

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA INFLUENCIA DE CICLOS DE
HUMEDECIMIENTO Y SECADO EN LOS PARAMETROS DE RESISTENCIA DE
UN SUELO EN FASE I**

JOSE RUBEN TORRES CAMARGO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN GEOTECNIA
BUCARAMANGA**

2012

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA INFLUENCIA DE CICLOS DE
HUMEDECIMIENTO Y SECADO EN LOS PARAMETROS DE RESISTENCIA DE
UN SUELO EN FASE I**

JOSE RUBEN TORRES CAMARGO

Trabajo de Grado para optar por el título de Magister en Geotecnia

**DIRECTOR
PHD VLADIMIR ERNESTO MERCHÁN
INGENIERO CIVIL UIS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN GEOTECNIA
BUCARAMANGA**

2012

DEDICATORIA

- A mi esposa Marcela por toda la inspiración.
- A mis hijos Samuel y Sarah por incrementar mi vida espiritual.
- A todos los trabajadores de Torres Ing por hacer grande mi labor profesional y personal.

AGRADECIMIENTOS

- Agradezco a mis compañeros de maestría por su amistad y compañerismo.
- A mi amigo PHD Vladimir Merchán, por toda una vida de hermandad y sabiduría.
- A los profesores de la maestría, por su paciencia y conocimientos aportados

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
1. ESTADO DEL ARTE.....	17
2. OBJETIVOS	21
2.1 OBJETIVO GENERAL	21
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
3. METODOLOGIA.....	23
4. SELECCIÓN DE UN TALUD PARA EL EXPERIMENTO.....	25
4.1 LOCALIZACIÓN	25
4.2 DESCRIPCIÓN DEL SECTOR	26
5. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO	29
6. EQUIPOS UTILIZADOS	33
6.1 ESTACIÓN GEODÉSICA TOTAL TOPCON 239W.....	33
7. REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO:	45
7.1 CLASIFICACIÓN DEL TIPO DE SUELO S.U.C.S,.....	45
7.2 ENSAYO DE CORTE DIRECTO PRACTICADO A LAS PROBETAS DE SUELO.	49
7.2.1 Justificación teórica:.....	49
7.2.2 Adaptación del equipo de corte directo	57

8. HUMEDECIMIENTO Y SECADO DE LAS PROBETAS DE SUELO.....	59
8.1 HUMEDECIMIENTO DE LAS PROBETAS DE SUELO	59
8.2 PROCEDIMIENTOS DE SECADO DE LAS PROBETAS.....	64
9. ENSAYO DE PROBETAS EN EQUIPO DE CORTE DIRECTO.....	67
9.1 EQUIPO UTILIZADO PARA EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO.....	67
9.2 PRUEBA DE PROBETAS EN EL EQUIPO DE CORTE DIRECTO:.....	68
9.2.1 Metodología de los ensayos	68
10. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO PRUEBAS 1, 2 Y 3.....	81
10.1 CORTES DIRECTOS:	81
10.2 CONTROL DE LA TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA EN LA PRUEBA DE CORTE DIRECTO:.....	90
10.3 RESÚMENES DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS E INTERPRETACIÓN:	92
11. RESUMEN CICLOS DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO vrs VARIACION DEL ANGULO DE FRICCIÓN Y LA COHESION DE LA PROBETA EN LA PRUEBA 3.....	96
CONCLUSIONES.....	108
BIBLIOGRAFIA.....	114
ANEXOS	115

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Cartera topográfica	34
Tabla 2. Resumen Granulometrías Prueba 1	46
Tabla 3. Resumen Granulometrías Prueba 1	47
Tabla 4. Resumen Granulometrías Prueba 3.....	48
Tabla 5. Resultados promedios del control de humedad y temperatura en la prueba de corte directo	91

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Localización general	25
Figura 2 Localización sector de la vía al Porvenir en la ciudad de Bucaramanga (Santander).....	26
Figura 3 Estación total Topcon 239w	33
Figura 4. Perfil topográfico A-A'	41
Figura 5 Planta topográfica.....	42
Figura 6. Carta de plasticidad clasificación Prueba 1.....	46
Figura 7. Carta de plasticidad Prueba 2.....	47
Figura 8. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 1 probeta 1	81
Figura 9. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 1 probeta 2	82
Figura 10. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 3 Probeta 3.....	82
Figura 11. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 2 Probeta 1	83
Figura 12. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 2 Probeta 2.....	83
Figura 13. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 2 Probeta 3.....	84
Figura 14. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 2 Probeta 4.....	85
Figura 15. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 2 Probeta 5.....	85
Figura 16. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 3 Probeta 1	86
Figura 17. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 3 Probeta 2.....	86
Figura 18. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 3 Probeta 3.....	87
Figura 19. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 3 Probeta 4.....	87
Figura 20. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 3 Probeta 5.....	88
Figura 21. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 3 Probeta 6.....	88
Figura 22. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 3 Probeta 7	89
Figura 23. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 3 Probeta 5.....	89
Figura 24. Compilación Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 1	92

Figura 25. Compilación Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 2.....93
Figura 26. Gráficas Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 394
Figura 27. Gráficas ampliadas Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 395

LISTA DE FOTOGRAFIAS

	Pág.
Fotografía 1 Vista sector	27
Fotografía 2 talud seleccionado para la toma de probetas de suelo para el estudio.....	28
Fotografía 3 Localización Delta 1 levantamiento topográfico	29
Fotografía 4 Localización Delta 1 levantamiento topográfico	30
Fotografía 5 Localización Delta 2levantamiento topográfico	31
Fotografía 6. Detalle de la excavación y Bloque probeta.	43
Fotografía 8 Muestreo de pastillas	44
Fotografía 9. Prueba de Humedecimiento A.	59
Fotografía 10. Humedecimiento prueba B.	61
Fotografía 11. Prueba de humedecimiento D y medición de la infiltración en la probeta de suelo	62
Fotografía 12. Prueba de humedecimiento D y medición de la infiltración en la probeta de suelo.....	63
Fotografía 13. Secado de probetas.....	65
Fotografía 14 Adaptación del equipo de corte directo	68
Fotografía 15. Ensayo Probeta 1 Prueba 1	69
Fotografía 16. Ensayo Probeta 2	70
Fotografía 17 Ensayo Probeta 1	73
Fotografía 18. Ensayo Probeta 2	73
Fotografía 19. Ensayo Probeta 3, humedecimientos y secados	75
Fotografía 20. Ensayo Probeta 1	76
Fotografía 21. Ensayo Probeta 2	77
Fotografía 22. Foto de ubicación de humidómetros	91

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA INFLUENCIA DE CICLOS DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO EN LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA DE UN SUELO EN FASE I*

AUTOR: JOSÉ RUBÉN TORRES CAMARGO**

PALABRAS CLAVES: Experimental, influencia, humedecimiento, resistencia, suelo

Es usual que los análisis de estabilidad de taludes se establezcan para una condición con parámetros de resistencia únicos en estado saturado. Cuando se realiza el diseño de taludes para ampliaciones de vías, donde se requiera el corte de la ladera, se realiza el análisis de estabilidad tomando como base un dato de resistencia del material de suelo en el talud, obtenido generalmente de ensayos de corte directo o triaxial practicado a probetas inalteradas tomadas del sector. Al ser intervenidos, el suelo queda expuesto a las condiciones naturales y los ensayos de laboratorio practicados a estos materiales se ejecutan con el fin de obtener parámetros geotécnicos, requeridos para chequear la estabilidad.

Sin embargo, las posibles variaciones que tengan estos parámetros por efecto de los cambios ambientales, lo cuales pueden generar cambios al interior del suelo y sus parámetros de resistencia, no ha sido estudiados hasta el momento para las condiciones locales de la ciudad de Bucaramanga (Formación Bucaramanga) donde los materiales de los taludes están sometidos a cambios cíclicos en su grado de saturación y secado.

Se presenta en esta tesis de grado, un estudio experimental sobre las posibles afectaciones que los ciclos de humedecimiento y secado puedan ocasionar en los parámetros de resistencia en condiciones drenadas. Esto considerando que cada ciclo de humedecimiento y secado simula una condición intensa de lluvia que logra humedecer el suelo completamente y luego un cambio de temperatura tan alta que pueda secar la probeta en su totalidad o en un porcentaje muy alto.

* Proyecto de grado

** Facultad de ingenierías fiscimecánicas, Escuela de ingeniería Civil, Maestría en Geotecnia, Director PHD Vladimir Ernesto Merchán

ABSTRACT

TITLE: EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF CYCLES OF WETTING AND DRYING IN A PHASE I SOIL STRENGTH PARAMETERS*

AUTHOR: JOSÉ RUBÉN TORRES CAMARGO**

KEY WORDS: Experimental, influence, dampening, resistance, soil

It is common for slope stability analysis is established for a condition with unique strength parameters in a saturated state. When doing the design of embankments for road extensions, where required cutting the hillside, is the analysis of stability based on a figure of resistance of soil material on the slope, usually obtained from direct shear tests or triaxial practiced undisturbed samples taken from the sector. When operated, the soil is exposed to natural conditions and laboratory tests performed on these materials run to obtain geotechnical parameters, required to check the stability.

However, the possible variations that these parameters have the effect of environmental change, which can cause changes within the soil and resistance parameters, has not been studied so far for local conditions in the city of Bucaramanga (Training Bucaramanga) where the material of the banks are subject to cyclical changes in the degree of saturation and drying.

Presented in this thesis, an experimental study on the possible effects that cycles of wetting and drying may have on the strength parameters in drained conditions. This considering that each cycle of wetting and drying simulates a condition that achieves intense rain completely wet the soil and then a change in temperature so high that the sample to dry in full or in a high percentage.

* Project of grade

** Faculty of engineering fiscimecanicas, Escuela de Ingeniería Civil, masters in Geotechnics, Director PHD Vladimir Ernesto Merchán

INTRODUCCIÓN

Es usual que los análisis de estabilidad de taludes se establezcan para una condición con parámetros de resistencia únicos en estado saturado. Cuando se realiza el diseño de taludes para ampliaciones de vías, donde se requiera el corte de la ladera, se realiza el análisis de estabilidad tomando como base un dato de resistencia del material de suelo en el talud, obtenido generalmente de ensayos de corte directo o triaxial practicado a probetas inalteradas tomadas del sector. Al ser intervenidos, el suelo queda expuesto a las condiciones naturales y los ensayos de laboratorio practicados a estos materiales se ejecutan con el fin de obtener parámetros geotécnicos, requeridos para chequear la estabilidad.

Sin embargo, las posibles variaciones que tengan estos parámetros por efecto de los cambios ambientales, lo cuales pueden generar cambios al interior del suelo y sus parámetros de resistencia, no ha sido estudiados hasta el momento para las condiciones locales de la ciudad de Bucaramanga (Formación Bucaramanga) donde los materiales de los taludes están sometidos a cambios cíclicos en su grado de saturación y secado.

Se presenta en esta tesis de grado, un estudio experimental sobre las posibles afectaciones que los ciclos de humedecimiento y secado puedan ocasionar en los parámetros de resistencia en condiciones drenadas. Esto considerando que cada ciclo de humedecimiento y secado simula una condición intensa de lluvia que logra humedecer el suelo completamente y luego un cambio de temperatura tan alta que pueda secar la probeta en su totalidad o en un porcentaje muy alto.

Esta hipótesis está planteada considerando que varios periodos de lluvia seguidos y críticos en un año, podrían infiltrarse en el suelo de tal manera que va a

humedecer un espesor de la capa superior del talud que pueda afectar los parámetros de resistencia del suelo ya sea por cambios físico químicos ocasionados el contenido de agua, procesos de succión de partículas finas, por desgaste del material debido a cambios de temperatura extremos y cíclicos o por lavado de partículas de suelo, las causas de lo anterior no hace parte de este estudio, pero se debe profundizar en una fase 2 de esta tesis.

Para llevar a cabo este estudio, se realiza una adaptación al equipo de corte directo para el control de humedad relativa en la probeta (de ésta manera el contenido de agua es constante durante el ensayo).

Fue tomada probeta inalterada de un talud tipo que contiene suelos de la formación Bucaramanga del cual fueron tomadas probetas con las dimensiones estándares para realizar el ensayo de corte directo.

La finalidad del estudio es determinar los posibles cambios o variaciones en los parámetros de resistencia de estas probetas, realizando varios ciclos de humedecimiento y secado a cada una de ellas y luego ensayarlas en un proceso estándar dentro del equipo de corte directo.

Los resultados permiten describir el efecto del ciclo extremo de humedecimiento y secado en los parámetros de resistencia del suelo.

El presente proyecto se realiza tomando probetas inalteradas de un talud del municipio de Bucaramanga, de la formación Bucaramanga ubicada a 750 metros de la autopista a Girón en la vía que conduce al Porvenir en la ciudad de Bucaramanga (Santander).

1. ESTADO DEL ARTE

En la mecánica de suelos parcialmente saturados apenas se comienza a estudiar el efecto en los parámetros de resistencia debidos a distintas trayectorias hidráulicas. Lo anterior, debido a que en los estudios fundamentales los resultados obtenidos estudiaron principalmente el efecto del grado de saturación o la succión en la envolvente de resistencia de Mohr –Coulomb obteniéndose un incremento en la cohesión aparente de los materiales al incrementarse la succión (Alonso et al 1990) dejando constante el ángulo de fricción. Estos resultados fueron obtenidos para limos arcillosos muy parecidos a los que tenemos en los suelos de la formación Bucaramanga.

Escario (1985) realizó una modificación del equipo de corte convencional para realizar un control de succión matricial ($< 1\text{MPa}$), encontrando también un incremento en la cohesión aparente y ningún cambio en el ángulo de fricción.

Por otra parte, en términos del ángulo de fricción en condición residual, se han realizado algunos trabajos principalmente en el Imperial College de Londres a partir del aparato de corte anular (ring shear). En este sentido se han estudiado, efectos como la tasa de desplazamiento, el efecto de la composición química del agua que contiene la muestra, el efecto de la mineralogía entre otros. Sin embargo no fue sino hasta la tesis doctoral (Merchán 2011) que se estudió el efecto del contenido de humedad o del grado de saturación en el ángulo de fricción residual encontrándose cambios importantes en materiales arcillosos en particular variaciones desde 13° en condición saturada hasta 30° en condición de muy alta succión (140MPa) es decir de muy bajo contenido de humedad. Otro aspecto es el efecto de los cambio de humedad sucesivos en los parámetros de resistencia pico. Este tema fue tratado en el proyecto y constituye muy seguramente el primer

referente de este tipo de estudios a nivel local y muy probablemente uno de los primeros a nivel mundial.

Por lo anterior, no existen en la literatura muchos elementos asociados a este tema en particular, quizá ninguno.

En términos de las hipótesis tenidas en cuenta para explicar los comportamientos observados experimentalmente en su momento se planteó que el aumento de la cohesión por efectos de la succión en el caso de las envolventes de resistencia pico estudiadas por Escario (1985) y Alonso et al (1990) se deben fundamentalmente al “bonding” que se desarrolla entre las partículas por efectos de los meniscos generados por la condición de saturación parcial. Es decir, el efecto capilar desarrolla cohesión entre las partículas y es más pronunciado este efecto a menor contenido de agua. En el caso de la resistencia residual estudiada por Merchán (2010), la succión no juega un papel importante en la cohesión pues esta no se observó en condiciones residuales, es decir cuando se somete una muestra a corte bajo grandes desplazamientos. Sin embargo, se observó una relación proporcional con la succión en términos del ángulo de fricción que en principio se creía invariante ante el efecto de la succión como fue demostrado en los trabajos de Alonso et al y Escario (1985). Los resultados del estudio micro-estructural de las muestras probadas por Merchán (2010) sugieren que durante el secado (aumento de la succión), el material arcilloso ganaba agregación, entendida como una rigidización entre los agregados de arcilla, de manera que durante el proceso de corte progresivo, la cohesión se destruía dejando puramente la fricción entre agregados, más rígidos cuanto menor contenido de agua tenían. Se puede pensar que esto también corresponde a un efecto de densificación del agregado por efectos de la curva de contracción cuando el material se somete a secado, sin embargo, esta hipótesis fue desestimada a partir de resultados con la parte fina del material arcilloso a índices de poro importantes sin procesos de secado partiendo de la condición saturada sino de la condición

más seca. Por tanto, es un efecto puramente micro-estructural y en particular a nivel de agregados de partículas de arcilla.

En investigaciones anteriores se han llevado a cabo trabajos sobre la fuerza cortante residual, que solo aplica un ciclo de humedecimiento a las probetas falladas, las cuales se ha estudiado en los últimos 50 años para analizar los problemas tales como la reactivación de deslizamientos progresiva de tierra, fenómenos de fallos, y la estabilidad del terraplén entre otros.

Las atenciones de estos estudios se han centrado principalmente en el estudio de la dependencia de diferentes factores en esta resistencia al cizallamiento residual de materiales arcillosos. La clasificación del suelo (Skempton 1964; Lupini et al. 1981), las partículas mineralogía (Mitchell y Soga 2005), la velocidad de cizallamiento (Tika et al. 1996), y la química del agua de poro (Di Maio, 1996a, b; Chighini et al 2005;. Musso et al. 2008). Sin embargo no se han tenido en cuenta los ciclos de humedecimiento y secado y su relación con los parámetros geotécnicos del suelo.

Hasta ahora, la microestructura de la arcilla, se había relacionado con el comportamiento en pequeñas deformaciones mediante el estudio de la cizalladura del módulo de elasticidad. Los resultados experimentales sobre muestras compactadas fueron estudiados con el estrés micro-estructural efectivo, propuesto por Alonso et al. (2010) y el estudio de las propiedades de distribución de tamaño de poro y una función de la historia en el secado.

La fuerza de cizallamiento residual de los suelos en los grandes desplazamientos, son típicamente asociados con la formación de superficies de cizallamiento.

Su importancia se relaciona con problemas geotécnicos, en la que la estabilidad de materiales fisurados, insuficiencia progresiva y preexistentes superficies

cortantes están involucrados. la primera Determinación de la resistencia residual de arcilla sin molestias fue publicado por el Dr. B. Tiedemann en 1937, que reconoció la existencia de una fuerza constante en desplazamientos cortantes grandes y el término «Residual» fue presentado por el profesor R. Haefeli en 1938 en Alemania.

En el desarrollo del presente estudio sobre la influencia de ciclos de secado, en los parámetros geotécnicos del suelo, se consideró que debido a la poca investigación realizada en el tema, la experimentación de ensayos de laboratorio que se plantean en este proyecto contribuyen con una fase preliminar de los efectos de la saturación y secado para las muestras de suelo con componentes arcillosos. La cual debe complementarse con experimentos complementarios en el tema y monitoreo de los taludes intervenidos.

Es así como se presenta el proyecto descrito en este documento

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar la influencia de los ciclos de humedecimiento en los parámetros de resistencia y secado en probeta de suelo natural de un talud de la formación Bucaramanga. En el costado occidental de la ciudad de Bucaramanga.

Realizar las pruebas experimentales realizadas a una probeta tomada mediante un apique realizado en la formación órganos ubicada en la vía que conduce de la autopista a Girón hacia el Porvenir en la ciudad de Bucaramanga (Santander).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer envolventes de resistencia en función de los ciclos de humedecimiento y secado.
- Realización de las pruebas de corte directo y clasificación de suelo a la probeta tomada simulando las condiciones de precipitación y exposición a temperatura de secado.
- Registrar la documentación de la variación de condiciones en las distintas pruebas realizadas.
- Documentar los análisis realizados a las distintas probetas para obtener las envolventes de carga, ángulos de fricción y comportamiento de la humedad relativa y temperatura ambiente con respecto al tiempo de realización de la prueba.

- Realizar un conjunto de análisis de estabilidad del talud seleccionado para las diferentes envolventes de resistencia, con una curva de reducción de resistencia en los parámetros geotécnicos del suelo.
- Conclusiones y análisis de los resultados encontrados

3. METODOLOGIA

- Selección de un talud para el experimento:- Fue seleccionado un talud que se encuentre dentro de la formación Bucaramanga ,el cual haya sido objeto de cortes para ampliación vial
- Levantamiento topográfico del talud : Se realizó el levantamiento topográfico del talud, con el fin de realizar un modelo digital del terreno para hacer al análisis de estabilidad
- Toma de probetas: Se extrajo una muestra de suelo en bloque de la parte superior del talud, cuyas características fueran homogéneas en composición de suelo.
- Realización de ensayos de laboratorio: primero se realizaron ensayos de clasificación de las probetas, granulometrías, límites de plasticidad y peso unitario para conocer el tipo de suelo.
- Realización de probetas con dimensiones estándar para realizar ciclos de humedecimientos y secado para luego realizar el ensayo de corte directo a cada muestra con diferentes ciclos, con los cuales se determinaron los parámetros de resistencia, ángulo de fricción y cohesión bajo diferentes procesos de saturación y drenaje, con el fin de simular los procesos de humedecimiento y secado que ocurren en el talud.

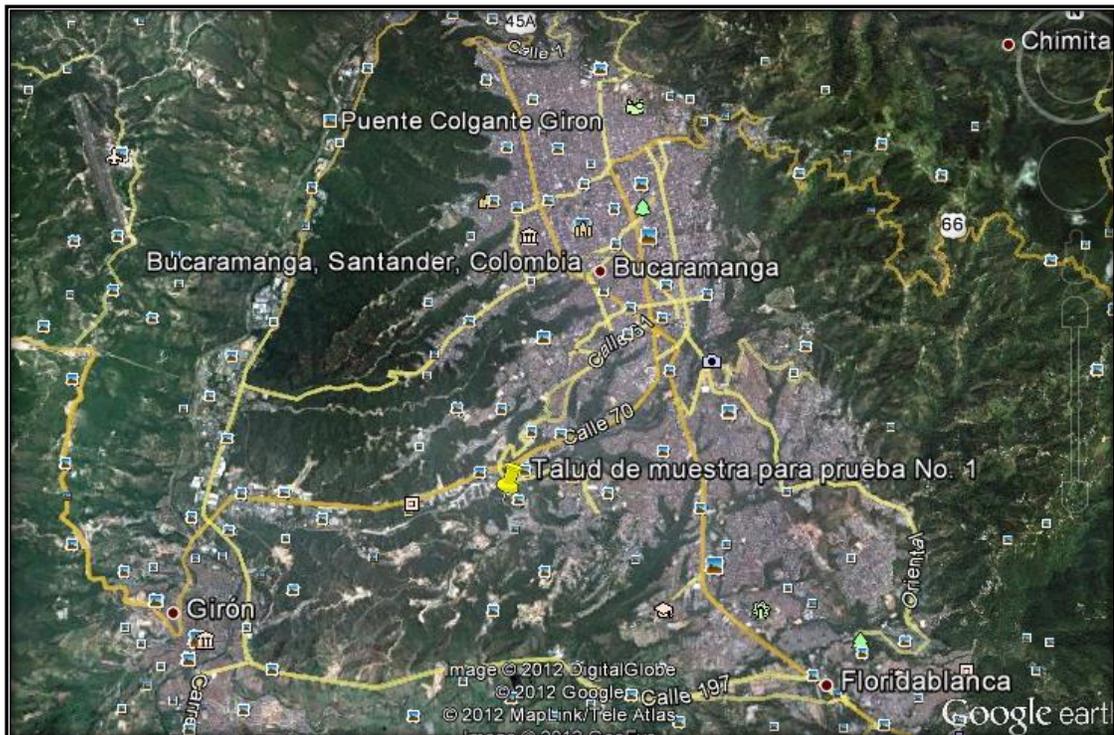
- Análisis de resultados , evaluación de la estabilidad del talud mediante un software especializado
- Conclusiones.

