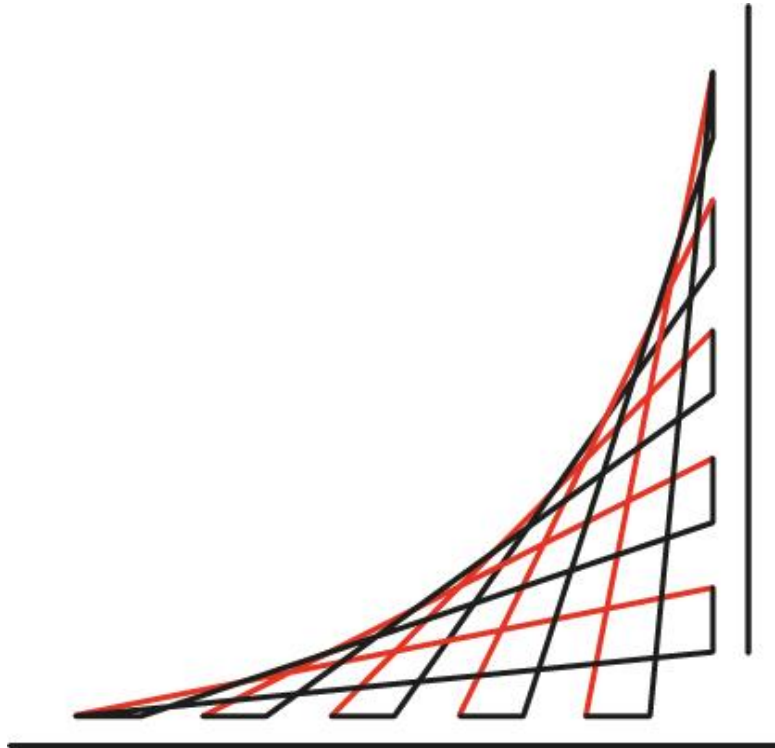


PROYECTO DIRIGIDO - SEMILLERO DE GEOTECNIA

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE UN TALUD EN CENTRÍFUGA GEOTECNICA



**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO**

ELABORADO POR:

PABLO JOSÉ BECERRA GONZÁLEZ

DIRIGIDO POR:

ING. CATALINA LOZADA LÓPEZ

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
15 DE NOVIEMBRE DE 2019
BOGOTÁ D.C.

Contenido

Índice de tablas.....	2
Índice de Figuras	3
1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. OBJETIVOS	5
2.1. Objetivo General.....	5
2.2. Objetivos Específicos.....	5
3. MARCO TEÓRICO.....	6
3.1. Tipos de movimientos.....	6
3.2. Señales de movimiento de un talud	8
3.3. Métodos de estabilidad de taludes	8
3.4. Técnicas de estabilización de un talud	10
3.5. Modelación física en centrífuga geotécnica	12
3.5.1. Efectos de escala Centrífuga Geotécnica	13
4. ÁRBOL DEL PROBLEMA.....	15
5. METODOLOGÍA	16
6. ACTIVIDADES	19
7. RESULTADOS MODELACIÓN FÍSICA.....	20
7.1. Análisis De Estabilidad Del Talud Sin Refuerzo.....	21
7.2. Análisis De Estabilidad Usando Micropilotes	25
7.3. Análisis de estabilidad usando Nails	27
8. CONCLUSIONES.....	29
8.1. Recomendaciones y trabajos futuros	30
9. BIBLIOGRAFÍA	30

Índice de tablas

Tabla No. 1 - Estructuras de contención. Fuente: Suárez, 2009.	10
Tabla No. 2 - Estructuras de anclaje. Fuente: Suárez, 2009.	11
Tabla No. 3 - Relación de las variables en el prototipo y en el modelo. Fuente: (Azizi, 1999).	13
Tabla No. 4 - Cronograma de actividades realizadas. Fuente: Elaboración propia.....	19
Tabla No. 5 - Tabla con modelos. Fuente: Elaboración propia	20
Tabla No. 6 - Humedad de las muestras tomadas de los modelos. Fuente: Elaboración propia.	21
Tabla No. 7 - Dimensiones en el modelo y en el prototipo. Fuente: Elaboración propia	21
Tabla No. 8 - Método analítico de Bishop simplificado para terreno natural. Fuente: Elaboración propia.	23

Índice de Figuras

Figura No. 1 - Caídas de rocas. Fuente: https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/deslizamientos/tipos-de-deslizamientos/	6
Figura No. 2 - Esquema de volcamiento. Fuente: https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/deslizamientos/tipos-de-deslizamientos/	6
Figura No. 3 - Tipos de deslizamiento. Fuente: https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/deslizamientos/tipos-de-deslizamientos/	7
Figura No. 4 - Esquema de Flujo. Fuente: https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/deslizamientos/tipos-de-deslizamientos/	7
Figura No. 5 - Grietas de tracción. Fuente: Google Images.	8
Figura No. 6 - Abultamientos de un talud. Fuente: INVIAS, 2006.	8
Figura No. 7 - Esquema de métodos de estabilización de un talud. Fuente: Suárez, 2009.	9
Figura No. 8 - Esquema método de Bishop simplificado. Fuente: Ayala, 1987.	10
Figura No. 9 - Estructuras de contención y de anclaje de taludes. Fuente: Suárez, 2009.	12
Figura No. 10 - Esquema de la centrífuga con respecto al prototipo. Fuente: (Azizi, 1999).	13
Figura No. 11 - Especificaciones de la centrífuga de la ECI. Fuente: López, C (2019).	14
Figura No. 12 - Centrífuga de la ECI. Fuente: López, C (2019).	14
Figura No. 13 - Prototipo a partir de geometría del talud a escala real. Fuente: López C. (2019). Eficiencia	16
Figura No. 14 - Modelo a escala. Fuente: López C. (2019). Eficiencia	16
Figura No. 15 - Muestras consolidándose en el laboratorio de suelos ECI. Fuente: Elaboración propia.	17
Figura No. 16 - Caja de muestra después de la consolidación, con la cerda de carga encima. Fuente: Elaboración propia	17
Figura No. 17 - Desarmado de caja con muestra de suelo. Fuente: Elaboración propia	18
Figura No. 18 - Talud modelo. Fuente: Elaboración propia.	18
Figura No. 19 - Modelo antes de ensayar en la centrífuga. Fuente: elaboración propia.	19
Figura No. 20 - Modelo del prototipo de talud natural. Fuente: Elaboración propia	22
Figura No. 21 - Factor de seguridad para prototipo de terreno natural. Fuente: Software Slide	22
Figura No. 22 - Dovelas para método analítico de Bishop simplificado. Fuente: Elaboración propia.	23
Figura No. 23 - Modelo 1 luego del ensayo, sin alternativa de estabilización. Fuente: Elaboración propia.	24
Figura No. 24 - Modelo del prototipo de talud con micropilotes. Fuente: Software Slide.....	25
Figura No. 25 - Factor de seguridad para prototipo con micropilotes. Fuente: Software Slide	25
Figura No. 26 - Factor de seguridad para prototipo con micropilotes aumentando el espesor de la base del talud. Fuente: Software Slide.....	26
Figura No. 27 - Modelo Ensayado de terreno con micropilotes. Fuente: Elaboración propia.....	27
Figura No. 28 - Factor de seguridad para prototipo con Nails. Fuente: Software Slide.....	27
Figura No. 29 - Modelo del prototipo de talud con micropilotes. Fuente: Software Slide.....	28
Figura No. 30 - Modelo Ensayado de terreno con Nails. Fuente: Elaboración propia.	29

1. INTRODUCCIÓN

La estabilización de taludes es uno de los problemas que más aquejan al ingeniero geotecnista de hoy en día en diferentes proyectos, tales como la construcción de carreteras, construcción de edificios cercanos a una ladera, entre otros. Para lograr dicho objetivo es necesario tener en cuenta los factores intrínsecos, externos e intermedios del talud. Cuando dicha estabilización no logra su objetivo, el talud falla mostrando señales de movimiento diferentes para cada alternativa, algunas se notan a simple vista, sin embargo, otras no serán visibles, hasta que el talud falle junto con la alternativa de estabilización, por esto, es de vital importancia, establecer los mecanismos de falla cuando un sistema no funciona bien, para así proponer otras alternativas de estabilización.

