,354	1,6060	57,8176
8	563	7,91	1,5947	57,4097
8,5	558,8	8,476	1,5828	56,9815

$\sigma = 2 \text{ kg/cm}^2$



ENVOLVENTE DE FALLA
CORTE 1.



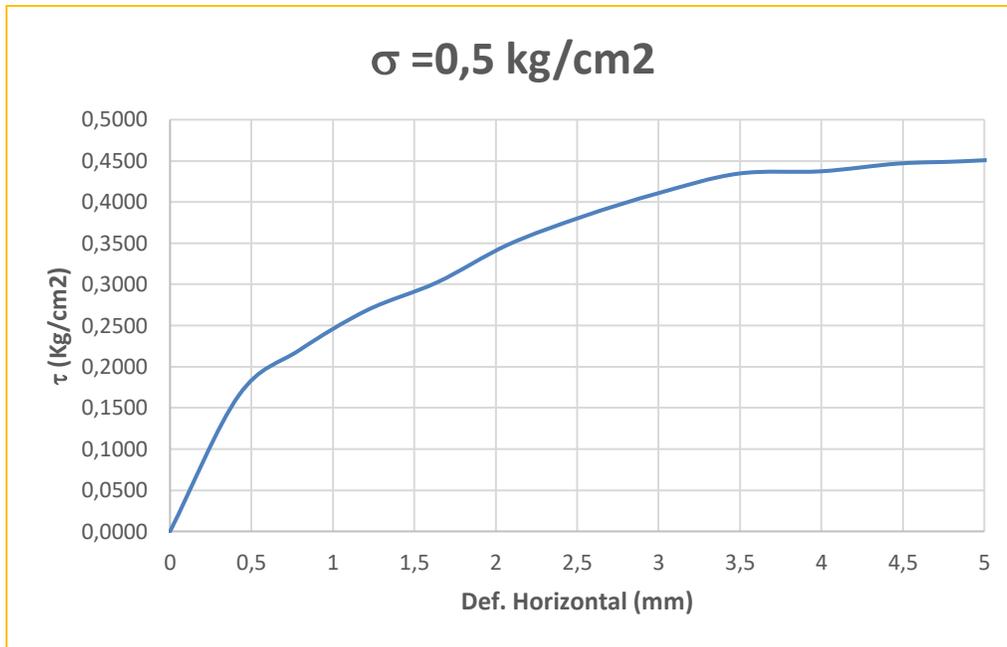
Pendiente	0,6848
Θ Angulo de fricción interna	34,403
C (Cohesión)	0,2101

CORTE 2.

Muestra 1.

Datos iniciales			
Sondeo o Apique		Peso muestra + Molde (g)	259,11
Profundidad		Peso del molde (g)	139,77
# Muestra		Altura de la muestra (cm)	1,97
Área de la muestra (cm ²)	36	Vel. Ensayo (mm/min)	1
		σ (Kg/cm ²)	0,5
Contenido de humedad			
Capsula No.		56	
Peso capsula (g)		26,7	
Peso suelo humedo + Capsula (g)		89,6	
Peso suelo seco + Capsula (g)		83,85	
Peso agua (g)		5,75	
Peso suelo seco (g)		57,15	
Humedad (%)		10,06	

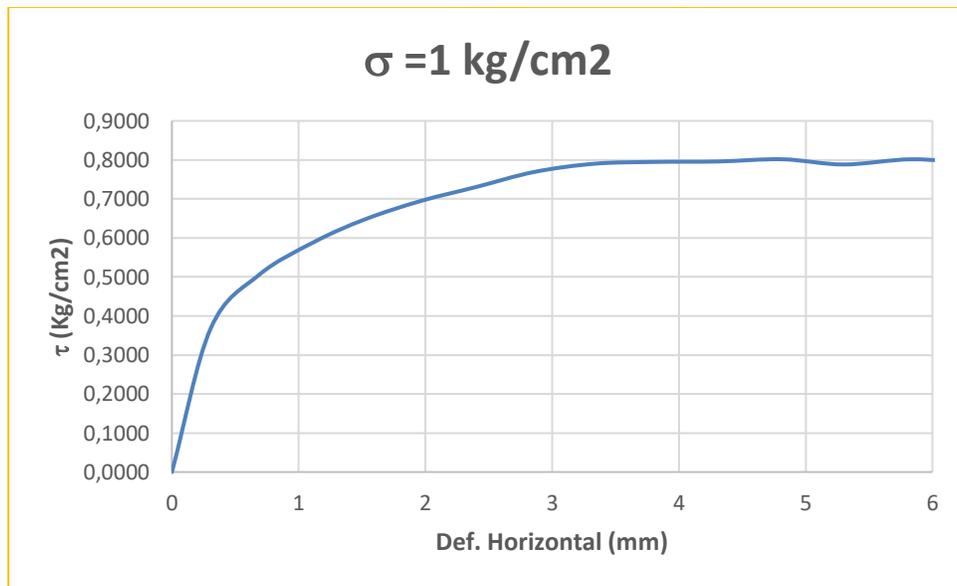
Tiempo (min)	Lectura de carga (N)	Def. Horizontal (mm)	τ (Kg/cm ²)	Lectura de carga en (kg-f)
0	0	0	0,0000	0,0000
0,5	58,3	0,422	0,1651	5,9449
1	77,7	0,794	0,2201	7,9232
1,5	94,8	1,209	0,2685	9,6669
2	106,8	1,641	0,3025	10,8905
2,5	122,9	2,075	0,3481	12,5322
3	135	2,535	0,3824	13,7661
3,5	145	2,998	0,4107	14,7858
4	153,4	3,49	0,4345	15,6424
4,5	154,4	4	0,4373	15,7443
5	157,7	4,472	0,4467	16,0808
5,5	158,7	4,874	0,4495	16,1828
6	160,7	5,36	0,4552	16,3868
6,5	164,1	5,88	0,4648	16,7335
7	164,4	6,399	0,4657	16,7640
7,5	165,1	6,922	0,4677	16,8354
8	161,1	7,413	0,4563	16,4275
8,5	150,4	8,036	0,4260	15,3365



Muestra 2.

Datos iniciales			
Sondeo o Apique		Peso muestra + Molde (g)	252,27
Profundidad		Peso del molde (g)	141,43
# Muestra		Altura de la muestra (cm)	1,95
Área de la muestra (cm ²)	36	Vel. Ensayo (mm/min)	1
		σ (Kg/ cm ²)	1
Contenido de humedad			
	Capsula No.	76	
	Peso capsula (g)	21,2	
	Peso suelo humedo + Capsula (g)	75,2	
	Peso suelo seco + Capsula (g)	69,9	
	Peso agua (g)	5,3	
	Peso suelo seco (g)	48,7	
	Humedad (%)	10,88	