4. SELECCIÓN DE UN TALUD PARA EL EXPERIMENTO

4.1 LOCALIZACIÓN

El sector del muestreo se encuentra a 750 metros de la autopista a Girón s tomando un desvío que se encuentra antes de la bomba del puente El Bueno sentido Girón – Bucaramanga el cuál es la entrada también para el parque industrial éste desvío conduce a la piscina del recrear porvenir; dicho sector es el punto referenciado en el mapa de localización general por la marca de posición de color amarillo.

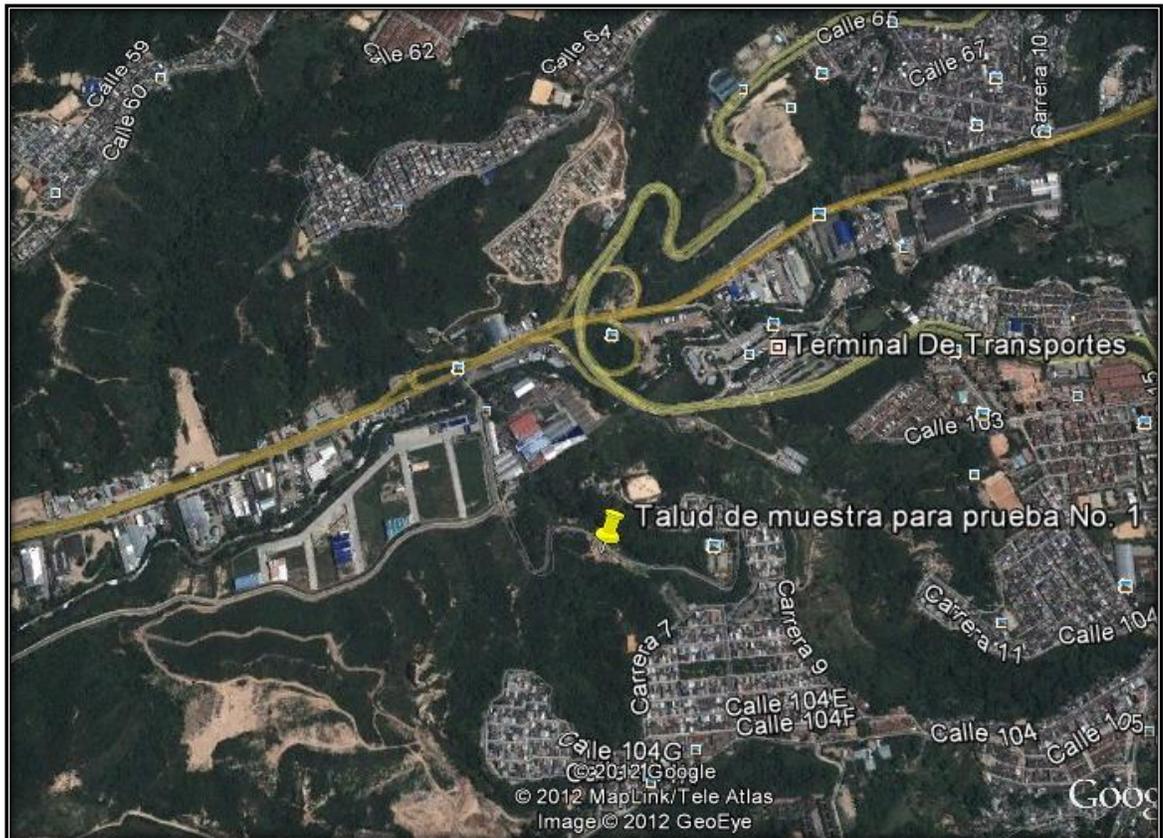
Figura 1 Localización general



Fuente: Estudiante – Google Earth

4.2 DESCRIPCIÓN DEL SECTOR

Figura 2 Localización sector de la vía al Porvenir en la ciudad de Bucaramanga (Santander).



Fuente: Estudiante – Google Earth

El sector se caracteriza por ser un depósito de material aluvial de piedras redondeadas, en forma de meseta de pendiente alta, con una coloración amarilla y rojiza arcillosa y predominancia de vegetación media arbustiva.

Qbo MIEMBRO ORGANOS: Es un depósito fluviotorrencial, compuesto por una serie monótona de fragmentos gruesos polimicticos, de aspecto conglomerático, en alternancia con capas y lentes limo arenosos, con variaciones laterales y

verticales en composición y textura. La probeta se tomó en la matriz de esta formación.

Fotografía 1 Vista sector



Fuente: Estudiante

Se observa en la fotografía anterior una vista panorámica del sector donde se realizó el apique el cual fue realizado en uno de los lentes limo arenoso de la formación Bucaramanga

Fotografía 2 talud seleccionado para la toma de probetas de suelo para el estudio.



Fuente: Estudiante

Se puede observar el perfil perteneciente al miembro órganos de la formación Bucaramanga

5. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

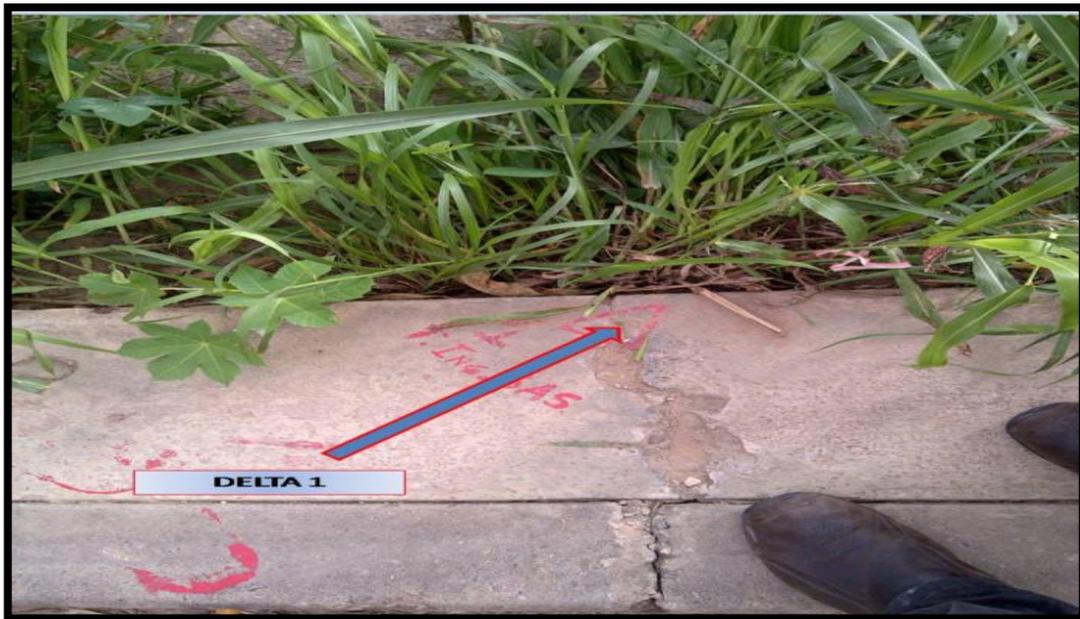
El levantamiento se realizó ejecutando amarres al sistema GPS en el sector en estudio y trazando poligonales cerradas, para después llevar a cabo las armadas donde se tomaron los detalles por medio de radiaciones.

En este sector se localizó un juego de coordenadas con su respectiva cota, quedando demarcadas como DELTA "1", DELTA "2", descritos a continuación:

DELTA 1: Delta localizado sobre el borde de la vía, materializado con una puntilla acerada tipo sombrilla e intervisible con el DELTA2 con una distancia de 40.508 m de longitud

DELTA 1: N= 1275278.000, E= 1104412.000, COTA= 859.000

Fotografía 3 Localización Delta 1 levantamiento topográfico



Fuente: Estudiante

Fotografía 4 Localización Delta 1 levantamiento topográfico



Fuente: Estudiante

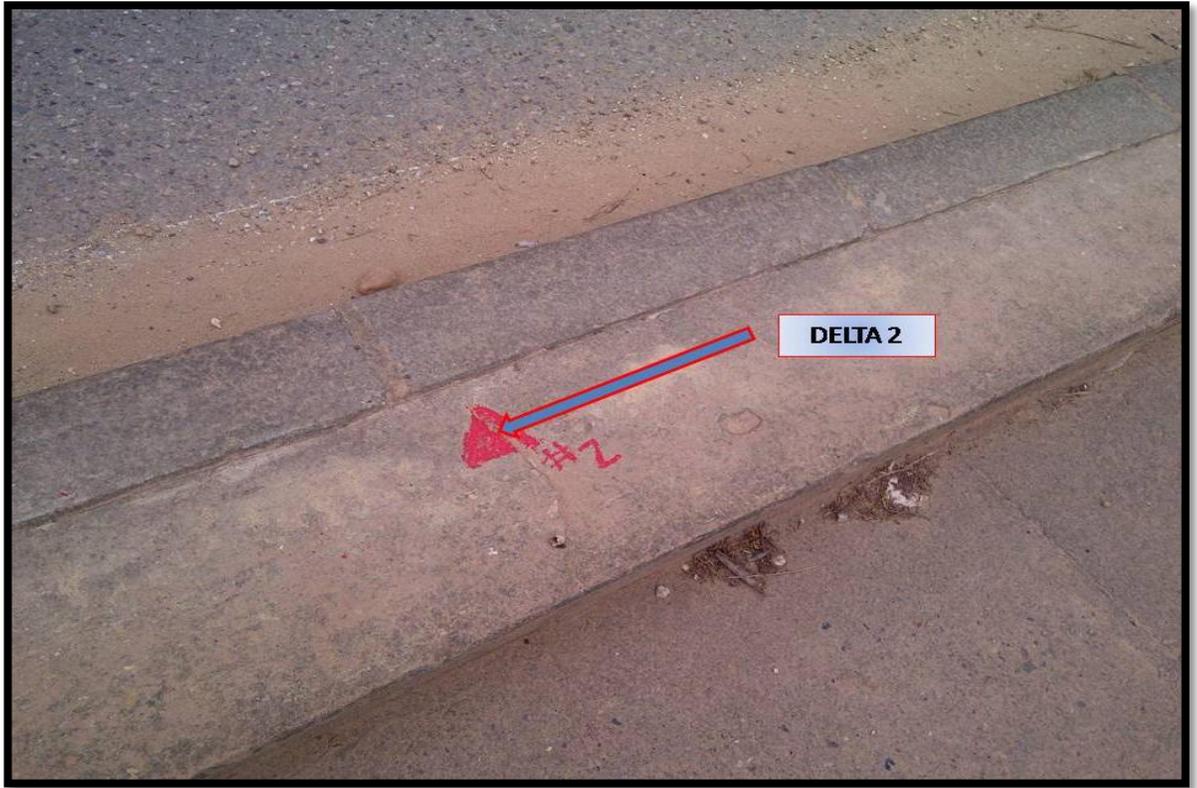
DELTA 2:N= 1275294.623, E= 1104375.060, COTA= 854.952

Fotografía 5 Localización Delta 2 levantamiento topográfico



Fuente: Estudiante

Fotografía 6. Localización Delta 2 levantamiento topográfico



Fuente: Estudiante

Se recomienda resaltar periódicamente los Deltas de referencia, para evitar que se borren con el paso del tráfico.

6. EQUIPOS UTILIZADOS

El levantamiento topográfico se realizó teniendo como base los siguientes equipos.

6.1 ESTACIÓN GEODÉSICA TOTAL TOPCON 239W

Es un equipo electro-óptico utilizado en topografía, cuyo funcionamiento se apoya en la tecnología electrónica que consiste en la incorporación de un distanciómetro y un microprocesador a un teodolito electrónico. Tiene la posibilidad de guardar información en formato electrónico, lo cual permite utilizarla posteriormente en ordenadores personales. Vienen provistas de diversos programas sencillos que permiten, entre otras capacidades, el cálculo de coordenadas en campo, el replanteo de puntos de manera sencilla y eficaz y el cálculo de azimuts y distancias. La figura probeta la estación total utilizada en el levantamiento.

Figura 3 Estación total Topcon 239w



Fuente: Consultor

Los resultados del levantamiento topográfico se pueden observar en la siguiente tabla, que contiene la cartera topográfica obtenida en campo.

Tabla 1. Cartera topográfica

PUNTO	NORTE	ESTE	ALTURA	DESCRIPCIÓN
1	1275278	1104412	859	DEL-1
2	1275294.62	1104375.06	854.952	DEL-2
3	1275306.87	1104342.27	851.121	BV
4	1275307.55	1104342.4	851.222	POST
5	1275304.19	1104350.19	851.967	POZO
6	1275305.18	1104350.69	852.034	BV
7	1275299.04	1104350.26	851.883	BV
8	1275303.25	1104356.9	852.77	BV
9	1275296.5	1104359.92	853.166	BV
10	1275299.51	1104365.84	853.713	BV
11	1275291.71	1104368.88	854.371	BV
12	1275297.9	1104370.5	854.303	POST
13	1275288.89	1104373.32	854.999	BV
14	1275288.72	1104384.74	855.948	SUM
15	1275286.82	1104388.29	856.175	SUM
16	1275279.4	1104387.72	856.775	BV
17	1275282.98	1104396.64	857.266	BV
18	1275283.86	1104396.5	857.251	POST
19	1275279.6	1104397.94	857.571	POZO
20	1275274.14	1104400	857.991	BV
21	1275277.9	1104410.5	858.657	FALL
22	1275276.75	1104408.01	858.497	FALL
23	1275277.55	1104404.46	858.174	FALL

PUNTO	NORTE	ESTE	ALTURA	DESCRIPCIÓN
24	1275279.18	1104402.1	857.878	FALL
25	1275281.7	1104399.74	857.56	FALL
26	1275271.73	1104407.21	858.702	BV
27	1275275.44	1104419.89	859.515	BV
28	1275267.53	1104423.15	860.094	BV
29	1275275.02	1104424.58	860.138	POST
30	1275272.21	1104439.5	861.166	BV
31	1275265.18	1104440.8	861.486	BV
32	1275271.28	1104453.18	862.289	BV
33	1275264.08	1104459.71	862.96	BV
34	1275270.75	1104463.87	863.122	BV
35	1275271.44	1104463.81	863.312	POST
36	1275264	1104477.71	864.399	BV
37	1275270.13	1104479.19	864.29	POZO
38	1275263.04	1104448.6	862.296	TN
39	1275260.7	1104444.08	868.039	TN
40	1275254.96	1104445.91	876.055	TN
41	1275253.25	1104444.31	875.686	TN
42	1275264.2	1104434.65	861.155	TN
43	1275254.05	1104439.55	875.055	TN
44	1275261.2	1104434.8	866.274	TN
45	1275254.21	1104437.77	873.835	TN
46	1275265.14	1104428.32	860.742	TN
47	1275255.5	1104435.05	874.444	TN
48	1275256.96	1104432.64	873.865	TN
49	1275261.93	1104427.98	865.922	TN
50	1275258.02	1104429.82	873.417	TN

PUNTO	NORTE	ESTE	ALTURA	DESCRIPCIÓN
51	1275265.71	1104423.28	860.334	TN
52	1275262.51	1104422.17	865.609	TN
53	1275259.47	1104427.51	870.49	TN
54	1275269.47	1104412.27	859.339	TN
55	1275260.66	1104422.97	868.91	TN
56	1275260.38	1104418.52	870.855	TN
57	1275264.55	1104411.56	864.296	TN
58	1275272.57	1104399.48	859.864	TN
59	1275267.68	1104398.9	863.602	TN
60	1275260.38	1104414.91	873.765	TN
61	1275267.41	1104397.15	865.747	TN
62	1275259.8	1104411.78	873.962	TN
63	1275259.4	1104409	874.195	TN
64	1275281.24	1104382.41	856.357	TN
65	1275260.29	1104407.28	873.961	TN
66	1275260.12	1104402.82	871.738	TN
67	1275261.92	1104401.43	869.682	TN
68	1275264.89	1104401.73	867.636	TN
69	1275264.59	1104399.07	866.964	TN
70	1275266.26	1104398.05	866.403	TN
71	1275267.39	1104395.44	866.16	TN
72	1275276.65	1104379.44	863.092	TN
73	1275261.71	1104396.22	868.637	TN
74	1275260.51	1104390.16	868.534	TN
75	1275261.7	1104386.87	868.218	TN
76	1275266.79	1104392.06	866.002	TN
77	1275278.16	1104392.13	857.245	DERRU

PUNTO	NORTE	ESTE	ALTURA	DESCRIPCIÓN
78	1275267.97	1104385.34	865.894	PARA
79	1275275.47	1104395.66	857.609	DERRU
80	1275271.28	1104384.52	865.841	TN
81	1275274.36	1104393.43	858.848	DERRU
82	1275271.26	1104384.52	865.836	TN
83	1275272.21	1104380.73	865.951	TN
84	1275275.78	1104392.04	859.027	DERRU
85	1275274.14	1104380.93	866.024	TN
86	1275275.78	1104390.2	858.418	DERRU
87	1275276.67	1104377.93	866.837	TN
88	1275279.33	1104413.97	858.967	FALL
89	1275278.35	1104412.85	858.962	FALL
90	1275279.73	1104410.65	858.551	FALL
91	1275280.53	1104407.57	858.204	FALL
92	1275282.32	1104402.29	857.681	FALL
93	1275284.35	1104397.1	857.222	FALL
94	1275286.3	1104394.43	856.925	FALL
95	1275284.99	1104393.43	856.926	BOX
96	1275285.75	1104391.43	856.736	BOX
97	1275288.68	1104393.16	855.064	BOX
98	1275287.68	1104394.42	855.207	BOX
99	1275277.9	1104427.52	859.815	TN
100	1275278.21	1104425.23	859.611	TN
101	1275278.98	1104422.13	859.599	TN
102	1275279.73	1104418.59	859.346	TN
103	1275280.36	1104415.21	859.041	TN
104	1275279.92	1104413.21	858.666	TN

PUNTO	NORTE	ESTE	ALTURA	DESCRIPCIÓN
105	1275280.75	1104409.85	858.193	TN
106	1275281.93	1104406.37	857.718	TN
107	1275282.79	1104403.33	857.595	TN
108	1275283.68	1104400.77	857.253	TN
109	1275284.82	1104398.64	857.155	TN
110	1275285.76	1104396.43	857.009	TN
111	1275290.92	1104398.41	855.005	TN
112	1275289.39	1104400.41	854.819	TN
113	1275287.26	1104402.84	854.163	TN
114	1275285.9	1104407.01	854.367	TN
115	1275283.4	1104411.61	855.632	TN
116	1275283.65	1104413.47	855.747	TN
117	1275284.45	1104416.79	856.043	TN
118	1275283.15	1104421.33	856.738	TN
119	1275282.38	1104425.51	856.857	TN
120	1275281.4	1104427.95	857.325	TN
121	1275298.93	1104414.94	847.749	DEL-3
122	1275294.8	1104397.44	853.081	TN
123	1275293.06	1104400.37	852.614	TN
124	1275289.56	1104401.58	853.845	TN
125	1275287.74	1104404.87	853.356	TN
126	1275286.93	1104409.57	853.544	TN
127	1275285.56	1104413.39	854.263	TN
128	1275286.13	1104416.27	853.712	TN
129	1275287.78	1104418.25	852.468	TN
130	1275288.72	1104420.51	851.395	TN
131	1275291.15	1104424.55	850.077	TN

PUNTO	NORTE	ESTE	ALTURA	DESCRIPCIÓN
132	1275289.6	1104428.44	851.021	TN
133	1275299.47	1104403.54	849.004	TN
134	1275293.7	1104435.05	849.014	TN
135	1275298.28	1104407.25	848.908	TN
136	1275294.88	1104430.05	848.65	TN
137	1275296.23	1104411.13	849.237	TN
138	1275298.67	1104428.74	847.583	TN
139	1275295.05	1104414.62	848.819	TN
140	1275296.8	1104423.02	847.659	TN
141	1275293.77	1104416.99	848.985	TN
142	1275297.93	1104418.51	847.413	TN
143	1275292.83	1104417.56	850.223	TN
144	1275299.99	1104412.35	847.275	TN
145	1275294.01	1104420.8	849.399	TN
146	1275304.83	1104403.2	846.417	EJE
147	1275295.68	1104418.9	847.839	TN
148	1275308.3	1104404.95	845.483	EJE
149	1275302.63	1104423.6	846.367	BCAN
150	1275313.75	1104400.57	844.082	BCAN
151	1275315.53	1104401.27	843.931	BCAN
152	1275311.5	1104403.95	844.524	BCAN
153	1275302.3	1104418.79	846.353	BCAN
154	1275312.31	1104405.16	844.813	BCAN
155	1275304.45	1104416.77	846.381	BCAN
156	1275310.48	1104405.84	845.149	BCAN
157	1275307.13	1104415.52	845.785	BCAN
158	1275310.69	1104411.46	845.279	BCAN