Otra de las razones para el estudio de la estabilización de taludes, es el incremento progresivo de cortes y rellenos, en proyectos de construcción, el cual incrementa el número de taludes en la zona, los cuales a su vez aumentan la necesidad de estudio de este campo (Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. 2001).

La centrífuga geotécnica es usada en varios casos de estudio, tales como, los ciclos de hielo-deshielo, las propiedades del suelo y su relación con la estabilidad de taludes periglaciares con cierto contenido de arcilla (Harris, C., Smith, J. S., Davies, M. C., & Rea, B. 2008), el análisis de la respuesta estática ante la carga de una centrífuga de taludes reforzados con geotextiles (Viswanadham, B. V. S., & Mahajan, R. R. 2007).

Este tipo de modelación física, también se usa para analizar el comportamiento de suelos arcillosos ante la carga de estructuras, tales como, túneles poco profundos (Cruz, L. A. B., & Cardona, J. C. C.); muros pantalla apuntalados (Vargas Losada, J. C. 2003); muros de gravedad (Romero Yate, Y. A., Pacheco Díaz, L. A., Velásquez, B., & José, E. 2007); interacción suelo sísmico- cimentación-estructura (H. B., Trombetta, N. W., Chen, Z., Bray, J. D., Hutchinson, T. C., & Kutter, B. L. 2013); diversos fenómenos físicos como la conductividad hidráulica en suelos no saturados (Singh, D. N., & Kuriyan, S. J. 2002) y la reflexión de ondas en los suelos (Murillo Feo, C. A. 2006); entre otros.

En el presente documento, se realizan ensayos en la centrífuga geotécnica y se analizan detalladamente dos diferentes formas en las cuales se puede estabilizar el talud.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

- Estabilizar un talud que falla por peso propio a escala reducida en centrífuga geotécnica.

2.2. Objetivos Específicos

- Estimar y comparar los factores de seguridad del talud sin técnica de estabilidad, utilizando diferentes métodos analíticos.
- Comparar los factores de seguridad, obtenidos analíticamente con los resultados obtenidos en la modelación física.
- Comparar las diferentes superficies de falla presentados en cada alternativa de estabilidad.

3. MARCO TEÓRICO

Existen muchas causas de inestabilidad de un talud, entre estas se encuentran: incremento en la presión de poros, desmoronamiento del suelo, incremento en la relación de vacíos, adelgazamiento de las capas del suelo, descomposición del suelo, creep a causa de cargas externas, filtración del suelo, ablandamiento del suelo, desgaste del suelo y cargas cíclicas. Estas razones, entre otras, determinan el modo de falla del suelo y el tipo de movimiento que tenderá a presentar, por esto, es necesario el buen uso de las alternativas de estabilización. (J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. 2014).

Los taludes son regiones topográficas con relieves muy presentes en el mundo, entre los tipos de relieve donde los podemos encontrar está: zonas topográficamente elevadas y abruptas, zonas de relieve escarpado, zonas de relieve volcánico accidentado, zonas de cárcavas y zonas con morfología glaciar. (Carcedo, F. J. A., & Posse, F. J. A. 2006).

3.1. Tipos de movimientos

A continuación, se enuncian los tipos de movimiento de falla en taludes (INVIAS, 2006):

- **Caídas:** Movimiento de una matriz rocosa de tamaño considerable, que se desprende de un talud empinado o un acantilado (Figura No. 1) (INVIAS, 2006).

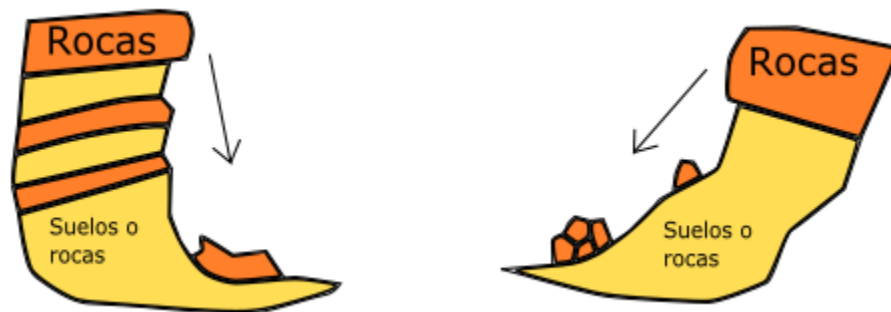


Figura No. 1 - Caídas de rocas. Fuente: <https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/deslizamientos/tipos-de-deslizamientos/>

- **Volcamientos:** Es la rotación hacia delante de una matriz rocosa (Figura No. 2) (INVIAS, 2006).

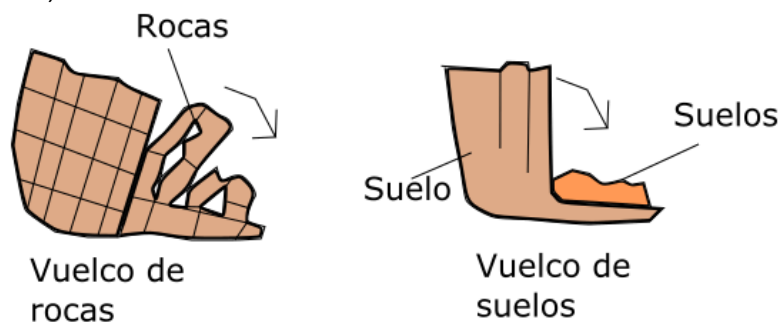


Figura No. 2 - Esquema de volcamiento. Fuente: <https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/deslizamientos/tipos-de-deslizamientos/>

- **Deslizamiento:** Es la deformación debida al esfuerzo cortante en el talud, que genera desplazamientos diferenciales. Este puede ser rotacional y traslacional (Figura No. 3); el primero es un desplazamiento de la masa del talud a lo largo de una superficie cóncava bien definida, el segundo, es el movimiento de la masa del talud a lo largo de superficies casi planas como por ejemplo estratos (INVIAS, 2006).

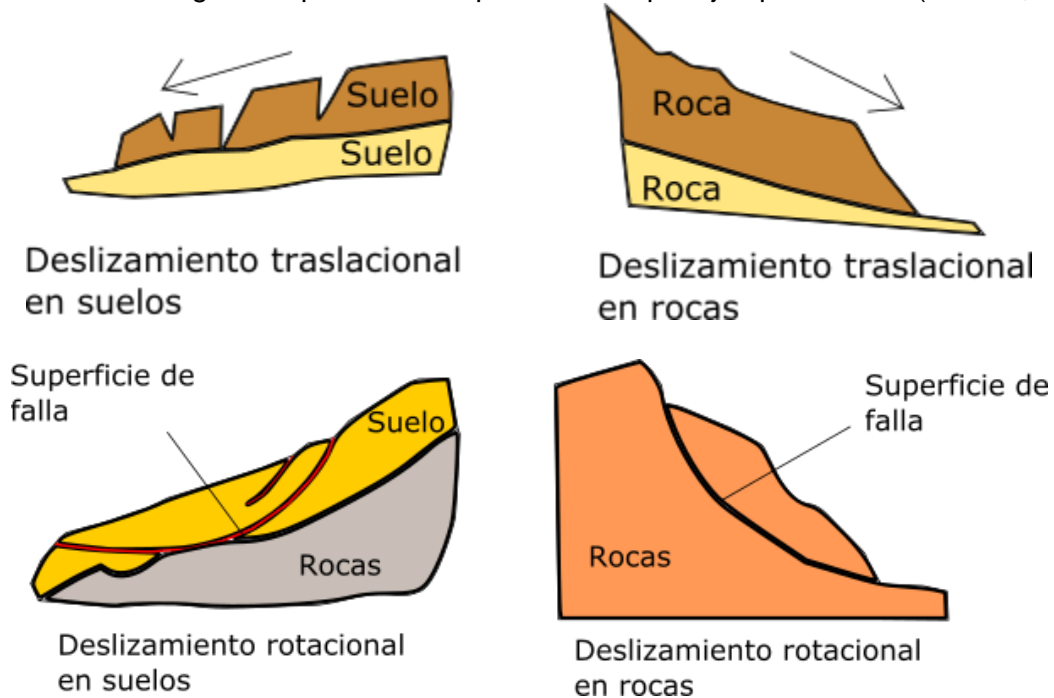


Figura No. 3 - Tipos de deslizamiento. Fuente: <https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/deslizamientos/tipos-de-deslizamientos/>

- **Flujos:** Es un movimiento continuo similar al de un líquido viscoso, la viscosidad del líquido depende del contenido de humedad del material que está en movimiento (Figura No. 4) (INVIAS, 2006).