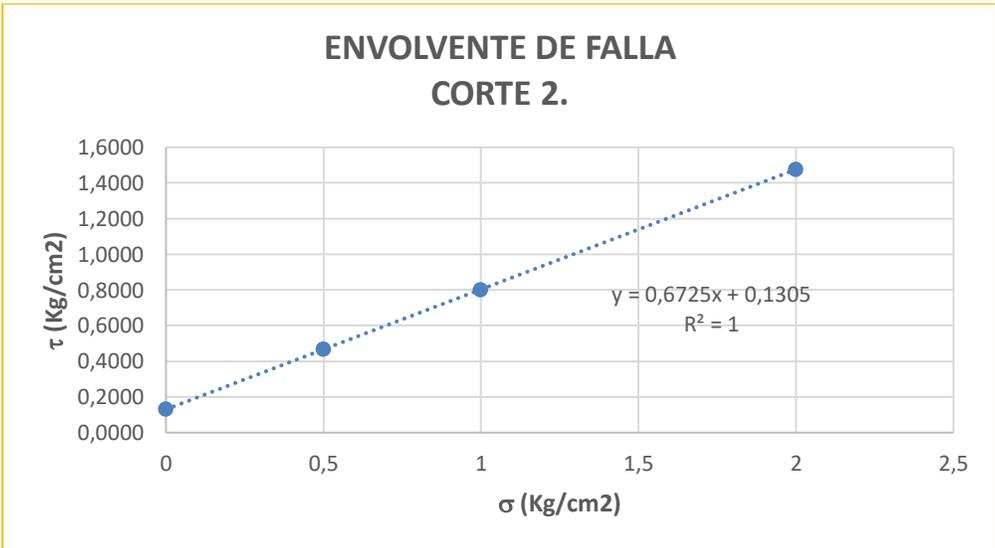
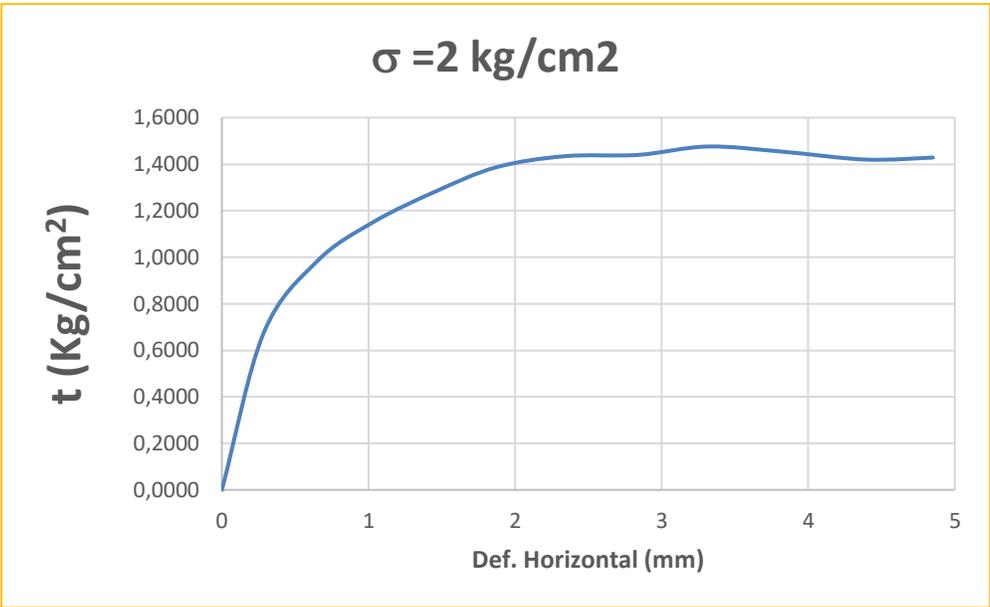
Tiempo (min)	Lectura de carga (N)	Def. Horizontal (mm)	τ (Kg/cm ²)	Lectura de carga en (kg-f)
0	0	0	0,0000	0,0000
0,5	129,9	0,306	0,3679	13,2460
1	178,5	0,689	0,5056	18,2018
1,5	208,4	1,126	0,5903	21,2508
2	228,7	1,524	0,6478	23,3208
2,5	245,1	1,959	0,6943	24,9931
3	257,9	2,4	0,7305	26,2983
3,5	271,6	2,862	0,7693	27,6954
4	279	3,339	0,7903	28,4499
4,5	280,6	3,814	0,7948	28,6131
5	281	4,31	0,7959	28,6539
5,5	283	4,817	0,8016	28,8578
6	278,3	5,3	0,7883	28,3786
6,5	283	5,84	0,8016	28,8578
7	279	6,36	0,7903	28,4499



Muestra 3.

Datos iniciales			
Sondeo o Apique		Peso muestra + Molde (g)	271,37
Profundidad		Peso del molde (g)	145,67
# Muestra		Altura de la muestra (cm)	1,95
Área de la muestra (cm ²)	36	Vel. Ensayo (mm/min)	1
		σ (Kg/ cm ²)	2
Contenido de humedad			
Capsula No.		140	
Peso capsula (g)		21	
Peso suelo humedo + Capsula (g)		67,8	
Peso suelo seco + Capsula (g)		63,3	
Peso agua (g)		4,5	
Peso suelo seco (g)		42,3	
Humedad (%)		10,64	

Tiempo (min)	Lectura de carga (N)	Def. Horizontal (mm)	τ (Kg/cm ²)	Lectura de carga en (kg-f)
0	0	0	0,0000	0,0000
0,5	238,1	0,285	0,6744	24,2793
1	346,6	0,648	0,9818	35,3432
1,5	406,2	1,031	1,1506	41,4207
2	453,1	1,46	1,2834	46,2031
2,5	489,6	1,872	1,3868	49,9251
3	506,4	2,339	1,4344	51,6382
3,5	508,4	2,842	1,4401	51,8421
4	521,1	3,313	1,4760	53,1371
4,5	513,4	3,817	1,4542	52,3520
5	501,3	4,392	1,4199	51,1181
5,5	504,4	4,85	1,4287	51,4342



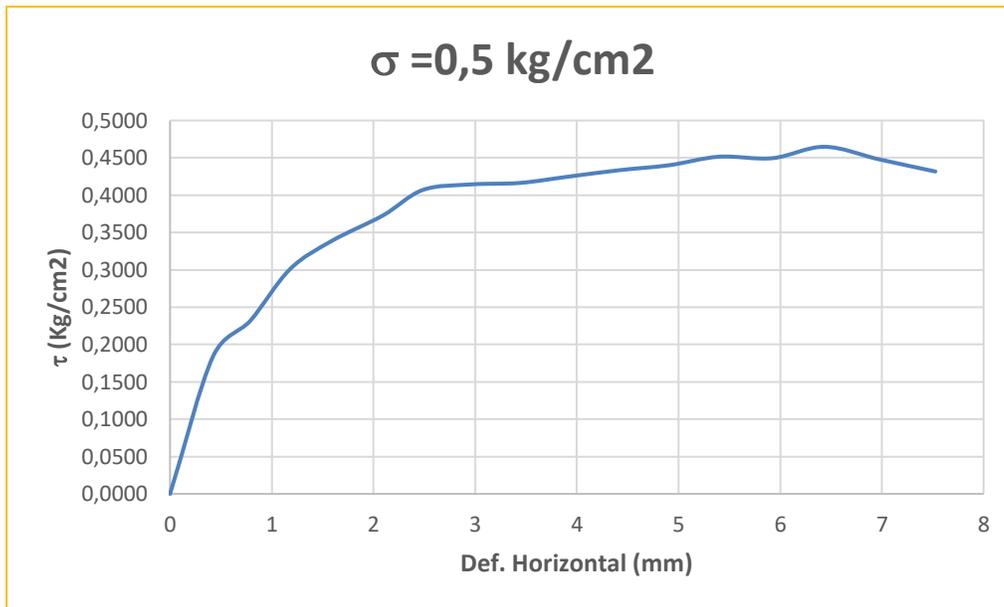
Pendiente	0,6725
Θ Angulo de fricción interna	34
C (Cohesión)	0,1305

CORTE 3.

Muestra 1.

Datos iniciales			
Sondeo o Apique		Peso muestra + Molde (g)	263,85
Profundidad		Peso del molde (g)	136,09
# Muestra		Altura de la muestra (cm)	1,97
Área de la muestra (cm ²)	36	Vel. Ensayo (mm/min)	1
		σ (Kg/ cm ²)	0,5
Contenido de humedad			
Capsula No.		7	
Peso capsula (g)		20,9	
Peso suelo humedo + Capsula (g)		65,2	
Peso suelo seco + Capsula (g)		61,41	
Peso agua (g)		3,79	
Peso suelo seco (g)		40,51	
Humedad (%)		9,36	

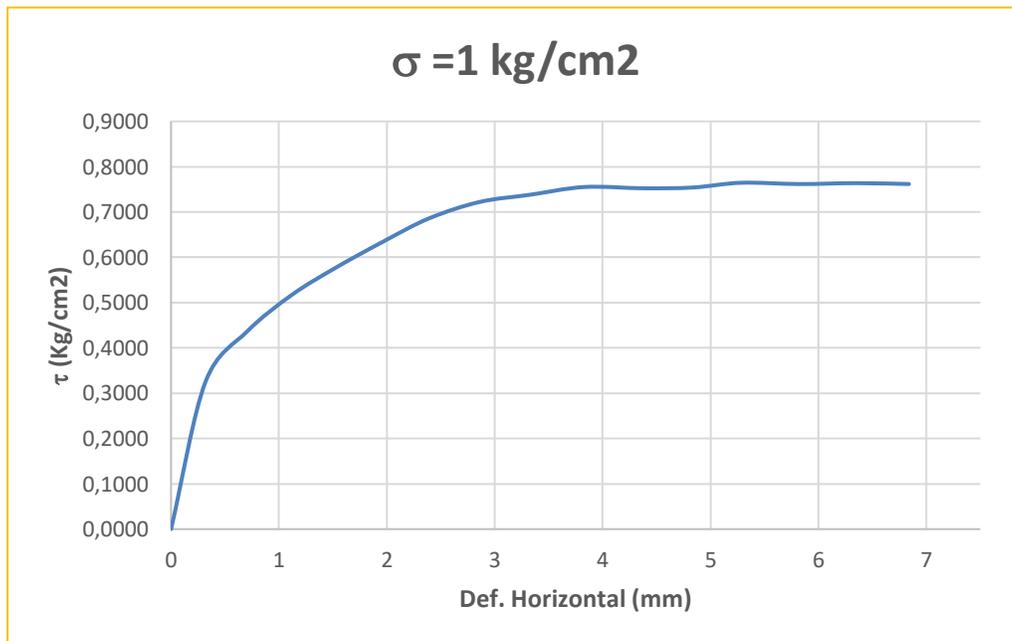
Tiempo (min)	Lectura de carga (N)	Def. Horizontal (mm)	τ (Kg/cm ²)	Lectura de carga en (kg-f)
0	0	0	0,0000	0,0000
0,5	65	0,423	0,1841	6,6281
1	81,7	0,787	0,2314	8,3310
1,5	106,2	1,179	0,3008	10,8293
2	119,6	1,591	0,3388	12,1957
2,5	131,6	2,093	0,3728	13,4194
3	143,7	2,487	0,4070	14,6532
3,5	146,3	2,962	0,4144	14,9184
4	147	3,44	0,4164	14,9898
4,5	150	3,921	0,4249	15,2957
5	153	4,414	0,4334	15,6016
5,5	155,4	4,911	0,4402	15,8463
6	159,4	5,397	0,4515	16,2542
6,5	158,7	5,923	0,4495	16,1828
7	164,1	6,436	0,4648	16,7335
7,5	158,1	6,976	0,4478	16,1216
8	152,4	7,526	0,4317	15,5404



