

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN MODELO EXPERIMENTAL Y
NUMÉRICO DE UN TALUD PREDEFINIDO**

FRANK NICOLÁS SUÁREZ MORENO



Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela de ingenierías

Facultad de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2020

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN MODELO EXPERIMENTAL Y
NUMÉRICO DE UN TALUD PREDEFINIDO**

Frank Nicolás Suárez Moreno

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:

INGENIERO CIVIL

Director de Proyecto

Julián André Galvis Flórez

Ingeniero Civil- Docente de planta

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela de ingenierías

Facultad de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2020

Agradecimientos

A Dios y a mis padres, de quienes siempre he recibido el apoyo necesario para crecer a nivel personal, profesional y espiritual.

A mi director y profesores adjuntos al proyecto por su contribución no solo a este trabajo sino también a mi formación académica.

A los coordinadores y trabajadores de los laboratorio de UPB – seccional Bucaramanga por su entrega y dedicación.

A CAVIPETROL y sus delegados por su gran apoyo y acompañamiento desde el inicio de mi carrera hasta su culminación.

CONTENIDO

| | |
|--|-----|
| LISTA DE FIGURAS | iv |
| LISTA DE TABLAS | v |
| LISTA DE FOTOGRAFÍAS | vii |
| 1. Introducción..... | 3 |
| 2. Objetivos del estudio | 6 |
| 3. Marco teórico..... | 7 |
| 3.1. Restricción al desarrollo de áreas de riesgo | 7 |
| 3.1.1. Políticas de disuasión: | 7 |
| 3.1.2. Regulación del uso de la tierra | 8 |
| 3.1.3. Códigos técnicos para el manejo de taludes | 8 |
| 3.2. Requerimientos mínimos en estudios de estabilidad | 9 |
| 3.3. Método de análisis de taludes finitos | 10 |
| 3.4. Factor de seguridad en taludes | 11 |
| 3.5. Método de las dovelas o rebanadas..... | 12 |
| 3.6. Uso de Software en los análisis de estabilidad de taludes finitos | 14 |
| 3.7. Teorema PI de Buckingham..... | 15 |
| 4. Metodología..... | 20 |
| 4.1. Caracterización del suelo | 20 |

| | | |
|--------|--|----|
| 4.1.1. | Ensayos de laboratorio..... | 21 |
| 4.2. | Construcción y ensayo modelo de laboratorio..... | 22 |
| 4.3. | Modelación del talud en Geostudio | 22 |
| 4.3.1. | Definición de las condiciones de contorno..... | 22 |
| 4.3.2. | Situaciones de proyecto, definición de los puntos de contorno y área de trabajo | 24 |
| 4.3.3. | Definir las propiedades de los suelos e introducir los puntos de contorno..... | 25 |
| 4.3.4. | Definición del radio de las superficies de deslizamiento y la malla..... | 25 |
| 4.4. | Aplicación de la metodología del teorema PI de Buckingham..... | 26 |
| 4.4.1. | Identificación de las variables asociadas al proyecto y sus magnitudes físicas ... | 27 |
| 4.4.2. | Reducción dinámica | 28 |
| 4.4.3. | Características geométricas del modelo | 29 |
| 5. | Resultados y discusión..... | 30 |
| 5.1. | Ensayos de Laboratorio..... | 30 |
| 5.1.1. | Ensayo de Granulometría | 30 |
| 5.1.2. | Ensayos Límites de Atterberg..... | 30 |
| 5.1.3. | Ensayo peso específico | 33 |
| 5.1.4. | Ensayo de compactación | 33 |
| 5.1.5. | Ensayo de comprensión simple | 34 |
| 5.1.6. | Ensayo de corte directo..... | 35 |
| 5.2. | Construcción de los modelos experimentales (Laboratorio) | 37 |

| | |
|---|----|
| 5.3. Ensayo de carga en los modelos experimentales (Laboratorio)..... | 41 |
| 5.4. Modelación en Geostudio – SLOPE (W)..... | 48 |
| 5.5. Análisis numérico de la estabilidad de los taludes tipo | 50 |
| 5.6. Graficas Esfuerzo - Deformación | 56 |
| 6. Conclusiones y recomendaciones | 59 |
| Bibliografía..... | 61 |
| Apéndice:..... | 63 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Descripción gráfica de una dovela | 12 |
| Figura 2. Recomendaciones geometría de un modelo | 23 |
| Figura 3. Dimensiones propuestas talud de estudio | 29 |
| Figura 4. Curva de fluidez | 31 |
| Figura 5. Curva de compactación | 34 |
| Figura 6. Parámetros de resistencia ensayos 1.1, 1.2 y 1.3 | 35 |
| Figura 7. Parámetros de resistencia ensayos 2.1, 2.2 y 2.3 | 36 |
| Figura 8. Parámetros de resistencia ensayos 3.1, 3.2 y 3.3 | 36 |
| Figura 9. Modelo con pendiente de 45°* | 38 |
| Figura 10. Modelo con pendiente de 55°* | 39 |
| Figura 11. Modelo con pendiente de 65°* | 40 |
| Figura 12. Modelo tipo Talud 45° | 48 |
| Figura 13. Modelo tipo Talud 55° | 49 |
| Figura 14. Modelo tipo Talud 65° | 49 |
| Figura 15. Tipos de suelo por parámetros – color | 50 |
| Figura 16. Masa deslizando talud tipo en estado límite de equilibrio | 55 |
| Figura 17. Esfuerzo – Deformación talud de 45° | 57 |
| Figura 18. Esfuerzo – Deformación talud de 55° | 57 |
| Figura 19. Esfuerzo – Deformación talud de 65° | 58 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Magnitudes fundamentales. Sistema Internacional | 17 |
| Tabla 2. Magnitudes derivadas del sistema internacional | 17 |
| Tabla 3. Cantidades y variables en un análisis de taludes | 18 |
| Tabla 4. Ensayos de laboratorio | 21 |
| Tabla 5. Variables relacionadas al análisis de taludes..... | 27 |
| Tabla 6. Distribución granulométrica del suelo..... | 30 |
| Tabla 7. Límite líquido | 31 |
| Tabla 8. Límite plástico | 31 |
| Tabla 9. Límite de contracción..... | 32 |
| Tabla 10. Peso específico | 33 |
| Tabla 11. Característica del molde de compactación | 33 |
| Tabla 12. Pesos unitarios – humedades de compactación..... | 34 |
| Tabla 13. Características de los especímenes, compresión simple..... | 35 |
| Tabla 14. Carga – Deformación Talud de 45° | 46 |
| Tabla 15. Carga – Deformación Talud de 55° | 46 |
| Tabla 16. Carga – Deformación Talud de 65° | 47 |
| Tabla 17. Factores de seguridad para el talud de 45° | 50 |
| Tabla 18. Factores de seguridad para el talud de 55° | 51 |
| Tabla 19. Factores de seguridad para el talud de 65° | 52 |
| Tabla 20. Factores de seguridad modelo de 45° estable..... | 54 |
| Tabla 21. Factores de seguridad modelo de 55° estable..... | 54 |
| Tabla 22. Factores de seguridad modelo de 65° estable..... | 54 |

| | |
|--|----|
| Tabla 23. Factores de seguridad modelo de 45° con carga última | 54 |
| Tabla 24. Factores de seguridad modelo de 55° con carga última | 55 |
| Tabla 25. Factores de seguridad modelo de 65° con carga última | 55 |

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

| | |
|--|----|
| Fotografía 1. Molde para la construcción de modelos en laboratorio | 37 |
| Fotografía 2. Modelo de 45° construido..... | 38 |
| Fotografía 3. Modelo de 55° construido..... | 39 |
| Fotografía 4. Modelo de 65° construido..... | 40 |
| Fotografía 5. Ensayo en marco de carga..... | 41 |
| Fotografía 6. Modelo con pendiente de 45° ensayado, zona frontal. | 42 |
| Fotografía 7. Modelo con pendiente de 45° ensayado, zona lateral. | 42 |
| Fotografía 8. Modelo con pendiente de 55° ensayado, zona frontal. | 43 |
| Fotografía 9. Modelo con pendiente de 55° ensayado, zona lateral..... | 43 |
| Fotografía 10. Modelo con pendiente de 65° ensayado, con masa deslizante | 44 |
| Fotografía 11. Modelo con pendiente de 65° ensayado, sin masa deslizante..... | 44 |
| Fotografía 12. Masas deslizantes modelos experimentales | 56 |

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN MODELO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE UN TALUD PREDEFINIDO

AUTOR(ES): Frank Nicolás Suárez Moreno

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Julian André Galvis Florez

RESUMEN

El presente estudio parte de la caracterización de una mezcla de suelo areno arcilloso, desde determinar propiedades básicas como la distribución granulométrica hasta la determinación de los parámetros de resistencia a través de un ensayo sencillo como lo es el ensayo de corte directo. En primer lugar, en favor de dar desarrollo a los objetivos propuestos, se construyeron tres modelos experimentales en el laboratorio de resistencia de materiales, representativos de una estructura tipo talud cuya principal diferencia fue la inclinación de sus pendientes, finalmente se ensayaron los modelos a través de la aplicación de una carga normal a la superficie de la corona de los taludes. En segundo lugar, se elaboraron 3 modelos numéricos en el software Geostudio – Slope (W) de los cuales se desprendió un amplio estudio contemplando tres métodos de análisis y simultáneamente considerando el efecto de la variabilidad de los parámetros de resistencia. Las primeras impresiones en relación con los resultados de carga en los modelos experimentales fueron que la pendiente estaba asociada con la capacidad para resistir esfuerzos de corte y de acuerdo con los resultados del análisis efectuado con el software se evidenció esta relación. El estudio concluye analizando el comportamiento del factor de seguridad en función de la pendiente en tres situaciones: 1) Teniendo en cuenta la variabilidad de los parámetros de resistencia, 2) Considerando el comportamiento de un modelo numérico representativo (fijando un ángulo de fricción y la cohesión) frente a un porcentaje de la carga total y 3) Considerando el comportamiento de los modelos experimentales y numéricos, frente a la carga última de ensayo, y analizando las superficies de falla obtenidas en el laboratorio y las arrojadas por el software.

PALABRAS CLAVE:

Taludes, factor seguridad, análisis numérico, parámetros resistentes, equilibrio límite, esfuerzos.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF AN EXPERIMENTAL AND NUMERICAL MODEL OF A DEFAULT SLOPE

AUTHOR(S): Frank Nicolás Suárez Moreno

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Julian André Galvis Florez

ABSTRACT

The present study is based on the characterization of a clay sand soil mixture, from determining basic properties such as granulometric distribution to the determination of resistance parameters through a simple test such as the direct cut test. In the first place, in order to develop the proposed objectives, three experimental models were constructed in the materials resistance laboratory, representative of a slope structure whose main difference was the magnitude of its slopes, finally the models were tested through the application of a normal load on the crown surface of the slopes. Secondly, three numerical models were developed in the Geostudio - Slope (W) software, from which a large study was carried out considering three methods of analysis and simultaneously considering the effect of the variability of the resistance parameters. The first impressions in relation to the loading results in the experimental models were that the slope was associated with the capacity to resist cutting efforts and according to the results of the analysis performed with the software, this relationship was evidenced. The study concludes by analyzing the behavior of the safety factor as a function of the slope in three situations: 1) Considering account the variability of the resistance parameters, 2) Considering the behavior of a representative numerical model (setting a friction angle and cohesion) against a percentage of the total load and 3) Considering the behavior of the experimental and numerical models, compared to the maximum test load, and analyzing the fault surfaces obtained in the laboratory and thrown by the software.

KEYWORDS:

Slope, safety factor, numerical analysis, resistance parameters, limit balance, stresses.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. Introducción

El análisis de taludes ha sido un tema complejo de estudio para el ingeniero civil debido a las múltiples suposiciones de las cuales se desprende el análisis, en las últimas décadas este ha sido de carácter numérico e iterativo. De las variadas perspectivas desde las cuales se puede abordar este tema, está el estudiar el efecto de la infiltración, la presión de poros, el carácter expansivo de algunos suelos, la homogeneidad del estrato y la geometría de este tipo de estructuras. Lo que se pretende con este trabajo de grado es establecer un análisis a partir de la geometría que pueda ser complemento o complementado a partir de otros trabajos similares. A continuación, se presentan algunos antecedentes, no tan antiguos en materia de estabilidad de taludes.

Antecedentes

Jiménez (2017), se enfoca en la estrecha relación entre las lluvias y los deslizamientos con el interés de incluir en el análisis de estabilidad de taludes las variables hidrológicas y las implicaciones que estas tienen sobre la infiltración en taludes, por medio de un análisis de metodologías.

Jiménez evalúa las variaciones y afectaciones en la estabilidad del sistema con base en una modelación matemática a través de herramientas computacionales (Geostudio, entre otros) para un talud hipotético variando los valores de conductividad hidráulica para seis tipos de materiales, principalmente a partir de las características de las precipitaciones.

Jiménez, entre los suelos relacionados con su trabajo, analizó un suelo limoso con las siguientes características:

$$\gamma = 18.2 \left(\frac{KN}{m^3} \right), C = 6Kpa, \phi = 29^\circ$$

Dentro de su análisis de estabilidad concluyó que, para deslizamientos profundos, a pesar de que el nivel freático asciende al cabo de un periodo de lluvias de 30 días las condiciones de estabilidad no desmejoran en gran proporción, contando con un factor de seguridad de 1.11 en condiciones iniciales y 1.06 después del periodo de prueba. Para deslizamientos superficiales se tiene un factor de seguridad de 1.28 en condiciones iniciales y 0.93 después del periodo de prueba.

También trabajó con un suelo arenoso con las siguientes características:

$$\gamma = 17 \left(\frac{KN}{m^3} \right), C = 0Kpa, \phi = 36^\circ$$

De forma similar, concluye las condiciones de estabilidad son buenas en general a pesar de un aumento del nivel freático en el molo.

La utilidad de estos resultados es tal que permite tener una idea de la estabilidad del talud que se propondrá (contando con características similares), a partir de otro punto de vista como lo son los factores hidrológicos.

Herrera (2013), empleando la metodología de diseño de experimentos, evalúa la interacción dinámica suelos estructura de edificaciones construidas en ladera, considerando un espacio bidimensional por medio del software Plaxis 2010 por medio de un modelo no lineal del suelo y elastoplástico para las estructuras. Los factores analizados son el contenido frecuencias del sismo, velocidad de onda de corte promedio del estrato de suelo, ángulo de inclinación de la ladera, período característico de la estructura y la posición de los edificios en el desarrollo de la ladera.

Las dos variables respuesta son la cortante basal y la relación del desplazamiento máximo experimentado en el techo de los edificios, comparadas en condición topográfica de ladera y plana.