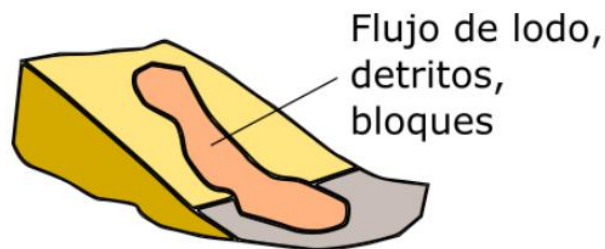


Figura No. 4 - Esquema de Flujo. Fuente: <https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/deslizamientos/tipos-de-deslizamientos/>

- **Movimientos complejos:** Es la combinación de dos o más de los movimientos descritos anteriormente (INVIAS, 2006).

3.2. Señales de movimiento de un talud

Se describen algunas señales de movimiento de taludes (INVIAS,2006):

- **Grietas de tracción:** Estas son grietas que se forman generalmente en la parte alta del talud, por lo general, indican que el talud va a comenzar su movimiento (Figura No. 5) (INVIAS, 2006).

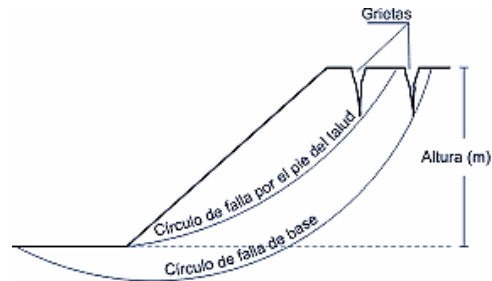


Figura No. 5 - Grietas de tracción. Fuente: Google Images.

- **Abultamientos:** Estos son los deslizamientos hacia la pata del talud (Figura No 6) (INVIAS, 2006).

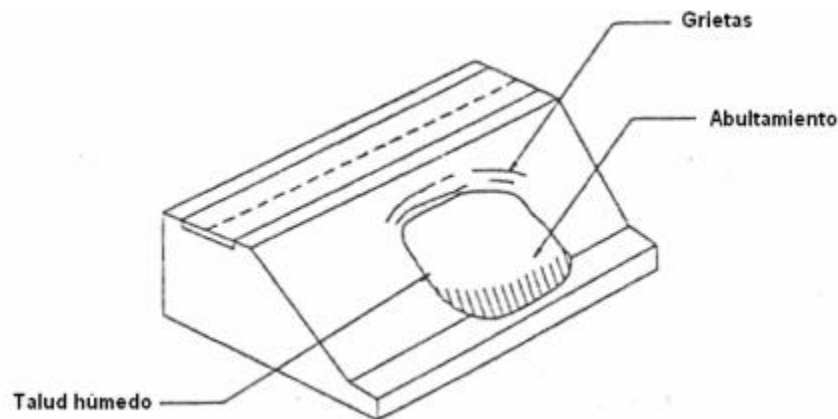


Figura No. 6 - Abultamientos de un talud. Fuente: INVIAS, 2006.

- **Cambios de forma:** estos son alteraciones en la superficie del terreno, causados por elementos externos del mismo, como postes, árboles o alternativas de estabilización mal implementadas (INVIAS, 2006).

3.3. Métodos de estabilidad de taludes

Jaime Suárez, en su libro de deslizamientos (2009), afirma que los métodos para analizar la estabilidad de un talud se dividen en dos grupos, los cuales se enuncian en la Figura No. 7 y se definen a continuación:

- **Métodos de cálculo de deformaciones del terreno:** Su aplicación práctica es de gran complejidad, por lo tanto, se deben estudiar aplicando elementos finitos u otro tipo de métodos numéricos (Suárez, 2009).

- **Métodos de equilibrio limite:** estos métodos siguen las leyes de la estática, su fundamento consiste en determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable (Suárez, 2009).

A su vez el autor dice que los métodos equilibrio limite se clasifican en tres grupos:

- **Métodos exactos:** Estos proporcionan una solución exacta en problemas sencillos, tales como, roturas planares y en cuña, con las simplificaciones de todos los métodos de equilibrio limite, las cuales son: ausencia de deformaciones y factor de seguridad constante en toda la superficie de rotura (Suárez, 2009).
- **Métodos no exactos:** Son aquellos métodos que requieren de una simplificación o hipótesis previa que permita su resolución, entre ellos están los métodos de dovelas, que consideran una masa deslizante dividida en una serie de fajas verticales (Suárez 2009).
- **Métodos aproximados:** los cuales no cumplen con todas las leyes de la estática, como Fellenius, Jambu y Bishop simplificado (Suárez, 2009).

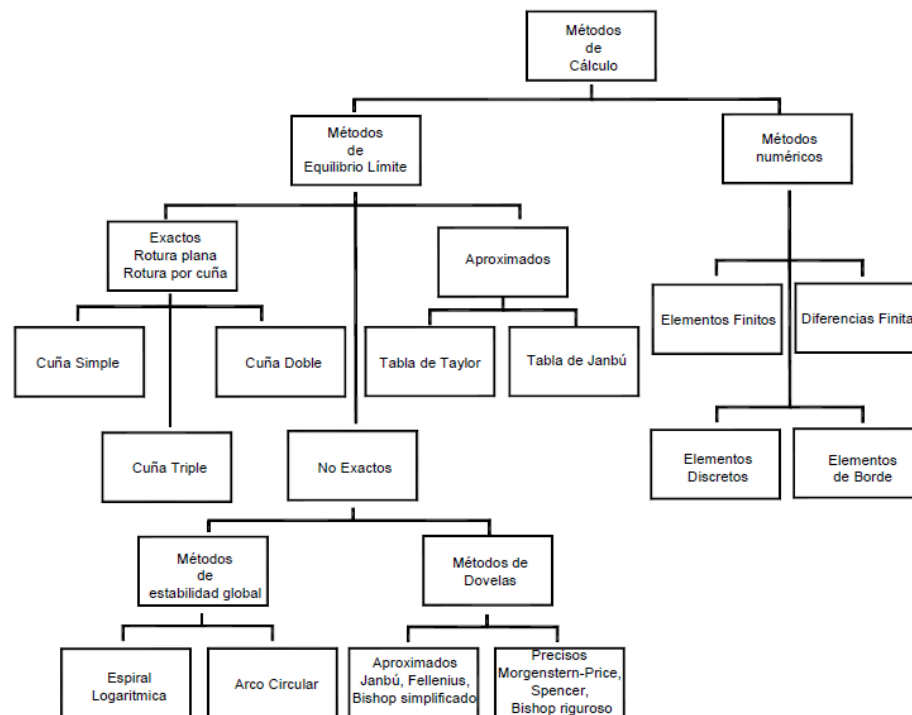


Figura No. 7 - Esquema de métodos de estabilización de un talud. Fuente: Suárez, 2009.