Muestra 2.

Datos iniciales			
Sondeo o Apique		Peso muestra + Molde (g)	262,92
Profundidad		Peso del molde (g)	140,24
# Muestra		Altura de la muestra (cm)	1,96
Area de la muestra (cm ²)	36	Vel. Ensayo (mm/min)	1
		σ (Kg/ cm ²)	1
Contenido de humedad			
Capsula No.		4	
Peso capsula (g)		20,9	
Peso suelo humedo + Capsula (g)		99,92	
Peso suelo seco + Capsula (g)		92,83	
Peso agua (g)		7,09	
Peso suelo seco (g)		71,93	
Humedad (%)		9,86	

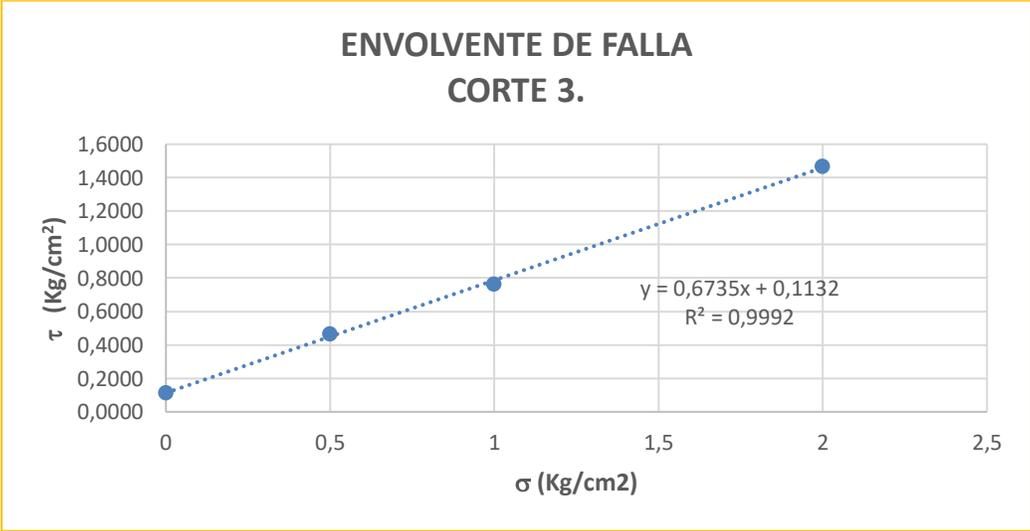
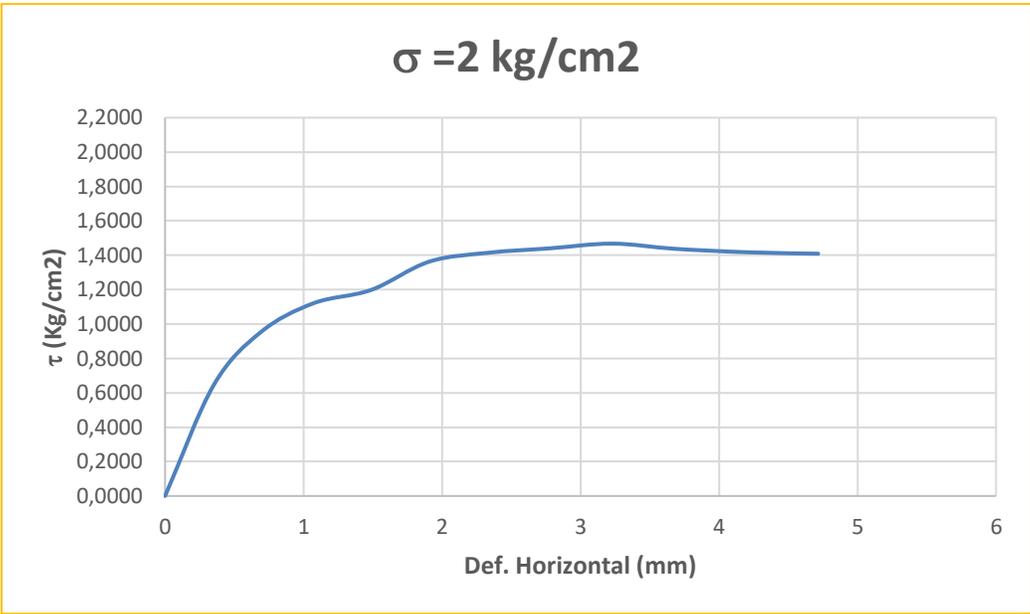
Tiempo (min)	Lectura de carga (N)	Def. Horizontal (mm)	τ (Kg/cm ²)	Lectura de carga en (kg-f)
0	0	0	0,0000	0,0000
0,5	114,9	0,32	0,3255	11,7165
1	154,1	0,706	0,4365	15,7137
1,5	182,5	1,119	0,5169	18,6097
2	203,3	1,518	0,5759	20,7307
2,5	224	1,965	0,6345	22,8415
3	242,1	2,39	0,6858	24,6872
3,5	254,9	2,858	0,7220	25,9924
4	260,5	3,323	0,7379	26,5635
4,5	266,6	3,831	0,7552	27,1855
5	265,6	4,382	0,7523	27,0835
5,5	266,2	4,836	0,7540	27,1447
6	269,9	5,284	0,7645	27,5220
6,5	268,9	5,823	0,7617	27,4200
7	269,6	6,35	0,7637	27,4914
7,5	268,9	6,84	0,7617	27,4200



Muestra 3.

Datos iniciales			
Sondeo o Apique		Peso muestra + Molde (g)	257,05
Profundidad		Peso del molde (g)	134,3
# Muestra		Altura de la muestra (cm)	1,95
Area de la muestra (cm ²)	36	Vel. Ensayo (mm/min)	1
		σ (Kg/ cm ²)	2
Contenido de humedad			
Capsula No.			
Peso capsula (g)		22	
Peso suelo humedo + Capsula (g)		71,81	
Peso suelo seco + Capsula (g)		67,51	
Peso agua (g)		4,3	
Peso suelo seco (g)		45,51	
Humedad (%)		9,45	

Tiempo (min)	Lectura de carga (N)	Def. Horizontal (mm)	τ (Kg/cm ²)	Lectura de carga en (kg-f)
0	0	0	0,0000	0,0000
0,5	228,1	0,352	0,6461	23,2596
1	336,6	0,692	0,9534	34,3235
1,5	395,7	1,072	1,1208	40,3500
2	423,1	1,489	1,1984	43,1440
2,5	481,1	1,907	1,3627	49,0583
3	499,4	2,335	1,4146	50,9244
3,5	508,4	2,776	1,4401	51,8421
4	518,1	3,229	1,4675	52,8312
4,5	507,4	3,683	1,4372	51,7401
5	500,3	4,212	1,4171	51,0161
5,5	497,4	4,716	1,4089	50,7204