Parámetros de los suelos en cuestión:

Suelo C, $C = 43 \text{ Kpa}$, $\phi = 31^\circ$; Suelo D, $C = 24 \text{ Kpa}$, $\phi = 36^\circ$;

Suelo E, $C = 18 \text{ Kpa}$, $\phi = 29^\circ$

El trabajo de Herrera constituye una base de análisis de susceptibilidad sísmica, teniendo en cuenta que la cohesión es un factor importante en la capacidad de respuesta del suelo. Por lo anterior, los suelos tipo D y E presentaron mayores aceleraciones por lo que el efecto de resonancia los deforma en mayor medida. El trabajo puede servir de base si en un futuro se decide analizar el asilamiento teniendo en cuenta cimentaciones profundas, lo cual podría permitir acercarse más a la corona de un talud para hacer verificaciones con la norma que aplique según sea el caso.

2. Objetivos del estudio

Objetivo general

Comparar los factores de seguridad de un modelo experimental y uno numérico de un talud conformado por un suelo areno limoso.

Objetivos específicos:

- Construir un modelo a escala de laboratorio que simule las condiciones de un talud areno limoso.
- Determinar las propiedades geotécnicas del suelo para el talud en estudio.
- Elaborar un modelo numérico que simule las condiciones del modelo experimental en el software Geostudio.
- Analizar el comportamiento de ambos modelos sometidos a esfuerzos de corte.

3. Marco teórico

3.1. Restricción al desarrollo de áreas de riesgo

Según Suárez (1998), uno de los métodos más efectivos y económicos para reducir pérdidas por deslizamientos tiene origen en la proyección de nuevos desarrollos, convirtiendo las áreas vulnerables en áreas verdes o evitando un grado de uso/ocupación alto. La mayoría de los países y ciudades cuentan con políticas enfocadas al ordenamiento/aprovechamiento del suelo, diseñados para mitigar el riesgo a causa de fenómenos naturales.

El método más efectivo es el de evitar desarrollos de áreas susceptibles, el cual se puede obtener mediante varios sistemas:

3.1.1. Políticas de disuasión:

- ✓ Programas de información pública
- ✓ Manejo de escrituras o certificados de propiedad
- ✓ Negación de los servicios públicos
- ✓ Avisos públicos
- ✓ Adquisición de propiedades por parte del Estado
- ✓ Negación de créditos
- ✓ Costos de seguro
- ✓ Impuestos

3.1.2. Regulación del uso de la tierra

El Estado, al prohibir usos específicos o procedimientos que puedan generar falla de los taludes, tales como la construcción de carreteras, urbanizaciones, disposición de desechos, etc. se define como ente regulador al uso de la tierra.

En Colombia, las autoridades ambientales tienen la facultad de constituir distritos de manejo integral para la prevención de amenazas naturales apoyadas en el código de Recursos Naturales. Así mismo, se ponen en práctica los códigos de urbanismo para regular los nuevos desarrollos. Sin embargo, la conciencia ciudadana juega un papel fundamental a la hora de enfrentar y evitar las amenazas, siendo útil para estas sean puestas en consideración al momento de diseñar las regulaciones (Suárez, 1998).

3.1.3. Códigos técnicos para el manejo de taludes

Algunas ciudades han desarrollado códigos o normas específicas para el manejo de taludes, en los cuales definen un conjunto de parámetros técnicos de diseño y construcción de obras de estabilización.

En el caso de Bucaramanga- Colombia, el código es manejado por las autoridades ambientales de la mano de las entidades de planificación y desarrollo. Con este código se rigen los siguientes aspectos:

- Requisitos para la presentación de proyectos
- Parámetros mínimos para la elaboración de estudios geotécnicos y de estabilidad

- Procedimientos para el manejo y estabilización de taludes
- Normas para el control de fondo y lateral de cauces
- Requisitos para la construcción de vías en áreas susceptibles

3.2. **Requerimientos mínimos en estudios de estabilidad**

CDMB (2005) Define un estudio de estabilidad de taludes como la evaluación de las condiciones naturales de origen geológico, morfológicas y de mecánica de suelos que posibiliten definir el riesgo potencial por posibles movimientos de masa que afecten las obras en él proyectadas, extendiéndose a zona adyacentes donde las obras puedan activar procesos de inestabilidad.

Para la CDMB es indispensable la siguiente información para el buen desarrollo de un proyecto, a nivel geotécnico, sin embargo, el alcance de este proyecto lo lleva a tener en cuenta algunas de ellas como materia de estudio y análisis:

- Localización y área analizada, objetivo del estudio, resumen de la investigación adelantada, morfología del terreno
- Origen geológico de la formación donde se ubica el terreno, descripción de las principales unidades geológicas y geotécnicas, estratos encontrados con su origen, descripción visual y estado, y posición del nivel freático
- Localización del lote de acuerdo con el estudio de zonificación sismo geotécnica indicativa
- Sondeos

- Ensayos de Laboratorio: Ensayo de clasificación, humedad natural, compresión simple y resistencia triaxial.
- Análisis de estabilidad estática y sísmica (en este caso, solo análisis estático)
- Recomendaciones y diseño de las obras para garantizar la estabilidad (en este trabajo de grado no se incluye diseño de obras de contención/estabilidad)

3.3. Método de análisis de taludes finitos

Los análisis de estabilidad tienen por objetivo la implementación de medidas correctivas o de estabilización basadas en el nivel de seguridad determinado. Para Sanhueza y Rodríguez (2013), los estudios y análisis que se derivan de la ocurrencia de un evento de deslizamiento de masa son relevantes a la hora de caracterizar geomecánicamente el estrato afectado, puesto que conocer el mecanismo y la geometría de la inestabilidad, constituye una buena base para estudiar los factores influyentes y el comportamiento mecánico de los materiales en cuestión. Estos estudios indican el nivel de reproducibilidad que puede haber al tratar otros taludes en condiciones similares.

Los análisis consisten en determinar los parámetros resistentes del terreno – cohesión – fricción – a partir de los datos de terrenos, denominados datos de entrada, como geometría, características de los materiales, modelo de rotura, etc. Estos parámetros deberán satisfacer la condición de equilibrio de un talud ($f_s=1$) en toda su superficie de rotura.

El método de equilibrio límite, de los más usados, analiza el equilibrio de una masa susceptible a la falla y su metodología se basa en comparar las fuerzas resistentes con las motoras o deslizantes que existen a lo largo de una superficie de falla o rotura supuesta. Este método es basado en la teoría de Mohr-Coulomb y el cálculo de un factor de seguridad, resultado de la relación de fuerzas actuantes.

En base a la precisión de los resultados, estos métodos se subdividen en exactos y *no exactos*. Aquellos que son conocidos como métodos de estabilidad global, consideran la masa deslizante como un todo. En cambio, el método de las dovelas divide la masa deslizante en porciones o rebanadas de similar tamaño (dependiendo de la geometría del talud) para simplificar el análisis (Sanhueza, Rodríguez, 2013). Este segundo método resulta muy útil al considerar la anisotropía que pueda existir en el perfil de suelo estudiado, que a su vez puede ser homogéneo o heterogéneo.

En el método de las dovelas, la geometría de la superficie de falla permite abordar en dos dimensiones el problema. A una sección representativa del talud se le divide en franjas del mismo tamaño y analizando individualmente cada dovela, en cuanto a las fuerzas que se generan en base a su forma y propiedades (por su ubicación en el estrato) se obtiene un factor de seguridad.

3.4. Factor de seguridad en taludes

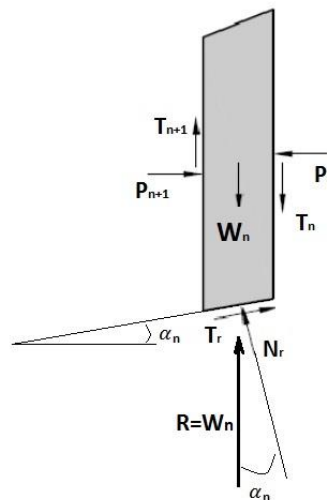
Una de las tareas del ingeniero es calcular las fuerzas resistentes y las fuerzas motoras o actuantes involucradas en el estudio del talud. El cociente de estos dos valores es determinante a

la hora de declarar que un talud es estable o que por el contrario se encuentra ante un inminente fallo. Tratándose de la primera situación, por lo general, un factor de seguridad mayor o igual a 1.5 $\left(\frac{\text{Fuerzas resistentes}}{\text{fuerzas actuantes}} \geq 1.5 \right)$ es considerado aceptable; la segunda situación se origina cuando el factor de seguridad no alcanza un valor superior a 1.0. A lo anterior se le puede denominar “equilibrio límite”, partiendo de la estimación de la fuerzas actuantes y las fuerzas resistentes que se requieren para obtener el equilibrio en el sistema se hace una verificación con las prestaciones del suelo, que se traducen a los parámetros de resistencia del suelo.

3.5. Método de las dovelas o rebanadas

Este método está basado en la descomposición geométrica de la sección de suelo que está por encima de una superficie de falla supuesta consiguiendo una división en cortes verticales del segmento de suelo, cuyas partes son denominadas dovelas; no necesariamente tienen las mismas dimensiones.

Figura 1. Descripción gráfica de una dovela



Las fuerzas que actúan sobre una dovela son las siguientes:

W_n : Peso efectivo de la dovela

N_r y T_r : Componentes normal y tangencial de la reacción $R = W_n$

P_n y P_{n+1} : Fuerzas normales que actúan sobre los lados de la dovela

T_n y T_{n+1} : Fuerzas de corte que actúan sobre los lados de la dovela

Se parte de una suposición respecto a las fuerzas normales y de corte a los lados de la dovela, la cual considera que las resultantes son iguales en magnitud y también que las líneas de acción coinciden.

Ahora, se tiene que el factor de seguridad con respecto a la resistencia es:

$$FS_s = \frac{\tau_f}{\tau_d}$$

Donde: τ_f : resistencia media del suelo al corte

τ_d : esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de una potencia superficie de falla

A su vez se tiene que:

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

Donde: c' : cohesión del suelo

σ' : esfuerzo normal efectivo en la falla

ϕ' : ángulo de fricción

Consideración de equilibrio:

$$N_r = W_n \cos \alpha_n$$

La componente tangencial se puede expresar como:

$$T_r = \tau_d \Delta L_n = \frac{\tau_f \Delta L_n}{FS_s} = \frac{1}{FS_s} [c' + \sigma' \tan \phi'] \Delta L_n$$

El esfuerzo efectivo en la falla es igual a:

$$\sigma' = \frac{N_r}{\Delta L_n} = \frac{W_n \cos \alpha_n}{\Delta L_n}$$

Ahora se considerará el equilibrio de la masa deslizante ubicada por encima de la superficie de falla, con respecto a un centro de circunferencia (propuesto).

$$\sum_{n=1}^{n=p} W_n r \sin \alpha_n = \sum_{n=1}^{n=p} \frac{1}{FS_s} \left[c' + \frac{W_n \cos \alpha_n}{\Delta L_n} \tan \phi' \right] \Delta L_n r$$

$$FS_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} [c' \Delta L_n + W_n \cos \alpha_n \tan \phi']}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n}$$

3.6. Uso de Software en los análisis de estabilidad de taludes finitos

Con la aparición de herramientas computacionales en la ingeniería, la precisión de los resultados ha ido en aumento debido a la cantidad de iteraciones que los programas pueden ejecutar, como en el caso del método de las dovelas donde es fundamental evaluar desde distintos puntos o centros de rotura para poder encontrar el valor mínimo correspondiente al factor de seguridad. Morgenstern- Price (1965) y Spencer (1967) han sido autores de procesos matemáticos más detallados en esta materia.

Slope/W (Geostudio), diseñado especialmente para este tipo de análisis, es uno de los programas más utilizados y se basa principalmente en el método de equilibrio límite. Las condiciones de los modelos que se pueden elaborar en este programa van desde la existencia de

superficies geométricas complejas, suelos estratificados hasta la presencia del nivel freático (Sanhueza, Rodríguez, 2013). Los métodos propuestos por Fellenius, Bishop, Janbú, Spencer y Morgenstern – Price hacen parte de las alternativas de análisis de este Software.

El comportamiento de materiales granulares es estudiado considerando la teoría de Mohr – Coulomb, el de roturas bilineales o con alguna función específica donde los esfuerzos normales y de corte sean relacionados. Los coeficientes verticales y horizontales de la aceleración del sismo son fundamentales para un análisis tipo dinámico.

Como resultado se obtienen distintas superficies de rotura (entre ellas la más desfavorable), una representación de las dovelas y su distribución en el modelo, así como un análisis individual para cada una de las dovelas dentro de la superficie de falla estudiada.

3.7. Teorema PI de Buckingham

El teorema de PI es una metodología usada para analizar de manera simplificada un problema teniendo en cuenta todas aquellas variables que se incluyan, de manera simultánea. En vez de analizar pares de variables es posible plantear una expresión que permita observar la relación de conjuntos de 3 variables, por ejemplo, a través del uso de gráficos. El método se basa en la similaridad dinámica, denominada así por la estrecha relación que debe existir entre la realidad del problema y la simulación que se quiere llevar a cabo. La importancia de la similaridad se debe a que el fin de constituir modelos de laboratorio es poder predecir o proyectar el funcionamiento o comportamiento del objeto materia de estudio, por esto es necesario estimar

con precisión todas aquellas propiedades intrínsecas de las que depende la respuesta que se origine por acción de las condiciones que existan e intervengan en el problema.

El teorema se basa en la determinación de unos factores adimensionales o *números* PI que mediante un proceso estándar reducen las variables a una expresión. Entonces, si existe una relación funcional entre las variables, de la forma $f(n \text{ variables})=0$, entonces es posible combinar las variables para formar una cantidad de factores adimensionales que depende de cálculo del determinante de la mayor submatriz cuadrada de una matriz dimensional, donde, por ejemplo, un resultado diferente de cero para una submatriz de 3x3 configura un rango J igual a 3, es decir, 3 factores adimensionales originados de las n variables que constituyan la matriz dimensional (la principal).