PUNTO	NORTE	ESTE	ALTURA	DESCRIPCIÓN
159	1275307.8	1104414.16	845.485	BCAN
160	1275307.43	1104412.11	845.618	BCAN
161	1275304.65	1104426.62	847.35	TN
162	1275317.39	1104400.22	843.669	TN
163	1275309.14	1104423.86	847.887	TN
164	1275313.78	1104420.61	847.58	TN
165	1275319.26	1104416.72	846.933	TN
166	1275314.84	1104403.79	844.303	TN
167	1275324.62	1104419.75	848.391	TN
168	1275320.76	1104421.27	848.052	TN
169	1275314.39	1104409.39	845.306	TN
170	1275316.67	1104424.04	848.83	TN
171	1275312.44	1104411.88	845.544	TN
172	1275312.63	1104426.56	848.907	TN
173	1275310.66	1104414.19	845.694	TN
174	1275308.73	1104416.28	846.435	TN
175	1275321.36	1104406.97	844.863	TN
176	1275306.22	1104430.66	848.879	ARB
177	1275321.53	1104410.02	845.664	TN
178	1275309.32	1104428.01	848.831	ARB
179	1275313.29	1104419	847.194	ARB
180	1275313.33	1104411.51	845.855	ARB
181	1275312.59	1104409.54	844.481	ARB
182	1275310.16	1104403.28	845.037	ARB
183	1275323.67	1104409.2	845.568	TN
184	1275314.57	1104408.67	843.97	ARB
185	1275304.35	1104414.35	846.801	ARB

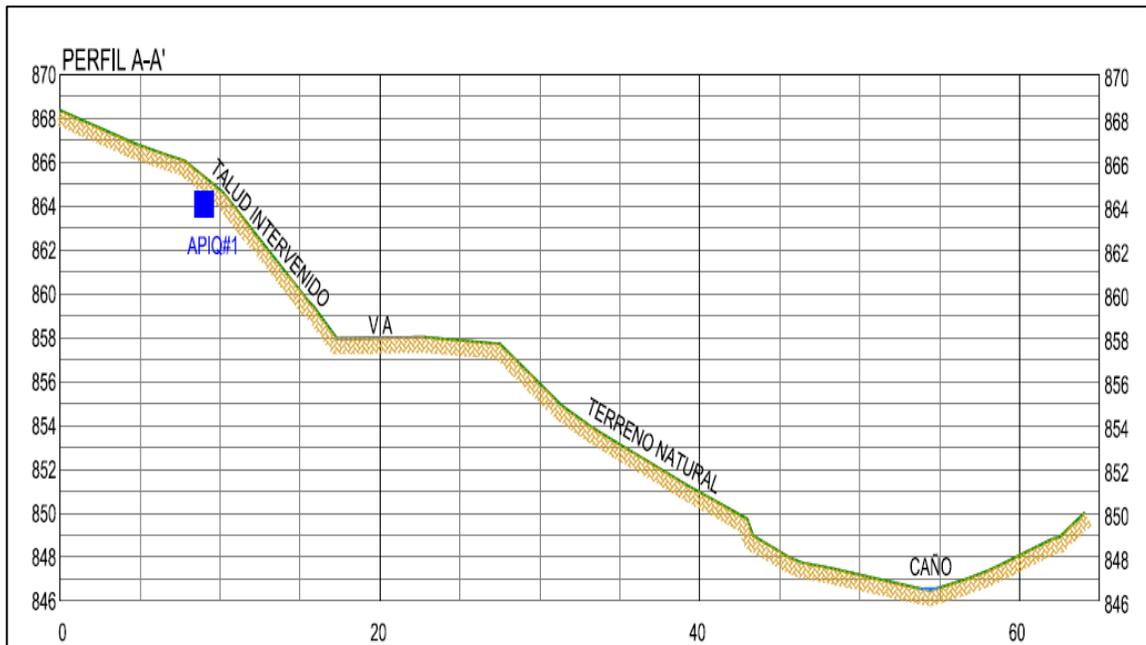
PUNTO	NORTE	ESTE	ALTURA	DESCRIPCIÓN
186	1275301.01	1104413.22	847.011	ARB
187	1275301.68	1104402.03	847.7	EJE
188	1275299.08	1104400.5	849.47	EJE

Fuente: Consultor

Con esta cartera topográfica se generó un esquema en planta y perfil mediante modelo digital del terreno, que permite identificar todas las características mencionadas anteriormente en el sector donde se extrajeron las probetas para el desarrollo del experimento.

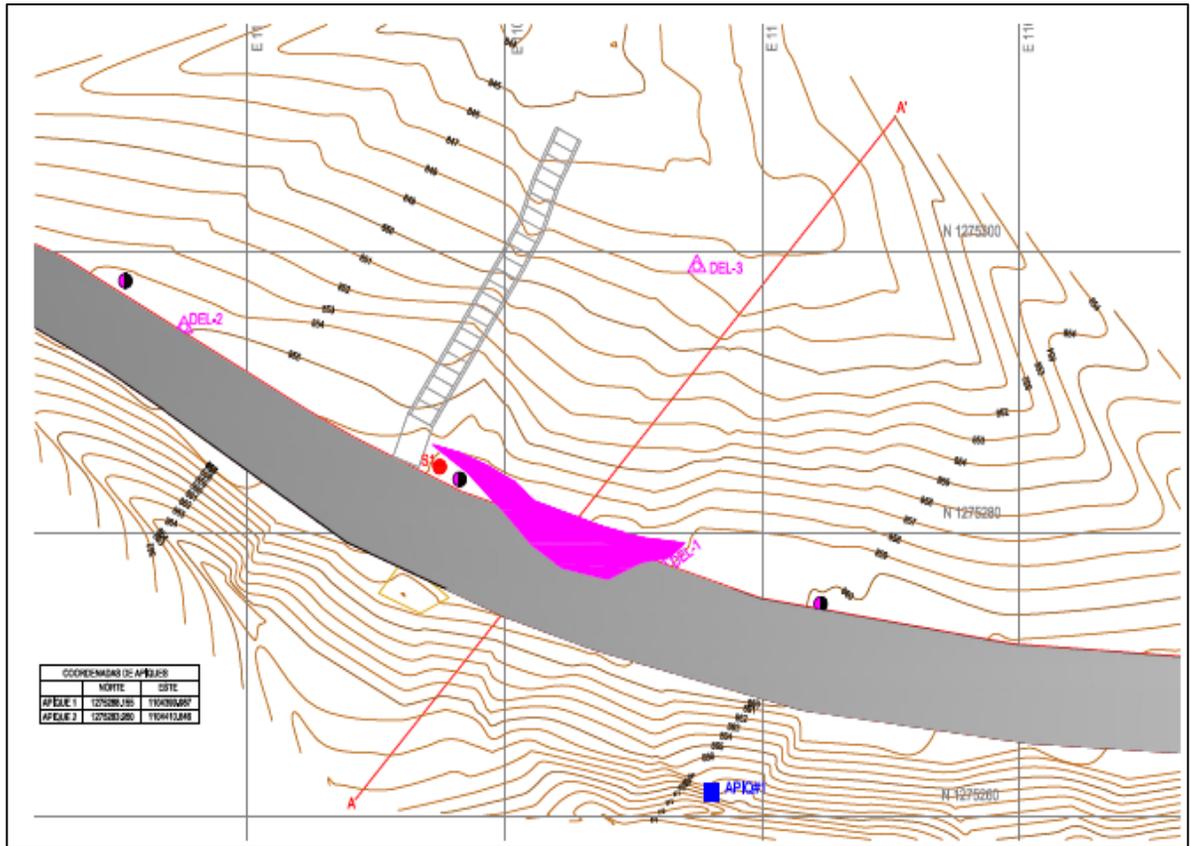
La siguiente figura muestra el perfil topográfico del sector PORVENÍR.

Figura 4. Perfil topográfico A-A'



Fuente: Consultor

Figura 5 Planta topográfica



Fuente: Consultor

Toma de probetas de suelo del talud

Se realizó un apique de donde se extrajo una probeta inalterada en bloque de la parte superior del talud, cuyas características fueran homogéneas en composición de suelo. Ver localización apique en planta y perfil

Fotografía 6. Detalle de la excavación y Bloque probeta.



Fuente: Estudiante

Se aprecia el tamaño del bloque de suelo inalterado extraído de la parte superior del talud. Las pastillas para los cortes y la probeta para la clasificación del suelo fueron tomadas de varios bloques los cuales fueron extraídos mediante una excavación en forma de trinchera a una profundidad de 1.5 m. los bloques están caracterizados por la presencia de coloración parda predominante y en menos proporciones vetas de color amarillo y blanco. Las dimensiones de las pastillas y sus pesos fueron registrados para obtener datos de deformación en su volumen después de realizar los ciclos de humedecimiento y secado.

Fotografía 8 Muestreo de pastillas



Fuente: Estudiante

Se observa el tamaño estándar de la probeta que se extrae del bloque de suelo.

Durante de la investigación se realizaron 3 pruebas, cada prueba incluía la toma de bloques del mismo suelo de los cuales posteriormente serian extraídas las probetas para la caracterización del tipo de suelo y las pastillas para la realización de los ensayos de corte directo, para las pruebas de humedecimiento-secado así como también pastillas extras para darle el uso que fuera necesario. La cantidad de probetas se relacionan a continuación.

7. REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO:

Se realizaron tres pruebas a las probetas de suelo, para las cuales se hicieron los respectivos ensayos de laboratorio para clasificación y límites de plasticidad.

Las pruebas 1, 2 y 3 sirvieron para determinar el procedimiento estándar de humedecimiento y secado de las probetas

Una vez la probeta fue llevada al laboratorio, Fueron realizados ensayos de clasificación de las probetas, granulometrías, límites de plasticidad y peso unitario para conocer el tipo de suelo. Luego de esto se tallaron probetas con dimensiones estándar para realizar el ensayo de corte directo con el cual se determinaron los parámetros de resistencia, ángulo de fricción y cohesión bajo diferentes procesos de saturación y drenaje, con el fin de simular los procesos de humedecimiento y secado

7.1 CLASIFICACIÓN DEL TIPO DE SUELO S.U.C.S,

El primer ensayo consiste en la clasificación granulométrica de la probeta del suelo

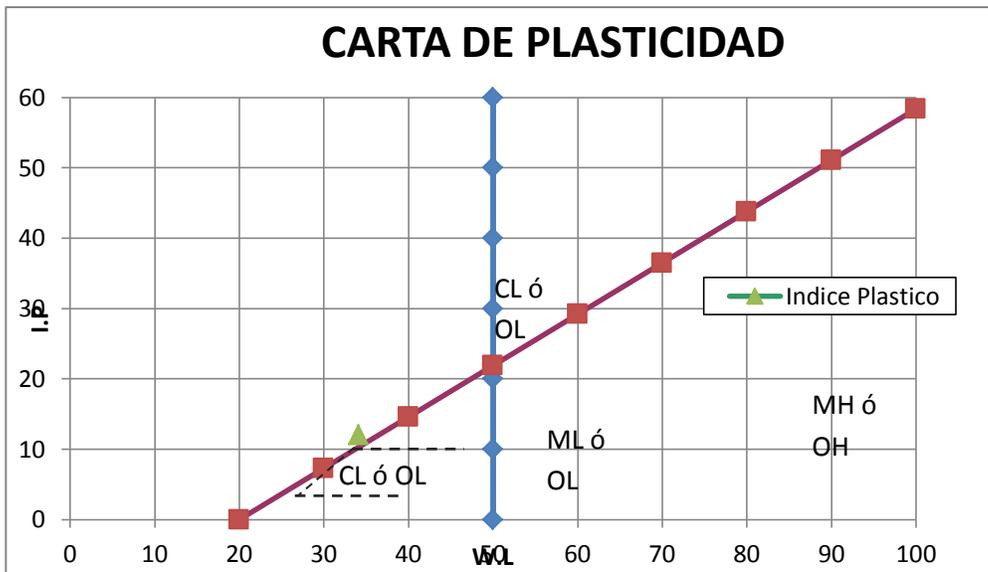
7.1.1 Prueba 1

Tabla 2. Resumen Granulometrías Prueba 1

Torres INGENIERIA		Perfil Estratigráfico													
Proyecto:		PROYECTO DE GRADO				FECHA:	08/03/2012		CÓDIGO	TOR-LAB-04					
Tipo de ensayo:		GRANULOMÉTRICO		Solicitante:				HOJA	2						
								DE	2						
PROF(m)	DESCRIPCIÓN	DIAGRAMA	MUESTRA	CLASIFICACIÓN S.U.C.S.	wn. %	LÍMITES ATTERBERG				GRADACIÓN			A.A.S.H.T.O.	LUGAR	UBICACIÓN
						LL. %	LP. %	IP. %	Ic	GRAVAS %	ARENAS %	FINOS %			
1,50	ARCILLA LIGERA CON ARENA, HUMEDAD BAJA, CONSISTENTE.		M1	CL	13,61%	34,13%	22,07%	12,06%	1,70	0,00%	24,32%	75,68%	A-6	VIA AL PORVENIR	MUNICIPIO DE BUCARAMANGA

Fuente: Estudiante

Figura 6. Carta de plasticidad clasificación Prueba 1



Fuente: Estudiante

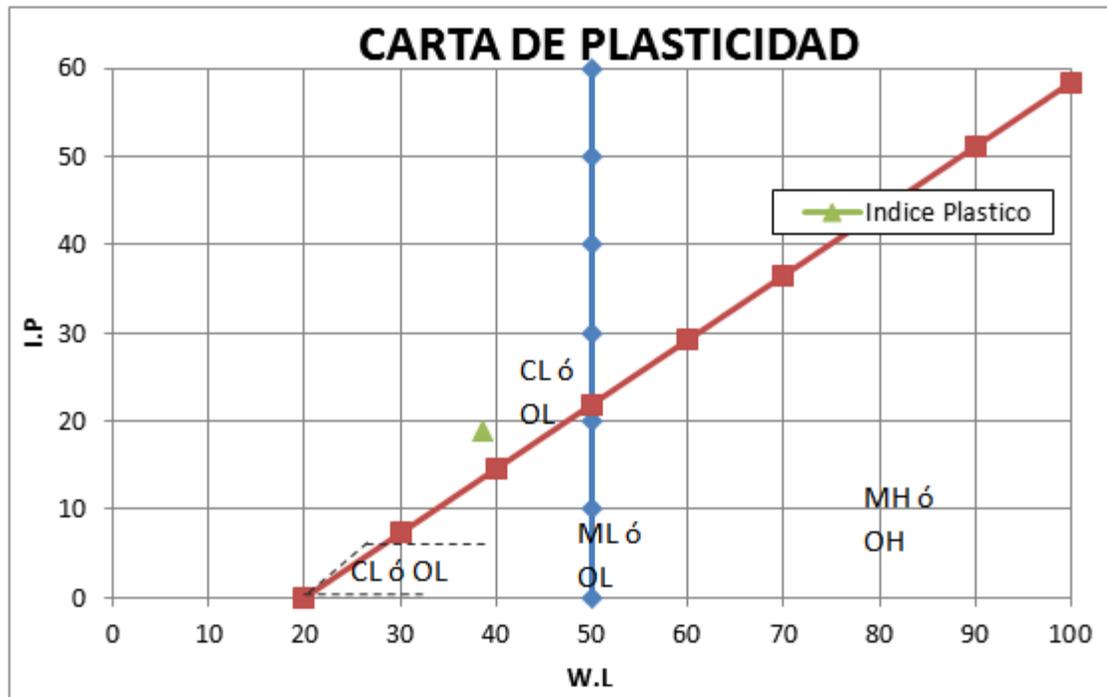
7.1.2 Prueba 2

Tabla 3. Resumen Granulometrías Prueba 1

		Perfil Estratigráfico													
		Proyecto:		PROYECTO DE GRADO			FECHA:		08/03/2012		CÓDIGO	TOR-LAB-04			
		Tipo de ensayo:		GRANULOMÉTRICO	Solicitante:					HOJA	2				
PROF(m)	DESCRIPCIÓN	DIAGRAMA	MUESTRA	CLASIFICACIÓN S.U.C.S.	wt. %	LÍMITES ATTERBERG				GRADACIÓN			A.A.S.H.T.O.	LUGAR	UBICACIÓN
						LL. %	LP. %	IP. %	Ic	GRAVAS %	ARENAS %	FINOS %			
1,50	ARCILLA LIGERA CON ARENA, HUMEDAD BAJA, CONSISTENTE.		M1	CL	13,61%	34,13%	22,07%	12,06%	1,70	0,00%	24,32%	75,68%	A-6	VIA AL PORVENIR	MUNICIPIO DE BUCARAMANGA

Fuente: Estudiante

Figura 7. Carta de plasticidad Prueba 2



Fuente: Estudiante

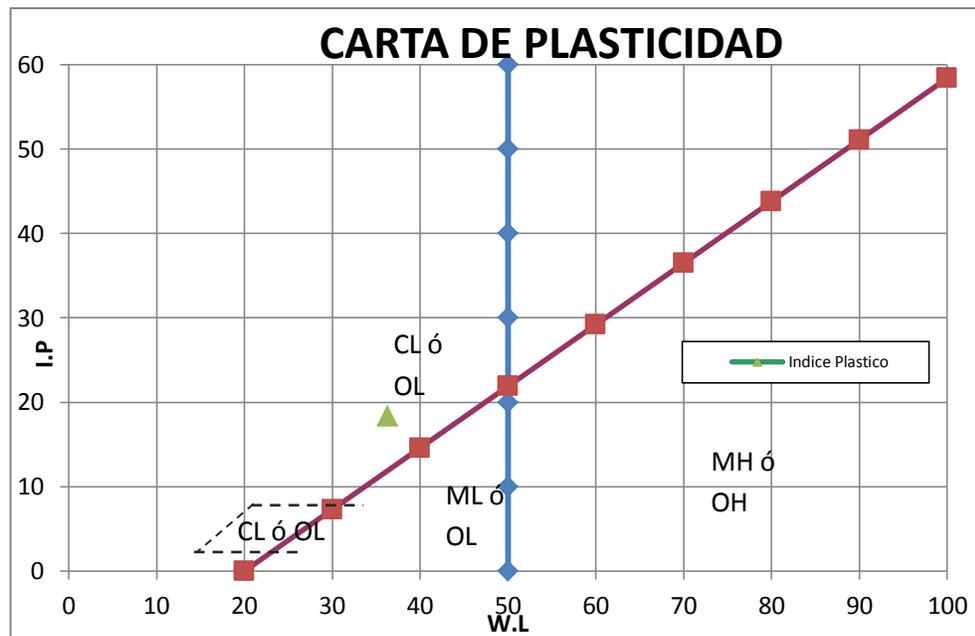
7.1.3 Prueba 3

Tabla 4. Resumen Granulometrías Prueba 3

		Perfil Estratigráfico											CÓDIGO		TOR-LAB-04	
		Proyecto:			Proyecto de grado				FECHA:		20/04/2012		HOJA		2	
Tipo de ensayo:		CARACTERIZACIÓN			Solicitante:				GRADACIÓN			DE		2		
PROF(m)	DESCRIPCIÓN	DIAGRAMA	MUESTRA	CLASIFICACIÓN S.U.C.S.	wn. %	LÍMITES ATTERBERG				GRADACIÓN			A.A.S.H.T.O.	LUGAR	UBICACIÓN	
						LL. %	LP. %	IP. %	Ic	GRAVAS %	ARENAS %	FIOS %				
0,00	Arcilla inorgánica de baja a media plasticidad de buena consistencia con humedad media															
			M1	CL	20,11%	36,31%	17,98%	18,33%	0,88	0,00%	36,23%	63,77%	A-6	Bucaramanga Santander	Via al Porvenir	
1,50																

Fuente: Estudiante

Figura 8. Carta de plasticidad Prueba 3 Prueba 5



Fuente: Estudiante

Se determinó que la probeta de suelo corresponde con un suelo tipo CL, con limite liquido entre 34% y 36% , y límite plástico entre 17% y 22%, Correspondiente con una arcilla inorgánica de baja plasticidad de buena consistencia con humedad media.

7.2 ENSAYO DE CORTE DIRECTO PRACTICADO A LAS PROBETAS DE SUELO.

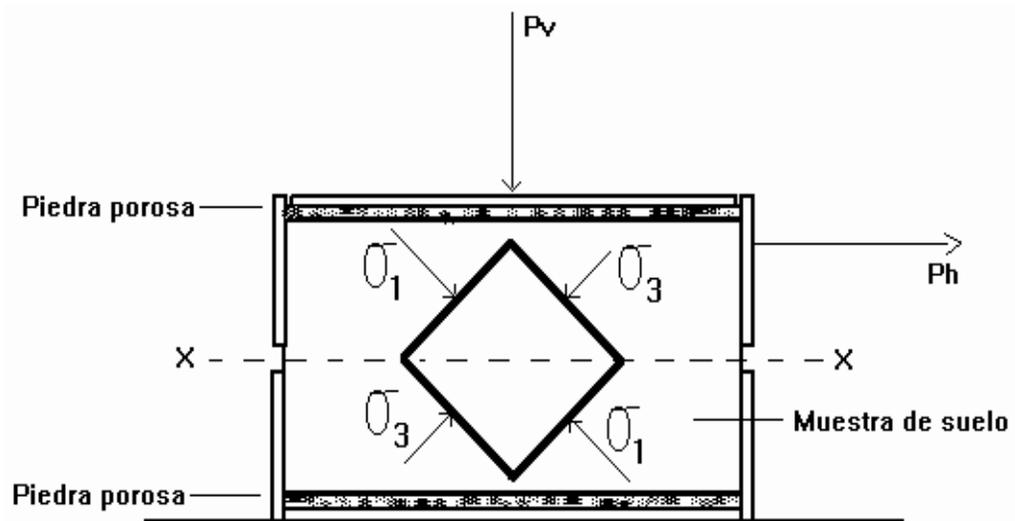
7.2.1 Justificación teórica:

ENSAYO DE CORTE DIRECTO-N – INV -154

La finalidad de los ensayos de corte, es determinar la resistencia de una probeta de suelo, sometida a fatigas y/o deformaciones que simulen las que existen o existirán en terreno producto de la aplicación de una carga.

Para conocer una de estas resistencias en laboratorio se usa el aparato de corte directo, siendo el más típico una caja de sección cuadrada o circular dividida horizontalmente en dos mitades. Dentro de ella se coloca la probeta de suelo con piedras porosas en ambos extremos, se aplica una carga vertical de confinamiento (P_v) y luego una carga horizontal (P_h) creciente que origina el desplazamiento de la mitad móvil de la caja originando el corte de la probeta (figura 1.).