Pendiente	0,6735
θ Angulo de fricción interna	33,96
C (Cohesión)	0,1132

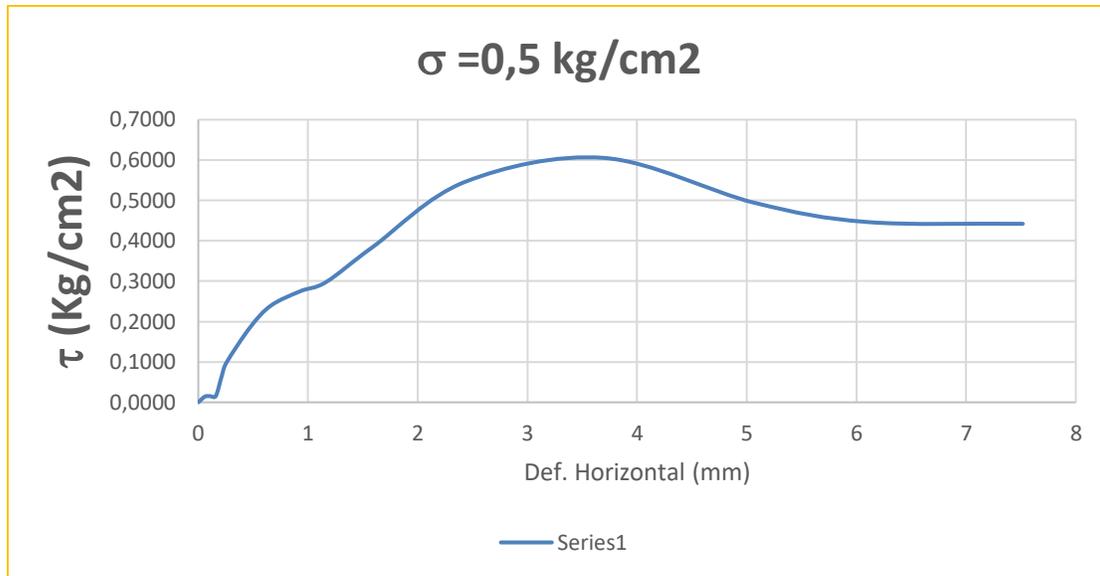
Muestras tomadas de molde tipo Proctor modificado.

CORTE 1.

Muestra 1.

Datos iniciales			
Sondeo o Apique		Peso muestra + molde (g)	287,6
Profundidad		peso del molde (g)	141,6
# Muestra		Altura de la muestra (cm)	1,9
Área de la muestra (cm ²)	36	Vel. Ensayo (mm/min)	0,5
		σ (Kg/ cm ²)	0,5
Contenido de humedad			
Capsula No.		6	
Peso capsula (g)		27,44	
peso suelo humedo + capsula (g)		111,37	
Peso suelo seco + capsula (g)		102,99	
Peso agua (g)		8,38	
Peso suelo seco (g)		75,55	
Humedad (%)		11,09	

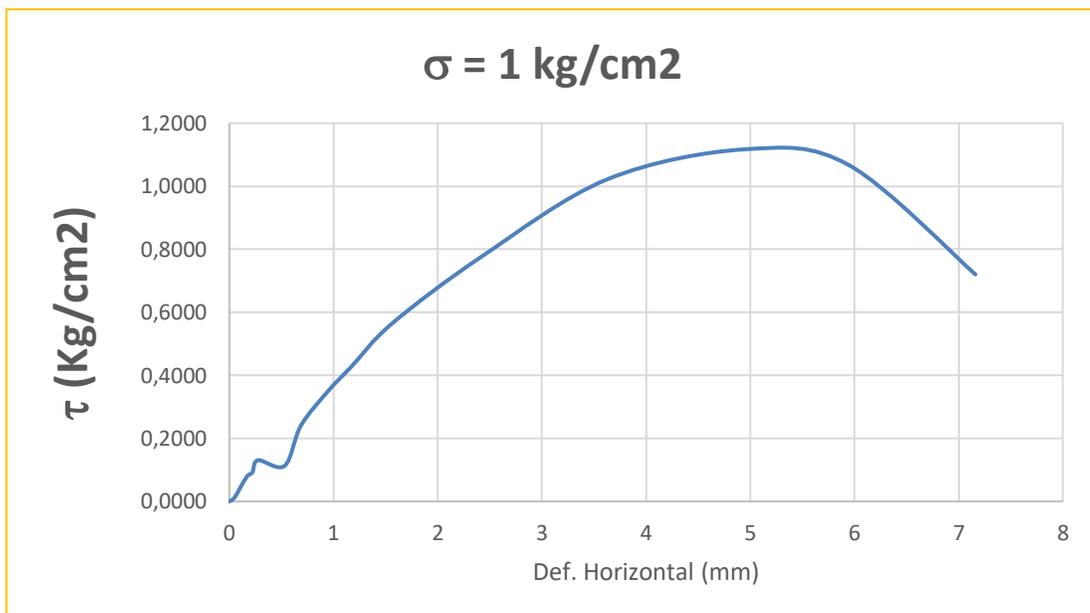
Tiempo (min)	Lectura de carga (N)	Def. horizontal (mm)	σ	Def. horizontal (mm) maxima	Lectura de carga en (kg-f)
0	0	0	0,0000	0,6053	0
0,12	5	0,06	0,0142		0,509855507
0,24	5,4	0,108	0,0153		0,550643948
0,36	5,4	0,159	0,0153		0,550643948
0,48	23,1	0,214	0,0654		2,355532442
0,6	34,8	0,257	0,0986		3,548594328
1,2	66	0,476	0,1869		6,730092692
1,8	84,7	0,664	0,2399		8,636952288
2,4	97,1	0,929	0,2750		9,901393945
3	105,2	1,166	0,2980		10,72735987
4	136	1,593	0,3852		13,86806979
6	193	2,438	0,5467		19,68042257
8,4	213,7	3,699	0,6053		21,79122437
11,2	174,5	5,069	0,4943		17,79395719
13,2	157,7	6,092	0,4467		16,08084269
16	156,1	7,516	0,4422		15,91768893



Muestra 2.

Datos iniciales			
Sondeo o Apique		Peso muestra + molde (g)	280,58
Profundidad		Peso del molde (g)	140,75
# Muestra		Altura de la muestra (cm)	1,9
Área de la muestra (cm ²)	36	Vel. Ensayo (mm/min)	0,5
		σ (Kg/ cm ²)	1
Contenido de humedad			
Capsula No.			53
Peso capsula (g)			27,57
peso suelo humedo + capsula (g)			106,75
Peso suelo seco + capsula (g)			99,44
Peso agua (g)			7,31
Peso suelo seco (g)			71,87
Humedad (%)			10,17