Por ejemplo, si tenemos $f(P, v, h, p, g) = 0$. La matriz dimensional es:

$$\begin{array}{c} - \quad P \quad v \quad h \quad p \quad g \\ M \\ L \\ T \end{array}$$

Ahora, al ver las letras M, L y T es necesario tratar otro tema: Las magnitudes fundamentales. Estas magnitudes son relevantes para el método puesto que mediante estas se descomponen todas aquellas variables involucradas en el problema. Las magnitudes fundamentales reconocidas en el Sistema Internacional de unidades de medida son las siguientes:

Tabla 1. Magnitudes fundamentales. Sistema Internacional

| Magnitud fundamental | Dimensión física ² | Unidad SI | Unidad Inglesa |
|---------------------------|-------------------------------|-----------|----------------|
| Longitud | L | m | ft |
| Masa | M | kg | lbm |
| Tiempo | T | s | s |
| Corriente eléctrica | I | A | A |
| Cantidad de sustancia | m | mol | mol |
| Temperatura termodinámica | t | K | R |
| Intensidad luminosa | i | cd | cd |

Fuente: Teorema π - Construyendo ciencia en el aula (Bernal Yermanos, 2015)

Ahora, hay magnitudes que se componen o derivan de las magnitudes fundamentales, como las siguientes:

Tabla 2. Magnitudes derivadas del sistema internacional

| Magnitud | Símbolo | Dimensión física | Unidad SI |
|------------------------|------------------|------------------|--------------------|
| Velocidad | $[v]$ | LT^{-1} | m/s. |
| Aceleración | $[a]$ | LT^{-2} | m/s ² . |
| Fuerza | $[F]$ | MLT^{-2} | N (newton). |
| Energía | $[E]$ | ML^2T^{-2} | J (joule). |
| Potencia | $[p]$ | ML^2T^{-3} | W (watt). |
| Volumen | $[V]$ | L^3 | m ³ . |
| Posición | $[x]$ | L | m. |
| Desplazamiento | $[\Delta x]$ | L | m. |
| Distancia | $[d]$ | L | m. |
| Desplazamiento angular | $[\Delta\theta]$ | 1 | rad (radián). |

Fuente: Teorema π - Construyendo ciencia en el aula (Bernal Yermanos, 2015)

Por lo anterior, se puede observar que cada variable está compuesta por una o más magnitudes relacionadas en la matriz dimensional así:

*Variables: Presión, velocidad, altura, densidad y gravedad.

$$P = \frac{M}{LT^2}; v = \frac{L}{T}; h = L; p = \frac{M}{L^3}; g = \frac{L}{T^2}.$$

La pregunta entonces es ¿Cómo está configurada la matriz? En los espacios deben ir los exponentes de cada dimensión física, entonces:

$$\begin{array}{rcccccc}
 & - & P & v & h & p & g \\
 M & & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 L & & -1 & 1 & 1 & -3 & 1 \\
 T & & -2 & -1 & 0 & 0 & -2
 \end{array}$$

Retomando el párrafo 2 de este numeral, tenemos entonces que $J=3$ (rango) puesto que existe una submatriz de tamaño 3×3 cuyo determinante es diferente de 0. Submatriz:

$$\begin{array}{rcccc}
 & - & P & v & h \\
 M & & 1 & 0 & 0 \\
 L & & -1 & 1 & 1 \\
 T & & -2 & -1 & 0
 \end{array} = 0 + 0 + 0 - 0 - (-1) - 0 = 1$$

3.1.1. Cálculo de los factores adimensionales

Los factores adimensionales que simplifican el análisis se originan de un tratamiento de las variables, involucradas en el problema, descompuestas en sus respectivas dimensiones físicas. La descomposición antes mencionada permite formular una ecuación en relación con cada variable. Las variables, identificadas en este caso, son las siguientes:

Tabla 3. Cantidades y variables en un análisis de taludes

| Ecuación No. | Variable | Símbolo | Sistema | |
|--------------|----------------------|---------------|-----------------|---------------|
| | | | Absoluto | Gravitacional |
| 1 | Fuerza | F | MLT^{-2} | F |
| 2 | Peso unitario | γ | $ML^{-2}T^{-2}$ | FL^{-3} |
| 3 | Deformación unitaria | ε | 1 | 1 |
| 4 | Esfuerzo | σ | $ML^{-1}T^{-2}$ | FL^{-2} |
| 5 | Cohesión | C | $ML^{-1}T^{-2}$ | FL^{-2} |
| 6 | Fricción | ϕ | 1 | 1 |

Bernal Yermanos (2015) expone el método de repetición de variables asociado a la metodología del teorema PI, el cual consiste en seleccionar “J” variables para repetir en expresiones que se derivan de la siguiente ecuación:

$$\pi_i = V_{Di} \prod_{k=1}^j V_{fk}^{a_k} \quad (\text{ecuación 1.0})$$

Donde: V_D = variables involucradas en el problema;

V_f : Variables dinámicas fundamentales (V. repetidas);

a_k : Exponentes que configuran el número π_i como adimensional

El rango “J” también puede determinarse observando el número de magnitudes fundamentales relacionadas (3 en este caso M, L y T) y el número de factores adimensionales puede determinarse como $k = n - j$, donde “n” es la cantidad de variables relacionadas y “j” el rango.

Por ejemplo, si se seleccionan la fuerza y la cohesión como variables a repetir uno de los factores adimensionales quedaría así, de acuerdo con la ecuación 1.0:

$$\pi_1 = \{M^0 L^0 T^0\} = ML^{-2} T^{-2} * (MLT^{-2})^a (ML^{-1} T^{-2})^b$$

$$L^0 = L^{-2} * L^a * L^{-b} \rightarrow 0 = -2 + a - b$$

$$T^0 = T^{-2} T^{-2a} * T^{-2b} \rightarrow 0 = -2 - 2a - 2b$$

$$M^0 = M * M^a * M^b \rightarrow 0 = 1 + a + b$$

$$b = -\frac{3}{2}; a = \frac{1}{2} \text{ es decir } \pi_1 = \gamma \sqrt[2]{F * \frac{1}{C^3}}$$

El fin último de obtener los factores adimensionales es obtener expresiones que relacionen varias variables a través de igualación de términos u otro procedimiento alternativo. Lo anterior otorga un carácter predictivo a las expresiones al considerar los rangos en los que oscilan las variables que se están tratando.

4. Metodología

La presente metodología parte de la caracterización del suelo a través de ensayos de laboratorio regidos por el *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Luego se procede a construir un modelo de laboratorio, de las dimensiones de una caja de 0.5x0.5 m y una altura definida a partir de la pendiente del talud que se vaya a estudiar. A partir de este modelo, se elabora el modelo numérico en el software, recreando las condiciones de este, definidas previamente. Se determinará el factor de seguridad para cada modelo y posteriormente, en base a las variaciones y calibraciones que sobre los modelos se efectúen, se compararán los resultados, con relación al factor de seguridad y los tipos de falla que se obtengan.

4.1. Caracterización del suelo

Análisis granulométrico, límites de atterberg y ensayos mecánicos

El suelo tendrá origen de los estratos de la universidad y combinado con material arenoso para obtener una resistencia no tan elevada que permita llegar a la falla, con el modelo a menor escala, con mayor rapidez al realizar la aplicación de cargas. Estas podrían ser aplicadas a través de

pesas que se encuentran en el laboratorio de materiales o con la prensa universal ubicada en el laboratorio de construcciones.

Para observar en mayor detalle las deformaciones causadas por la transmisión de las cargas, se aplicará un colorante en polvo creando un perfil de colores, facilitando analizar las deformaciones del suelo y la superficie de falla. Las proporciones para combinar el suelo arenoso con el suelo que se encuentra en los terrenos de la UPB (generalmente arcillosos/ limosos), dependerán del ángulo de fricción ϕ que se obtenga por cada proporción, ya que ϕ está relacionado con la superficie de falla. Considerando que a mayor inclinación del talud el factor de seguridad es menor se podría optar por seleccionar una proporción cuyo ángulo ϕ sea el mayor entre las combinaciones de suelo.

4.1.1. Ensayos de laboratorio

A continuación, se presenta una tabla resumen de los ensayos considerados para este proyecto relacionado con su respectiva norma.

Tabla 4. Ensayos de laboratorio

| Ensayo | Norma |
|-------------------------|------------|
| Análisis Granulométrico | INV E- 123 |
| Límite Líquido | INV E- 125 |
| Límite Plástico | INV E- 126 |
| Límite de Contracción | INV E- 127 |
| Peso Específico | INV E- 222 |
| Compactación | INV E- 142 |
| Compresión Inconfinada | INV E- 152 |
| Corte Directo | INV E- 154 |

4.2. Construcción y ensayo modelo de laboratorio

Este modelo contará con un área aproximada de 0.25 m², moldeado en un espacio comprendido por formaleta metálica, ideal para restringir el desplazamiento lateral del volumen de suelo. El material será compactado de manera que se genere un talud con una pendiente mayor a la propuesta, paso seguido se cizallará o raspará para darle una pendiente adecuada, que posibilite la rotura ante cargas no muy altas.

La carga se aplicará verticalmente a través de un brazo hidráulico fijo en el marco de carga (ver fotografía A1. Apéndice), se ocuparán dos canales en el datalogger (ver fotografía A2, Apéndice): Uno para registrar las deformaciones verticales usando un deformímetro con capacidad de 25 mm de desplazamiento y el segundo para registrar las cargas aplicadas. En base a los resultados del modelo experimental, se calibrarán los modelos numéricos en Slope (w), para asociar una carga permisible de acuerdo con un factor de seguridad mayor o igual a 1,5.

4.3. Modelación del talud en Geostudio

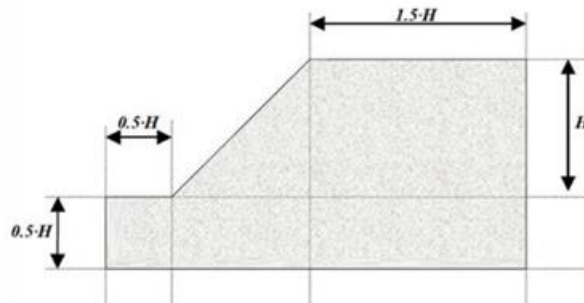
La modelación numérica consta de una serie de representaciones de la realidad, teniendo en cuenta las características propias del suelo, así como su geometría y condiciones de frontera. A continuación, se muestra una pauta que facilita llegar a la fase de análisis y resultados.

4.3.1. Definición de las condiciones de contorno

Generalmente, la altura y la pendiente del talud a estudiar son valores que se conocen con certeza, pero por otro lado no se tiene claridad sobre la geometría que el modelo debe considerar, representando la profundidad del terreno debajo del pie del talud, la distancia desde la cabeza del talud, etc.

López Pineda (2017), presenta un esquema de dimensiones típicas de la geometría del modelo, las cuales servirán como base para el primer cálculo y de acuerdo con el resultado con relación a la rotura se modifican calibrando el modelo. Los parámetros del terreno como son la cohesión y el ángulo de fricción son valores de entrada para el modelo.

Figura 2. Recomendaciones geometría de un modelo



Tomado de Introducción al uso del programa Slope/W Versión 2012

Dentro de la metodología que López Pineda propone para un caso en particular, se destaca lo siguiente, de manera general:

4.3.2. Situaciones de proyecto, definición de los puntos de contorno y área de trabajo

Las situaciones de proyecto consisten en identificar y representar, de acuerdo con el alcance del programa, aquellos factores objeto de estudio. Por ejemplo, si se desea analizar la estabilidad teniendo en cuenta únicamente el peso propio, la presencia de un nivel freático, la presencia de cargas externas, etc.

Los puntos de contorno se definen a partir de la geometría de este, los límites entre capas de terreno, las inclinaciones de los taludes, la altura, situación del nivel freático y parámetros geomecánicos del suelo(s).

El área de trabajo está definida como el espacio en el ‘papel’ del programa donde tendrá lugar el talud, se configura desde la misma interfaz del programa.

Otras configuraciones menores son:

- Definición de la escala y unidades de cálculo
- Definición del espaciado de malla
- Ejes del boceto
- Especificar el método de análisis
- Especificar el control de análisis: Sentido de la rotura y tipo de superficie del deslizamiento

- Configuración de las opciones avanzada: Definición de número de dovelas, tolerancia del factor de seguridad, espesor mínimo de la superficie de falla, número de iteraciones, etc.

4.3.3. Definir las propiedades de los suelos e introducir los puntos de contorno

Se introducen los valores – en KeyIn Materials – de la cohesión y el ángulo de fricción, adicionalmente se selecciona el modelo para el material, relacionado con la interacción del suelo. Generalmente Mohr Coulomb. También se define el contorno del perfil que condiciona el cálculo en KeyIn Points. Luego el programa permite sombrear las regiones de los distintos estratos existentes en Draw → Regions.

Posteriormente en Draw → Materials, se asigna un tipo de material a cada región.

4.3.4. Definición del radio de las superficies de deslizamiento y la malla

Con la opción Slip Surface, se dibujan una serie de líneas con variaciones leves en la pendiente de modo que exista un punto imaginario a donde todas confluyen. En base a estas líneas SLOPE dibujará círculos de rotura tangentes a estas líneas. Posteriormente se define una malla para el control de la ubicación de los centros de los círculos de rotura. Al definir el marco, se define el número de divisiones de la malla. Otra forma de funcionar el programa es que ejecuta el modelo y luego muestra una serie de superficies de falla ordenadas, empezando por la más crítica.

Existen otras configuraciones que permiten mostrar la información general del proyecto, de los materiales, por ejemplo. Finalmente, el programa verificará la existencia de errores y

procederá a realizar los cálculos desde la opción Windows → Solve Manager → Solve Checked Analyses. A partir de los resultados se genera todo el trabajo de análisis entre los dos modelos que se pretenden trabajar.

4.4. Aplicación de la metodología del teorema PI de Buckingham

Una de las maneras de proyectar el éxito durante el diseño y la construcción de cualquier proyecto, es construyendo modelos que permitan predecir el comportamiento del objeto, obra, etc. que se va a elaborar teniendo en cuenta las condiciones que existen y que muchas veces son una contraparte importante dentro de la planificación de un proyecto.

Los modelos se califican como representativos si estos son un reflejo de la realidad del objeto que están simulando y si se observa que el objeto y su modelo (igual en forma, pero con escala diferente) se comportan de manera similar bajo condiciones definidas entonces se consigue similaridad dinámica. En una situación en donde exista similaridad dinámica es imprescindible caracterizar de manera precisa aquel objeto materia de estudio con el fin de presentar un análisis del comportamiento del modelo basado en las propiedades de este.

Es importante resaltar que existen variables directamente relacionadas con los resultados de un análisis de taludes como lo son la cohesión y el ángulo de fricción, propiedades intrínsecas del todo suelo que no pueden ser incluidas dentro de la reducción dinámica del suelo (reducción del tamaño de las partículas) ya que dichas propiedades dependen precisamente del tamaño de las partículas de suelo, su distribución/acomodación que constituyen el estrato, por tanto, si se

aplicase algún tipo de reducción esta alteraría la similaridad entre el modelo y el talud al clasificarse como un suelo totalmente diferente.