Método de Bishop simplificado: Este método solo satisface el equilibrio de momentos y no el de fuerzas horizontales, se aplica en su mayoría para roturas circulares (Ayala, 1987). En la Figura No. 8 se muestra un esquema de las fuerzas actuantes sobre una dovela, estableciendo el equilibrio de momentos de toda la masa deslizante, respecto al círculo de deslizamiento, se obtiene la ecuación [1] para FS, en donde se tiene un número de N+1 incógnitas (Hurtado, J. E. A, 1994).

$$FS = \frac{1}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \sin \alpha_i} * \sum_{i=1}^n \left[c_i \frac{b_i}{\sin \alpha_i} + N_i \cdot \tan \phi_i \right] \quad [1]$$

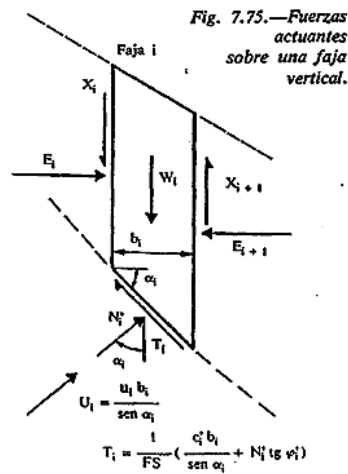


Figura No. 8 - Esquema método de Bishop simplificado. Fuente: Ayala, 1987.

3.4. Técnicas de estabilización de un talud

Para estabilizar un talud hay dos tipos de estructuras, estructuras de contención, las cuales tienen como objeto la imposición de fuerzas adicionales que resistan el movimiento del talud y estructuras de anclaje, que tiene como función reforzar el suelo o transmitir las cargas a suelos o rocas a profundidad, en las Tablas No. 1 y No. 2 se enuncian las ventajas y desventajas de algunas de estas alternativas de estabilización y en la Figura No. 9 se ilustran cada una de ellas. (Suárez, 2009).

Tabla No. 1 - Estructuras de contención. Fuente: Suárez, 2009.

Método	Ventajas	Desventajas
Muros en bloques de roca	Efectivos en los deslizamientos no muy grandes. Especialmente en los rotacionales que actúan como contrapeso. Son flexibles y permeables.	Se requiere una cimentación competente para colocar el relleno enrocado. Se necesitan grandes volúmenes de roca.
Muros en Gaviones	Son flexibles y se acomodan a los movimientos. Son permeables.	Son muy vulnerables a los movimientos. Requieren de un sistema de drenaje.
Muros de concreto	Poseen buena resistencia interna. Útiles para estabilizar movimientos relativamente pequeños. Son rígidos.	Se necesita una buena calidad de cimentación. Son poco efectivos en los taludes de gran altura.

Pilas, Pilotes o tablaestacas	No requieren gran espacio. Se pueden cimentar una gran profundidad. Son efectivos en movimientos poco profundos. Su construcción es rápida.	No son efectivos en deslizamientos profundos o cuando aparece la roca o el suelo muy duro debajo de la superficie de falla. Poco efectivos en los deslizamientos rotacionales.
Anclajes o pernos	Efectivos en la roca, especialmente cuando es estratificada.	Se requieren equipos especiales y que son costosos, por lo general
Pantallas ancladas o claveteadas	Útiles como estructuras de contención de masas de tamaño pequeño a mediano. Son muy efectivas cuando hay roca para anclaje.	Existen algunas incertidumbres sobre su efectividad cuando hay aguas subterráneas. Generalmente son costosas.

Tabla No. 2 - Estructuras de anclaje. Fuente: Suárez, 2009.

Método	Ventajas	Desventajas
Anclajes y pernos individuales	Refuerzos individuales que sostienen los bloques de roca. Permiten la estabilización de los bloques individuales o puntos específicos dentro de un macizo rocoso	Pueden sufrir corrosión. Se requiere rigidez del macizo rocoso.
Muros Anclados	Estructuras de concreto ancladas al talud. Se pueden construir en forma progresiva de arriba hacia abajo, a medida que se avanza con el proceso de excavación. Permiten excavar junto a edificios o estructuras. Permiten alturas considerables.	Los elementos de refuerzo pueden sufrir corrosión en ambientes ácidos. Se puede necesitar un mantenimiento permanente (tensionamiento). Con frecuencia se roban las tuercas y elementos de anclaje. Para su construcción se puede requerir el permiso del vecino. Su construcción es muy costosa
Clavos (Nails)	Inclusiones o refuerzos cementados en toda su longitud. Muy eficientes como elemento de refuerzo en los materiales fracturados o sueltos.	Generalmente, hay que emplear un gran número de Nails para estabilizar un talud específico, lo cual los hace costosos. No funcionan muy bien en suelos sueltos.
Micropilotes	Inclusiones de refuerzo inyectadas con lechada a presión. Refuerzan el suelo e inyectan los poros para mejorar la resistencia del material del talud.	Su efecto específico es difícil de predecir. No son muy eficientes en suelos arcillosos.

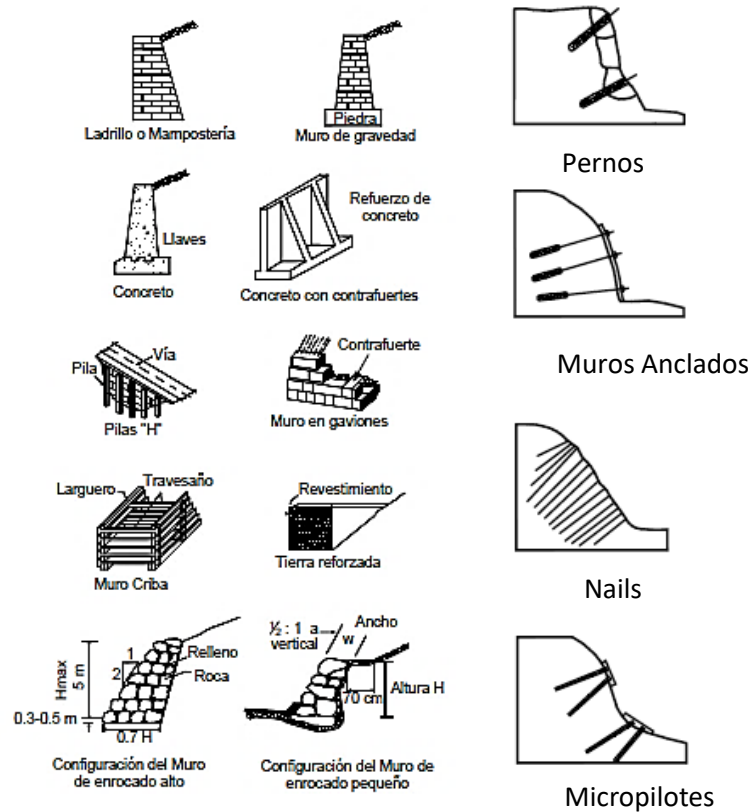


Figura No. 9 - Estructuras de contención y de anclaje de taludes. Fuente: Suárez, 2009.

3.5. Modelación física en centrífuga geotécnica

El principio básico de la centrífuga es someter el suelo a condiciones de esfuerzo similares a las aplicadas por la gravedad, a un modelo hecho a escala a partir de un prototipo. Para esto, se asume que el prototipo tiene las mismas características que las del suelo del modelo, se tienen las ecuaciones [2] y [3], en donde se relacionan los esfuerzos verticales, en la base del suelo para el modelo y para el prototipo, N es el número de gravedades a la que será sometido el modelo (Azizi, 1999).

$$\sigma_{vm} = \sigma_{vp} \Rightarrow \frac{N g}{w^2 R} = 1 - \frac{1}{2n} \quad [2]$$

Según Azizi (1999), las dimensiones de modelo (h_m) y las del prototipo (h_p) corresponden respectivamente a (Figura No 10):

$$h_m = \frac{R}{n} \text{ y } h_p = N \frac{R}{n} \quad [3]$$

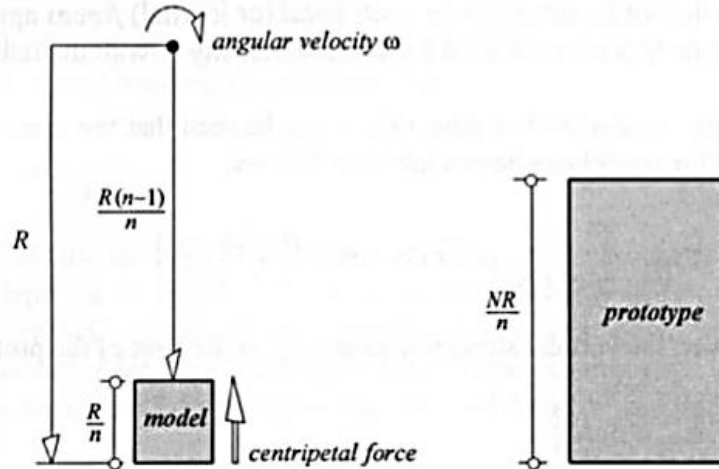


Figura No. 10 - Esquema de la centrífuga con respecto al prototipo. Fuente: (Azizi, 1999).