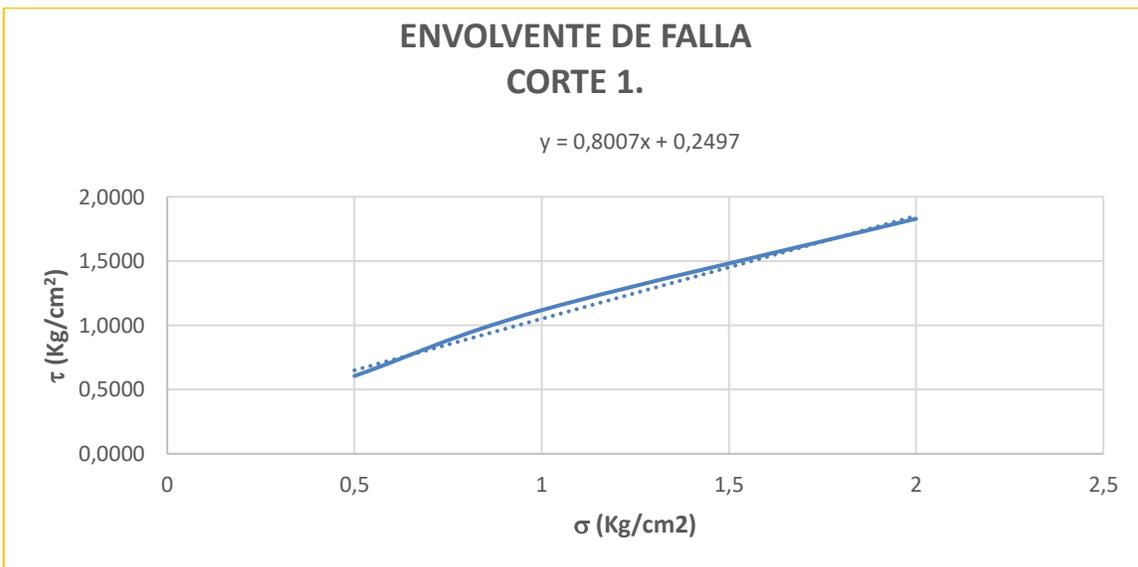
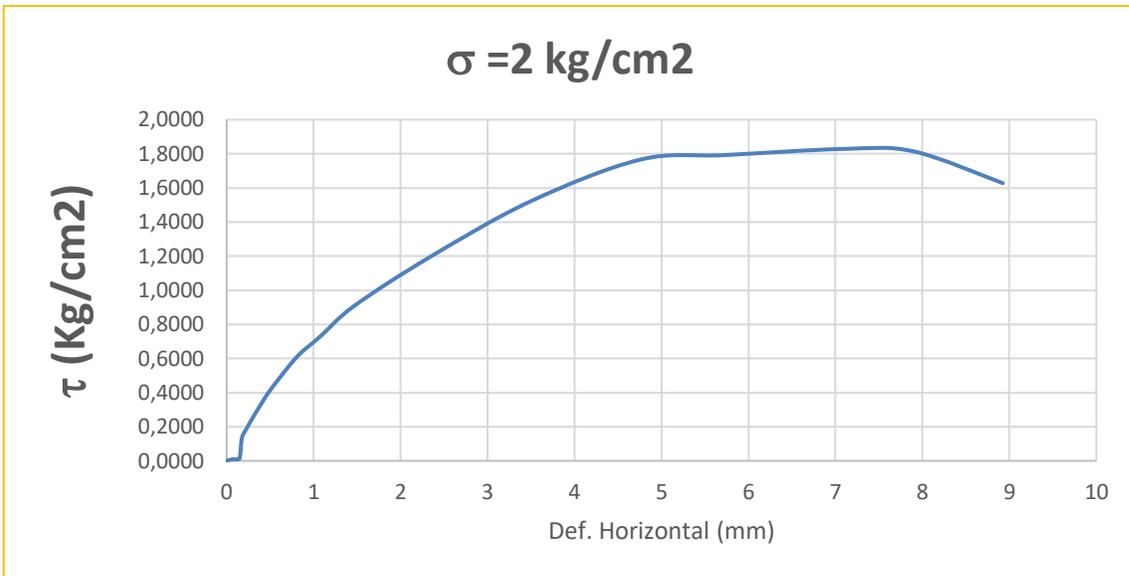
Tiempo (min)	Lectura de carga (N)	Def. horizontal (mm)	σ	Def. horizontal (mm) maxima	Lectura de carga en (kg-f)
0	0	0	0,0000	1,1174	0
0,12	4	0,048	0,0113		0,407884406
0,24	14,4	0,1	0,0408		1,46838386
0,36	28,1	0,17	0,0796		2,865387949
0,48	32,8	0,222	0,0929		3,344652126
0,6	46,2	0,276	0,1309		4,711064884
1,2	39,9	0,531	0,1130		4,068646945
1,8	85,1	0,688	0,2410		8,677740728
2,4	123,6	0,948	0,3501		12,60362813
3	151,4	1,175	0,4288		15,43842475
4	199,6	1,565	0,5654		20,35343184
6	275	2,431	0,7789		28,04205288
8,4	361	3,632	1,0225		36,8115676
11,2	394,5	4,962	1,1174		40,2275995
13,2	376,8	5,946	1,0673		38,422711
16	254,3	7,161	0,7203		25,93125108



Muestra 3.

Datos iniciales			
Sondeo o Apique		Peso muestra + molde (g)	275,17
Profundidad		peso del molde (g)	144,9
# Muestra		Altura de la muestra (cm)	1,9
Área de la muestra (cm ²)	36	Vel. Ensayo (mm/min)	0,5
		σ (Kg/ cm ²)	2
Contenido de humedad			
Capsula No.		21	
Peso capsula (g)		27,32	
peso suelo humedo + capsula (g)		103,98	
Peso suelo seco + capsula (g)		97,04	
Peso agua (g)		6,94	
Peso suelo seco (g)		69,72	
Humedad (%)		9,95	

Tiempo (min)	Lectura de carga (N)	Def. horizontal (mm)	σ	Def. horizontal (mm) maxima	Lectura de carga en (kg-f)
0	0	0	0,0000	1,8287	0
0,12	3	0,057	0,0085		0,305913304
0,24	3	0,106	0,0085		0,305913304
0,36	6	0,15	0,0170		0,611826608
0,48	47,2	0,175	0,1337		4,813035986
0,6	64,3	0,22	0,1821		6,556741819
1,2	127,6	0,43	0,3614		13,01151254
1,8	163,8	0,575	0,4640		16,70286641
2,4	217,3	0,819	0,6155		22,15832033
3	257,9	1,08	0,7305		26,29834705
4	320,5	1,466	0,9078		32,681738
6	421,3	2,333	1,1933		42,96042502
8,4	537,5	3,499	1,5225		54,809467
11,2	623,6	4,761	1,7664		63,58917883
13,2	632,8	5,73	1,7924		64,52731296
16	645,6	7,102	1,8287		65,83254306
17,3	640,3	7,904	1,8137		65,29209622
21	574,7	8,925	1,6279		58,60279197



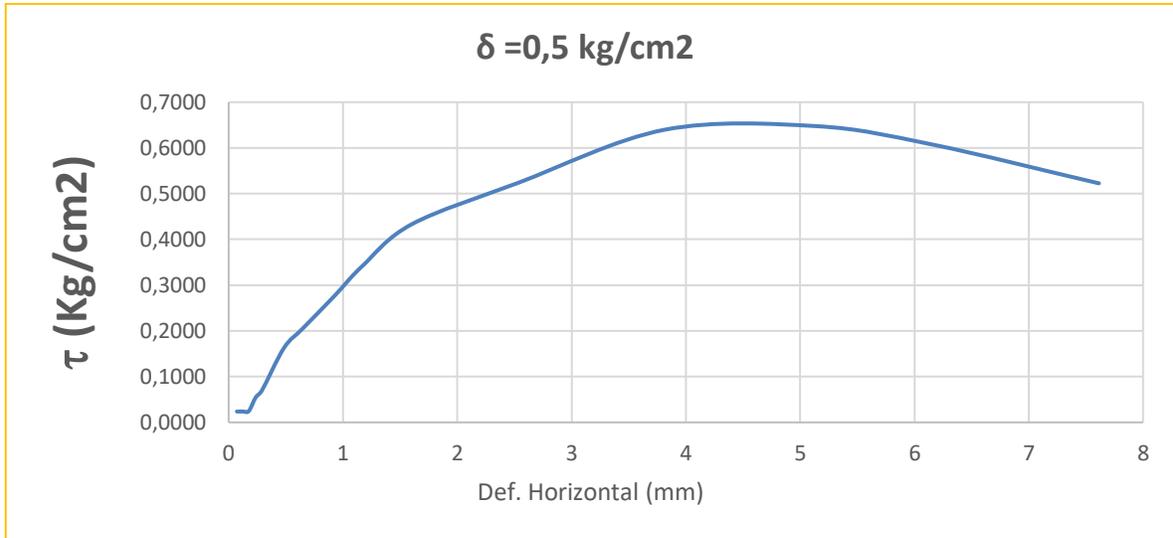
Pendiente	0,801
θ Ángulo de fricción interna	38,68
C (Cohesión)	0,250

CORTE 2.

Muestra 1.

Datos iniciales			
Sondeo o Apique		Peso muestra + molde (g)	271,64
Profundidad		peso del molde (g)	141,4
# Muestra		Altura de la muestra (cm)	1,9
Área de la muestra (cm ²)	36	Vel. Ensayo (mm/min)	0,5
		σ (Kg/ cm ²)	0,5
Contenido de humedad			
Capsula No.		65	
Peso capsula (g)		27,13	
peso suelo humedo + capsula (g)		144,03	
Peso suelo seco + capsula (g)		131,88	
Peso agua (g)		12,15	
Peso suelo seco (g)		104,75	
Humedad (%)		11,60	