4.4.1. Identificación de las variables asociadas al proyecto y sus magnitudes físicas

Tabla 5. Variables relacionadas al análisis de taludes

| Ecuación No. | Variable | Símbolo | Dimensión física |
|--------------|----------------------|---------------|------------------|
| 1 | Fuerza | F | MLT^{-2} |
| 2 | Peso unitario | γ | $ML^{-2}T^{-2}$ |
| 3 | Deformación unitaria | ε | 1 |
| 4 | Esfuerzo | σ | $ML^{-1}T^{-2}$ |
| 5 | Cohesión | C | $ML^{-1}T^{-2}$ |
| 6 | Fricción | ϕ | 1 |

Número de variables $n=6$

Número de magnitudes fundamentales: 3 (M, L y T)

Rango $J=2$ (Submatrices 3x3 con determinante igual a 0)

Números PI = $n-J=4$

Variables repetidas: F, C

El método de las variables repetidas establece que la cantidad de variables a repetir es igual a la cantidad de magnitudes fundamentales presente en general en todas las variables y si existe una submatriz dimensional asociada cuyo determinante (3x3) sea diferente de cero En este caso las variables son dimensionalmente dependiente por lo que la mayor submatriz cuyo determinante es diferente de cero, es de tamaño 2x2. Esto indica que serán dos las variables que se repetirán y cuatro los factores adimensionales.

$$\pi_1 = \varepsilon$$

$$\pi_2 = \emptyset$$

$$\pi_3 = \{M^0 L^0 T^0\} = ML^{-2} T^{-2} * (MLT^{-2})^a (ML^{-1} T^{-2})^b$$

$$L^0 = L^{-2} * L^a * L^{-b} \rightarrow 0 = -2 + a - b$$

$$T^0 = T^{-2} * T^{-2a} * T^{-2b} \rightarrow 0 = -2 - 2a - 2b$$

$$M^0 = M * M^a * M^b \rightarrow 0 = 1 + a + b$$

$$a = \frac{1}{2}; b = -\frac{3}{2} \rightarrow \pi_3 = \gamma \sqrt{\frac{F}{C^3}}$$

$$\pi_4 = \{M^0 L^0 T^0\} = ML^{-1} T^{-2} * (MLT^{-2})^a (ML^{-1} T^{-2})^b$$

$$L^0 = L^{-1} * L^a * L^{-b} \rightarrow 0 = -1 + a - b$$

$$T^0 = T^{-2} * T^{-2a} * T^{-2b} \rightarrow 0 = -2 - 2a - 2b$$

$$M^0 = M * M^a * M^b \rightarrow 0 = 1 + a + b$$

$$a = 0; b = -1 \rightarrow \pi_4 = \frac{\sigma}{C}$$

$$\pi_4 = \pi_3 = \gamma \sqrt{\frac{F}{C^3}} = \frac{\sigma}{C}$$

$$F = \frac{C \sigma^2}{\gamma^4}$$

4.4.2. Reducción dinámica

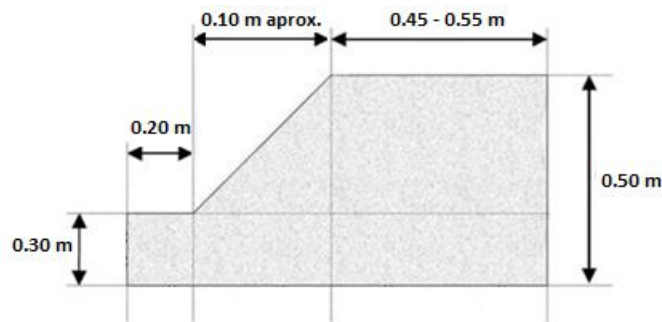
Considerando que las características geométricas (siguiente capítulo) se reducen para escalar el problema, el comportamiento de este puede alterarse como puede pasar en elementos de concreto con la diferencia de que la acomodación de partículas en este es totalmente diferente debido a su rigidez, además las propiedades cementantes del cemento se traducen en una

restricción para la redistribución de los agregados. Sin embargo, se podría escalar la fuerza que se aplicará al modelo a través de la segunda ley de Newton, de manera similar como se hace en elementos de concreto, y verificar si la fuerza reducida corresponde en proporción al evento de falla que suceda en el modelo.

4.4.3. Características geométricas del modelo

Las dimensiones propuestas para el modelo a escala son las siguientes:

Figura 3. Dimensiones propuestas talud de estudio



Tomado de Introducción al uso del programa Slope/W Versión 2012

Estas características representan un talud tipo de dimensiones de 16 metros de ancho por 10 metros de altura, aproximadamente, configurando así una escala de 1:20. La escalabilidad también está sustentada de manera sencilla en el teorema Pi, con un factor de escala que considera cantidades de la misma dimensión así: $S_L = \frac{L_p}{L_m}$; donde L_p es la longitud del prototipo, en este caso el talud a escala real y L_m la longitud del modelo.

5. Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados de ensayos de laboratorio (caracterización), ensayos de laboratorio de evaluación; el desarrollo de la metodología en general.

5.1. Ensayos de Laboratorio

Los resultados de ensayos de laboratorios se presentarán a continuación en el orden presentado en la tabla 4.

5.1.1. Ensayo de Granulometría

Ese ensayo fue realizado bajo la metodología presentada en la norma INV E – 123.

Tabla 6. Distribución granulométrica del suelo

| Malla | Abertura [mm] | Peso retenido [g] | % Retenido parcial | % Pasa |
|----------------|---------------|-------------------|--------------------|--------|
| <i>No. 4</i> | 4.75 | 0 | 0 | 100 |
| <i>No. 10</i> | 2 | 10.13 | 2.03 | 97.97 |
| <i>No. 20</i> | 0.85 | 85.22 | 17.04 | 80.93 |
| <i>No. 40</i> | 0.425 | 130.35 | 26.07 | 54.86 |
| <i>No. 60</i> | 0.25 | 84.77 | 16.96 | 37.91 |
| <i>No. 140</i> | 0.106 | 56.82 | 11.36 | 26.54 |
| <i>No. 200</i> | 0.075 | 6.93 | 1.39 | 25.15 |
| <i>Fondo</i> | - | 125.78 | 25.15 | 0 |

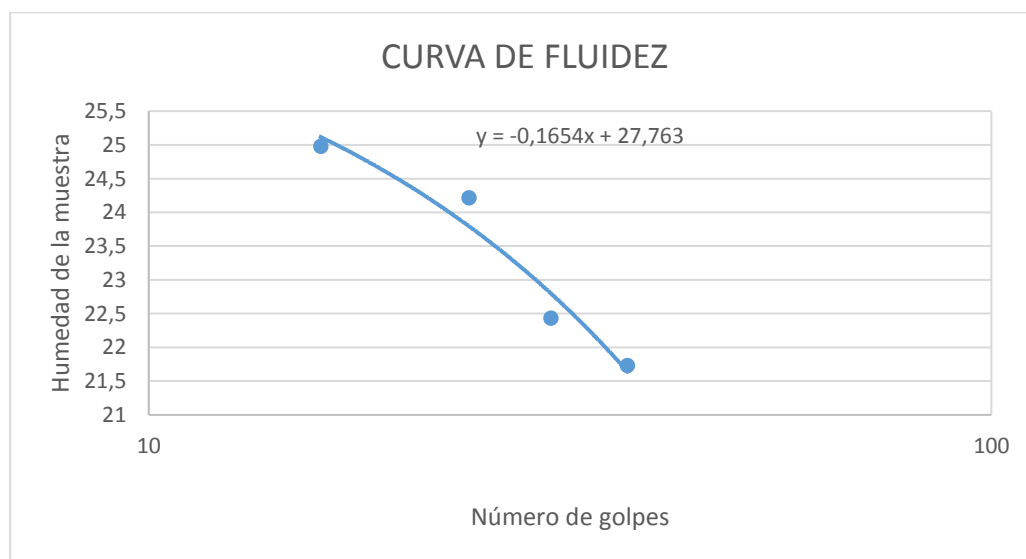
5.1.2. Ensayos Límites de Atterberg

Estos ensayos fueron realizados bajo la metodología presentada en la norma INV E-125 – límite líquido), INV E-126 – límite plástico e INV E-127 – límite de contracción.

Tabla 7. Límite líquido

| Numero de golpes | Humedad [%] |
|------------------|----------------|
| 16 | 24.9785 |
| 24 | 24.2152 |
| 30 | 22.4327 |
| 37 | 21.7281 |
| | |
| 25 | 24 (LL) |

Figura 4. Curva de fluidez



Se encuentra un **límite líquido de 24** (humedad correspondiente a los 25 golpes requeridos en la copa de Casagrande).

En el apéndice del presente documento se encuentra la tabla A1, la cual soporta los datos recogidos en la tabla 7.

Tabla 8. Límite plástico

| Prueba No. | Capsula No. | Peso cápsula+ suelo húmedo [g] | Peso cápsula + suelo seco [g] | Peso agua [g] | Peso cápsula [g] | Peso suelo seco [g] | Humedad [%] | Índice de Plasticidad |
|------------|-------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------|------------------|---------------------|-------------|-----------------------|
| 1 | 43 | 18.14 | 16.95 | 1.19 | 10.6 | 6.35 | 18.7 | 6.13 |
| 2 | 6 | 19.07 | 17.91 | 1.16 | 10.8 | 7.11 | 16.3 | |
| 3 | 48 | 24.17 | 22.11 | 2.06 | 11 | 11.11 | 18.5 | |
| | | | | | | LP | 18 | |

Se encuentra un límite plástico de 18, humedad máxima del suelo antes de entrar en un estado semisólido.

Tabla 9. Límite de contracción

| Densidad del mercurio [g/cm ³] | No. Cápsula | Peso cápsula[g] Mt | Peso mercurio en capsula [g] | Volumen suelo húmedo[cm ³] V | Peso cápsula + suelo húmedo [g] Mw | Peso suelo húmedo [g] M |
|--|------------------------|--|--|---|------------------------------------|-------------------------|
| 13.55 | 1 | 7.67 | 390.23 | 28.8 | 62.87 | 55.2 |
| | 2 | 7.74 | 390.57 | 28.82 | 63.86 | 56.12 |
| | 3 | 7.86 | 377.56 | 27.86 | 61.02 | 53.16 |
| | 4 | 21.42 | 272.13 | 20.08 | 60.44 | 39.02 |
| Peso cápsula + suelo seco[g] MD | Peso suelo seco [g] Mo | Peso mercurio removido por suelo seco[g] | Volumen suelo seco[cm ³] V0 | Humedad [%] | Límite de Contracción | Relación de Contracción |
| 51.48 | 43.81 | 325.85 | 24.05 | 26 | 15 | 1.82 |
| 52.27 | 44.53 | 328.52 | 24.26 | 26 | 16 | 1.84 |
| 50.06 | 42.2 | 312.56 | 23.07 | 26 | 15 | 1.83 |
| 52.41 | 30.99 | 230.16 | 16.99 | 26 | 16 | 1.82 |

Se encuentra un límite de contracción de 15.5 en promedio, humedad límite bajo la cual el suelo no sufre efectos expansivos o de contracción por efecto del aumento o disminución de su fase líquida.

Clasificación del suelo:

En base a la información de granulometría y límites es posible clasificar el suelo de acuerdo

$$\% \text{ Arenas} = 100 - \% \text{ finos} - \% \text{ Gravas} \rightarrow \% \text{ Arenas} = 100 - 25.15 - (100 - 100)$$

$$\% \text{ Arena} = 74.85 \text{ y } \% \text{ Finos} > 12\% \rightarrow \text{Arena SC/SM (S.U.C.S)}$$

Caso frontera, se ubica en la carta de plasticidad por encima de la Línea "A" y un IP entre 4 y

$$7 (6.13)$$

Clasificación AASHTO

$$\% \text{ Pasa } 200 = 25.15 (< 35\%); LL = 24 (< 40); IP = 6.13 (< 10); IG = 0 \rightarrow A-2-4$$

5.1.3. Ensayo peso específico

Este ensayo se realizó bajo la metodología propuesta por la norma INV E – 222, norma destinada al ensayo de muestras con partículas finas.

Tabla 10. Peso específico

| | | | | | | |
|----------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------|-----------|
| | Masa [g] | | | | | |
| A = | 467.71 | | SH | SECA AL HORNO | | |
| B = | 619.88 | | SSS | SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA | | |
| C = | 851.71 | | | | | |
| S = | 500 | | | | | |
| | | | Kg/m ³ | Kg/m ³ | Kg/m ³ | % |
| Densidad Relativa SH | Densidad Relativa SSS | Densidad Relativa Aparente | Densidad SH | Densidad SSS | Densidad Aparente | Absorción |
| 1.74 | 1.86 | 1.98 | 1740 | 1860 | 1978 | 6.9 |
| | | | | | 19.40418 | |
| | | | | | KN/m³ | |

A: Masa de la muestra seca al horno

B: Masa del picnómetro lleno de agua

C: Masa total del picnómetro con suelo+agua

D: Masa de muestra saturada y superficialmente seca

5.1.4. Ensayo de compactación

Este ensayo se realizó bajo la metodología de la norma INV E – 142.