Figura 9. Esquema del aparato de corte directo.



Fuente: Geotecnia LNV., 1993.

El ensayo induce la falla a través de un plano determinado. Sobre este plano de falla actúan dos esfuerzos:

- ✓ un esfuerzo normal (σ_n), aplicado externamente debido a la carga vertical (P_v).
- ✓ un esfuerzo cortante (τ), debido a la aplicación de la carga horizontal.

Estos esfuerzos se calculan dividiendo las respectivas fuerzas por el área (A) de la probeta o de la caja de corte y deberían satisfacer la ecuación de Coulomb:

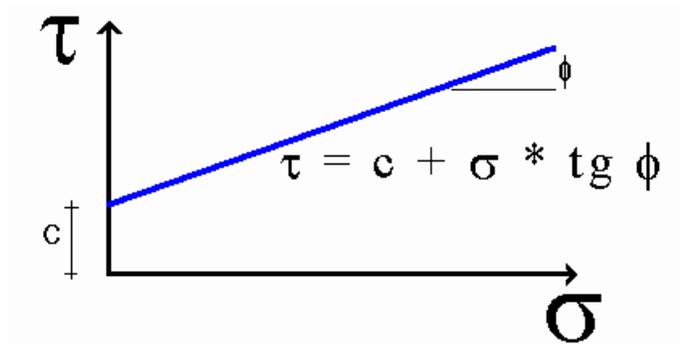
$$\tau = c' + \sigma_n \cdot \tan(\varphi)$$

Según esta ecuación la resistencia al corte depende de la cohesión (c') y la fricción interna del suelo (φ).

Al aplicar la fuerza horizontal, se van midiendo las deformaciones y con estos valores es posible graficar la tensión de corte (τ), en función de la deformación (ϵ) en el plano de esta tensión de corte. De la gráfica es posible tomar el punto máximo de tensión de corte como la resistencia al corte del suelo.

Los valores de τ se llevan a un gráfico en función del esfuerzo normal (σ_n), obteniendo la recta intrínseca (figura 2.), donde τ va como ordenada y σ_n como abscisa. El ángulo que forma esta recta con el eje horizontal es el ángulo φ y el intercepto con el eje τ , la cohesión (c').

Figura 10. Recta intrínseca.



Fuente: Espinace R., 1979.

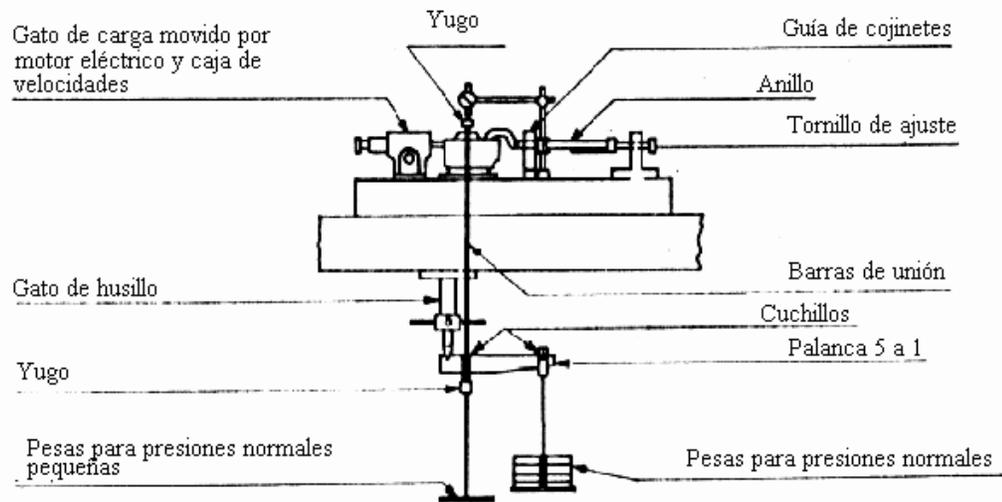
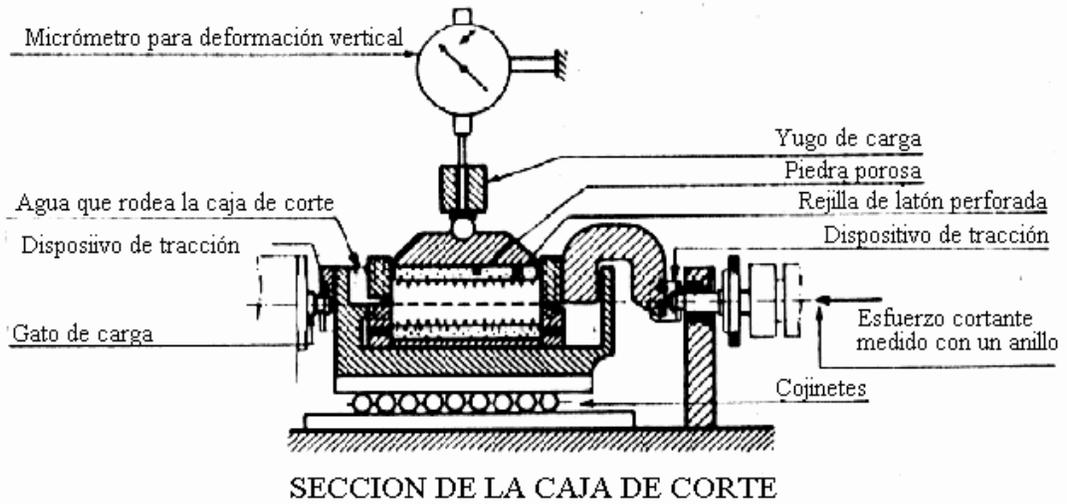
Los ensayos de corte directo en laboratorio se pueden clasificar en tres tipos según exista drenaje y/o consolidación de la probeta, por lo tanto los valores de c' y ϕ dependen esencialmente de la velocidad del ensayo y de la permeabilidad del suelo.

- ✓ Ensayo no consolidado no drenado (UU). Es un ensayo rápido, donde el corte se inicia antes de consolidar la probeta bajo la carga normal (P_v); si el suelo es cohesivo y saturado, se desarrollará exceso de presión de poros. Generalmente la recta intrínseca en el diagrama de τ contra σ es horizontal, donde $\tau = c_u$. No se permite el drenaje de la probeta en todo el ensayo.
- ✓ Ensayo consolidado no drenado (CU). En este ensayo se permite que la probeta drene ó se consolide durante la aplicación de la carga vertical, de modo que en el momento de aplicar el esfuerzo de corte las presiones intersticiales sean nulas, pero no durante la aplicación del esfuerzo cortante. La tensión de corte es rápida para que la presión de poros no pueda disiparse en el transcurso del ensayo. Estos ensayos no se usan en suelos permeables y es necesario medir el movimiento vertical durante la consolidación (drenaje) para saber cuándo se ha producido por completo. Por lo tanto, la ecuación de Coulomb se transforma en:

$$\tau = c_{cu} + \sigma * Tg(\varphi_{cu}) = c_{cu} + (\sigma + \mu) * Tg(\varphi_{cu})$$

- ✓ Ensayo consolidado drenado (CD). La velocidad de corte es lenta, se permite el drenaje de la probeta durante todo el ensayo siendo las presiones intersticiales nulas durante la aplicación del esfuerzo cortante ($\mu=0$), esto implica que: $\sigma = \sigma'$, $c=c'$, $\varphi=\varphi'$.
- ✓ Por otro lado, según la forma en que se aplica el esfuerzo horizontal, los ensayos de corte se pueden clasificar en dos tipos.
- ✓ Ensayos de tensión controlada. Se aplica el esfuerzo horizontal, se miden las deformaciones hasta llegar hasta la estabilización, luego se aumenta la fuerza horizontal y así sucesivamente, hasta que llega el momento en que las deformaciones no se estabilizan, lo que nos indica que hemos sobrepasado la carga de rotura.
- ✓ Ensayos de deformación controlada. La mitad móvil de la caja se desplaza a una velocidad determinada; los esfuerzos horizontales se van midiendo con un anillo dinamométrico conectado en serie con la fuerza horizontal (figura 3.).

Figura 11. Corte directo de deformación controlada.



Fuente: Jiménez Salas J. y De Justo Alpañes J., Vol. 1, 1975.

Para el desarrollo del estudio, se utilizó el método de control de deformaciones-
CD-Consolidado Drenado



Fotografía del equipo usado. Se utilizó el método de control de deformaciones-CD-Consolidado Drenado

Procedimiento.

Método para suelos cohesivos. Se moldean 3 o 4 probetas de una bloque de suelo inalterada, utilizando un anillo cortante para controlar el tamaño. Se ensambla la caja de corte, se saturan las piedras porosas y se mide la caja para calcular el área (A) de la probeta. Se colocan la probeta en la caja de corte, las piedras porosas y el pistón de carga sobre el suelo, la carga normal P_v y se ajusta el deformímetro vertical. Para un ensayo consolidado es necesario controlar el deformímetro vertical igual que en el ensayo de consolidación para determinar cuando la consolidación haya terminado.

Luego, se separan las mitades de las cajas de corte dejando una pequeña separación y se empalma la cabeza de carga, asegurando que la carga normal refleje la fuerza normal más el peso del bloque de carga y la mitad superior de la caja de corte. Se acopla el deformímetro de deformación cortante y se fija en cero tanto el deformímetro horizontal como vertical (en ensayos saturados se llena la caja con agua y se espera la saturación de la probeta).

Aplicar la carga de corte tomando lecturas del deformímetro de carga, de desplazamientos de corte y verticales (cambios de volumen). En ensayos de deformación controlada, las lecturas se toman a desplazamientos horizontales de 5, 10 y cada 10 o 20 unidades.

La tasa de deformación unitaria debe ser la misma que en el caso anterior (no más de 2 mm/min.) y tal que falle entre 5 a 10 minutos, a menos que el ensayo sea consolidado drenado. La velocidad de deformación para este último, debería ser tal que el tiempo para que ocurra la falla (t_f) sea: $t_f = 50 \cdot t_{50}$, donde t_{50} es el tiempo necesario para que ocurra el 50% de la consolidación bajo la carga normal P_v .

Al finalizar el ensayo, se remueve el suelo y se toman probetas para determinar el contenido de humedad. El procedimiento se repetirá para las probetas adicionales.

Cálculos y gráficos.

Los siguientes cálculos son aplicables tanto a suelos cohesivos como a suelos no cohesivos.

Se grafican en escala natural las curvas de deformación, donde la ordenada será la deformación horizontal y la abscisa el tiempo necesario de las distintas probetas. Se obtiene la máxima deformación horizontal. Con los valores de carga vertical y tangencial se calcula la tensión tangencial y la tensión normal. Gráficamente se pueden obtener el esfuerzo cortante (τ) y el esfuerzo normal (σ_n), mediante las siguientes expresiones:

$$\tau = Ph / A \text{ (kg/cm}^2\text{)} \text{ y } \sigma_n = P_v / A \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Donde:

P_v = carga vertical aplicada (kg.)

P_h = carga horizontal aplicada (kg.)

A = área nominal de la probeta (cm²)

Con los datos de τ y σ_n de cada una de las probetas, se traza la recta intrínseca y de ella se obtiene c' y ϕ , donde c' es la ordenada de la recta hasta el eje de las abscisas y ϕ el ángulo que forma la horizontal con la recta intrínseca.

Es posible trazar además la curva de deformaciones verticales, donde se llevan en ordenadas las deformaciones (asentamiento hinchamiento) y en abscisas el tiempo.

Observaciones.

- ✓ La velocidad del ensayo debe ser la estipulada, ya que si es muy rápida en ensayos drenados, la presión de poros no es capaz de disiparse.
- ✓ Es fundamental que en ensayos consolidados, esta se realice completamente. Deben hacerse con especial cuidado las lecturas de los comparadores (diales) y de las fuerzas tangenciales aplicadas, al igual que el trazado de las curvas. La ventaja de este tipo de ensayos es la simplicidad y velocidad de avance para suelos no cohesivos.
- ✓ Las probetas de suelos cohesivos, se deben moldear (en lo posible) dentro de una cámara húmeda.
- ✓ En arcillas muy blandas, el separar las mitades de la caja de corte se realizará cuidadosamente porque el material podría ser extruido fuera de la caja por la zona de separación, en estos casos se deben utilizar cargas verticales pequeñas.
- ✓ El ensayo de corte directo tiene las siguientes limitaciones:
- ✓ el área de la probeta cambia a medida que el ensayo progresa. Esto no es demasiado significativo, cuando las probetas fallan a deformaciones muy bajas.

- ✓ cuando se diseñó la caja de corte, se supuso que la superficie de falla real sería plana y que el esfuerzo cortante tendría una distribución uniforme a lo largo de esta, sin embargo, con el tiempo se estableció que estas suposiciones no siempre son válidas.

7.2.2 Adaptación del equipo de corte directo

En la realización de los cortes directos y la simulación de las condiciones de precipitación y exposición al sol que afectan las pastillas, fue necesario idear un horno de secado que recreara las dichas condiciones en el laboratorio y realizar algunas adaptaciones al equipo de corte directo para mantener una temperatura y humedad relativa determinadas.

- Método de simulación de condiciones ambientales

Para lograr la obtención de resultados precisos y reducir las fuentes de error, se debía controlar la mayor cantidad de parámetros de afectación de resultados, para esto se realizó lo que sigue:



Fotografía del equipo de corte directo utilizado usado. Se utilizó el método de control de deformaciones-CD-Consolidado Drenado

- ✓ Se implementó una capsula de acrílico que permite controlar los cambios bruscos de temperatura que puedan ocurrir en el laboratorio.
- ✓ Esto con el fin de mantener constante la humedad relativa en el momento del fallo de la probeta.

8. HUMEDECIMIENTO Y SECADO DE LAS PROBETAS DE SUELO.

8.1 HUMEDECIMIENTO DE LAS PROBETAS DE SUELO

Con el fin de estudiar y estandarizar el procedimiento de humedecimiento de las probetas de suelo, se realizaron varias pruebas con el fin de determinar cuál podría aproximarse a la condición a la cual se expone el suelo en el talud.

Prueba de humedecimiento A:

Esta prueba se efectuó durante la realización de la prueba No. 1, la adición de agua a la pastilla se realizó sumergiendo la misma en agua durante un minuto, al realizar esto la pastilla comenzó a desmoronarse rápidamente por los vértices de la misma, pero aun así el centro de la pastilla se mantuvo seco, este método de humedecimiento fue descartado.

Fotografía 9. Prueba de Humedecimiento A.



Fuente: Estudiante

Se observa que las probetas pierden consistencia por la acción de la inmersión en agua.

Prueba de humedecimiento B:

Esta prueba también se efectuó durante la realización de la prueba No. 1, la adición de agua a la pastilla se realizó mediante un atomizador de 500 ml realizando los disparos a una altura de 40 cm de la pastilla, se usaron 22.78 ml de agua a intervalos de 50 disparos, en lapsos de 10 minutos.

Con este método se aprecia que la adición de agua no es homogénea ya que parte del agua adicionada en forma de rocío es perdida por la aspersion de la misma entonces la cantidad real de agua adicionada no puede ser calculada durante la adición; debido a esto algunas pastillas recibían mas agua que otras en ciertas adiciones. También se observó que el tiempo de absorción de las pastillas era mayor a 10 minutos por lo tanto las pastillas sufrían expansión y agrietamiento severo por el cambio rápido en el volumen al agregar el agua.

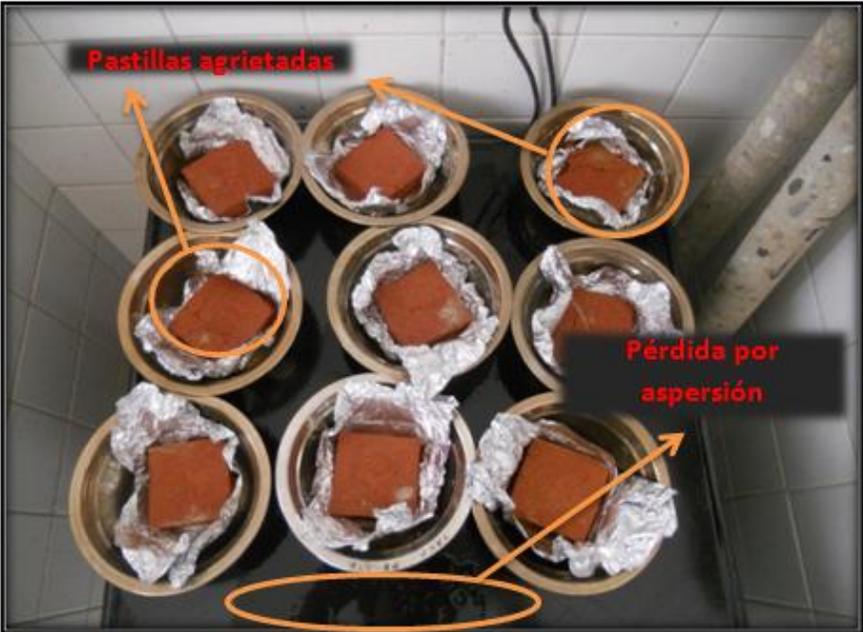
Este método también fue descartado. Ver imagen prueba de humedecimiento B

Prueba de humedecimiento C:

Esta prueba se efectuó durante la realización de la prueba No. 2, la adición de agua a la pastilla se realizó con el mismo procedimiento de la prueba B pero en este caso las adiciones fueron realizadas a una altura de 7 cm a 9 cm de la pastilla, con el fin de disminuir la perdida por aspersion y el lapso de tiempo fue ampliado a media hora; Se observó que las pastillas sufrían menos fisuras, pero ahora debido a que el aspensor estaba tan cerca de la pastilla, éste desprendía partículas de la misma y aun así hubo perdida por aspersion en las pastillas.

Este método también fue descartado. Ver imagen prueba de humedecimiento B

Fotografía 10. Humedecimiento prueba B.



Fuente: Estudiante

Prueba de humedecimiento D:

Esta prueba se efectuó antes de la realización de la prueba No. 3.

Como primer paso se determinó el tiempo que un área conocida del material tardaba en absorber cierto volumen, para esto se realizó una caja de geometría conocida en un bloque de suelo de la probeta, luego de impermeabilizar las paredes de dicho espacio se llenó con un volumen de agua determinado

Se revisaron los niveles de infiltración en la probeta de suelo con su respectivo registro de tiempo. De esta manera se encontró que el tiempo de infiltración tardó aproximadamente de 4 horas en llegar al fondo de la pastilla.

Dentro de la probable simulación o análisis del infiltración en el talud, es poco probable que una lluvia de corta duración logre infiltrarse totalmente en el talud, es por esto que debe suponerse que deben ocurrir intensos periodos de lluvia para que el suelo pueda ser infiltrado de esta manera.

Fotografía 11. Prueba de humedecimiento D y medición de la infiltración en la probeta de suelo



Fuente: Estudiante

Una vez obtenido el dato de infiltración en la pastilla se procedió a adicionar agua mediante un gotero con el fin de estandarizar el volumen agregado a todas las probetas y evitar pérdidas por aspersion.

Fotografía 12. Prueba de humedecimiento D y medición de la infiltración en la probeta de suelo



Fuente: Estudiante

Luego de varias pruebas tipo D de humedecimientos se concluyó que el volumen de agua para humedecer una probeta completamente, fue 20.3 cm^3 distribuido en 7 intervalos de 2.9 cm^3 aplicados cada media hora.

Después de estandarizar los procedimientos de humedecimiento de las probetas de suelo, se concluye que el más indicado para la prueba a realizar es el procedimiento de humedecimiento D, puesto que ofrece una infiltración de volumen estándar de agua y un tiempo igual para todas las probetas

8.2 PROCEDIMIENTOS DE SECADO DE LAS PROBETAS

Fueron realizadas dos pruebas para realizar el secado de las probetas, de manera que pueda simular condiciones extremas temperatura sin afectar las probetas de suelo.

El objetivo es secar las probetas con el fin de realizar luego un nuevo ciclo de humedecimiento. Para ello, se realizó inicialmente una prueba en el horno de resistencia eléctrica y otra utilizando bombillas eléctricas.

Secado al horno de resistencia eléctrica:

En la prueba No. 1 el secado de las probetas se realizó en un horno el cual lograba una temperatura mínima de $70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Se presentaron expansiones volumétricas y contracciones de las probetas, con presencia de fisuras y desmoronamiento.

Este procedimiento fue descartado.

Secado al horno de bombillas eléctricas:

Fue realizado en las pruebas No.2 y No. 3 debido a los problemas con el secado en horno de resistencia eléctrica descrito anteriormente.

De esta manera se elaboró un horno que consistió en un cajón de madera forrado en papel aluminio, al cual le fueron adaptadas dos bombillas de 60 watts en una en cada costado, con este horno se alcanza una temperatura de 52°C , pero fue controlada a $35^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, usando termómetros y medidores de humedad relativa.

Se dejaron las probetas en este horno artificial de madera durante aproximadamente 21 horas, tiempo requerido para obtener un secado casi del

100%, algunas probetas presentaron figuración superficial, sin embargo conservaron completamente su geometría, por lo cual fue adoptado este procedimiento para el secado. Ver figura secado de probetas.

Fotografía 13. Secado de probetas



Fuente: Estudiante

Se encontró un procedimiento para humedecer las probetas a prueba y error y otro procedimiento para secarlas sin afectar su composición volumétrica.

Se tomaron un total de 50 probetas con la misma probeta de suelo para realizar el procedimiento objeto del estudio experimental.

Del total de 50 probetas de la prueba 3, se realizó un procedimiento estándar para humedecer, secar y fallar las probetas con el equipo de corte directo.

El primer ciclo realizado a todas y cada una de las probetas consistió inicialmente en humedecerlas según el procedimiento D descrito anteriormente, y luego secándolas en el horno artificial de bombillas eléctricas, luego de cada ciclo, se tomaron 6 probetas para realizar el fallo en el equipo de corte directo, el anterior es el procedimiento estándar que se realizó durante 8 ciclos completos.

Cada uno de los ciclos permitió obtener datos de resistencia de las probetas seleccionadas al azar dentro del total de 50 probetas. 3 de estas probetas fueron falladas en el equipo de corte directo y las otras 3 se usaron para medir humedad y como testigo.