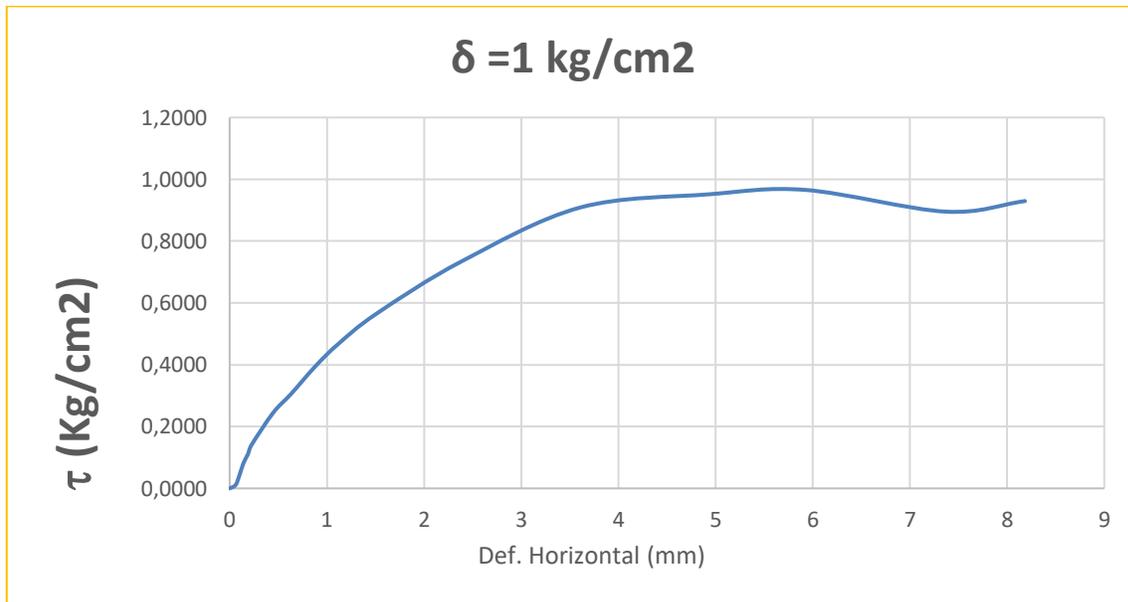
Tiempo (min)	Lectura de carga (N)	Def. horizontal (mm)	σ	Def. horizontal (mm) maxima	Lectura de carga en (kg-f)
0	0	0		0,6478	
0,12	8,4	0,072	0,0238		0,856557252
0,24	8,4	0,126	0,0238		0,856557252
0,36	8,7	0,176	0,0246		0,887148582
0,48	19,4	0,237	0,0550		1,978239367
0,6	24,8	0,292	0,0702		2,528883314
1,2	57,6	0,485	0,1632		5,87353544
1,8	72,7	0,651	0,2059		7,413299071
2,4	97,8	0,928	0,2770		9,972773716
3	120,6	1,169	0,3416		12,29771483
4	153	1,603	0,4334		15,60157851
6	184,9	2,533	0,5237		18,85445665
8,4	225,9	3,816	0,6399		23,0352718
11,2	228,7	5,132	0,6478		23,32079089
13,2	214,3	6,164	0,6070		21,85240703
16	184,5	7,614	0,5226		18,81366821



Muestra 2.

Datos iniciales			
Sondeo o Apique		Peso muestra + molde (g)	268,7
Profundidad		peso del molde (g)	141,4
# Muestra		Altura de la muestra (cm)	1,9
Área de la muestra (cm ²)	36	Vel. Ensayo (mm/min)	0,5
		σ (Kg/ cm ²)	1
Contenido de humedad			
	Capsula No.	13	
	Peso capsula (g)	27,43	
	peso suelo humedo + capsula (g)	124,99	
	Peso suelo seco + capsula (g)	115,2	
	Peso agua (g)	9,79	
	Peso suelo seco (g)	87,77	
	Humedad (%)	11,15	

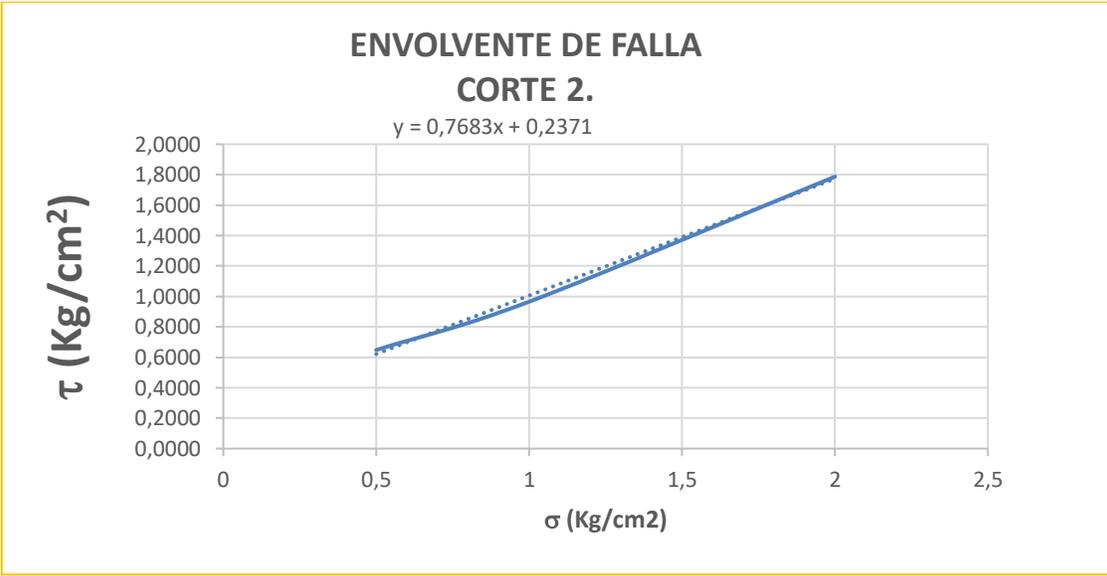
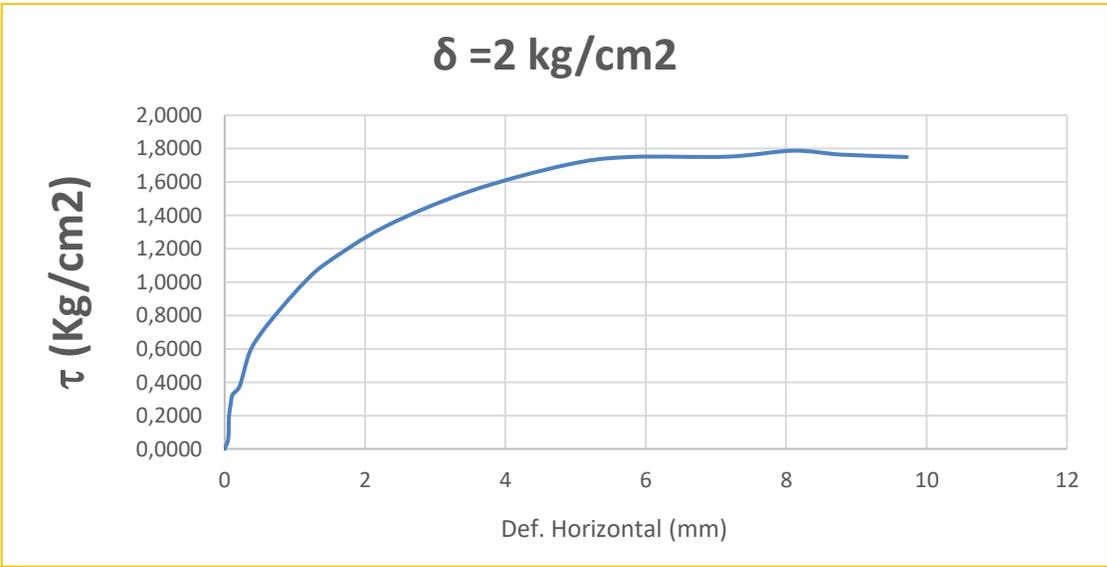
Tiempo (min)	Lectura de carga (N)	Def. horizontal (mm)	σ	Def. horizontal (mm) maxima	Lectura de carga en (kg-f)
0	0	0	0,0000	0,9656	0
0,12	4	0,062	0,0113		0,407884406
0,24	16,4	0,105	0,0465		1,672326063
0,36	29,1	0,143	0,0824		2,96735905
0,48	39,2	0,189	0,1110		3,997267174
0,6	49,6	0,225	0,1405		5,057766629
1,2	86,4	0,448	0,2447		8,81030316
1,8	107,5	0,629	0,3045		10,9618934
2,4	139,3	0,881	0,3946		14,20457442
3	164,8	1,116	0,4668		16,80483751
4	199,6	1,512	0,5654		20,35343184
6	259,2	2,385	0,7342		26,43090948
8,4	320,8	3,606	0,9087		32,71232933
11,2	335,9	4,929	0,9514		34,25209296
13,2	340,9	5,926	0,9656		34,76194846
16	316,1	7,368	0,8954		32,23306515
17,3	328,2	8,184	0,9296		33,46691548



Muestra 3.