A partir de las ecuaciones tenemos un error ΔS , como se muestra en la ecuación [4] (Azizi, 1999):

$$\Delta S = \frac{1}{4n-3} \quad [4]$$

3.5.1. Efectos de escala Centrífuga Geotécnica

De acuerdo con las ecuaciones anteriores, la escala está relacionada con el un factor N, el cual indica, el número de gravedades al cual será sometido el modelo en la centrífuga, dado en la ecuación [5] (Azizi, 1999).

$$N = \frac{d_m}{d_p} \quad [5]$$

En donde, d_m son las dimensiones del modelo y d_p son las dimensiones de prototipo, así mismo, este factor de escala influye a cada una de las variables del modelo y del prototipo.

Tabla No. 3 - Relación de las variables en el prototipo y en el modelo. Fuente: (Azizi, 1999).

Variable	Modelo	Prototipo
Longitud	L_m	$L_m * N$
Peso unitario	γ_m	$N * \gamma_m$
Gradiente hidráulica	i_m	i_m / N
Velocidad	v_m	v_m / N
Tiempo	t_m	$t_m * N^2$
Flujo	q_m	$q_m * N^2$
Numero de Reynolds	Re_m	Re_m / N

Las especificaciones de la centrífuga, propiedad de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, se muestran en la Figura No. 11, en la Figura No. 12 se observa una imagen fotográfica de la misma.

Rango de aceleración	10 to 200 g
Radio a la plataforma	610 mm
Rampa de aceleración recomendada	1 min
Rampa de frenado recomendada	2 min
Velocidad máxima	582.6 RPM @ 200g
Carga a la aceleración máxima de 200g	12 kg
Dimensiones útiles (canastas basculantes):	
• Largo	230 mm
• Ancho	150 mm
• Alto	150 mm
Desbalance máximo	1%
G-fuerza	2.4 g ton
Conectores rotativos	4 @ 100 PSI
Potencia eléctrica del motor	5 HP

Figura No. 11 - Especificaciones de la centrífuga de la ECI. Fuente: López, C (2019).

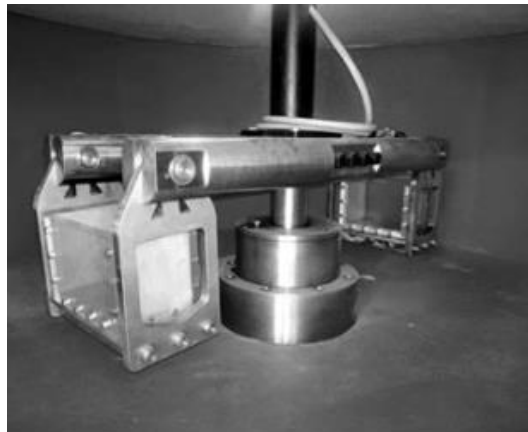
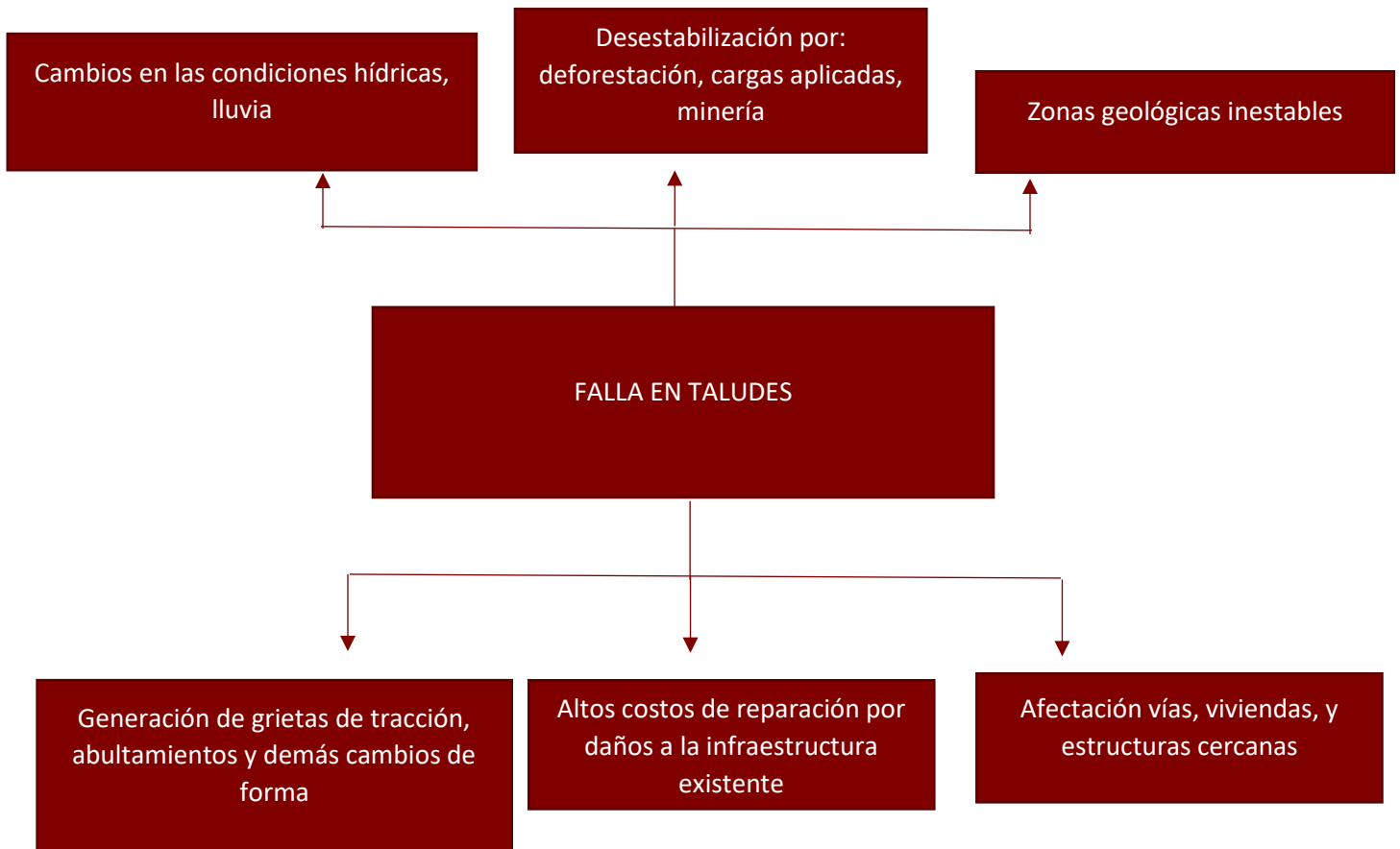


Figura No. 12 - Centrífuga de la ECI. Fuente: López, C (2019).