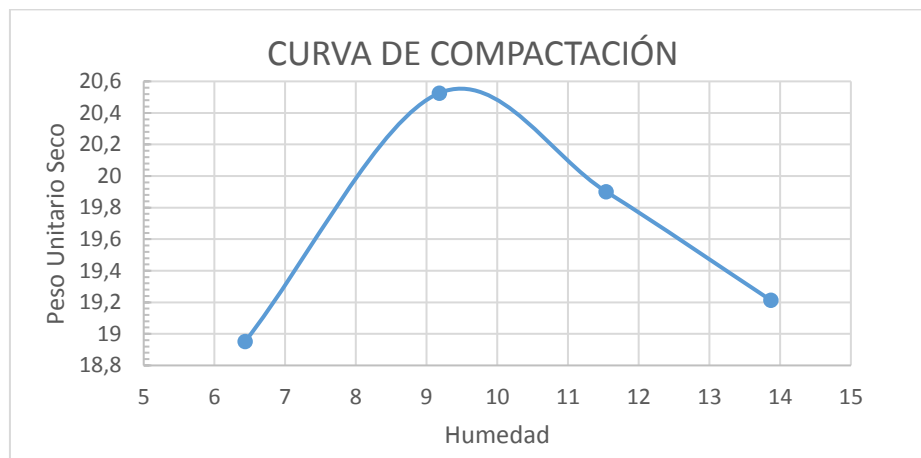
Tabla 11. Característica del molde de compactación

| Características del Molde | |
|---------------------------|--------|
| Peso[g] +base | 3770 |
| Diámetro[cm] | 10 |
| Altura[cm] | 11.7 |
| Volumen[cm ³] | 918.92 |

Tabla 12. Pesos unitarios – humedades de compactación.

| P.U. seco [KN/m ³] | Humedad [%] |
|---------------------------------|--------------------|
| 18.95093031 | 6.43 |
| 20.5262612 | 9.18 |
| 19.90117619 | 11.54 |
| 19.21302058 | 13.87 |
| P. U. Máx. [KN/m ³] | Humedad Óptima [%] |
| 20.556 | 9.48 |

Figura 5. Curva de compactación



En el apéndice de este documento se encuentra la tabla A2 y tabla A3, que contiene la información completa del ensayo de compactación

5.1.5. Ensayo de compresión simple

Este ensayo se realizó bajo la metodología presentada en la norma INV E – 152

Tabla 13. Características de los especímenes, compresión simple

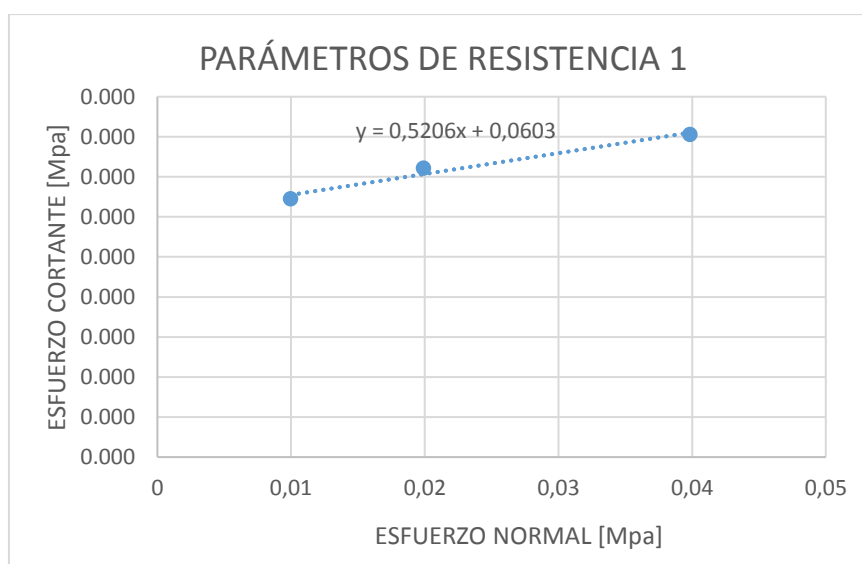
| Especimen No. | Diámetro [cm] | Altura [cm] | Peso [g] |
|----------------|---------------------|----------------|----------|
| 1 | 3.498 | 7.365 | 153.55 |
| 2 | 3.492 | 7.367 | 150.62 |
| 3 | 3.484 | 7.374 | 155.41 |
| Carga Máx. [N] | Desplazamiento [mm] | Esfuerzo [Mpa] | |
| 52.33 | 0.762 | 0.05445293 | |
| 46.9 | 0.9398 | 0.04919565 | |
| 60.25 | 1.0668 | 0.06290986 | |

En el apéndice de este documento se encuentran las tablas A4, A5, A6 y A7 que contienen la información completa de los ensayos de compresión simple.

5.1.6. Ensayo de corte directo

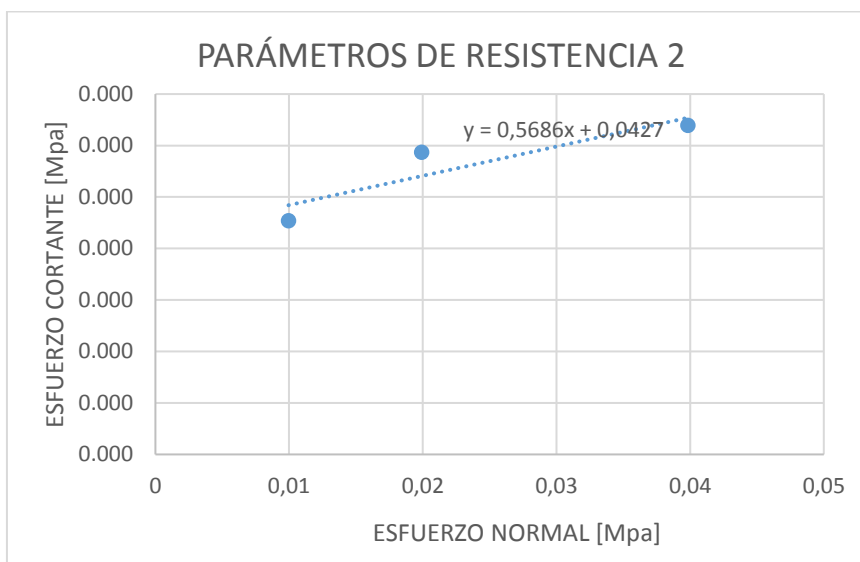
Se realizaron tres ensayos de corte directo, como resultado se obtuvieron 3 pares de datos correspondiente a los parámetros de resistencia del suelo, siguiendo la metodología propuesta en la norma INV E – 154.

Figura 6. Parámetros de resistencia ensayos 1.1, 1.2 y 1.3



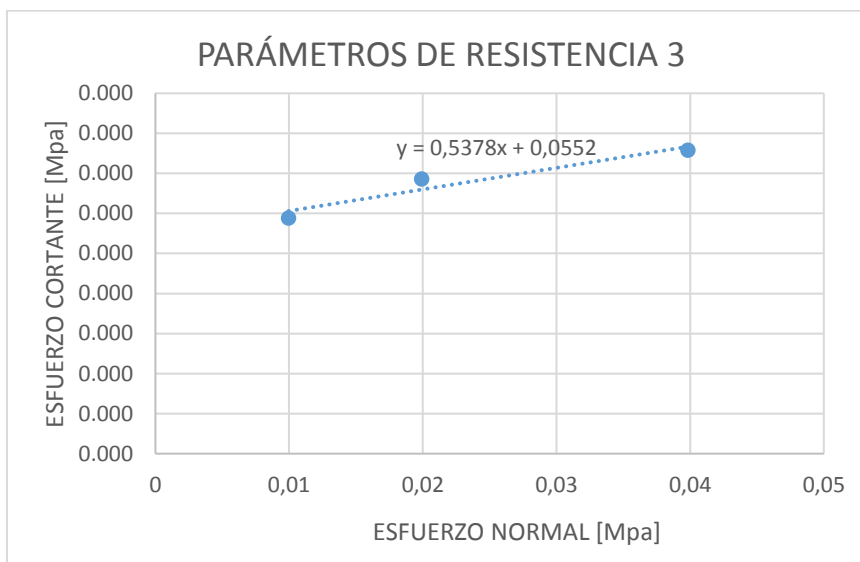
Angulo de fricción: $\phi = \text{Arctan}0.5206 \rightarrow \phi = 27.5$, Cohesión: $C = 60.3 \text{ Kpa}$

Figura 7. Parámetros de resistencia ensayos 2.1, 2.2 y 2.3



Angulo de fricción: $\phi = \text{Arctan}0.5686 \rightarrow \phi = 29.6$, Cohesión: $C = 42.7 \text{ Kpa}$

Figura 8. Parámetros de resistencia ensayos 3.1, 3.2 y 3.3



Angulo de fricción: $\phi = \text{Arctan}0.5378 \rightarrow \phi = 28.3$, Cohesión: $C = 55.2 \text{ Kpa}$

En el anexo 1 se encuentran las tablas AN1, AN2, AN3, AN4, AN5, AN6, AN7, AN8 y AN9 donde se encuentra la información completa de los ensayos de corte directo.

5.2. Construcción de los modelos experimentales (Laboratorio)

Para la elaboración de los taludes, se emplearon moldes conformados por formaleta metálica (ver fotografía 1, ideal para restringir el desplazamiento lateral (simulando confinación lateral), favoreciendo la falla en la zona frontal del talud.

Fotografía 1. Molde para la construcción de modelos en laboratorio

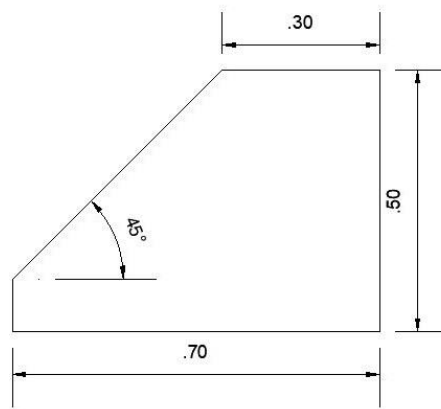


Fuente: Propia

Las siguientes figuras ilustran los tres modelos que se construyeron (por reconstitución) en el laboratorio, la variable entre ellos fue la pendiente y por supuesto el volumen (alterado por la pendiente). El tiempo de construcción de estos modelos fue de aproximadamente 8 horas por modelo, además de los trabajos de destrucción y preparación* para la reconstitución. Los modelos fueron los siguientes:

*La preparación implicó la desintegración tanto del volumen del talud construido como de terrones y un secado parcial del suelo para posteriormente adicionar agua para una compactación óptima.

Figura 9. Modelo con pendiente de 45°*



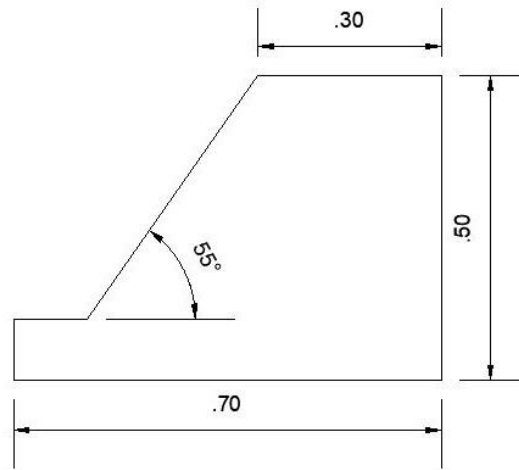
Para este modelo se usaron aproximadamente 220 kg de material. *medidas en metros

Fotografía 2. Modelo de 45° construido



Fuente: Propia

Figura 10. Modelo con pendiente de 55°*



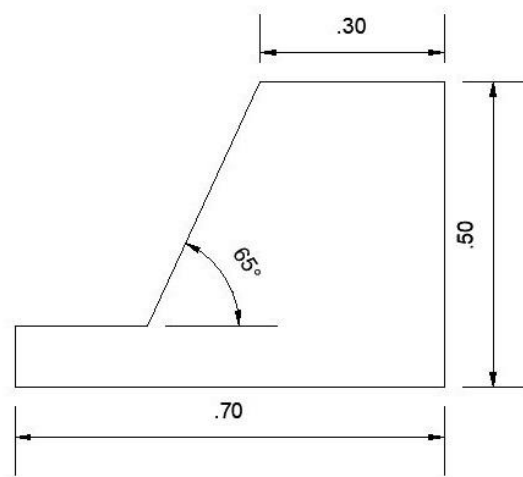
Para este modelo se usaron aproximadamente 200 Kg de material. *medidas en metros

Fotografía 3. Modelo de 55° construido



Fuente: Propia

Figura 11. Modelo con pendiente de 65°*



Para este modelo se usaron aproximadamente 180 Kg de material. *medidas en metros

Fotografía 4. Modelo de 65° construido



Fuente: Propia

5.3. Ensayo de carga en los modelos experimentales (Laboratorio)

Como resultado de la aplicación de carga vertical (Ver fotografía 5.) en los modelos, se obtuvieron, además de los registros en el datalogger, unas superficies de falla que se pueden observar en la parte lateral del talud al remover una de las caras del molde. En algunos casos se puede observar la falla desde la zona frontal del talud.

Fotografía 5. Ensayo en marco de carga



En la imagen se puede observar un deformímetro con capacidad de 25 mm de desplazamiento, así como elementos metálicos para acoplar la placa con la que el brazo hidráulico aplica la carga.

Las siguientes figuras corresponden al estado final de los modelos ensayados:

Fotografía 6. Modelo con pendiente de 45° ensayado, zona frontal.



Fuente: propia

Se evidencian grietas en la parte frontal el talud, zona alta y media.

Fotografía 7. Modelo con pendiente de 45° ensayado, zona lateral.



Fuente: propia

No es tan evidente la falla al finalizar el ensayo, aun así, es perceptible. Falla de talud con circulo de punta.

Fotografía 8. Modelo con pendiente de 55° ensayado, zona frontal.



Fuente: propia

Es evidente el desplazamiento de la parte superior del talud en un área que corresponde al área de aplicación.

Fotografía 9. Modelo con pendiente de 55° ensayado, zona lateral



Fuente: propia

La irregularidad de la textura de talud se debe a desprendimiento de material en la zona donde esta se evidencia. Así mismo se observa que la masa deslizante se ha desplazado hacia la parte frontal del molde. Falla de talud con circulo de pendiente.

Fotografía 10. Modelo con pendiente de 65° ensayado, con masa deslizante



Fuente: propia

Falla denominada como falla de talud con circulo de punta.

Fotografía 11. Modelo con pendiente de 65° ensayado, sin masa deslizante



Fuente: propia

Retirando la masa deslizante es posible observar que la superficie de falla es similar en toda la profundidad.

5.3.1. Registro de datos – Datalogger

De acuerdo con la velocidad de carga (5mm/min en este caso) el datalogger registra datos en intervalos de tiempo diferentes, entre menor desplazamiento por minuto mayor cantidad de datos. En este caso el rango de datos está entre los tres mil y ocho mil datos, rango que se traduce a una mayor duración de los ensayos en cuanto más datos obtenemos. La duración de los ensayos estuvo definida como el tiempo en que tarda el suelo en solo deformarse verticalmente llegando el esfuerzo a un tope, es decir, cuando este fue constante en el tiempo. Aunque se tiene un amplio rango de datos, algunos fueron descartados, por ejemplo: datos registrados durante el tiempo que tardaba el brazo en acoplarse al sistema completamente, aunque se registran algunas deformaciones sólo después de ese momento el suelo empieza a soportar las cargas que se registran en el datalogger.

A continuación, se presentan los datos a manera de resumen, recogidos por el datalogger. Estos corresponden a los datos de carga correspondientes a diferentes porcentajes de la deformación total.