Datos iniciales			
Sondeo o Apique		Peso muestra + molde (g)	269,08
Profundidad		peso del molde (g)	141,55
# Muestra		Altura de la muestra (cm)	1,9
Área de la muestra (cm ²)	36	Vel. Ensayo (mm/min)	0,5
		σ (Kg/ cm ²)	2
Contenido de humedad			
Capsula No.		0	
Peso capsula (g)		21,29	
peso suelo humedo + capsula (g)		83,51	
Peso suelo seco + capsula (g)		77,47	
Peso agua (g)		6,04	
Peso suelo seco (g)		56,18	
Humedad (%)		10,75	

Tiempo (min)	Lectura de carga (N)	Def. horizontal (mm)	σ	Def. horizontal (mm) maxima	Lectura de carga en (kg-f)
0	0	0	0,0000	1,7870	0
0,12	22,1	0,051	0,0626		2,253561341
0,24	67,3	0,061	0,1906		6,862655124
0,36	93,8	0,085	0,2657		9,56488931
0,48	114,9	0,113	0,3255		11,71647955
0,6	132,6	0,213	0,3756		13,52136804
1,2	204,6	0,356	0,5795		20,86328734
1,8	247,2	0,531	0,7002		25,20725626
2,4	299,4	0,815	0,8481		30,53014776
3	352,6	1,138	0,9988		35,95501035
4	391,5	1,435	1,1089		39,92168619
6	470,2	2,284	1,3319		47,94681187
8,4	545,2	3,495	1,5443		55,59464448
11,2	600,8	4,867	1,7018		61,26423772
13,2	617,5	5,755	1,7491		62,96715511
16	618,2	7,164	1,7511		63,03853488
17,3	630,9	8,099	1,7870		64,33356787
19	622,6	8,783	1,7635		63,48720773
21	617,5	9,719	1,7491		62,96715511



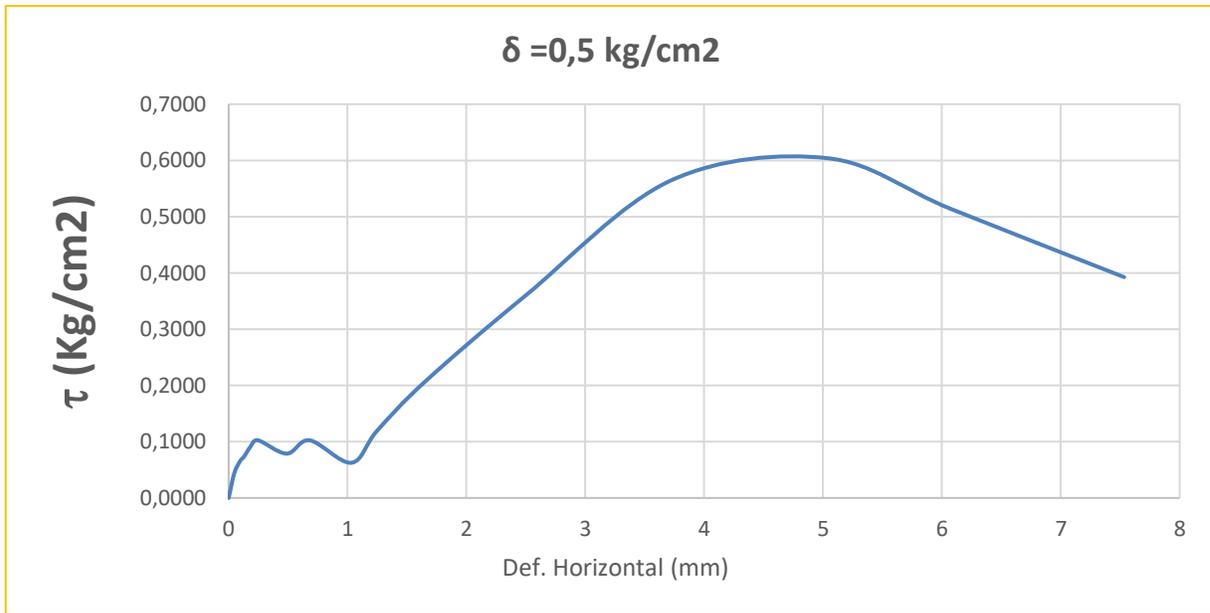
Pendiente	0,7683
θ Ángulo de fricción interna	37,5351
C (Cohesión)	0,2371

CORTE 3.

Muestra 1.

Datos iniciales			
Sondeo o Apique		Peso muestra + molde (g)	264,08
Profundidad		peso del molde (g)	140,27
# Muestra		Altura de la muestra (cm)	1,9
Área de la muestra (cm ²)	36	Vel. Ensayo (mm/min)	0,5
		σ (Kg/ cm ²)	0,5
Contenido de humedad			
Capsula No.			10
Peso capsula (g)			21,22
peso suelo humedo + capsula (g)			80,25
Peso suelo seco + capsula (g)			74,54
Peso agua (g)			5,71
Peso suelo seco (g)			53,32
Humedad (%)			10,71

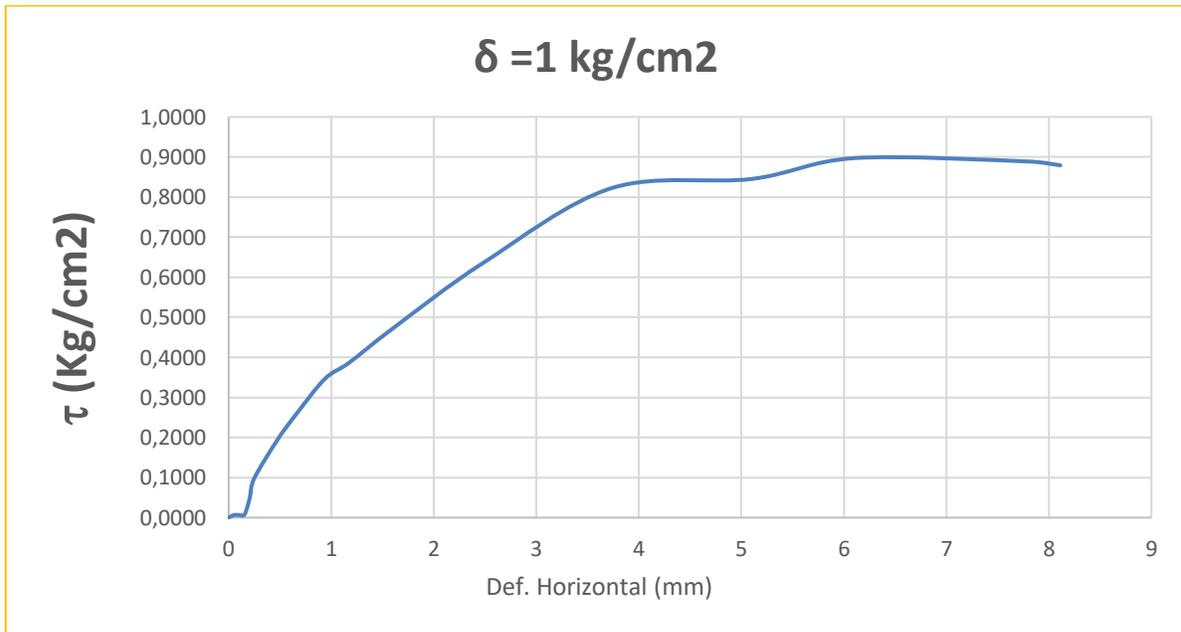
Tiempo (min)	Lectura de carga (N)	Def. horizontal (mm)	σ	Def. horizontal (mm) maxima	Lectura de carga en (kg-f)
0	0	0	0,0000	0,6042	0
0,12	15,7	0,048	0,0445		1,600946292
0,24	23,1	0,096	0,0654		2,355532442
0,36	26,1	0,131	0,0739		2,661445746
0,48	31,8	0,18	0,0901		3,242681024
0,6	36,2	0,246	0,1025		3,69135387
1,2	27,8	0,488	0,0787		2,834796619
1,8	36,2	0,682	0,1025		3,69135387
2,4	22,1	1,034	0,0626		2,253561341
3	42,2	1,249	0,1195		4,303180479
4	73,3	1,656	0,2076		7,474481732
6	127,6	2,507	0,3614		13,01151254
8,4	199,3	3,721	0,5645		20,32284051
11,2	213,3	5,031	0,6042		21,75043593
13,2	181,2	6,082	0,5133		18,47716357
16	138,6	7,533	0,3926		14,13319465



Muestra 2.