4. ÁRBOL DEL PROBLEMA



5. METODOLOGÍA

Se requiere estabilizar un talud (Figura No. 13) construido con una pendiente de 45° en una arcilla homogénea con un $S_u=24 \text{ KN/m}^2$ y $\gamma=17\text{kN/m}^3$

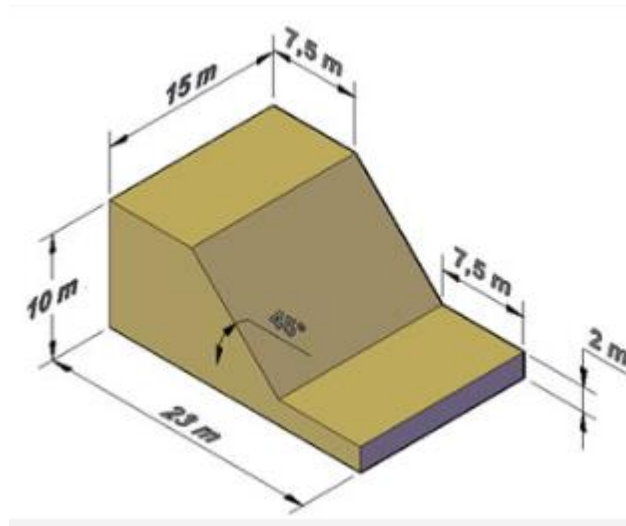


Figura No. 13 - Prototipo a partir de geometría del talud a escala real. Fuente: López C. (2019). Eficiencia

El modelo a escala reducida en la centrífuga (Figura No. 14) se va a realizar a 150 gravedades. Según las leyes en modelo se presenta en la siguiente figura:

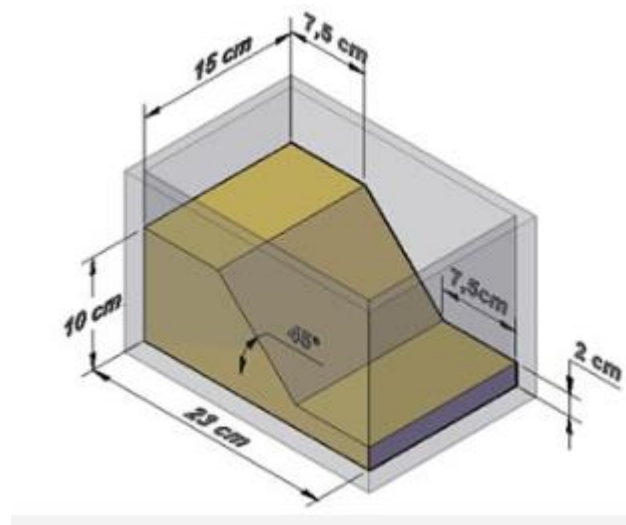


Figura No. 14 - Modelo a escala. Fuente: López C. (2019). Eficiencia

Para realizar el ensayo se ejecutó el procedimiento que se describe a continuación a cada uno de los tres modelos propuestos:

1. Se elabora la mezcla de arcilla y se coloca a consolidar en la caja de la centrífuga (Figura No. 15), con un esfuerzo de preconsolidación de 100 kPa para llegar a un S_u de 24 kPa.



Figura No. 15 - Muestras consolidándose en el laboratorio de suelos ECI. Fuente: Elaboración propia.

2. Después de haber consolidado la muestra, se extrae del consolidómetro (Figura No. 16).

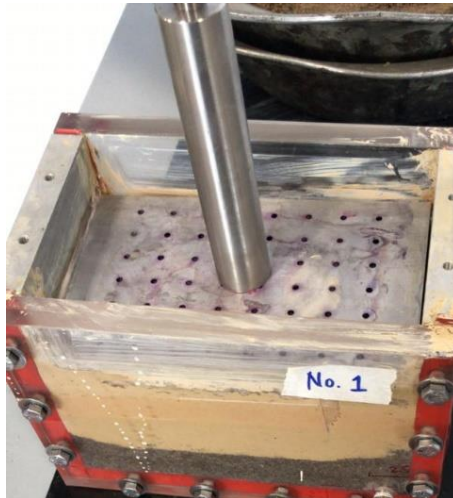


Figura No. 16 - Caja de muestra después de la consolidación, con la cerda de carga encima. Fuente: Elaboración propia

3. Cuando se tiene la caja de la centrífuga con la muestra consolidada, se procede a quitar las tapas a la caja (Figura No. 17).

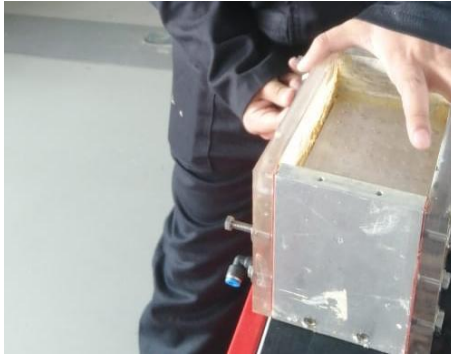


Figura No. 17 - Desarmado de caja con muestra de suelo. Fuente: Elaboración propia

- Una vez se tiene la muestra libre lateralmente, se procede a armar el talud, cortando el material con mucho cuidado, armando el modelo propuesto anteriormente, se realiza un talud de 45° (talud 1:1), altura 4 cm (Figura No. 18).

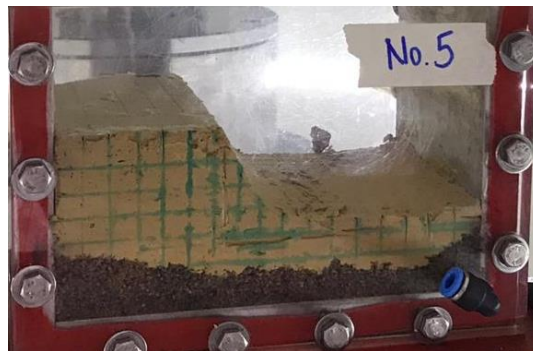


Figura No. 18 - Talud modelo. Fuente: Elaboración propia.

- Luego en un recipiente se hace una mezcla con colorante C4 y agua, se introduce un hilo y se procede a marcar la cuadrícula en el talud (Figura No. 18), esto con el objetivo, que después de realizado el ensayo se visualice de manera clara la superficie de falla del talud.
- Cuando se han completado los pasos anteriores con cada uno de los 3 modelos propuestos, se procede a armar la caja y a implementar la alternativa de estabilización según sea el caso, para el primer caso se dejó el talud sin alternativa de estabilización, para el segundo caso se implantaron 9 micropilotes con un radio de 3 mm, los de la fila superior con una longitud de 4 cm y las dos filas inferiores con una longitud de 3 cm, los cuales se distribuyeron equitativamente en 3 filas en el interior de la superficie del talud, para la tercera y última alternativa, se usó un alambre delgado dulce, con el fin de simular unos Nails, otra técnica de estabilización de taludes muy usada en campo, estos se distribuyeron en 3 filas de 4 alambres cada una, la fila superior con una longitud de 4,5 cm, la fila media con 4 cm y la inferior con 3 cm respectivamente.
- Completados estos pasos, se ensayan los tres modelos en la centrífuga a 150 gravedades, durante 4 minutos (Figura No. 19).

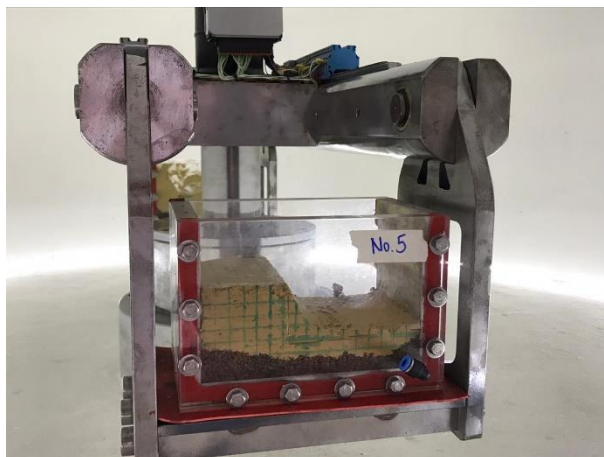


Figura No. 19 - Modelo antes de ensayar en la centrifuga. Fuente: elaboración propia.

6. ACTIVIDADES

Se realizaron una serie de actividades para la investigación, las cuales se enuncian en la Tabla No. 4.



Tabla No. 4 - Cronograma de actividades realizadas. Fuente: Elaboración propia.

Actividades	Fecha
Inicio de ensayo de consolidación de los modelos	24/10/2019
Preparación de muestras y ensayos modelo 1 y 2 en la centrifuga	01/11/2019
Preparación de muestra modelo 3	13/11/2019
Ensayo modelo 3	15/11/2019

7. RESULTADOS MODELACIÓN FÍSICA

Para realizar la modelación física, se plantearon 3 modelos a ensayar, en dos de ellos se implementaron técnicas de estabilización, el restante se realizó sin técnica de estabilización con el fin de comparar los 3 resultados y concluir. En la Tabla No. 5 se describen las características principales de cada modelo.