9. ENSAYO DE PROBETAS EN EQUIPO DE CORTE DIRECTO.

9.1 EQUIPO UTILIZADO PARA EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Se utilizó un equipo automático para ensayos de Corte Directo Digital, el cual tiene una interface para registro auténtico de los resultados de ensayo. Este equipo es operado y controlado por microprocesadores, recibe parámetros de la probeta y calcula resultados del ensayo en tiempo real; memoriza los datos de consolidación y el corte directo.

La función de salida de datos (Puerto USB) asegura la veracidad y exactitud de los datos de resultados. Las magnitudes medidas y calculadas son: Tiempo, Fuerza, Deformación Horizontal, Deformación Vertical, Esfuerzo Cortante, Deformación Unitaria, Área y Velocidad de desplazamiento.

La medición del avance - deformación horizontal - (deformación tangencial) se realiza a través de un sensor inductivo incorporado en la maquina y la deformación vertical (consolidación) se realiza con un comparador de carátula digital que por medio de una interface se comunican con el sistema de control. La medición de fuerza se hace por medio de una celda de carga de precisión. Todas las lecturas quedaban registradas en una hoja de cálculo de Excel.

Adicional al equipo estándar de corte directo se realizó una adaptación para el control de humedad relativa y temperatura durante el ensayo, esta adaptación consistía en un cajón hermético en acrílico que aseguraba que las condiciones de humedad y temperatura se mantuvieran durante el ensayo.

Fotografía 14 Adaptación del equipo de corte directo



Fuente: Estudiante

9.2 PRUEBA DE PROBETAS EN EL EQUIPO DE CORTE DIRECTO:

Durante la investigación las pruebas experimentales (denominadas Prueba 1, 2 y 3) se realizaron cortes directos en estado natural y en estado consolidado drenado después de los ciclos de humedecimiento-secado a las probetas de suelo:

9.2.1 Metodología de los ensayos

Prueba 1:

En esta prueba inicial o prueba 1 se realizaron 3 ensayos de corte directo los cuales incluían el corte de 3 probetas por ensayo; falladas bajo las siguientes condiciones:

Probeta 1: Ensayo realizado a las probetas en estado natural, sin tiempo de consolidación ni saturación.

Probeta 2: Ensayo realizado a las probetas en estado natural, con tiempo de consolidación y saturación de 3 horas.

Probeta 3: Ensayo realizado a las probetas con 2 ciclos de humedecimiento-secado, con tiempo de consolidación y saturación de 3 horas.

- **Prueba 1 Probetas N 1: estado natural consolidado drenado.**

Fotografía 15. Ensayo Probeta 1 Prueba 1



Fuente: Estudiante

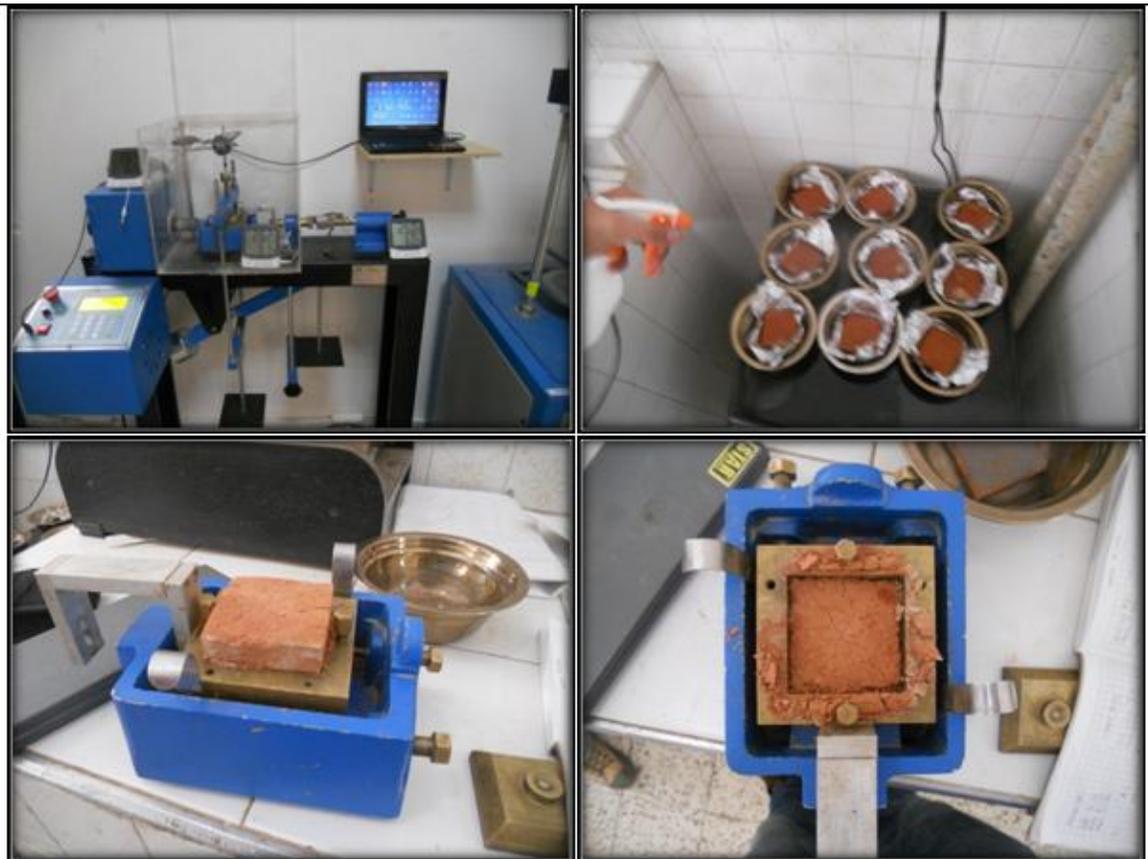
Para esta probeta se ensayaron tres probetas del mismo suelo sometidas a diferentes esfuerzos verticales como lo indica la norma INVIAS, inicialmente se determinan parámetros geomecánicos del suelo en condiciones naturales. Debido a esto, no se realizó saturación ni consolidación.

Cada probeta de suelo fue sometida a esfuerzos de corte a lo largo de un plano horizontal hasta llegar a una deformación de 6 mm (10% aprox.), se obtuvieron los datos de esfuerzos horizontales, deformaciones horizontales y verticales, temperatura y humedad relativa para cada punto finalmente se elaboró una gráfica

con los valores de esfuerzo normal y cortante máximos y se calcularon los parámetros cohesión y ángulo de fricción interna del suelo.

Prueba 1 Probetas N 2: dos ciclos de humedecimiento-secado, consolidado drenado.

Fotografía 16. Ensayo Probeta 2



Fuente: Estudiante

Las probetas fueron sometidas a dos ciclos de humedecimiento y secado (al horno de resistencia eléctrica) a 70°C, Se observó que las probetas sufrieron expansión (deformación lateral y vertical) y agrietamiento leves.

Se ensayaron tres probetas del mismo suelo sometidas a diferentes esfuerzos verticales iguales a los del ensayo del suelo en estado natural (Probeta 1).

Con el fin de comparar las propiedades geomecánicas después de un ciclo de humedecimiento y secado, con la probeta del suelo en condiciones naturales falladas inicialmente, no se realizó saturación ni consolidación en el ensayo de corte directo.

Sin embargo al realizar el montaje en de la probeta en la mordaza de corte del equipo las probetas sufrieron desmoronamiento debido a la expansión sufrida, la probeta que se desmoronó fue reacomodada en los espacios de donde se desprendió mediante una leve presión, se dio inicio a cada ensayo en el momento de completar todo el montaje, cada probeta de suelo fue sometida a esfuerzos de corte a lo largo de un plano horizontal hasta llegar a una deformación de 6 mm (10% aprox.), se obtuvieron los datos de esfuerzos horizontales, deformaciones horizontales y verticales, temperatura y humedad relativa para cada punto, finalmente se elaboró una gráfica con los valores de esfuerzo normal y cortante máximos y se calcularon los parámetros cohesión y ángulo de fricción interna del suelo. De igual manera como las probetas sufrieron deformaciones y pérdida de material por desmoronamiento, no se tienen en cuenta los datos de esta prueba y se dio por terminado el muestreo y ensayos para la prueba 1.

Prueba 2:

Se realizó nuevamente una selección de probetas para realizar la prueba 2.

En esta prueba se realizaron 5 ensayos de corte directo los cuales incluían el corte de 3 Probetas por ensayo; las probetas fueron ensayadas bajo las siguientes condiciones:

Probetas N 1: Ensayo realizado a las probetas en estado natural, sin tiempo de consolidación ni saturación.

Probetas N 2: Ensayo realizado a las probetas en estado natural, con tiempo de consolidación y saturación de 3 horas.

Probetas N 3, 4 y 5: Ensayo realizado a las probetas con 2, 4 y 6 ciclos de humedecimiento-secado correspondientemente, con tiempo de consolidación y saturación de 3 horas.

Prueba 2 Probetas N 1: estado natural no consolidado ni drenado.

En la prueba 2 – Probetas N 1 se ensayaron tres probetas sometidas a diferentes esfuerzos verticales, (0.25 [Kg/cm²], 0.5 [Kg/cm²] y 0.75 [Kg/cm²] aproximadamente), No se realizó saturación ni consolidación, para obtener parámetros geotécnicos naturales de la probeta 1.

Cada probeta de suelo fue sometida a esfuerzos de corte a lo largo de un plano horizontal hasta llegar a una deformación de 10 mm (17% aprox.), se obtuvieron los datos de dimensiones, pesos, esfuerzos horizontales, deformaciones horizontales y verticales, temperatura y humedad relativa para cada punto finalmente se elaboró una gráfica con los valores de esfuerzo normal y cortante máximos y se calcularon los parámetros cohesión y ángulo de fricción interna del suelo.

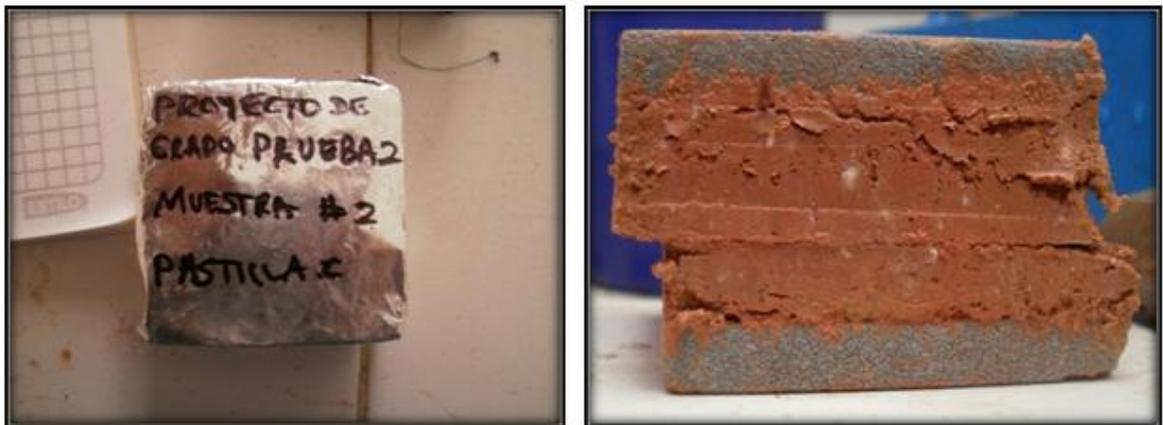
Fotografía 17 Ensayo Probeta 1



Fuente: Estudiante

Prueba 2 Probetas N 2: estado natural consolidado drenado.

Fotografía 18. Ensayo Probeta 2



Fuente: Estudiante

En la Probeta 2 fueron ensayadas tres probetas sometidas a diferentes esfuerzos verticales, con cargas iguales a las de la Probeta 1.

El objetivo fue obtener parámetros geotécnicos en estado natural sin ningún ciclo de humedecimiento y secado, pero si en condiciones drenadas. Para ello se

saturó cada probeta durante el ensayo y se consolidó durante dos horas. Con el fin de controlar el parámetro de humedad de corte. Cada probeta de suelo fue sometida a esfuerzos de corte a lo largo de un plano horizontal hasta llegar a una deformación de 10 mm (17% aprox.), se obtuvieron los datos de dimensiones, pesos, esfuerzos horizontales, deformaciones horizontales y verticales, temperatura y humedad relativa para cada punto finalmente se elaboró una gráfica con los valores de esfuerzo normal y cortante máximos y se calcularon los parámetros cohesión y ángulo de fricción interna del suelo.

Prueba 2 Probetas N 3, Probetas N 4 y Probetas N 5: 2, 4 y 6 ciclos de humedecimiento-secado, consolidado drenado correspondientemente

Las probetas fueron sometidas a dos ciclos de humedecimiento - secado según el procedimiento 2, que consiste en un cajón de madera el cual se forró en papel aluminio y se le adaptaron dos bombillas de 60 watts. Con este horno se alcanza una temperatura de 52 grados centígrados, controlando la temperatura a 40 grados, (permitiendo una pequeña entrada de aire en el cajón).

De otra parte, el proceso de humedecimiento se realizó mediante el procedimiento B, explicado anteriormente mediante un aspersor para garantizar que las probetas no sufrieran de fisuras por la adición de agua rápidamente, el secado de las probetas también fue lento a causa de la temperatura del horno.

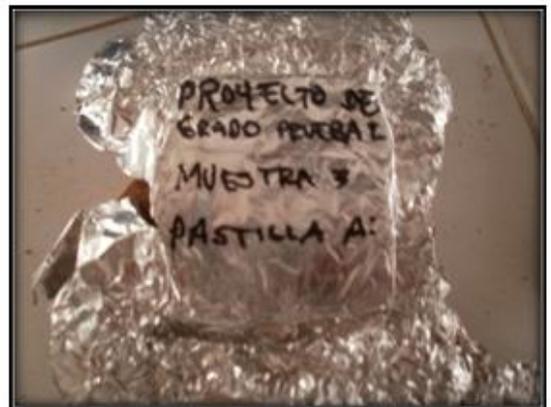
Después de los ciclos de humedecimiento y secado, se evidenció que las probetas sufrieron cambios en su volumen, por contracción. Sin embargo se continuó con el experimento y se realizaron las pruebas para 6 ciclos de humedecimiento y secado

Se obtuvieron los datos de dimensiones, pesos, esfuerzos horizontales, deformaciones horizontales y verticales, temperatura y humedad relativa para

cada punto, finalmente se elaboró una gráfica con los valores de esfuerzo normal y cortante máximos y se calcularon los parámetros cohesión y ángulo de fricción interna del suelo.

Debido al cambio volumétrico que se presentó en las probetas, se decidió no tomar en cuenta los resultados de la prueba 2.

Fotografía 19. Ensayo Probeta 3, humedecimientos y secados



Fuente: Estudiante

Prueba 3:

Después de analizar los resultados en las pruebas 1 y 2 se determinó un nuevo proceso de humedecimiento (con el fin de permitir una infiltración completa de la probeta y evitar pérdida de material por desmoronamiento) y un ensayo de corte

directo ajustando los esfuerzos verticales usados estandarizados en (0.25 [Kg/cm²], 0.5 [Kg/cm²], 0.75 [Kg/cm²] y 1 [Kg/cm²]).

Las probetas fueron ensayadas bajo las siguientes condiciones:

Probetas N 1: Ensayo realizado a las probetas en estado natural, sin tiempo de consolidación ni saturación.

Probetas N 2: Ensayo realizado a las probetas en estado natural, con tiempo de consolidación y saturación de 3 horas.

Probetas N 3, 4, 5, 6, 7 y 8: Ensayo realizado a las probetas con 2, 4, 6, 8, 10 y 12 ciclos de humedecimiento-secado correspondientemente, con tiempo de consolidación y saturación de 3 horas.

Prueba 3 Probetas N 1: estado natural no consolidado ni drenado.

Fotografía 20. Ensayo Probeta 1



Fuente: Estudiante

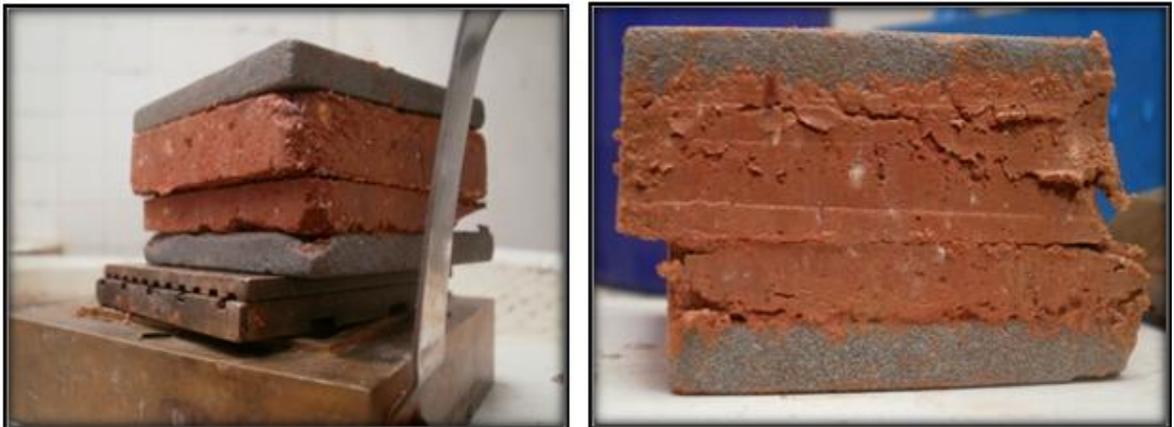
En las Probetas N 1 de la prueba 3, se ensayaron cuatro probetas sometidas a diferentes esfuerzos verticales, (0.25 [Kg/cm²], 0.5 [Kg/cm²], 0.75 [Kg/cm²] y 1 [Kg/cm²] aproximadamente).

Con el objetivo de conocer los parámetros geotécnicos de las probetas o en condiciones naturales. No se realizó saturación ni consolidación.

Cada probeta fue sometida a esfuerzos de corte a lo largo de un plano horizontal hasta llegar a una deformación de 10 mm (17% aprox.), se registraron los datos de dimensiones, pesos, esfuerzos horizontales, deformaciones horizontales y verticales, temperatura y humedad relativa para cada punto finalmente se elaboró una gráfica con los valores de esfuerzo normal y cortante máximos y se calcularon los parámetros cohesión y ángulo de fricción interna del suelo. Ver resultados de corte directo- prueba tres-probetas N 1

Prueba 3 probetas N 2: estado natural consolidado drenado

Fotografía 21. Ensayo Probeta 2



Fuente: Estudiante

En las probetas N 2 de la prueba 3, fueron ensayadas tres probetas N 2, sometidas a los mismos esfuerzos de las probetas N 1 prueba 3, usando

condiciones drenadas. Para ello, se realizó saturación y consolidación durante tres horas, con el fin de controlar el parámetro de humedad de corte.

Las probetas 2, fueron sometidas a esfuerzos de corte a lo largo de un plano horizontal hasta llegar a una deformación de 10 mm (17% aprox.)

Fueron registrados datos de dimensiones, pesos, esfuerzos horizontales, deformaciones horizontales y verticales, temperatura y humedad relativa para cada punto finalmente se elaboró una gráfica con los valores de esfuerzo normal y cortante máximos y se calcularon los parámetros cohesión y ángulo de fricción interna del suelo. Ver resultados de corte directo- prueba tres-probetas N 2.

Prueba 3 probetas N 3: dos ciclos humedecimiento-secado, consolidado drenado.

En las probetas N 3 fueron ensayadas (las cuales había pasado por un proceso de 2 ciclos de humedecimiento y secado) sometidas a diferentes esfuerzos verticales, iguales a los tres primeros de las probetas N 1 y 2.

Se realizó saturación y consolidación durante tres horas al igual que en las probetas N 2.

Las probetas N 3, fueron sometidas a esfuerzos de corte a lo largo de un plano horizontal hasta llegar a una deformación de 10 mm (17% aprox.)

Se registraron los datos de dimensiones, pesos, esfuerzos horizontales, deformaciones horizontales y verticales, temperatura y humedad relativa para cada punto finalmente se elaboró una gráfica con los valores de esfuerzo normal y cortante máximos y se calcularon los parámetros cohesión y ángulo de fricción interna del suelo. Ver resultados de corte directo- prueba tres-probetas N 3.

Prueba 3 PROBETAS N 4: cuatro ciclos humedecimiento-secado, consolidado drenado.

En las probetas N 4 fueron ensayadas tres probetas (las cuales había pasado por un proceso de 4 ciclos de humedecimiento y secado)

El ensayo de corte directo, se realizó con el mismo proceso que en la Probeta N 3 sin ninguna observación adicional.

Se registraron los datos de dimensiones, pesos, esfuerzos horizontales, deformaciones horizontales y verticales, temperatura y humedad relativa para cada punto finalmente se elaboró una gráfica con los valores de esfuerzo normal y cortante máximos y se calcularon los parámetros cohesión y ángulo de fricción interna del suelo. Ver resultados de corte directo- prueba tres-probetas N 4

Prueba 3 PROBETAS N 5: seis ciclos humedecimiento-secado, consolidado drenado.

En la Probeta 5 fueron ensayadas tres probetas, las cuales había pasado por un proceso de 6 ciclos de humedecimiento y secado.

Fueron sometidas a esfuerzos verticales, iguales a los de la Probetas N1, N 2, N3 y N4.

El ensayo de corte directo se realizó el mismo proceso que en la Probeta N3.

Se registraron los datos de dimensiones, pesos, esfuerzos horizontales, deformaciones horizontales y verticales, temperatura y humedad relativa para cada punto finalmente se elaboró una gráfica con los valores de esfuerzo normal y

cortante máximos y se calcularon los parámetros cohesión y ángulo de fricción interna del suelo. Ver resultados de corte directo- prueba tres-probetas N 5

Prueba 3 PROBETAS N 6, PROBETAS N 7 y PROBETAS N8: ocho, diez y doce ciclos humedecimiento-secado respectivamente, consolidado drenado.

En el ensayo de estas Probetas N6, N7, N8, fueron falladas cuatro probetas por ensayo (las cuales había pasado por un proceso de 6, 8, 10 y 12 ciclos de humedecimiento y secado, correspondientemente)

Se sometieron a esfuerzos verticales, iguales a los de la Prueba 3-probetas 3

El ensayo de corte directo se realizó el mismo proceso que en la Probeta 3.