Datos iniciales			
Sondeo o Apique		Peso muestra + molde (g)	265,5
Profundidad		peso del molde (g)	140,7
# Muestra		Altura de la muestra (cm)	1,9
Área de la muestra (cm ²)	36	Vel. Ensayo (mm/min)	0,5
		σ (Kg/ cm ²)	1
Contenido de humedad			
	Capsula No.	52	
	Peso capsula (g)	22,39	
	peso suelo humedo + capsula (g)	81,6	
	Peso suelo seco + capsula (g)	75,65	
	Peso agua (g)	5,95	
	Peso suelo seco (g)	53,26	
	Humedad (%)	11,17	

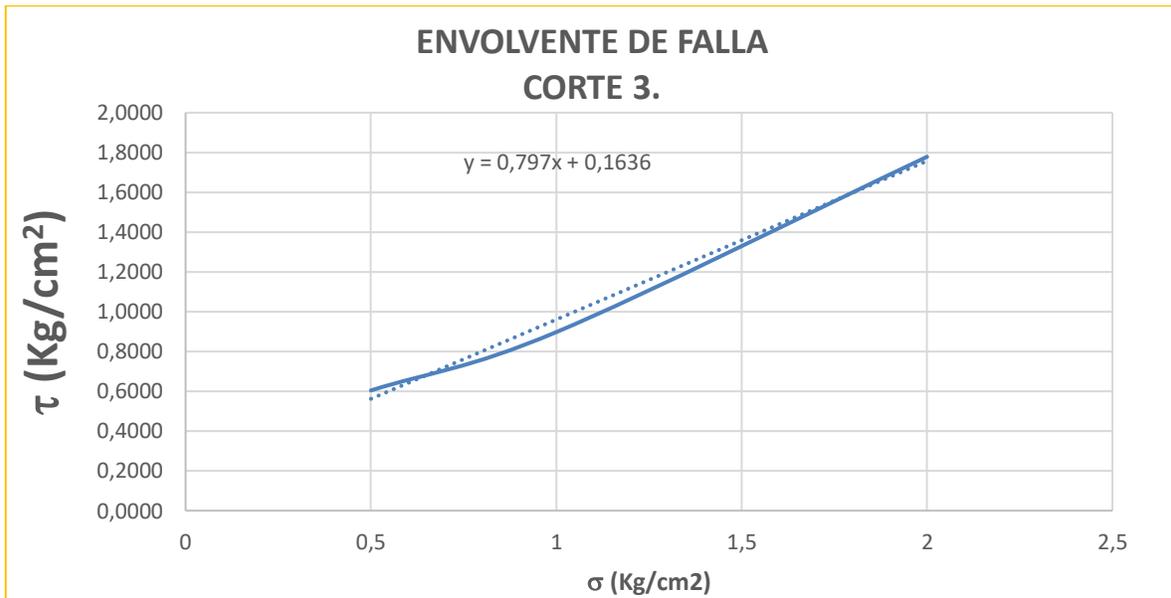
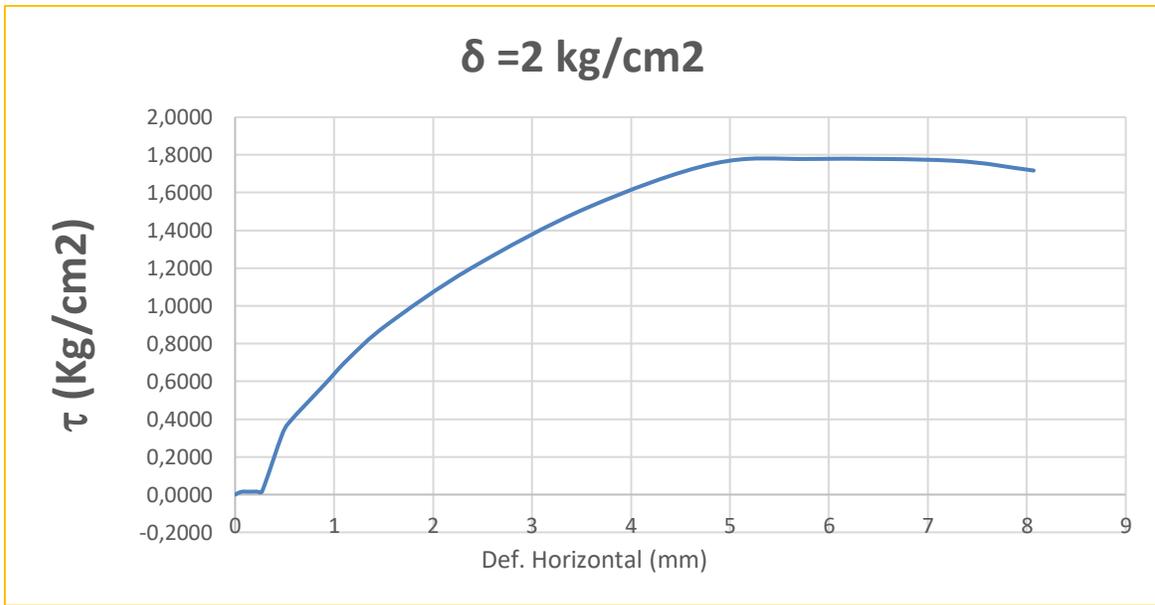
Tiempo (min)	Lectura de carga (N)	Def. horizontal (mm)	σ	Def. horizontal (mm) maxima	Lectura de carga en (kg-f)
0	0	0	0,0000	0,8973	0
0,12	2,3	0,052	0,0065		0,234533533
0,24	2,3	0,103	0,0065		0,234533533
0,36	2,7	0,155	0,0076		0,275321974
0,48	17,1	0,205	0,0484		1,743705834
0,6	34,5	0,249	0,0977		3,518002998
1,2	68,7	0,477	0,1946		7,005414665
1,8	91,4	0,661	0,2589		9,320158667
2,4	122,2	0,938	0,3461		12,46086859
3	136,6	1,177	0,3869		13,92925245
4	166,8	1,603	0,4725		17,00877971
6	224,7	2,487	0,6365		22,91290648
8,4	290,4	3,738	0,8226		29,61240784
11,2	298,4	5,103	0,8452		30,42817665
13,2	316,8	6,109	0,8973		32,30444492
16	313,8	7,791	0,8888		31,99853162
17,3	310,4	8,111	0,8792		31,65182987



Muestra 3.

Datos iniciales			
Sondeo o Apique		Peso muestra + molde (g)	266,86
Profundidad		peso del molde (g)	134,56
# Muestra		Altura de la muestra (cm)	1,9
Área de la muestra (cm ²)	36	Vel. Ensayo (mm/min)	0,5
		σ (Kg/ cm ²)	2
Contenido de humedad			
Capsula No.		77	
Peso capsula (g)		21,43	
peso suelo humedo + capsula (g)		94,91	
Peso suelo seco + capsula (g)		87,48	
Peso agua (g)		7,43	
Peso suelo seco (g)		66,05	
Humedad (%)		11,25	

Tiempo (min)	Lectura de carga (N)	Def. horizontal (mm)	σ	Def. horizontal (mm) maxima	Lectura de carga en (kg-f)
0	0	0	0,0000	1,7785	0
0,12	5	0,059	0,0142		0,509855507
0,24	5,4	0,112	0,0153		0,550643948
0,36	5,4	0,166	0,0153		0,550643948
0,48	5,6	0,223	0,0159		0,571038168
0,6	5,8	0,272	0,0164		0,591432388
1,2	110,9	0,472	0,3141		11,30859514
1,8	135	0,546	0,3824		13,76609869
2,4	207,6	0,912	0,5880		21,16920065
3	253,2	1,14	0,7172		25,81908287
4	317,5	1,533	0,8993		32,37582469
6	423,6	2,385	1,1999		43,19495855
8,4	537,2	3,566	1,5216		54,77887567
11,2	619,2	4,837	1,7539		63,14050598
13,2	627,9	5,827	1,7785		64,02765456
16	624,6	7,247	1,7692		63,69114993
17,3	606,2	8,069	1,7171		61,81488166



Pendiente	0,797
θ Ángulo de fricción interna	38,55
C (Cohesión)	0,1636

ANEXO E
ENSAYOS SOBRE EL MURO DE REACCIÓN.

ENSAYOS	CARGA MAX (KN)	δ	θ	K
1	11,7	28,61	34,09	0,84
2	11,2	27,57	34,09	0,81
3	11,2	27,57	34,09	0,81
4	11,7	28,61	34,09	0,84
5	11	27,15	34,09	0,80
6	10,9	26,94	34,09	0,79
7	11	27,15	34,09	0,80
8	11,1	27,36	34,09	0,80
9	10,8	26,73	34,09	0,78
10	11,5	28,20	34,09	0,83
11	10,5	26,08	34,09	0,77
12	11,4	27,99	34,09	0,82
13	11,4	27,99	34,09	0,82
14	10,5	26,08	34,09	0,77
15	10,8	26,73	34,09	0,78
PROMEDIO	11,11	27,38	34,09	0,80
DES. ESTANDAR	0,38	0,80	0,00	0,02
COEF. VARIACIÓN	3,43%	2,93%	0,00%	2,93%

ANEXO F
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN				
DÍAS	MUESTRAS	RESISTENCIA		
		MPA	PSI	%
7	1	12,18	1766,56	58
	2	12,81	1857,64	61
	3	11,34	1644,73	54
14	1	17,85	2588,93	85
	2	18,06	2619,39	86
	3	16,38	2375,72	78
28	1	19,11	2771,69	91
	2	19,53	2803,58	93
	3	18,9	2741,22	90

ANEXO G

RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DEL ACERO.