Tabla 14. Carga – Deformación Talud de 45°

| Def. [%] | Carga [KN] | Def. [mm] |
|----------|------------|-----------|
| 5 | 9.30 | 0.37 |
| 10 | 14.20 | 0.74 |
| 15 | 19.10 | 1.11 |
| 20 | 23.20 | 1.48 |
| 25 | 26.30 | 1.86 |
| 30 | 28.60 | 2.23 |
| 35 | 30.90 | 2.61 |
| 40 | 32.90 | 2.94 |
| 45 | 35.40 | 3.35 |
| 50 | 37.50 | 3.71 |
| 55 | 39.50 | 4.09 |
| 60 | 41.20 | 4.44 |
| 65 | 42.80 | 4.81 |
| 70 | 44.20 | 5.16 |
| 75 | 45.80 | 5.58 |
| 80 | 47.10 | 5.97 |
| 85 | 48.20 | 6.33 |
| 90 | 49.40 | 6.70 |
| 95 | 50.60 | 7.09 |
| 100 | 51.30 | 7.35 |

Duración: 30 minutos

Tabla 15. Carga – Deformación Talud de 55°

| Deformación [%] | Carga [KN] | Def. [mm] |
|-----------------|------------|-----------|
| 5 | 5.20 | 0.96 |
| 10 | 10.70 | 1.91 |
| 15 | 15.10 | 2.89 |
| 20 | 18.50 | 3.81 |
| 25 | 21.30 | 4.79 |
| 30 | 23.70 | 5.68 |
| 35 | 25.90 | 6.74 |
| 40 | 27.80 | 7.68 |
| 45 | 29.50 | 8.60 |
| 50 | 31.10 | 9.58 |
| 55 | 32.40 | 10.51 |
| 60 | 32.50 | 10.72 |

| | | |
|-----|-------|-------|
| 65 | 34.60 | 12.40 |
| 70 | 35.60 | 13.15 |
| 75 | 36.60 | 14.11 |
| 80 | 36.90 | 14.29 |
| 85 | 37.00 | 14.23 |
| 90 | 37.10 | 14.31 |
| 95 | 37.30 | 14.57 |
| 100 | 37.60 | 19.29 |

Duración 30 minutos

Tabla 16. Carga – Deformación Talud de 65°

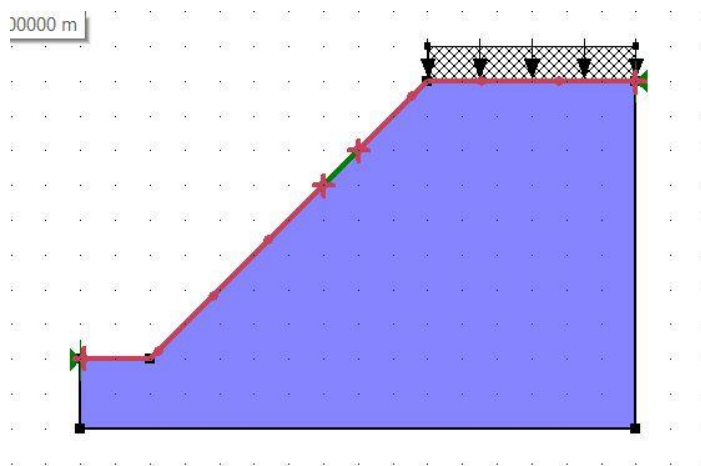
| Deformación [%] | Carga [KN] | Def. [mm] |
|-----------------|------------|-----------|
| 5 | 5.60 | 1.14 |
| 10 | 10.50 | 2.30 |
| 15 | 11.90 | 3.43 |
| 20 | 13.20 | 4.57 |
| 25 | 14.90 | 5.93 |
| 30 | 16.30 | 7.03 |
| 35 | 17.80 | 8.21 |
| 40 | 19.20 | 9.45 |
| 45 | 20.60 | 10.78 |
| 50 | 21.60 | 11.87 |
| 55 | 22.50 | 12.90 |
| 60 | 23.00 | 13.89 |
| 65 | 23.60 | 15.04 |
| 70 | 23.90 | 15.96 |
| 75 | 24.00 | 15.98 |
| 80 | 24.20 | 17.11 |
| 85 | 24.60 | 19.78 |
| 90 | 25.00 | 20.81 |
| 95 | 25.40 | 21.97 |
| 100 | 25.80 | 23.01 |

Duración: 60 minutos

5.4. Modelación en Geostudio – SLOPE (W)

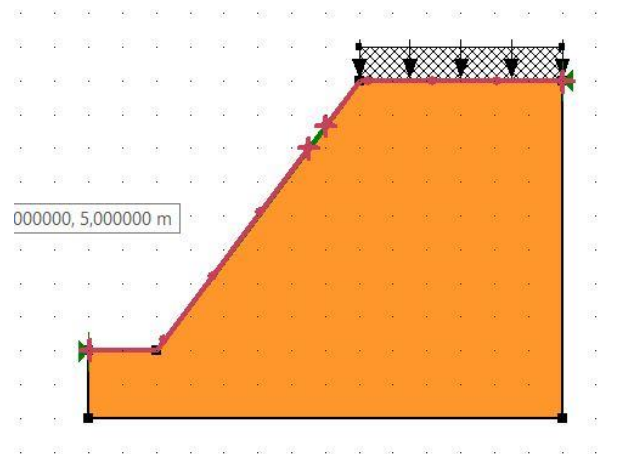
Para la elaboración de los modelos en el software, se tuvieron en consideración tres aspectos para determinar cuántos modelos debían probarse teniendo en cuenta un análisis amplio del caso. Uno de los aspectos considerado fue la existencia de nueve posibles suelos – resultado de cruzar tres datos de cohesión con tres datos de ángulo de fricción – el siguiente aspecto fue tener en cuenta varios métodos de análisis entre los que ofrece el programa, tales fueron: Método de Bishop (Obispo), Janbu generalizado y Spencer. Los tres son métodos basados en el equilibrio de momentos, fuerzas y momentos-fuerzas, respectivamente (Suárez, 1998). El tercer aspecto fue el hecho de haber trabajado con diferentes pendientes, tres. En total fueron ochenta y uno modelos elaborados en Geostudio. A continuación, se presentan un modelo tipo por cada pendiente:

Figura 12. Modelo tipo Talud 45°



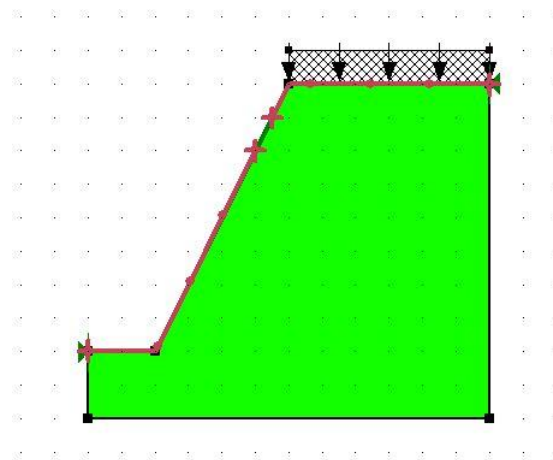
Captura tomada del modelo original de Geostudio – Slope (W).

Figura 13. Modelo tipo Talud 55°



Captura tomada del modelo original de Geostudio – Slope (W).

Figura 14. Modelo tipo Talud 65°

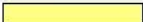




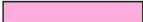




Captura tomada del modelo original de Geostudio – Slope (W).

Algunos detalles que se pueden observar es que la carga se ha distribuido en el total de la longitud de la corona, tal como ocurrió durante los ensayos de laboratorio. Otro detalle es que se utilizó la función Superficie de deslizamiento para el análisis, dibujando una entrada (pendiente – corona) y una salida (base – pendiente) y dejando una distancia pequeña entre estos dos elementos para obtener un mayor número de superficies de falla.

Como se evidencia existen unos colores. Estos hacen referencia al tipo de suelo que se está modelando, que de acuerdo con los parámetros de resistencia que simulan se les ha asignado un color como se muestra a continuación:

Figura 15. Tipos de suelo por parámetros – color

| Name | Color |
|---|--|
| 1-1 Arena Limo-Arcillosa 27.5° - C=60.3 Kpa |  |
| 1-2 Arena Limo-Arcillosa 27.5° - C=42.7 Kpa |  |
| 1-3 Arena Limo-Arcillosa 27.5° - C=55.2 Kpa |  |
| 2-1 Arena Limo-Arcillosa 29.6° - C=60.3 Kpa |  |
| 2-2 Arena Limo-Arcillosa 29.6° - C=42.7 Kpa |  |
| 2-3 Arena Limo-Arcillosa 29.6° - C=55.2 Kpa |  |
| 3-1 Arena Limo-Arcillosa 28.3° - C=60.3 Kpa |  |
| 3-2 Arena Limo-Arcillosa 28.3° - C=42.7 Kpa |  |
| 3-3 Arena Limo-Arcillosa 28.3° - C=55.2 Kpa |  |

5.5. Análisis numérico de la estabilidad de los taludes tipo

Después de haber modelado el total de los modelos, se obtuvieron los respectivos factores de seguridad referentes a todas las superficies de falla más críticas, los cuales se resumieron de la siguiente manera.

Tabla 17. Factores de seguridad para el talud de 45°

| SUELO TIPO | CARGA: 14.2 KN | | |
|------------|----------------|--------------|--------------|
| | 45° | | |
| | BISHOP | JANBU | SPENCER |
| 1-1 | 1.810 | 1.854 | 1.795 |
| 1-2 | 1.503 | 1.469 | 1.491 |
| 1-3 | 1.722 | 1.759 | 1.708 |
| 2-1 | 1.880 | 1.566 | 1.865 |
| 2-2 | 1.571 | 1.554 | 1.559 |
| 2-3 | 1.792 | 1.826 | 1.776 |
| 3-1 | 1.836 | 1.000 | 1.822 |
| 3-2 | 1.528 | 1.496 | 1.516 |
| 3-3 | 1.749 | 1.784 | 1.730 |

| | CARGA: 23.1 KN | | |
|------------|-----------------------|--------------|--------------|
| | 45° | | |
| SUELO TIPO | BISHOP | JANBU | SPENCER |
| 1-1 | 1.477 | 1.446 | 1.465 |
| 1-2 | 1.256 | 1.230 | 1.246 |
| 1-3 | 1.413 | 1.384 | 1.402 |
| 2-1 | 1.543 | 1.518 | 1.530 |
| 2-2 | 1.319 | 1.293 | 1.310 |
| 2-3 | 1.479 | 1.449 | 1.467 |
| 3-1 | 1.502 | 1.463 | 1.490 |
| 3-2 | 1.280 | 1.254 | 1.270 |
| 3-3 | 1.438 | 1.416 | 1.426 |
| | | | |
| | CARGA: 32.9 KN | | |
| | 45° | | |
| SUELO TIPO | BISHOP | JANBU | SPENCER |
| 1-1 | 1.271 | 1.248 | 1.262 |
| 1-2 | 1.092 | 1.070 | 1.082 |
| 1-3 | 1.222 | 1.198 | 1.213 |
| 2-1 | 1.334 | 1.301 | 1.324 |
| 2-2 | 1.146 | 1.123 | 1.136 |
| 2-3 | 1.284 | 1.261 | 1.276 |
| 3-1 | 1.295 | 1.270 | 1.285 |
| 3-2 | 1.113 | 1.090 | 1.102 |
| 3-3 | 1.245 | 1.222 | 1.237 |

Tabla 18. Factores de seguridad para el talud de 55°

| | CARGA: 10.7 KN | | |
|------------|-----------------------|----------------------|--------------|
| | 55° | | |
| SUELO TIPO | BISHOP | JANBU | SPENCER |
| 1-1 | 1.766 | 1.810 | 1.752 |
| 1-2 | 1.452 | 1.485 | 1.441 |
| 1-3 | 1.675 | 1.709 | 1.662 |
| 2-1 | 1.829 | 1.000 | 1.814 |
| 2-2 | 1.515 | 1.530 | 1.504 |
| 2-3 | 1.738 | 1.769 | 1.724 |
| 3-1 | 1.790 | 1.884 | 1.776 |
| 3-2 | 1.476 | 1.494 | 1.464 |
| 3-3 | 1.699 | 1.732 | 1.685 |
| | | Masa deslizando [m³] | |
| | 1 | 12 | |

| | CARGA: 15.1 KN | | |
|------------|-----------------------|--------------|--------------|
| | 55° | | |
| SUELO TIPO | BISHOP | JANBU | SPENCER |
| 1-1 | 1.551 | 1.575 | 1.537 |
| 1-2 | 1.292 | 1.304 | 1.281 |
| 1-3 | 1.476 | 1.196 | 1.463 |
| 2-1 | 1.612 | 1.658 | 1.597 |
| 2-2 | 1.353 | 1.364 | 1.341 |
| 2-3 | 1.537 | 1.556 | 1.523 |
| 3-1 | 1.574 | 1.598 | 1.560 |
| 3-2 | 1.315 | 1.327 | 1.304 |
| 3-3 | 1.499 | 1.543 | 1.486 |
| | | | |
| | CARGA: 18.5 KN | | |
| | 55° | | |
| SUELO TIPO | BISHOP | JANBU | SPENCER |
| 1-1 | 1.430 | 1.411 | 1.417 |
| 1-2 | 1.202 | 1.182 | 1.191 |
| 1-3 | 1.364 | 1.382 | 1.351 |
| 2-1 | 1.490 | 1.489 | 1.475 |
| 2-2 | 1.261 | 1.281 | 1.250 |
| 2-3 | 1.424 | 1.429 | 1.411 |
| 3-1 | 1.453 | 1.472 | 1.439 |
| 3-2 | 1.224 | 1.205 | 1.214 |
| 3-3 | 1.387 | 1.389 | 1.374 |

Tabla 19. Factores de seguridad para el talud de 65°

| | CARGA: 5.6 KN | | |
|------------|----------------------|----------------------|--------------|
| | 65° | | |
| SUELO TIPO | BISHOP | JANBU | SPENCER |
| 1-1 | 1.910 | 2.041 | 1.905 |
| 1-2 | 1.538 | 1.875 | 1.532 |
| 1-3 | 1.803 | 1.000 | 1.797 |
| 2-1 | 1.968 | 1.508 | 1.962 |
| 2-2 | 1.597 | 1.615 | 1.590 |
| 2-3 | 1.861 | 2.265 | 1.854 |
| 3-1 | 1.932 | 2.119 | 1.926 |
| 3-2 | 1.560 | 1.582 | 1.554 |
| 3-3 | 1.824 | 2.264 | 1.818 |
| | | Masa deslizando [m³] | |
| | 1 | 16.18 | |

| SUELO TIPO | CARGA: 10.5 KN | | |
|------------|-----------------------|--------------|--------------|
| | 65° | | |
| | BISHOP | JANBU | SPENCER |
| 1-1 | 1.557 | 1.614 | 1.547 |
| 1-2 | 1.280 | 1.287 | 1.271 |
| 1-3 | 1.477 | 1.456 | 1.468 |
| 2-1 | 1.613 | 1.722 | 1.602 |
| 2-2 | 1.335 | 1.333 | 1.326 |
| 2-3 | 1.533 | 1.635 | 1.522 |
| 3-1 | 1.578 | 1.683 | 1.568 |
| 3-2 | 1.301 | 1.311 | 1.292 |
| 3-3 | 1.498 | 1.575 | 1.488 |
| | | | |
| SUELO TIPO | CARGA: 11.9 KN | | |
| | 65° | | |
| | BISHOP | JANBU | SPENCER |
| 1-1 | 1.525 | 1.561 | 1.511 |
| 1-2 | 1.222 | 1.251 | 1.223 |
| 1-3 | 1.415 | 1.431 | 1.405 |
| 2-1 | 1.545 | 1.645 | 1.534 |
| 2-2 | 1.286 | 1.280 | 1.276 |
| 2-3 | 1.470 | 1.475 | 1.459 |
| 3-1 | 1.511 | 1.166 | 1.500 |
| 3-2 | 1.252 | 1.247 | 1.242 |
| 3-3 | 1.436 | 1.441 | 1.426 |

La recopilación de datos se realizó con la intención de poder observar en qué rango de carga se encuentra la estabilidad del talud, traducida a un factor de seguridad $\geq 1,5$.