Se registraron los datos de dimensiones, pesos, esfuerzos horizontales, deformaciones horizontales y verticales, temperatura y humedad relativa para cada punto finalmente se elaboró una gráfica con los valores de esfuerzo normal y cortante máximos y se calcularon los parámetros cohesión y ángulo de fricción interna del suelo. Ver resultados de corte directo- prueba tres-probetas, N 6, N7 y N8.

10. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO PRUEBAS 1, 2 Y

3

Los resultados de los ensayos de corte directo son utilizados para graficar la envolvente de carga del suelo en estudio.

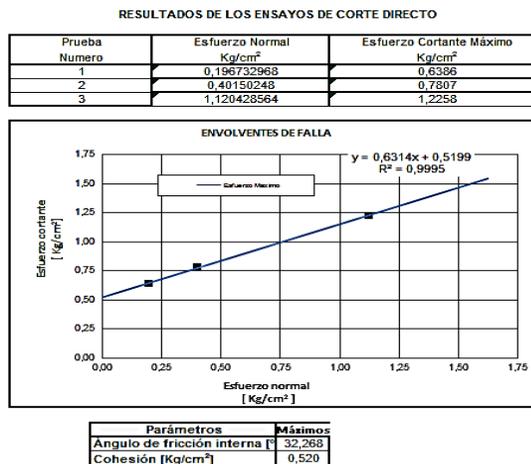
A continuación se presentan las envolventes de carga de cada una de las probetas ensayadas durante todo el experimento, incluyendo la prueba 1, prueba 2 y prueba 3.

Además de esto se relacionan las lecturas realizadas a las condiciones de temperatura y humedad relativa del medio:

10.1 CORTES DIRECTOS:

Prueba 1 PROBETA 1: estado natural consolidado drenado.

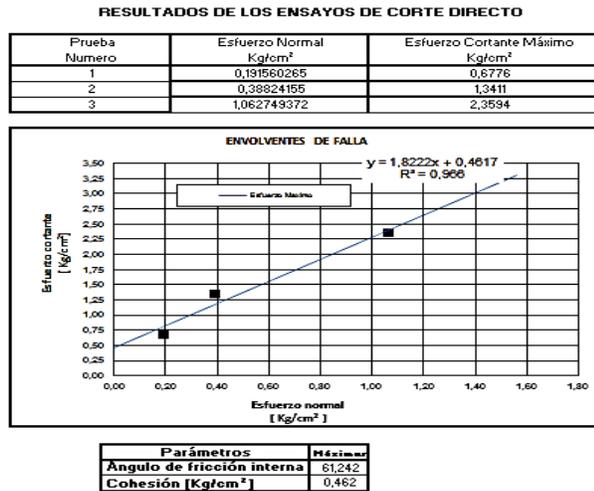
Figura 8. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 1 probeta 1



Fuente: Estudiante

Prueba 1 PROBETA 2: dos ciclos de humedecimiento-secado, consolidado drenado.

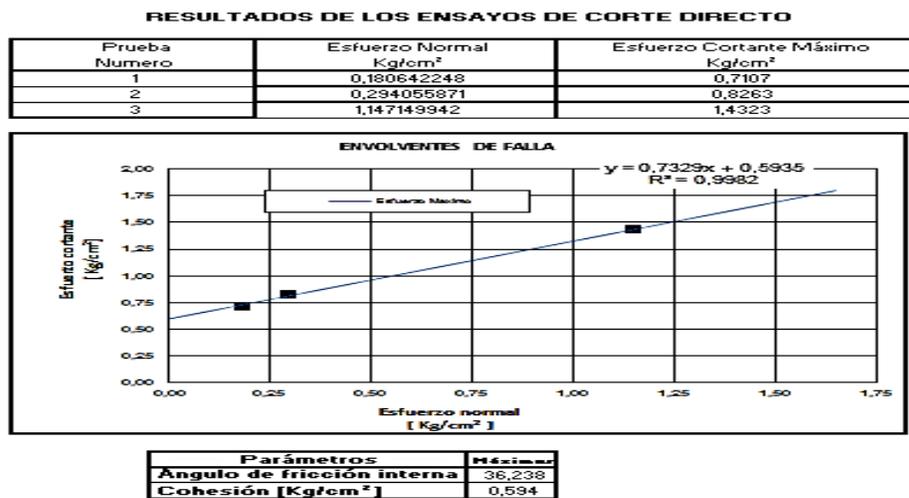
Figura 9. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 1 probeta 2



Fuente: Estudiante

Prueba 1 PROBETA 3: 3 ciclos de humedecimiento-secado, consolidado drenado.

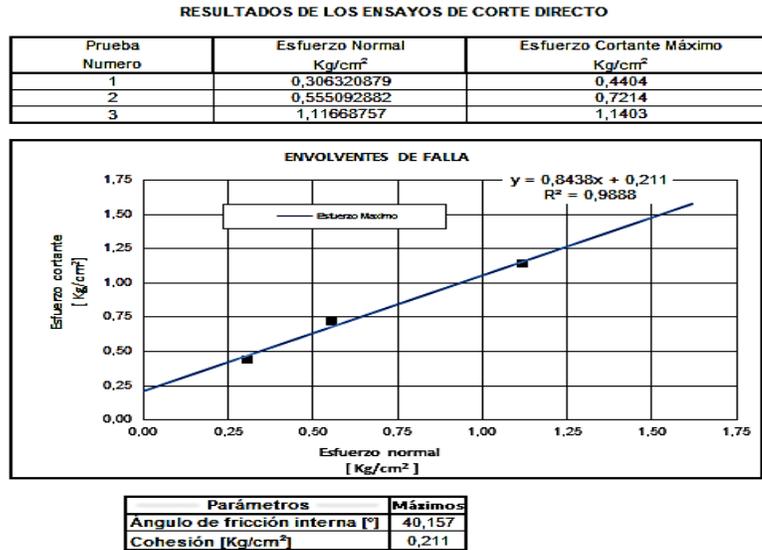
Figura 10. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 3 Probeta 3



Fuente: Estudiante

Prueba 2 PROBETA 1: estado natural no consolidado ni drenado.

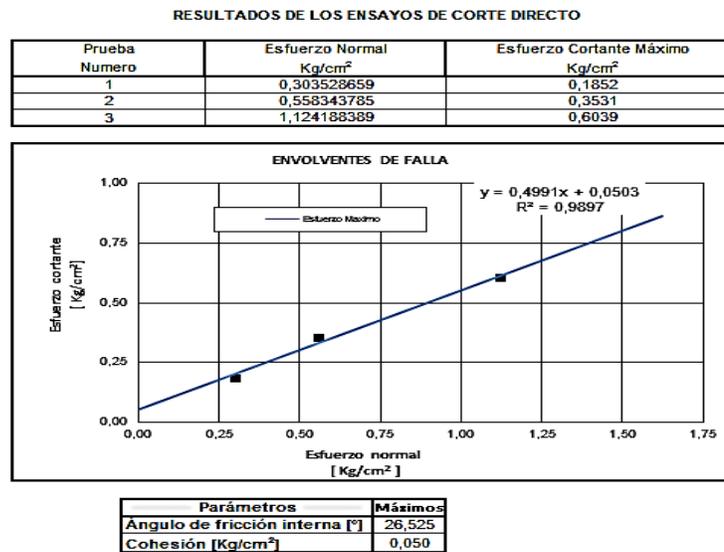
Figura 11. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 2 Probeta 1



Fuente: Estudiante

Prueba 2 PROBETA 2: estado natural consolidado drenado.

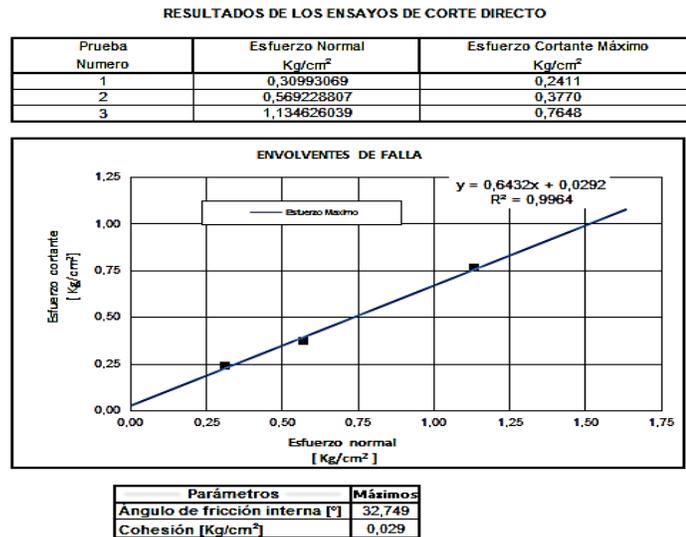
Figura 12. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 2 Probeta 2



Fuente: Estudiante

Prueba 2 PROBETAS N 3: 2 ciclos de humedecimiento-secado, consolidado drenado

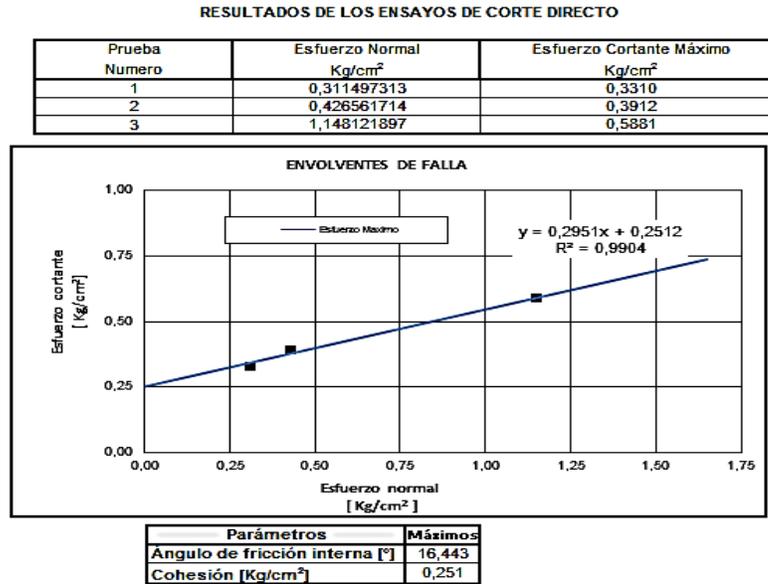
Figura 13. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 2 Probeta 3



Fuente: Estudiante

Prueba 2 PROBETAS N 4: 4 ciclos de humedecimiento-secado, consolidado drenado

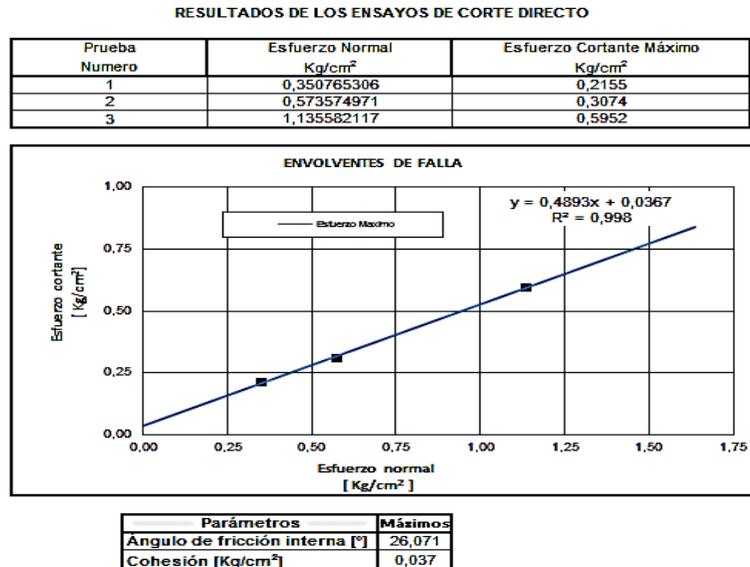
Figura 14. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 2 Probeta 4



Fuente: Estudiante

Prueba 2 PROBETAS N 5: 6 ciclos de humedecimiento-secado, consolidado drenado

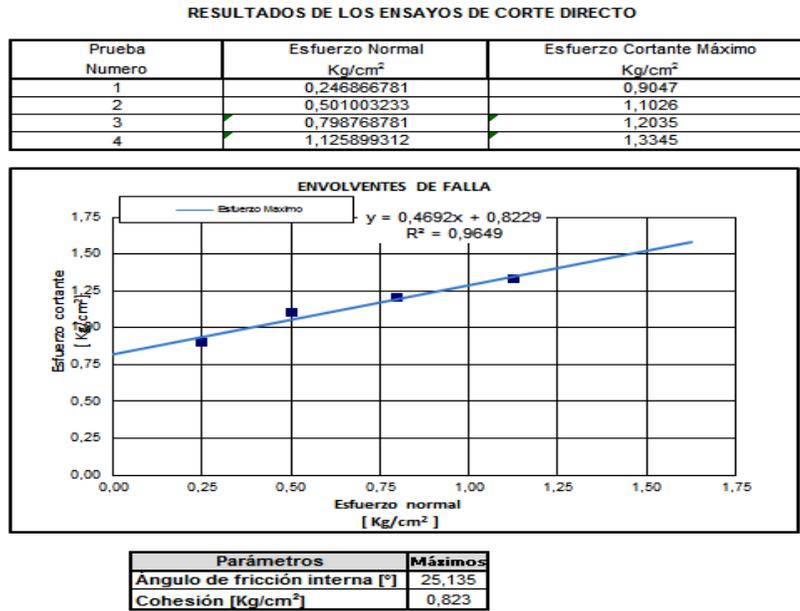
Figura 15. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 2 Probeta 5



Fuente: Estudiante

Prueba 3 PROBETAS N 1: estado natural no consolidado ni drenado.

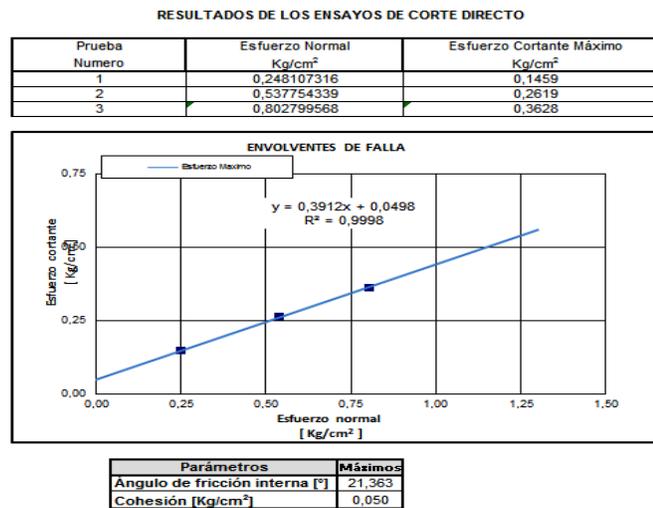
Figura 16. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 3 Probeta 1



Fuente: Estudiante

Prueba 3 PROBETAS N 2: estado natural consolidado drenado.

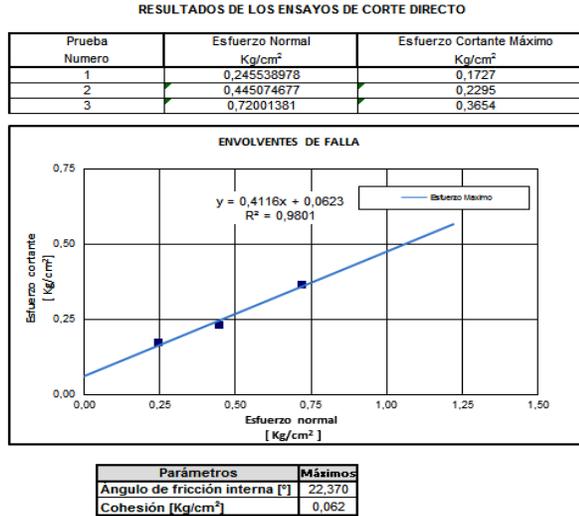
Figura 17. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 3 Probeta 2



Fuente: Consultor

Prueba 3 PROBETAS N3: dos ciclos humedecimiento-secado, consolidado drenado.

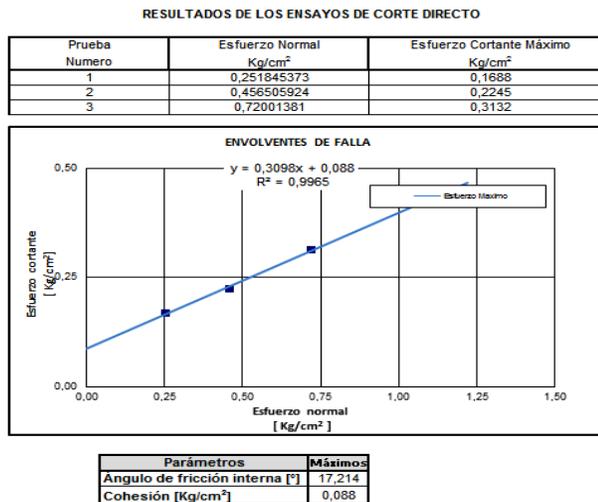
Figura 18. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 3 Probeta 3



Fuente: Estudiante

Prueba 3 PROBETAS N4: cuatro ciclos humedecimiento-secado, consolidado drenado.

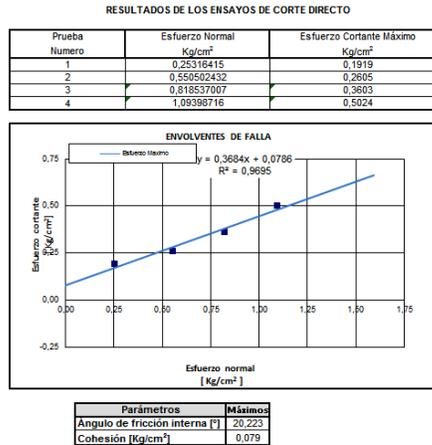
Figura 19. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 3 Probeta 4



Fuente: Estudiante

Prueba 3 PROBETAS N5: seis ciclos humedecimiento-secado, consolidado drenado.

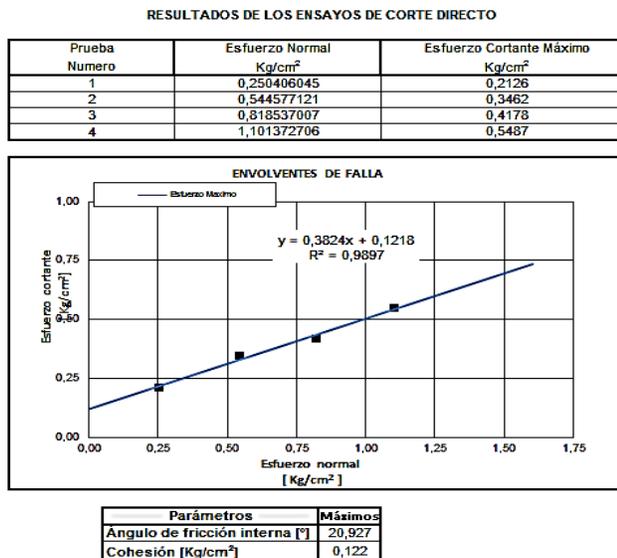
Figura 20. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 3 Probeta 5



Fuente: Estudiante

Prueba 3 PROBETAS N6: ocho ciclos humedecimiento-secado, consolidado drenado.

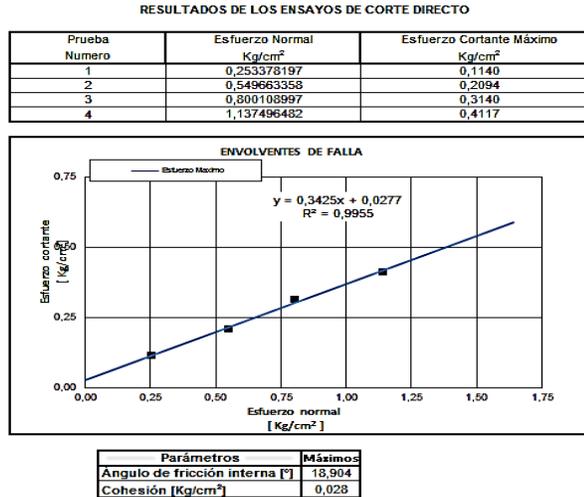
Figura 21. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 3 Probeta 6



Fuente: Estudiante

Prueba 3 PROBETAS N7: diez ciclos humedecimiento-secado, consolidado drenado.

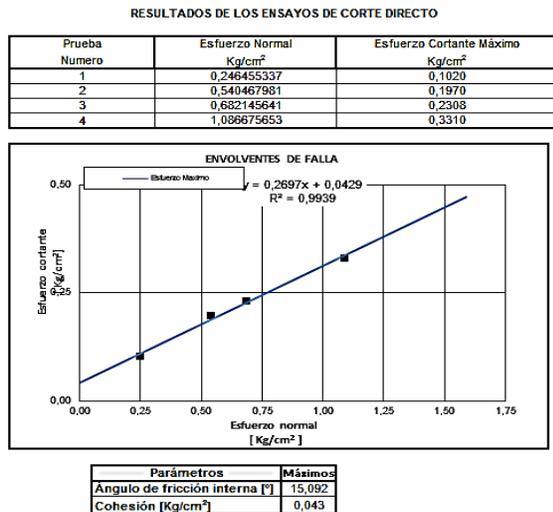
Figura 22. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 3 Probeta 7



Fuente: Estudiante

Prueba 3 PROBETAS N8: doce ciclos humedecimiento-secado, consolidado drenado.

Figura 23. Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 3 Probeta 5



Fuente: Estudiante

Debido a los inconvenientes presentados con los cambios volumétricos de las probetas y a la pérdida de material por desmoronamiento las pruebas 1 y 2 no fueron tenidas en cuenta en el momento de hacer análisis de resultados pues se considera que no presentan un grado de confiabilidad en el momento de realizar el ensayo de corte directo. Sin embargo se presentan los resultados del ensayo de corte directo para analizar los inconvenientes presentados.

Se toma como prueba única la prueba 3, con la cual se podrán hacer los respectivos análisis de resultados y desarrollo del modelo de estabilidad del talud en estudio. Se toma como prueba única la prueba 3, con la cual se podrán hacer los respectivos análisis de resultados y desarrollo del modelo de estabilidad del talud en estudio.