Tabla No. 5 - Tabla con modelos. Fuente: Elaboración propia

	Modelo No. 1	Modelo No. 2	Modelo No. 3
Técnica de estabilización	Ninguna	Micropilotes	Nails
Distribución	N/A	9 micropilotes en la parte baja del talud cada 2 cm horizontalmente y 1 cm verticalmente	12 Nails en el talud, distribuidos cada 2cm horizontalmente y 1cm verticalmente
			
Longitud modelo	N/A	3 pilotes superiores de 4 cm de longitud, los otros 6 de 3 cm de longitud	Fila superior de 4.5 cm de longitud, Fila intermedia de 4 cm y fila inferior de 3 cm
Longitud prototipo	N/A	4 pilotes superiores de 6m de longitud, los otros 6 de 4.5 cm de longitud	Fila superior de 6.75m de longitud, Fila intermedia de 6m y fila inferior de 4.5m
Radio modelo	N/A	3cm	N/A
Radio prototipo	N/A	45cm	N/A

Al realizar los modelos, se tomaron dos muestras de humedad, los resultados se muestran en la Tabla No 6.

Tabla No. 6 - Humedad de las muestras tomadas de los modelos. Fuente: Elaboración propia.

	Muestra 1	Muestra 2
Peso natural (gr)	139	117
Peso seco (gr)	206	193
Peso del platón (gr)	106	106
Humedad (%)	39	34
Humedad promedio (%)	37	

7.1. Análisis De Estabilidad Del Talud Sin Refuerzo

Para analizar la estabilidad del talud natural sin refuerzo se usó el programa de elementos finitos Slide de Rockscience con el método de Bishop simplificado, también se elaboró el análisis con el mismo método de manera manual. Posteriormente se compararon los resultados calculados con los resultados obtenidos en el laboratorio.

- **Modelo en Slide, Rockscience**

Se procedió a modelar el talud en el programa Slide, se usaron las medidas de prototipo, las con base en las medidas del modelo usando la ecuación [5] se muestran las dimensiones en la Tabla no 7:

Tabla No. 7 - Dimensiones en el modelo y en el prototipo. Fuente: Elaboración propia

N	150	
	Modelo	Prototipo
Largo L	0.17	25.5
Ancho B	0.1	15
Alto H	0.02	3
Altura del talud Ht	0.04	6

Con las medidas de la Tabla No. 7 se modeló un corte del talud con un comportamiento no drenado y se asignaron las propiedades del suelo dadas en las especificaciones, en la Figura No. 20 se muestra un esquema de las dimensiones del talud del prototipo.

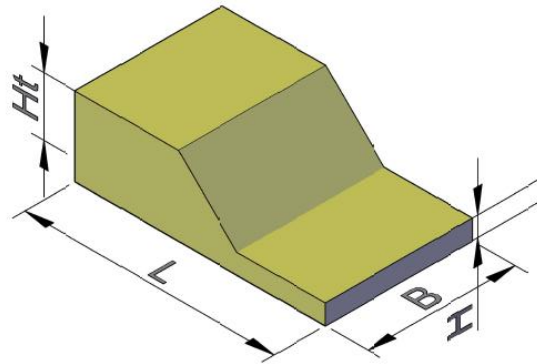


Figura No. 20 - Modelo del prototipo de talud natural. Fuente: Elaboración propia

Luego de asignar las medidas del corte al modelo y las características del suelo, se calculó el factor de seguridad, el resultado del cálculo se muestra en la Figura No. 21. El software arroja un factor de seguridad crítico de 1.384, lo cual hasta el momento nos indica que no cumple con los requisitos del INVIAS de mínimo 1.5.

Todos los modelos numéricos se realizaron con el modelo constitutivo Mohr-Coulomb en condición no drenada. En el modelo numérico no se consideró la posición del nivel freático, condición que representa verídicamente las condiciones de modelación física, por esta razón es posible que los resultados que arroja el software difieren un poco con los resultados obtenidos en el laboratorio.

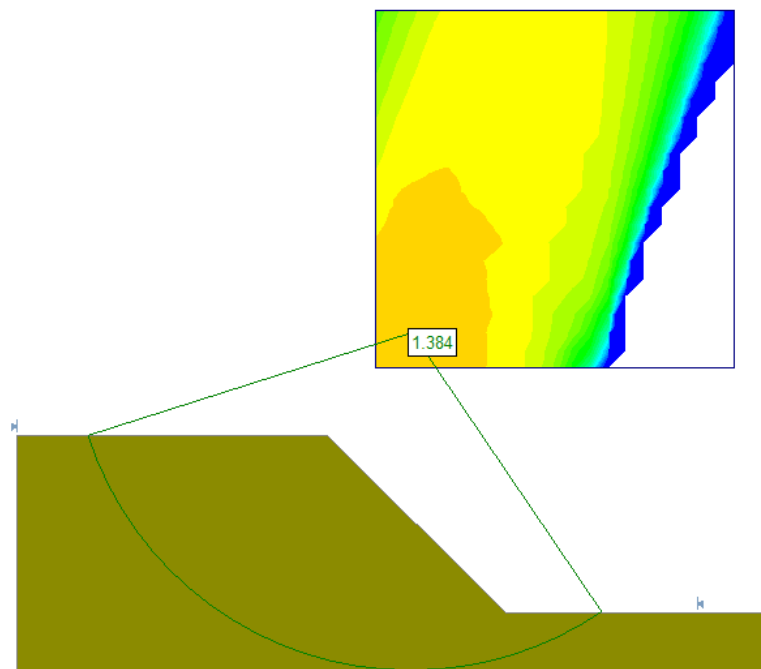


Figura No. 21 - Factor de seguridad para prototipo de terreno natural. Fuente: Software Slide

- **Modelo analítico del talud usando el método de Bishop Simplificado**

Posterior a esto se halla factor de seguridad para el talud por medio del método de Bishop simplificado, para esto primero se divide el talud en las dovelas para un radio de 11.45m, este radio se obtuvo a partir de los datos arrojados por el programa Slide para la superficie de falla crítica, este divide la superficie de falla en dovelas, para este caso se usaron dovelas de 1.4 metros de espesor con excepción de la primera de 0.69 metros. Un esquema de las dovelas se muestra en la Figura No. 22.

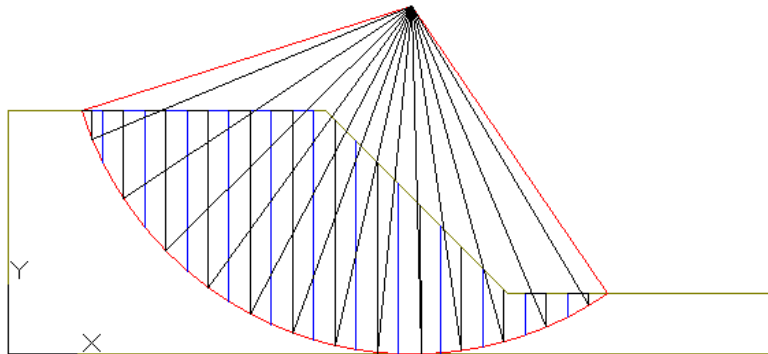


Figura No. 22 - Dovelas para método analítico de Bishop simplificado. Fuente: Elaboración propia.

Después de sacar las dovelas se procede a usar las ecuaciones la ecuación [1] de Bishop simplificado para sacar el factor de seguridad de las dovelas, el cual da un valor de 1.5 como se muestra en la Tabla No. 8.

Tabla No. 8 - Método analítico de Bishop simplificado para terreno natural. Fuente: Elaboración propia.