Para efectos de presentar un modelo representativo de este estudio, se ha considerado, teniendo en cuenta los tres pares de parámetros de resistencia, determinar un promedio de valores, obteniendo los siguientes datos:

Angulo de fricción $\phi = 28.5$ y Cohesión $C = 52.7$, suelo promedio (PROM)

A partir de estos datos concentramos el análisis en encontrar el punto de estabilidad respecto a la carga y también determinar los factores de seguridad de acuerdo con la carga última. La estabilidad con respecto a la carga se presenta en las siguientes tablas:

Tabla 20. Factores de seguridad modelo de 45° estable

| | CARGA: 18.9 KN | | |
|-------------|----------------|--------------|--------------|
| | 45° | | |
| SUELO TIPO | BISHOP | JANBU | SPENCER |
| PROM | 1.524 | 1.519 | 1.507 |

Tabla 21. Factores de seguridad modelo de 55° estable

| | CARGA: 14.4 KN | | |
|-------------|----------------|--------------|--------------|
| | 55° | | |
| SUELO TIPO | BISHOP | JANBU | SPENCER |
| PROM | 1.505 | 1.526 | 1.488 |

Tabla 22. Factores de seguridad modelo de 65° estable

| | CARGA: 9.45 KN | | |
|-------------|----------------|--------------|--------------|
| | 65° | | |
| SUELO TIPO | BISHOP | JANBU | SPENCER |
| PROM | 1.512 | 1.498 | 1.499 |

Los factores de seguridad correspondientes a la aplicación de la carga última soportada por los modelos experimentales se muestran a continuación:

Tabla 23. Factores de seguridad modelo de 45° con carga última

| | CARGA: 51.3 KN (última) | | |
|-------------|-------------------------|--------------|--------------|
| | 45° | | |
| SUELO TIPO | BISHOP | JANBU | SPENCER |
| PROM | 1.012 | 0.990 | 1.004 |

Tabla 24. Factores de seguridad modelo de 55° con carga última

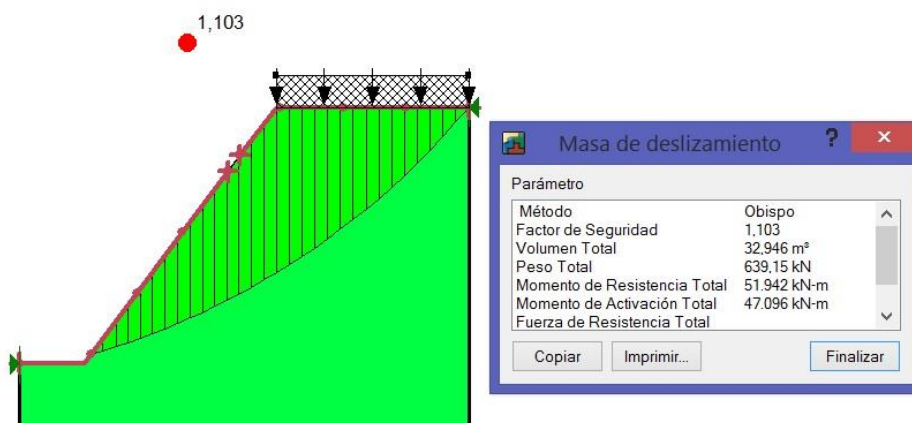
| | CARGA: 37.6 KN (última) | | |
|-------------|-------------------------|--------------|--------------|
| | 55° | | |
| SUELO TIPO | BISHOP | JANBU | SPENCER |
| PROM | 1.103 | 1.087 | 1.091 |

Tabla 25. Factores de seguridad modelo de 65° con carga última

| | CARGA: 25.8 KN (última) | | |
|-------------|-------------------------|--------------|--------------|
| | 65° | | |
| SUELO TIPO | BISHOP | JANBU | SPENCER |
| PROM | 1.032 | 1.019 | 1.019 |

Como se evidencia, los taludes alcanzan una estabilidad (en relación con un factor mínimo de 1.5) frente a cargas que están por debajo de la carga última medida en el laboratorio sobre los modelos experimentales. Concretamente, corresponde al 37, 38 y 37% de la carga total, respectivamente. Los taludes (laboratorio) alcanzan un equilibrio límite que valorado de acuerdo con la literatura representa un estado potencial de falla, pero que de acuerdo con los modelos numéricos la magnitud del deslizamiento podría ser mucho mayor que la representada por los modelos ensayados en el laboratorio, como se muestra a continuación:

Figura 16. Masa deslizante talud tipo en estado límite de equilibrio



Captura tomada de Geostudio

Fotografía 12. Masas deslizantes modelos experimentales



Las masas deslizantes de los modelos experimentales, considerando el factor de escala (1:20), están en el rango de los 5 a los 10 m³ y como se puede observar la masa deslizante del modelo en estado de equilibrio límite es de aproximadamente la tercera parte del volumen total, 300% más aproximadamente en comparación con el modelo experimental.

5.6. Gráficas Esfuerzo - Deformación

Con el registro de datos completos, cuya recopilación fue presentada a través de las tablas 14, 15 y 16, fue posible determinar los esfuerzos a lo largo del ensayo y generar las correspondientes gráficas de Esfuerzo – Deformación para los modelos experimentales, las cuales se muestran a continuación:

Figura 17. Esfuerzo – Deformación talud de 45°

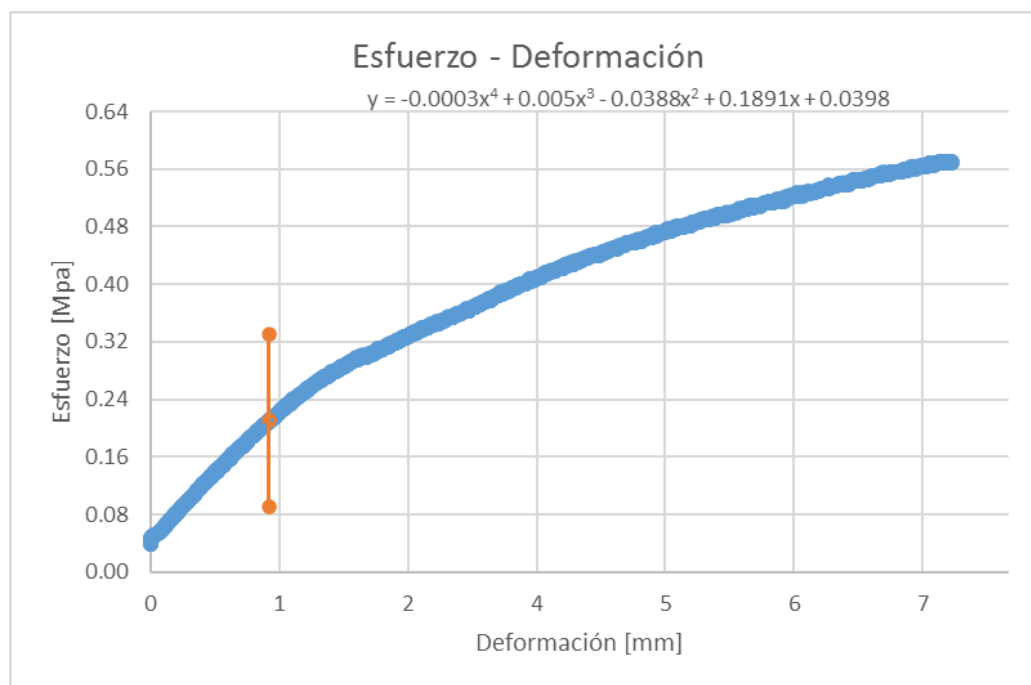


Figura 18. Esfuerzo – Deformación talud de 55°

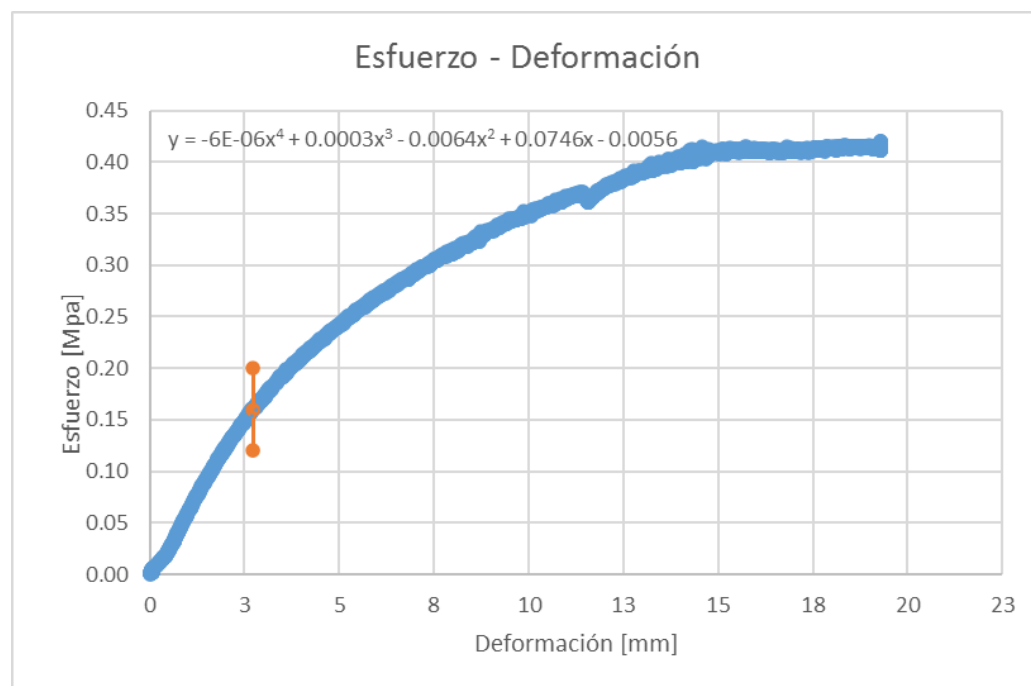
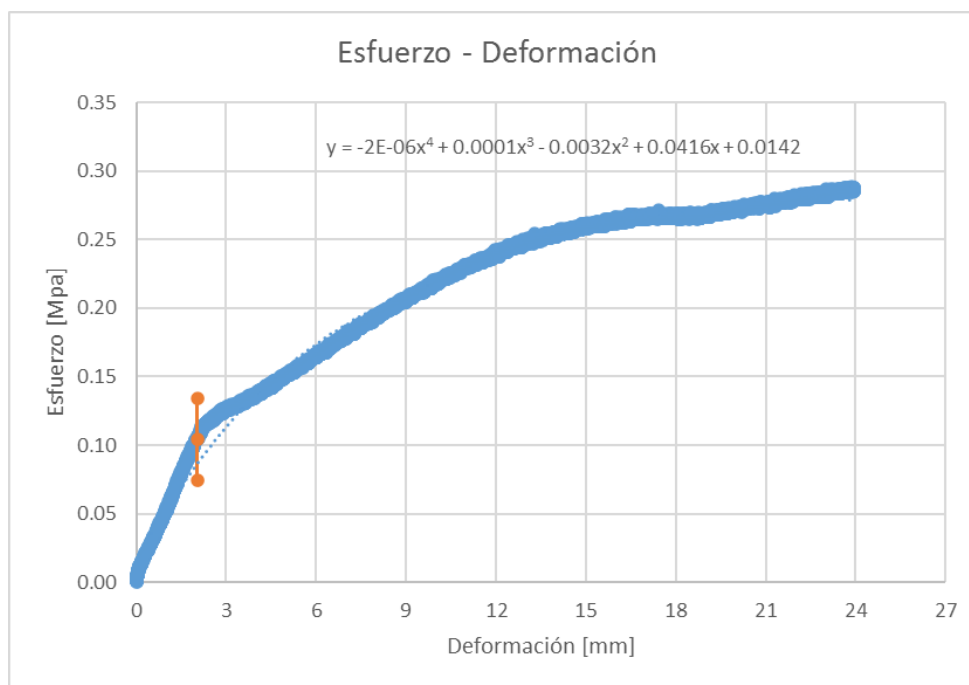


Figura 19. Esfuerzo – Deformación talud de 65°



La intersección entre la serie de datos (azul) y la línea naranja es el punto donde se halla la estabilidad del talud, como se analizaba anteriormente están por debajo de la carga última. Gracias al análisis en Slope (W) es posible determinar múltiples superficies de falla, por lo cual, y teniendo en cuenta las gráficas esfuerzo deformación, se evidencia la susceptibilidad de los taludes al aumento de su pendiente. Además, con el fin de dar cumplimiento a las exigencias técnicas ($FS > 1.2$ y > 1.5 en otros casos), los modelos numéricos son el reflejo de una resistencia menor a la resistencia pico medida en laboratorio.

6. Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con los resultados, existe una relación entre la capacidad de carga y la pendiente; una pendiente menor favorece la aplicación de cargas mayores, con respecto a la estabilidad del talud. Aunque dentro del análisis no se ha considerado el efecto del agua en la estabilidad, los resultados en este trabajo constituyen una base para corroborar la relación entre la magnitud de la pendiente y las cargas aplicadas.

Aunque no todos los estudios sobre estabilidad de taludes contemplan la idea de considerar superficies de falla compuestas por arcos de círculos, se pueden valorar los ensayos en el marco de carga como exitosos basados en la geometría de la falla obtenida. El éxito es valorado también por la simetría en el plano de profundidad de los modelos y porque fue posible encontrar factores de seguridad aceptables que correspondían a superficies de falla similares a las obtenidas en el laboratorio; confirmando una buena relación entre el modelo experimental y los modelos numéricos mostrados.