10.2 CONTROL DE LA TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA EN LA PRUEBA DE CORTE DIRECTO:

La siguiente tabla permite ver la relación promedio entre la humedad relativa y la temperatura con respecto al tiempo durante el ensayo de corte directo.

Las lecturas 1 y 3 corresponden con las probetas de control expuestas a condiciones ambientales y la lectura 2 de color rojo, corresponde con la probeta que mide los parámetros de las condiciones ambientales, en el cajón de acrílico adaptado al equipo de corte directo, donde la probeta está siendo ensayada. Ver imagen ubicación de humedómetros.

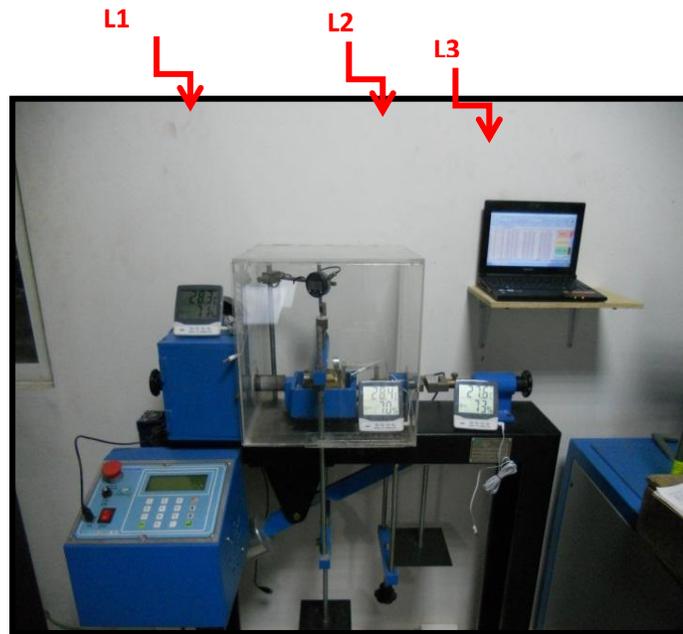
Se observó que las variaciones de estas condiciones no afectan los resultados de los ensayos de corte directo, debido a que los cambios en las mismas no fueron muy representativos (mayores al 30%).

Tabla 5. Resultados promedios del control de humedad y temperatura en la prueba de corte directo

Probeta 1	Lectura	Prom. Humedad	Prom. T(°c)
Probeta A	L 1	70,2	25,98
	L2	79,4	26,1
	L3	66,2	26
Probeta B	L 1	64,6	26,6
	L2	69,2	26,32
	L3	62,4	26,08
Probeta c	L 1	59,4	27,2
	L2	74,4	26,4
	L3	66,6	26,28

Fuente: Estudiante

Fotografía 22. Foto de ubicación de humidómetros



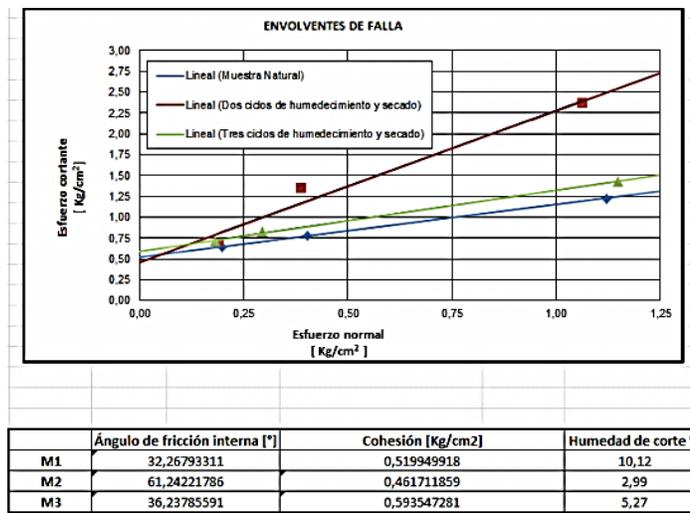
Fuente: Estudiante

10.3 RESÚMENES DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS E INTERPRETACIÓN:

Los resultados de los ensayos de corte directo fueron resumidos en una gráfica para cada una de las tres pruebas realizadas:

Resumen resultados Prueba 1:

Figura 24. Compilación Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 1



Fuente: Estudiante

Se aprecia variación en los parámetros de Ángulo de fricción y cohesión, debido a que dicha variación no es lineal o decreciente se puede inferir que fue causada por la variación de los parámetros de afectación del ensayo: después de los ciclos de humedecimiento-secado los volúmenes de las probetas sufrieron cambios considerables así como desmoronamiento de las mismas

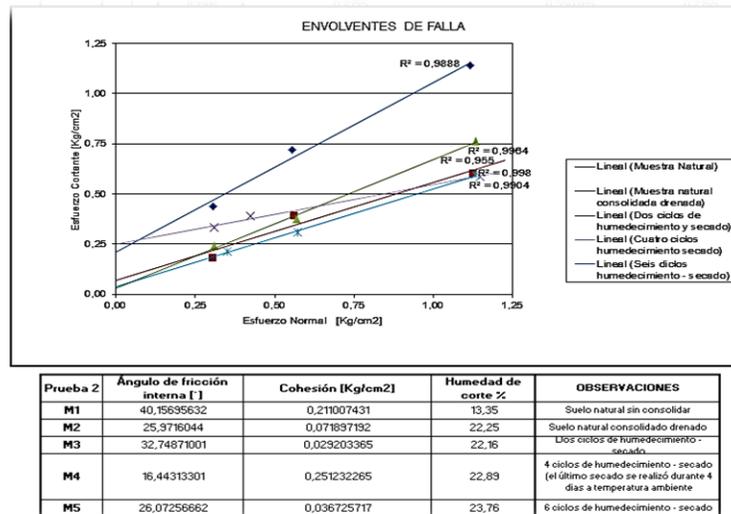
Se evidencia que la variación menor de la humedad de corte es de alrededor del 2.28% lo cual es una variación considerable que puede afectar al ensayo.

Estos resultados fueron descartados debido a la variación en los mismos.

La prueba No. 1 fue la prueba con la cual se inició todo el proceso de experimentación, a pesar de la inconsistencia de los parámetros ángulo de fricción y cohesión esta prueba sirvió para ajustar y corregir el método de secado y aportó a la búsqueda del método óptimo de la realización de los humedecimientos

Resumen resultados Prueba 2:

Figura 25. Compilación Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 2



Fuente: Estudiante

En la prueba No. 2 los humedecimientos se realizaron un poco más homogéneos y durante un tiempo prolongado, debido a esto las probetas tuvieron un comportamiento homogéneo; salvo el último fallo de corte directo No.4, el cual tuvo una variación completamente atípica a las demás probetas por lo tanto no es tenida en cuenta.

La cohesión de todas las probetas cortadas en estado C.D (consolidado drenado) se comportan en un rango comprendido entre 0.0251 Kg/cm² y 0.072 Kg/cm² y los

ángulos de fricción entre los 25.07° y los 32.75°. Estos resultados varían de diferente manera a medida que se van realizando los ciclos de humedecimiento-secado.

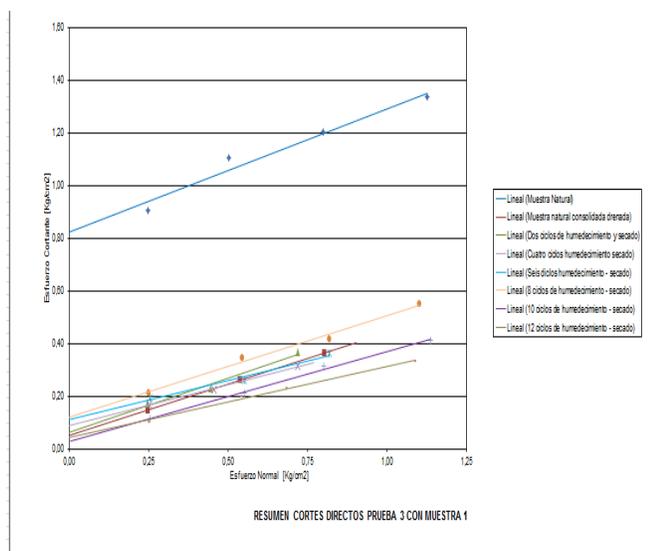
La prueba No. 2 sirve para establecer que los humedecimientos se debían realizar de manera paulatina para evitar la expansión de las probetas.

También descartó el uso del atomizador como equipo usado para los humedecimientos y permitió confirmar que el uso del horno de bombillas eléctricas funciona de acuerdo con la temperatura esperada, contribuyendo al secado homogéneo de las probetas.

Sin embargo debido a que la prueba 2, las probetas también presentaron cambios volumétricos y pérdida de material por desmoronamiento, no fue tomada en cuenta para los análisis finales del estudio experimental desarrollado.

Resumen resultados Prueba 3:

Figura 26. Gráficas Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 3



En la tercera prueba de esta investigación fueron falladas alrededor de 50 probetas de suelo.

Se encontró que los parámetros de la envolvente de carga de cada una de las probetas ensayadas bajo condiciones saturadas, consolidadas y drenadas se comporta de una forma similar a la lineal.

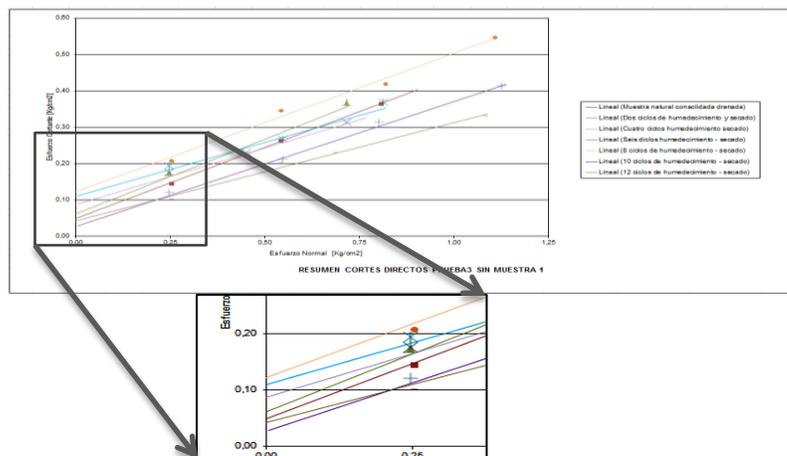
Los resultados de valor de la cohesión varían desde los 0.0251 Kg/cm^2 hasta los 0.072 Kg/cm^2 .

Los resultados del valor del ángulo de fricción oscilan entre los 15.09° y los 22.37° . Las probetas ensayadas presentan envolventes de falla las cuales varían de ángulo y cohesión de manera aleatoria entre estos rangos.

Se aprecia el descenso del ángulo de fricción a partir de la probeta No. 6 .

La cohesión presenta un comportamiento diferente del ángulo de fricción, sin embargo se puede determinar un descenso en este parámetro.

Figura 27. Gráficas ampliadas Resultados Ensayos Corte Directo Prueba 3



Fuente: Estudiante

**11. RESUMEN CICLOS DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO vrs VARIACION
DEL ANGULO DE FRICCION Y LA COHESION DE LA PROBETA EN LA
PRUEBA 3**

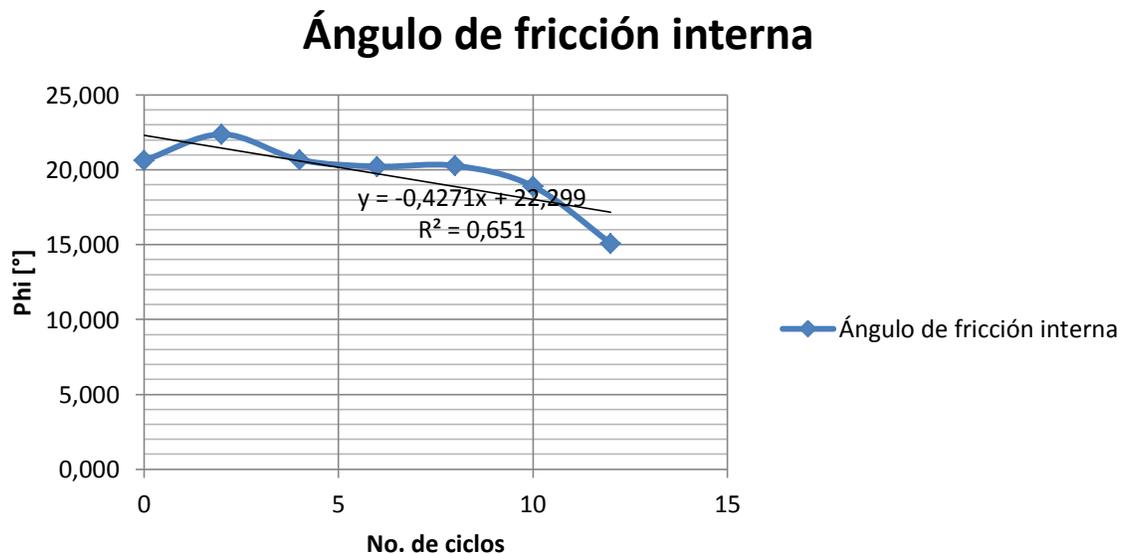
RESUMEN DE RESULTADOS DE CORTE DIRECTO

PRUEBA No. 3					
Muestra	No. De ciclos	Ángulo de Fricción interna [°] (Phi)	Cohesión [Kg/cm²] (C')	Humedad de corte %	Observaciones
M1	0	25,606	0,095	15,85	Suelo natural sin consolidar, ensayo consolidado drenado.
M2	0	20,622	0,069	21,1	Suelo natural consolidado drenado, ensayo consolidado drenado.
M3	2	22,370	0,062	24,37	2 ciclos de humedecimiento - secado, ensayo consolidado drenado.
M4	4	20,669	0,081	23,99	4 ciclos de humedecimiento - secado, ensayo consolidado drenado.
M5	6	20,223	0,079	21,94	6 ciclos de humedecimiento - secado, ensayo consolidado drenado.
M6	8	20,275	0,058	21,61	8 ciclos de humedecimiento - secado, ensayo consolidado drenado.
M7	10	18,904	0,028	21,89	10 ciclos de humedecimiento - secado, ensayo consolidado drenado.
M8	12	15,092	0,043	18,78	12 ciclos de humedecimiento - secado, ensayo consolidado drenado.
	Promedio:	20,4703	0,0644	21,1913	
	Desviación:	2,9648	0,0218	2,7649	

Los resultados de los ensayos de corte directo de la prueba 3, presentan un comportamiento homogéneo y fueron realizados estandarizando cada procedimiento, es por esto que se considera apropiado realizar un análisis del comportamiento de las probetas en esta prueba.

Utilizando los valores de los resultados del ángulo de fricción y cohesión de la prueba 3, se realizó una gráfica con el fin de analizar el comportamiento de las probetas. La cual se muestra a continuación:

- Comportamiento del ángulo de fricción vrs ciclos de humedecimiento y secado:



Se evidencia una disminución en el valor del ángulo de fricción con un comportamiento lineal, relacionado con el aumento en los ciclos de humedecimiento y secado

Ecuación de comportamiento de Phi en función del No. De ciclos (n):

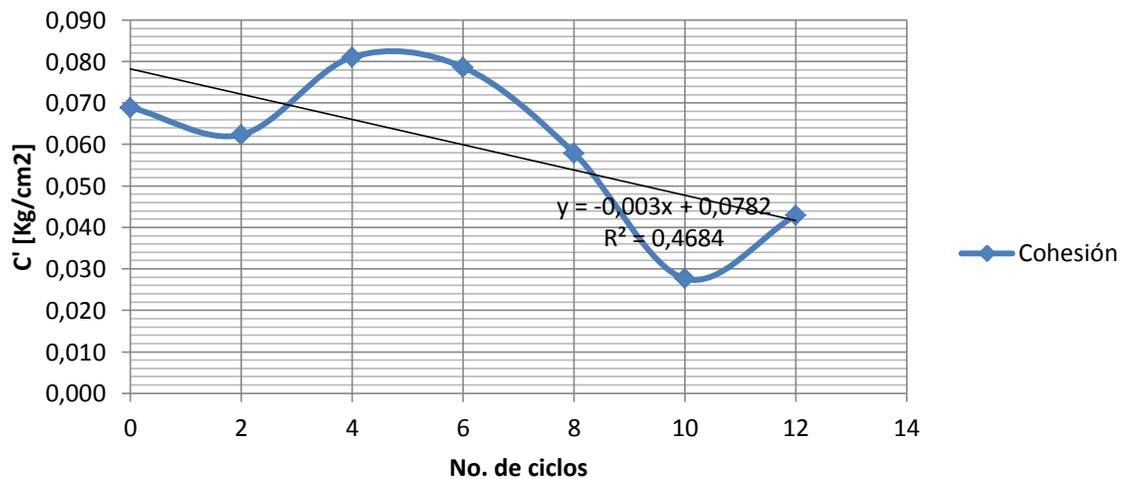
$$\phi = -0,4271n + 22,299$$

Dónde:

ϕ – *angulo de friccion*-[°]

n – *numero de ciclos de humedecimiento y secado*

Cohesión



Se determina una ecuación que refleja el comportamiento del ángulo de fricción del suelo relacionado con el número de ciclos de humedecimiento y secado.

Es evidente que existe una reducción significativa en la reducción del ángulo de fricción en la medida en que aumentan los ciclos de humedecimiento y secado.

- Comportamiento del parámetro de cohesión vs ciclos de humedecimiento y secado:

Se evidencia una disminución muy leve en el valor del ángulo del parámetro de cohesión después de 8 ciclos de humedecimiento y secado

Ecuación de comportamiento de C' en función del No. De ciclos (n):
$c' = -0,003n + 0,0782$

Dónde:

c' – cohesión [Kg/cm²]

n – numero de ciclos de humedecimiento y secado

Se determina una ecuación que refleja el comportamiento del ángulo de la cohesión del suelo relacionada con el número de ciclos de humedecimiento y secado.

Es evidente que existe una reducción muy leve en el valor de la cohesión en la medida en que aumentan los ciclos de humedecimiento y secado.

Se evidencia una reducción cuantificable de este parámetro después de 8 ciclos de humedecimiento y secado.

El principal objetivo del estudio experimental fue estudiar el comportamiento de un suelo bajo la influencia de los ciclos de humedecimiento y secado.

A través de este estudio se pudo establecer que en la muestra de suelo se presentan variaciones en los parámetros geotécnicos del ángulo de fricción y cohesión relacionados con los ciclos de humedecimiento y secado que se realicen en el suelo.

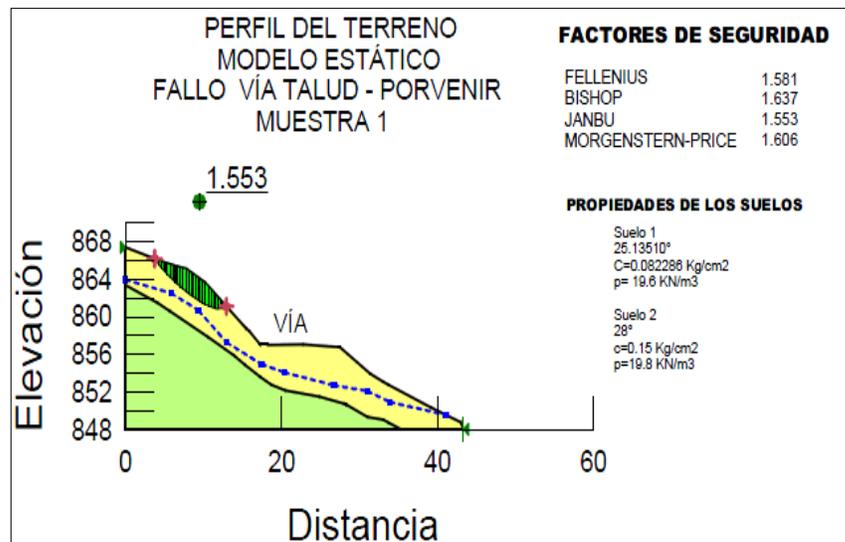
Basados en esta determinación, se presenta un ejercicio de análisis de los factores de seguridad del talud donde se extrajo la muestra de suelo, con la cual se desarrolló el estudio experimental.

Lo anterior con el fin de calcular los posibles cambios en los factores de seguridad que se presentan en el talud, debido a las variaciones en los parámetros geotécnicos de ángulo de fricción y cohesión.

Utilizando el perfil del talud, obtenido del modelo digital de la topografía realizada en el sector, se pueden establecer análisis de estabilidad con el fin de calcular los factores de seguridad para las diferentes variaciones del ángulo de fricción y la cohesión.

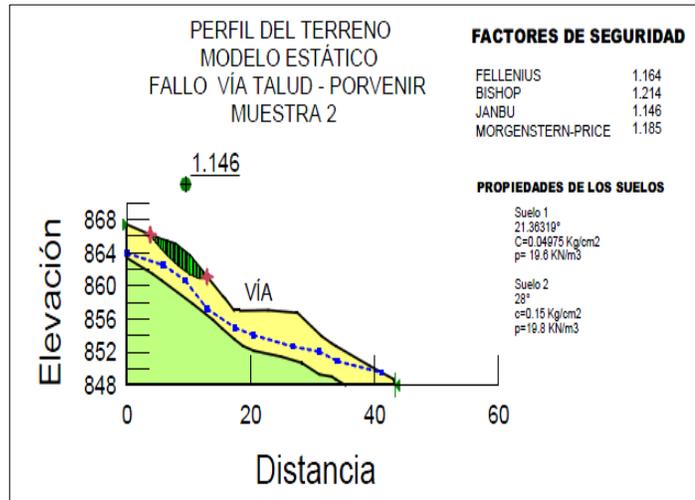
A continuación se muestran las gráficas de resultados de modelos de estabilidad realizados mediante el software geoslope de GEOESTUDIO, cuya licencia pertenece a la UIS.

- **Análisis de estabilidad usando los resultados de las probetas prueba 3-
Probetas N1 -cero ciclos de humedecimiento y secado**



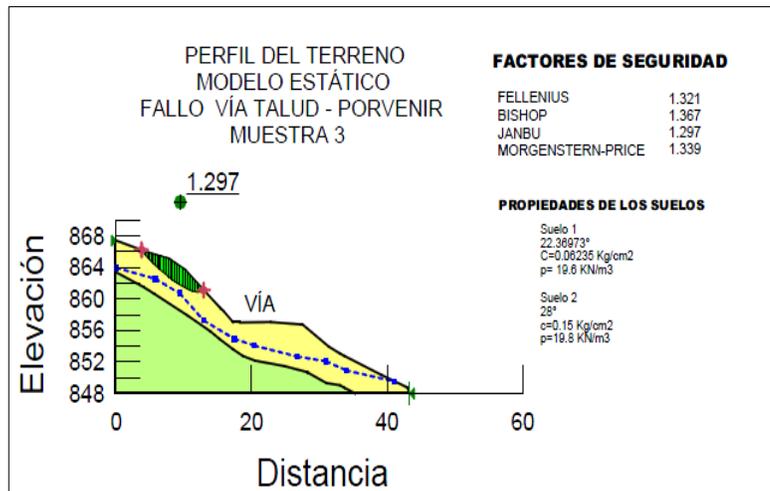
El factor de seguridad crítico calculado es de 1.553 para el análisis estático cero ciclos de humedecimiento y secado-fallos consolidado drenado

- **Análisis de estabilidad usando los resultados de las probetas prueba 3-
Probetas N2**



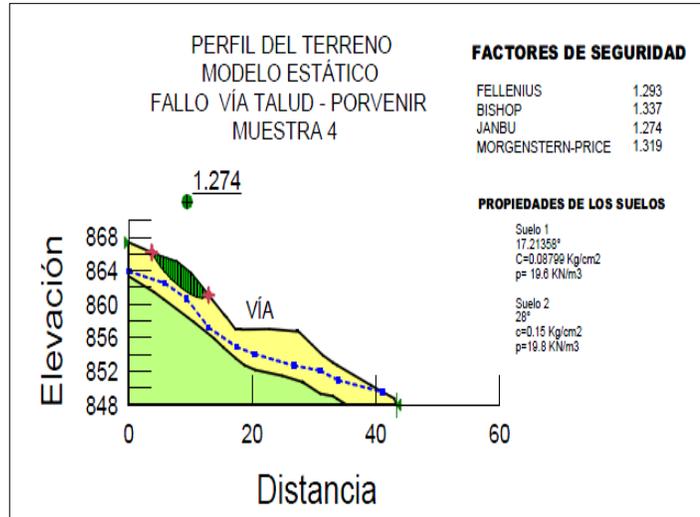
El factor de seguridad crítico calculado es de 1.146 para el análisis estático

**Análisis de estabilidad usando los resultados de las probetas prueba 3-
Probetas N3**



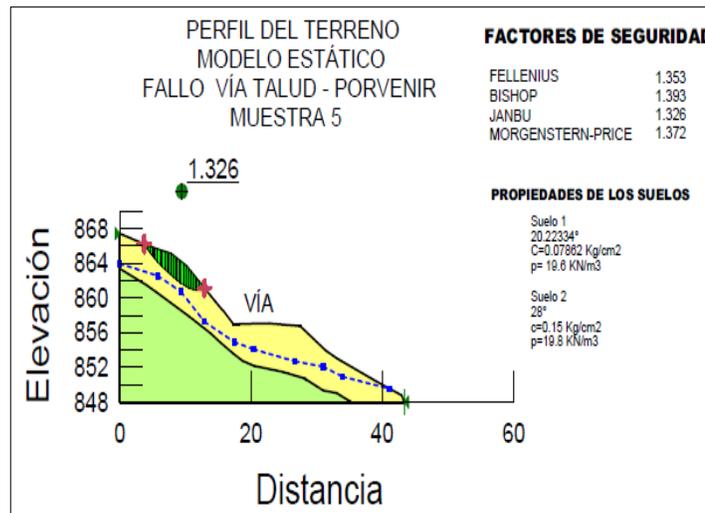
- Dos ciclos de humedecimiento y secado-fallos consolidado drenado
- El factor de seguridad crítico calculado es de 1.297 para el análisis estático

**Análisis de estabilidad usando los resultados de las probetas prueba 3-
Probetas N4**



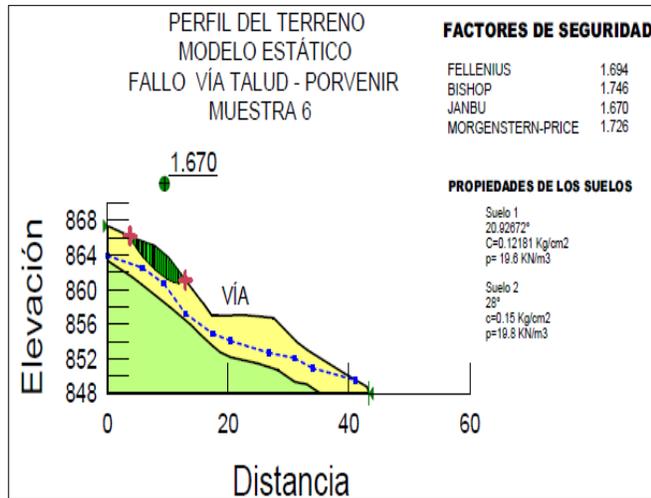
- Cuatro ciclos de humedecimiento y secado-fallos consolidado drenado
- El factor de seguridad crítico calculado es de 1.274 para el análisis estático

**Análisis de estabilidad usando los resultados de las probetas Prueba 3-
Probetas N5**



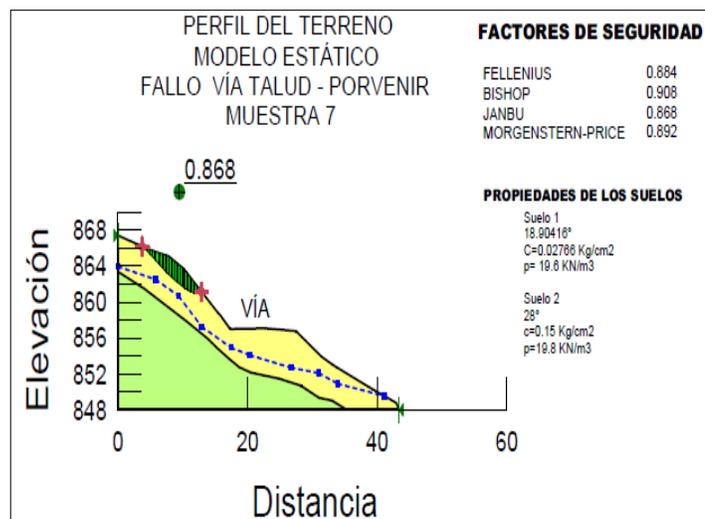
- Seis ciclos de humedecimiento y secado-fallos consolidado drenado
- El factor de seguridad crítico calculado es de 1.326 para el análisis estático

**Análisis de estabilidad usando los resultados de las probetas Prueba 3-
Probetas N6**



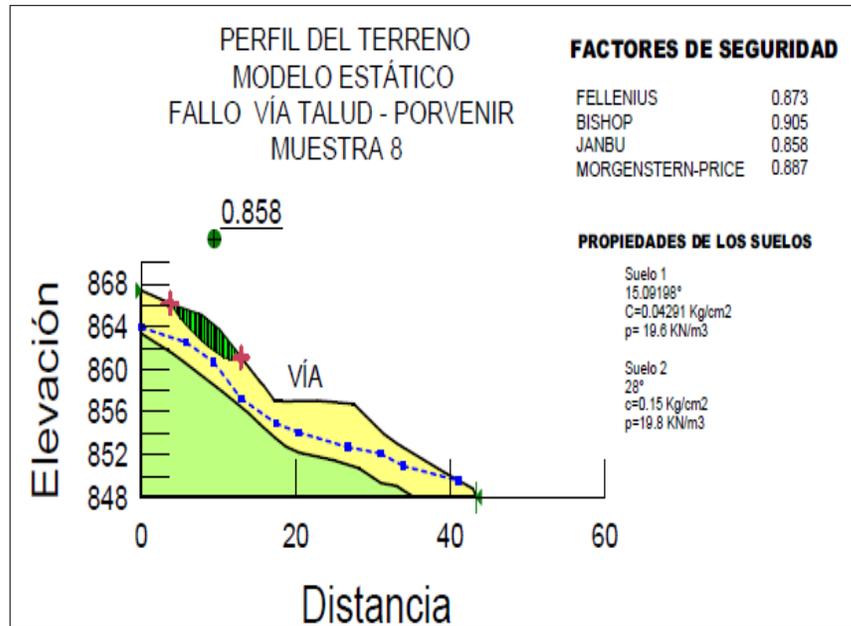
- ocho ciclos de humedecimiento y secado-fallos consolidado drenado
- El factor de seguridad crítico calculado es de 1.67 para el análisis estático

**Análisis de estabilidad usando los resultados de las probetas Prueba 3-
Probetas N7**



- Diez ciclos de humedecimiento y secado-fallos consolidado drenado
- El factor de seguridad crítico calculado es de 0.868 para el análisis estático

Análisis de estabilidad usando los resultados de las probetas Prueba 3- Probetas N8



- Doce ciclos de humedecimiento y secado-fallos consolidado drenado
- El factor de seguridad crítico calculado es de 0.85 para el análisis estático

Se puede evidenciar que los factores de seguridad del talud son afectados por los ciclos de humedecimientos y secado, esto resulta preocupante máxime cuando los diseños para taludes nuevos o existentes se basan en una sola muestra de suelo y en un solo ensayo de corte directo o triaxial cuyos valores se toman como únicos en el tiempo.

Deberá realizarse un análisis más profundo para determinar muchas más ecuaciones del comportamiento de los parámetros geotécnicos y sus variaciones

frente a cambios de humedecimiento y secado, para que los taludes puedan diseñarse con mayor precisión y proyectarse con un periodo de diseño.

HIPOTESIS SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO ANTE LOS CICLOS DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO

Respecto a la hipótesis para explicar los comportamientos observados en el presente proyecto experimental por ciclos de humedecimiento y secado hay que anotar los siguientes aspectos:

- Los suelos donde se presentan estos efectos en la formación Bucaramanga, son aquellos en los cuales se ha realizado un corte para explanación de un talud, poniendo a este estrato en contacto con las condiciones ambientales de escorrentía, infiltración y temperatura, en estos perfiles de suelo antes de cortar el talud, las condiciones ambientales no afectan de manera directa los parámetros geomecánicos, debido a que los niveles freáticos se encuentran por debajo de este y la infiltración de la escorrentía no llega a esta profundidad de 2 metros bajo la superficie antes de realizar la intervención de a ladera.
- Los procesos utilizados en el laboratorio son mucho más agresivos especialmente en términos de temperatura que los desarrollados durante el tiempo geológico de formación del depósito.
- De igual forma, los procesos de humedecimiento en la naturaleza son en efecto más lentos y progresivos que el método de laboratorio.
- Adicionalmente la profundidad de extracción de la muestra (1.5m a 2m), corresponde a un nivel para el cual no se presentan variaciones importantes del contenido de humedad por efectos del aporte de infiltración de las lluvias o por el incremento del nivel freático nivel freático el cual se encuentra entre 6 a 8m debajo de la cota de muestreo. Por lo anterior, es de esperar que el bloque en su condición natural no tuviera una historia de ciclos de humedecimiento y secado importante.

- Es decir, como modelo se asume que la muestra tiene una historia de ciclos ambientales baja.
- Bajo esta premisa, someter las muestras de dicho bloque ante varios ciclos de humedecimiento y secado implica entonces un modelo de degradación acelerado para lo que sufrirá en términos de su tiempo geológico si el material queda en su condición natural pero eventualmente puede acelerarse si su condición geométrica se altera y dicho material queda expuesto como en el caso de los cortes de taludes. Esto implicaría evidentemente un aumento en los procesos de degradación de la roca desde el punto de vista mecánico (micro fracturamiento).
- Basados en el comportamiento de algunos taludes intervenidos en la formación Bucaramanga, los cuales han presentado deslizamientos al cabo de algunos años de ser intervenidos, se plantea como hipótesis del estudio lo siguiente : cada dos años de intensas lluvias y fuertes veranos corresponden con un ciclo de humedecimiento y secado practicado a cada probeta.
- Entonces, cada ciclo de humedecimiento y secado simulará el efecto de intensas lluvias y fuertes veranos durante dos años, lo cual afecta los parámetros geotécnicos según los resultados obtenidos en los ensayos de corte directo fallados en el experimento desarrollado.

A continuación se muestra una tabla donde se resume los cambios y variaciones en los factores de seguridad obtenidos para el talud donde se tomaron las muestras de suelo.

DESCRIPCION FACTOR DE SEGURIDAD-MODELO ESTATICO										
Probeta No.	FACTORES DE SEGURIDAD				PROPIEDADES DE LOS SUELOS					
	Fellenius	Bishop	Janbu	Morgenstern-price	Suelo 1			Suelo 2		
					T	C	p	T	C	p
Probeta 1	1.581	1.637	1.553	1.606	25.13510°	0.082286 Kg/cm2	19.6 KN/m3	28°	0.15 Kg/cm2	19.8 KN/m3
Probeta 2	1.164	1.214	1.146	1.185	21.36319°	0.04975 Kg/cm2	19.6 KN/m3	28°	0.15 Kg/cm2	19.8 KN/m3
Probeta 3	1.321	1.367	1.297	1.339	22.36973°	0.06235 Kg/cm2	19.6 KN/m3	28°	0.15 Kg/cm2	19.8 KN/m3
Probeta 4	1.293	1.337	1.274	1.319	17.21358°	0.08799 Kg/cm2	19.6 KN/m3	28°	0.15 Kg/cm2	19.8 KN/m3
Probeta 5	1.353	1.393	1.326	1.372	20.22334°	0.07862 Kg/cm2	19.6 KN/m3	28°	0.15 Kg/cm2	19.8 KN/m3
Probeta 6	1.694	1.746	1.670	1.726	20.92672°	0.12181 Kg/cm2	19.6 KN/m3	28°	0.15 Kg/cm2	19.8 KN/m3
Probeta 7	0.884	0.908	0.868	0.892	18.90416°	0.02766 Kg/cm2	19.6 KN/m3	28°	0.15 Kg/cm2	19.8 KN/m3
Probeta 8	0.873	0.905	0.858	0.887	15.09198°	0.04291 Kg/cm2	19.6 KN/m3	28°	0.15 Kg/cm2	19.8 KN/m3

Se analizaron diferentes superficies de falla en este talud, utilizando diferentes métodos de análisis, y se calculó el factor de seguridad crítico para cada uno de las variaciones de los parámetros geotécnicos (fricción y cohesión), obtenidos a partir del estudio experimental de la influencia de ciclos de humedecimiento y secado en muestras de suelo obtenidas del talud.

CONCLUSIONES

- EL ángulo de fricción en las probetas fallas mediante el ensayo de corte directo, presenta un comportamiento descendente con relación al aumento en los ciclos de humedecimiento y secado.
- Se determinó una ecuación que representa el comportamiento del ángulo de fricción de las probetas falladas, la cual se relaciona así:

$$\phi = -0,4271n + 22,299$$

Dónde:

ϕ – *angulo de friccion-[°]*

n – *numero de ciclos de humedecimiento y secado*

- Esta ecuación permite analizar la incidencia de los ciclos de humedecimiento con la disminución del valor del ángulo de fricción de las probetas de suelo falladas en el estudio experimental.
- Se determinó una ecuación que representa el comportamiento de la cohesión de las probetas de suelo falladas, la cual se relaciona así:

$$C' = -0,003n + 0,0782$$

Dónde:

c' – *cohesion [Kg/cm²]*

n – *numero de ciclos de humedecimiento y secado*

- Es probable que el ángulo de fricción pueda disminuir como producto del lavado interno de partículas que pueda generar el humedecimiento de la probeta.

- Otra posibilidad es que existe una succión del material por efecto de la salida y entrada de agua en la probeta.
- Los cambios en el contenido de agua y temperatura pueden ocasionar un microfracturamiento en las partículas de suelo, lo cual genera disminución en la resistencia de la misma.
- La cohesión puede disminuir aun que de una manera muy lenta comparada con el ángulo de fricción, como consecuencia del secado rápido de las probetas que genera reordenamiento en las partículas de forma desordenada, generando pérdida en los enlaces cohesivos de las probetas de suelo.
- Puede ocurrir disminución de resistencia de partículas debido a la histéresis química del agua en el momento de absorción o desorción, debido a que el potencial químico del agua en el suelo, a iguales contenidos de humedad, dependerá del sentido en que se siga la curva (de absorción o desorción respectivamente). La cantidad de agua retenida por un suelo es mayor cuando el suelo se encuentra en proceso de desecación que cuando se encuentra en humedecimiento.
- Estos cambios pueden ocurrir en las zonas superficiales de los taludes, lo cual puede ocasionar pérdida de resistencia y disminución de los factores de seguridad, todo esto conlleva a posibles deslizamientos.
- Las causas probables de los fenómenos de reducción en los valores del ángulo de fricción y la cohesión no son objeto de este estudio experimental, sin embargo se puede plantear la realización de ensayos de granulometría de finos en cada uno de los ciclos de humedecimiento y secado, así como ensayos de reacción química, y otros, con lo cuales se podrían encontrar y

demostrar probables causas de los resultados encontrados en este estudio. Estas pruebas adicionales corresponden con un estudio en fase 2.

- Se seleccionaron las muestras que cumplieran con valores de contenido de humedad durante la prueba cercanos al 22 % , lo cual representa un estado casi saturado por encontrarse cerca al límite plástico por lo tanto, tienen un valor de succión CONSTANTE, es decir el efecto de los ciclos de humedecimiento es la única variable asociada.
- Esta tendencia aunque no muy clara para pocos ciclos, si muestra que a mayor número de ciclos el ángulo de fricción tiende a reducirse.
- Por lo tanto, los resultados evidencian un efecto de tipo mecánico que afecta el ángulo de fricción que está relacionado con la pérdida del área efectiva de contacto entre partículas por la rotura progresiva entre agredados a nivel micro-estructural durante los procesos de expansión y contracción del material.
- Una vez realizados análisis de estabilidad para cada uno de los parámetros geotécnicos obtenidos en los diferentes ciclos de humedecimiento y secado, se encontró que los factores de seguridad en el talud de ven afectados por los diferentes ciclos de humedecimientos y secado.
- La hipótesis del estudio planteada a través del análisis de resultados manifiesta que cada dos años de intensas lluvias y fuertes veranos corresponden con un ciclo de humedecimiento y secado practicado a cada probeta.
- En ese orden de ideas para el talud donde fue tomada la muestra de suelo, los parámetros geotécnicos se reducen en un periodo de 24 años. Periodo durante el cual podrían ocurrir deslizamientos en los sectores superficiales del talud.

- .Los resultados de este estudio pueden establecer que periodos intensos de lluvias e intensos y largos veranos pueden proyectarse como un ciclo de humedecimiento y secado encontrado en el laboratorio.
- Los análisis de estabilidad realizados para el talud en estudio, evidencian la disminución en los factores de seguridad del mismo, como consecuencia de los ciclos de intensas lluvias y fuertes veranos.
- En la formación Bucaramanga se han presentado múltiples deslizamientos en las laderas y taludes intervenidos para ampliaciones viales y obras de infraestructura. Lo anterior refleja la necesidad de profundizar en el estudio de la influencia de los ciclos de lluvias y veranos para poder analizar con mayor precisión los factores de seguridad, usando un periodo de diseño en la construcción de obras de estabilización.
- Lo anterior con el fin de logra proyectar obras de estabilidad diseñadas utilizando parámetros geotécnicos adecuado, proyectados en un periodo de el tiempo.
- La profundización de este proyecto desarrollará nuevas metodologías con las cuales las entidades ambientales y gubernamentales deberán implementar monitoreos en las obras de estabilización construidas y en aquellos taludes que han sido intervenidos y no han sido estabilizados, con el fin de comprobar las hipótesis propuesta en este proyecto experimental
- Estos monitoreos permitirán ajustar las variables del comportamiento geomecánicos del suelo en el talud con el fin de optimizar los diseños de taludes y proyectarlos en el tiempo.

- Se deberá profundizar en la investigación y llevarla a fase 2 con muchos más ciclos de humedecimiento y secado e implementando nuevos mecanismos que definan de varias maneras estos procesos naturales.

IMPACTO QUE TENDRÁ EL TRABAJO DE GRADO PARA LA COMUNIDAD ACADÉMICA, CIENTÍFICA O PROFESIONAL DEL ÁREA

1. Aporte al conocimiento tecnológico de la región en cuanto al tema
2. Revisión preliminar sobre los análisis de estabilidad y su eficiencia frente a los procesos de posible variación de resistencia por acción del cambio de saturación
3. Proponer un estudio de mayor profundidad, con el fin de evaluar los posibles periodos de diseño de estructuras de estabilización de taludes
4. Enfocar modelos más reales en los estudios para el análisis de amenaza riesgo y vulnerabilidad sísmica en el área metropolitana de Bucaramanga.
5. Propiciar la investigación aplicada a corto plazo en la maestría en geotecnia UIS y en la demás facultades de ingeniería de la Ciudad de Bucaramanga.

BIBLIOGRAFIA

- BOWLES, Joseph, "Foundation analysis and design". Nueva York, 1996.
- GUÍA METODOLÓGICO 1. Incorporación de la prevención y la reducción de riesgos en los procesos de ordenamiento Territorial. MAVDT, -Bogotá 2005.
- MEMORIAS (2000), Seminario de Estudios de Riesgos por fenómenos de remoción en masa, Secretaria de Gobierno, Alcaldía Mayor de Santa Fe de Bogotá
- NORMA SISMO RESISTENTE 1998 Norma NSR – 98. Bogotá, 1999
- NORMAS GEOTECNICAS CDMB Bucaramanga, 2005.
- SUAREZ DIAZ, Jaime "Deslizamientos Vol. 1". Bucaramanga, 2009.
- MERCHAN JAIMES, Vladimir E. Tesis Doctoral "Small strain stiffness and residual strength behaviour of Boom Clay: A microstructural insight" 2011.
- ALONSO ET AL "Tipos de estructura del suelo" 1987.
- ESCARIO "Situación Estratigráfica de la Peñuela, perfil Geotécnico NE-SE. 1985.

ANEXOS

-Resultado de laboratorio de caracterización y corte directo practicados a las probetas ensayadas