Aunque los taludes alcanzan un equilibrio teórico al ser evaluados con la carga última, estos factores de seguridad son insuficientes de acuerdo a normas vigentes, siendo requisito indispensable para el manejo de cortes y/o conformaciones de superficie, control de excavaciones e incluso son insuficientes frente a algunas flexibilidades – contempladas en la norma geotécnica de la CDMB – como factores de seguridad mínimos de 1.2 para el control de excavaciones cuyas zonas aledañas están libres de edificaciones. Sin embargo, estos factores de seguridad les dan consistencia a los resultados obtenidos en el marco de carga, estos son indicadores de que las cargas presentadas como última realmente corresponden a un estado de equilibrio límite.

De acuerdo con los resultados, es notable que el análisis es bastante sensible ante la variabilidad de las propiedades del suelo, por lo cual el ingeniero civil siempre se va a ver obligado a tomar medidas conservadoras para garantizar la estabilidad de un talud ante las

múltiples posibilidades de un evento de falla. Por esto, es de suma importancia una excelente caracterización del suelo; un mayor sesgo representa una mayor dispersión en los resultados de este tipo de análisis traduciéndose en una limitante a la hora de determinar las cargas permisibles.

De acuerdo con los cálculos de masa deslizante de los modelos con superficie crítica y de los modelos experimentales y tiempos de construcción de modelos tipo de laboratorio, la gran diferencia entre los valores es un reflejo de la realidad que se vive en torno al análisis de taludes. Por lo anterior, es necesario apoyarse en este tipo de metodologías de análisis para conocer realmente bajo qué cargas de trabajo se puede garantizar un comportamiento adecuado de un talud en la etapa de operación además de asegurar que la fase de estudios y diseños sea lo más corta posible.

Es recomendable ampliar el análisis con modelos experimentales para tener mayor conocimiento acerca del comportamiento de este tipo de estructuras, así como tener en cuenta factores como la infiltración, la presión de poros, etc. para lo cual este estudio serviría de base.

Bibliografía

Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga. (2005). *Normas Geotécnicas CDMB* (pp. 30-31). Bucaramanga: Carlos Gómez Ballesteros.

Herrera, L. (2013). Evaluación de la interacción dinámica suelos-estructura de edificaciones construidas en ladera (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C.

Instituto Nacional de Vías. (2014). *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras* (pp. Sección 100, INV E-123, INV E-125, 126, 127, INV E-142, INV E-152, INV E-154 y Sección 200, INV E- 222). Colombia.

Jiménez, C. (2017). Análisis de metodologías para la inclusión de parámetros hidrológicos en la estabilidad de taludes (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C.

López Pineda, G. (2017). *Introducción al uso del programa Slope/W Versión 2012* (1st ed., p. 29-). España.

Peraccucci, S., Brunetti, M., Luciani, S., Calzolari, M., Bartolini, D. and Guzzetti, F. (2014). Umbrales topográficos y pedológicos para la predicción de deslizamientos de tierra poco profundos en el centro de Italia. Ciencia de deslizamientos de tierra para un geoambiente más seguro. *Revista Geomorfología*, (1), pp.291-298.

Sanhueza Plaza, C., & Rodríguez Cifuentes, L. (2013). Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. *Revista De La Construcción*, (1 Vol. 12), pp.20-24.

Suárez, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales [E-book] (1ra. ed., pp. 392-394). Bucaramanga: Ingeniería de Suelos Ltda. Disponible en: <http://www.erosion.com.co/presentaciones/category/14-libro-deslizamientos-y-estabilidad-de->

taludes-en-zonas-tropicales-jaime-suarez.html?download=142:191-12-
prevencionestabilizacionydiseno

Bernal Yermanos, M. (2015). *Teorema π - Construyendo ciencia en el aula* [E-book] (1ra. ed., pp. 5-12). Bogotá D.C. Disponible en: Repositorio UNAL Colombia.

Suárez, J. (1998). Modelos de análisis de estabilidad [E-book] (1ra. ed., pp. 122-). Bucaramanga: Ingeniería de Suelos Ltda. Disponible en: <http://www.erosion.com.co/deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-en-zonas-tropicales.html>

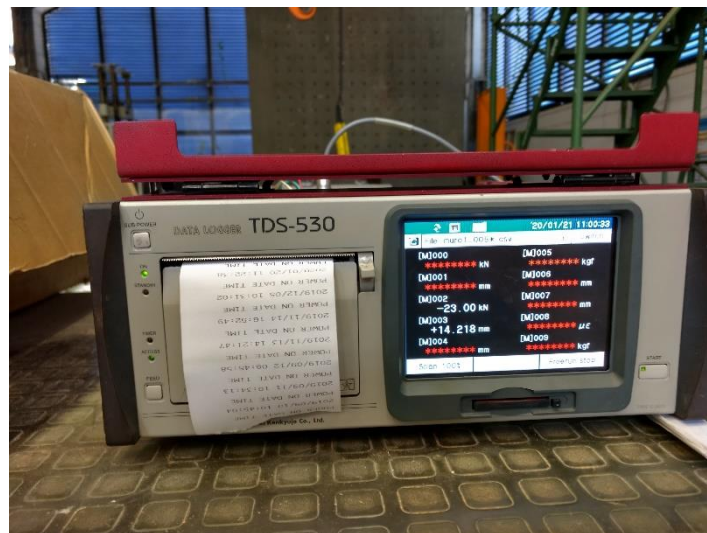
Apéndice:

Fotografía A1. Marco de carga



Fuente: propia

Fotografía A2. Datalogger



Fuente: propia

Tabla A1. Límite líquido

| Prueba No. | Capsula No. | No. Golpes | | | |
|--------------------------------|-------------------------------|---------------|------------------|---------------------|-------------|
| 1 | 34 | 16 | | | |
| 2 | 38 | 24 | | | |
| 3 | 139 | 30 | | | |
| 4 | 24 | 37 | | | |
| Peso cápsula+ suelo húmedo [g] | Peso cápsula + suelo seco [g] | Peso agua [g] | Peso cápsula [g] | Peso suelo seco [g] | Humedad [%] |
| 25.76 | 22.85 | 2.91 | 11.2 | 11.65 | 24.9785 |
| 22.08 | 19.92 | 2.16 | 11 | 8.92 | 24.2152 |
| 33.48 | 31.23 | 2.25 | 21.2 | 10.03 | 22.4327 |
| 35.09 | 30.79 | 4.3 | 11 | 19.79 | 21.7281 |

Tabla A2. Ensayo de compactación

| Compactación | Molde + suelo [g] | Suelo Húmedo [g] | Densidad H. [g/cm ³] | Densidad S. [g/cm ³] | P.U. seco [KN/m ³] |
|--------------|-------------------|------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| No.1 | 5850 | 2080 | 2.2635 | 2.0293 | 19.9012 |
| No.2 | 5870 | 2100 | 2.2853 | 2.0931 | 20.5263 |
| No.3 | 5820 | 2050 | 2.2309 | 1.9592 | 19.2130 |
| No.4 | 5660 | 1890 | 2.0568 | 1.9325 | 18.9509 |

Tabla A3. Humedades de las muestras, ensayo de compactación

| No. Capsula | Peso Capsula [g] | Capsula + suelo h. [g] | Capsula + suelo seco [g] | Suelo [g] | Agua [g] | Humedad [%] |
|-------------|------------------|------------------------|--------------------------|-----------|----------|-------------|
| 33 | 18.64 | 144.3 | 131.3 | 112.66 | 13 | 11.5391 |
| 34 | 17.42 | 193.4 | 178.6 | 161.18 | 14.8 | 9.1823 |
| 36 | 17.32 | 242.3 | 214.9 | 197.58 | 27.4 | 13.8678 |
| 35 | 19 | 215.9 | 204 | 185 | 11.9 | 6.4324 |

Tabla A4. Humedades de las muestras, ensayo de compresión simple

| Espécimen | Peso Cápsula [g] | Peso Cápsula + Suelo Húmedo [g] | Peso Cápsula + Suelo Seco [g] | Peso del Agua [g] | Peso Suelo Seco [g] | Humedad [%] |
|-----------|------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------|---------------------|-------------|
| 1 | 40.77 | 193.87 | 181.4 | 12.47 | 140.63 | 8.867240276 |
| 2 | 27.03 | 177.09 | 164.78 | 12.31 | 137.75 | 8.936479129 |
| 3 | 27.19 | 182.24 | 169.63 | 12.61 | 142.44 | 8.852850323 |

Tabla A5. Ensayo de compresión simple 1

| | | |
|---------------|-----------------------|----------------|
| Ensayo 1.1 | | |
| Peso m. [g] | 154 | |
| Diámetro [mm] | Altura [mm] | Duración [min] |
| 34.98 | 73.65 | |
| Carga [N] | Desplazamiento [pulg] | Esfuerzo [Mpa] |
| 5.89 | 0.002 | 0.0061 |
| 14.14 | 0.004 | 0.0147 |
| 23.1 | 0.006 | 0.0240 |
| 32.04 | 0.008 | 0.0333 |
| 39.45 | 0.01 | 0.0411 |
| 45.55 | 0.012 | 0.0474 |
| 49.16 | 0.014 | 0.0512 |
| 51.52 | 0.017 | 0.0536 |
| 52.33 | 0.019 | 0.0545 |
| 49.59 | 0.021 | 0.0516 |
| 48.57 | 0.022 | 0.0505 |
| 45.41 | 0.022 | 0.0473 |
| 41.26 | 0.023 | 0.0429 |
| 39.62 | 0.024 | 0.0412 |
| 36.22 | 0.025 | 0.0377 |
| 32.28 | 0.026 | 0.0336 |
| 26.46 | 0.027 | 0.0275 |
| 22.56 | 0.028 | 0.0235 |
| 18.26 | 0.029 | 0.0190 |
| 16.41 | 0.03 | 0.0171 |

Tabla A6. Ensayo de compresión simple 2

| | | |
|---------------|-----------------------|----------------|
| Ensayo 1.2 | | |
| Peso m. [g] | 155.41 | |
| Diámetro [mm] | Altura [mm] | Duración [min] |
| 34.92 | 73.67 | |
| Carga [N] | Desplazamiento [pulg] | Esfuerzo [Mpa] |
| 16.33 | 0.003 | 0.0171 |
| 17.28 | 0.004 | 0.0180 |
| 21.49 | 0.005 | 0.0224 |
| 26.23 | 0.006 | 0.0274 |
| 31.69 | 0.007 | 0.0331 |
| 36.04 | 0.008 | 0.0376 |
| 41.2 | 0.009 | 0.0430 |
| 45.46 | 0.01 | 0.0475 |
| 50.06 | 0.011 | 0.0523 |
| 51.25 | 0.012 | 0.0535 |
| 53.51 | 0.013 | 0.0559 |
| 55.43 | 0.014 | 0.0579 |
| 56.73 | 0.015 | 0.0592 |
| 57.63 | 0.016 | 0.0602 |
| 58.48 | 0.017 | 0.0611 |
| 59.3 | 0.018 | 0.0619 |
| 59.6 | 0.019 | 0.0622 |
| 59.75 | 0.02 | 0.0624 |
| 60.03 | 0.021 | 0.0627 |
| 60.13 | 0.022 | 0.0628 |
| 60.25 | 0.023 | 0.0629 |
| 60.13 | 0.024 | 0.0628 |
| 59.81 | 0.025 | 0.0625 |
| 59.56 | 0.026 | 0.0622 |
| 59.21 | 0.027 | 0.0618 |
| 58.53 | 0.028 | 0.0611 |
| 58.06 | 0.029 | 0.0606 |
| 57.62 | 0.03 | 0.0602 |
| 56.89 | 0.031 | 0.0594 |
| 56.08 | 0.032 | 0.0586 |
| 55.33 | 0.033 | 0.0578 |
| 54.23 | 0.034 | 0.0566 |
| 52.7 | 0.035 | 0.0550 |
| 51.4 | 0.036 | 0.0537 |
| 50.29 | 0.037 | 0.0525 |
| 48.9 | 0.038 | 0.0511 |
| 46.92 | 0.039 | 0.0490 |
| 45.58 | 0.04 | 0.0476 |

| | | |
|-------|-------|--------|
| 44.04 | 0.041 | 0.0460 |
| 42 | 0.042 | 0.0439 |

Tabla A7. Ensayo de compresión simple 3

| Ensayo 1.3 | | |
|---------------|-----------------------|----------------|
| Peso m. [g] | 150.62 | |
| Diámetro [mm] | Altura [mm] | Duración [min] |
| 34.84 | 73.74 | |
| Carga [N] | Desplazamiento [pulg] | Esfuerzo [Mpa] |
| 5.77 | 0.001 | 0.0061 |
| 10.69 | 0.002 | 0.0112 |
| 18.82 | 0.003 | 0.0197 |
| 25.36 | 0.004 | 0.0266 |
| 29.9 | 0.005 | 0.0314 |
| 35.99 | 0.006 | 0.0378 |
| 39.13 | 0.007 | 0.0410 |
| 41.43 | 0.008 | 0.0435 |
| 43.82 | 0.009 | 0.0460 |
| 45.15 | 0.01 | 0.0474 |
| 46.2 | 0.011 | 0.0485 |
| 46.64 | 0.012 | 0.0489 |
| 46.9 | 0.013 | 0.0492 |
| 46.78 | 0.014 | 0.0491 |
| 46.63 | 0.015 | 0.0489 |
| 46.31 | 0.016 | 0.0486 |
| 45.93 | 0.017 | 0.0482 |
| 45.52 | 0.018 | 0.0477 |
| 45.23 | 0.019 | 0.0474 |
| 44.53 | 0.02 | 0.0467 |
| 44.11 | 0.021 | 0.0463 |
| 43.87 | 0.022 | 0.0460 |
| 43.57 | 0.023 | 0.0457 |
| 43.15 | 0.024 | 0.0453 |
| 42.76 | 0.025 | 0.0449 |
| 42.49 | 0.026 | 0.0446 |
| 42 | 0.027 | 0.0441 |
| 41.66 | 0.028 | 0.0437 |
| 41.07 | 0.029 | 0.0431 |
| 40.66 | 0.03 | 0.0427 |
| 39.81 | 0.031 | 0.0418 |
| 39.52 | 0.032 | 0.0415 |

| | | |
|-------|-------|--------|
| 38.42 | 0.034 | 0.0403 |
| 37.68 | 0.035 | 0.0395 |
| 37 | 0.036 | 0.0388 |
| 36.44 | 0.037 | 0.0382 |