Dovelas	b	Hm (suelo1)	Area Total	Peso dovela	WT	α	Fuerza tangente
1	0.69	0.85	0.59	10.00	10.00	22.00	3.75
2	1.40	2.82	3.95	67.12	66.54	34.00	37.53
3	1.40	4.55	6.37	108.33	107.40	45.00	76.60
4	1.40	5.76	8.06	137.07	135.90	54.00	110.90
5	1.40	6.63	9.28	157.84	156.49	62.00	139.37
6	1.40	7.26	10.16	172.70	171.22	70.00	162.29
7	1.40	7.36	10.30	175.07	173.57	77.00	170.58
8	1.40	6.27	8.78	149.31	239.07	84.00	148.49
9	1.40	4.95	6.93	117.73	224.11	-2.00	-4.11
10	1.40	3.45	4.83	82.11	206.87	-8.00	-11.43
11	1.40	1.87	2.61	44.42	186.24	-16.00	-12.24
12	1.40	1.11	1.55	26.33	26.10	-23.00	-10.29
13	1.40	0.42	0.59	9.99	9.90	-31.00	-5.14
						Total	806.29

Fuerzas resistentes		Iteración 1					
Cohesión	Fricción	$C^*b + (W - Hw * Yw * b) \tan(\Phi)$	Sec (α)	Tan(α)	tan (Φ)Suelo	$\frac{\sec \alpha}{1 + \tan \alpha \frac{\tan \phi}{FS}}$	$C^*b + (W - ub) \tan \phi^* \frac{\sec \alpha}{1 + \tan \alpha \frac{\tan \phi}{FS}}$
C*b	$(W - Hw * Yw * b) \tan(\Phi)$						
17	0.00	16.66	1.08	0.40	0.00	1.08	17.96
34	0.00	33.60	1.21	0.67	0.00	1.21	40.53
34	0.00	33.60	1.41	1.00	0.00	1.41	47.52
34	0.00	33.60	1.70	1.38	0.00	3.40	114.33
34	0.00	33.60	2.13	1.88	0.00	4.26	143.14
34	0.00	33.60	2.92	2.75	0.00	5.85	196.48
34	0.00	33.60	4.45	4.33	0.00	4.45	149.37
34	0.00	33.60	9.57	9.51	0.00	9.57	321.44
34	0.00	33.60	1.00	-0.03	0.00	1.00	33.62
34	0.00	33.60	1.01	-0.14	0.00	1.01	33.93
34	0.00	33.60	1.04	-0.29	0.00	1.04	34.95
34	0.00	33.60	1.09	-0.42	0.00	1.09	36.50
34	0.00	33.60	1.17	-0.60	0.00	1.17	39.20
Suma		419.86				Suma	1208.97
Fs(aproximado)		1.50				Fs	1.50

Posteriormente, se procede a ensayar el modelo usando la metodología descrita anteriormente. El ensayo se realizó en la centrífuga geotécnica a 150 gravedades durante 4 minutos, esto equivale a un tiempo del prototipo de 62 días y medio, esto indica que el comportamiento es a corto plazo por lo tanto el análisis se debe hacer en condiciones no drenadas.

El comportamiento del modelo 1 luego de ser ensayado se muestra en la Figura No. 23 en la cual se puede observar una superficie con menor factor de seguridad al esperado. Esto se puede deber a una menor resistencia al corte no drenado obtenida en el modelo que la esperada. En futuros trabajos se recomienda medir la resistencia al corte no drenado en el ensayo usando técnicas como el CPT o la veleta adaptadas para el modelo reducido.



Figura No. 23 - Modelo 1 luego del ensayo, sin alternativa de estabilización. Fuente: Elaboración propia.

7.2. Análisis De Estabilidad Usando Micropilotes

Como primera alternativa de estabilización, se propuso usar pilotes hincados de madera para el modelo No. 2. Para modelar esto en Slide se usó un peso unitario de la madera de 8kN/m^2 , y se colocaron los pilotes de una sección de corte cada 2 metros en el plano del talud, como se muestra en la Figura No. 24.

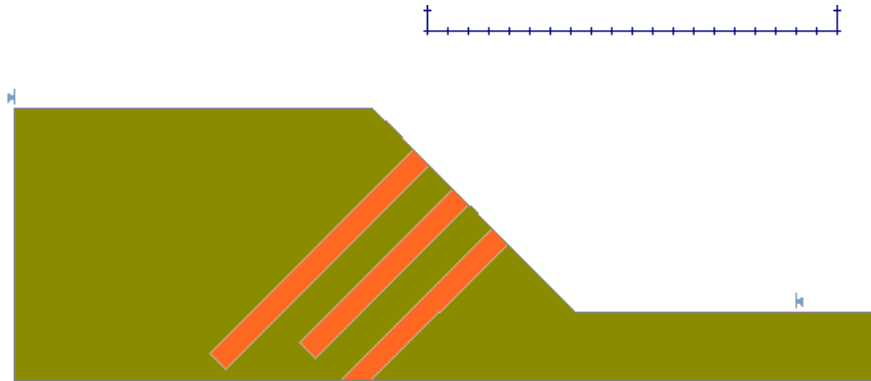


Figura No. 24 - Modelo del prototipo de talud con micropilotes. Fuente: Software Slide

Luego se determinó el factor de seguridad con el método de Bishop simplificado y con una condición no drenada, los resultados del cálculo se muestran en la Figura No. 25. Según el resultado obtenido con las dimensiones especificadas para la modelación física en centrífuga geotécnica, se tiene un factor de seguridad crítico de 9.2. También se pueden evidenciar unas superficies de falla rosadas, estas son las superficies de falla que el software toma como invalidas ya que sobrepasan el área de suelo establecida para la modelación numérica.

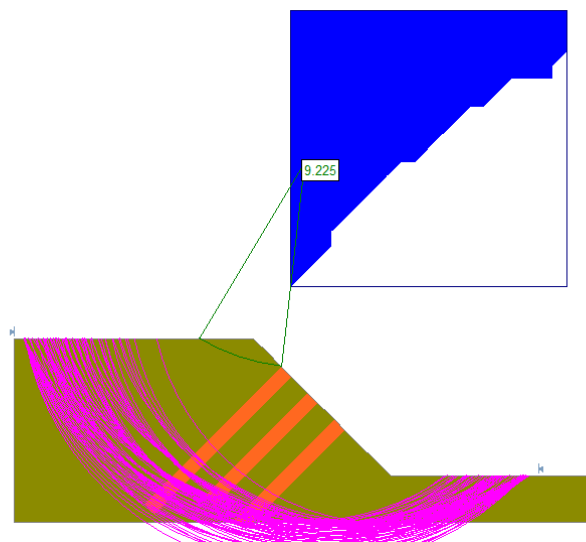


Figura No. 25 - Factor de seguridad para prototipo con micropilotes. Fuente: Software Slide

Con el objetivo de considerar todas las superficies de falla posibles permitiendo el desarrollo completo de la falla del talud, se procede a aumentar la masa del talud en dirección vertical, y luego de esto se recalcula el modelo. Como se aprecia en la Figura No 26 al ampliar el espesor de la base del talud se reduce el factor de seguridad crítico a 1.424.

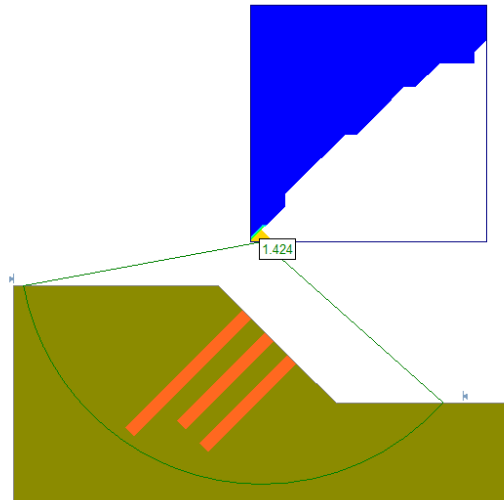


Figura No. 26 - Factor de seguridad para prototipo con micropilotes aumentando el espesor de la base del talud. Fuente: Software Slide.

En la Figura No. 27 se muestran los resultados del modelo No 2 después de ser ensayado en la centrífuga durante 4 minutos a 150 gravedades equivalente a un tiempo del prototipo de 62 días y medio.

Comparando los resultados obtenidos con el modelo numérico y el mecanismo de falla del talud realizado en la modelación física en centrífuga geotécnica se pueden establecer los siguientes aspectos:

- Para la modelación inicial numérica con las dimensiones del modelo físico se obtuvo un factor de seguridad de 9.25, factor que es mucho mayor al del talud modelado físicamente. Se observa que el modelo físico llega a la falla.
- La condición de modelación numérica con las dimensiones del modelo físico no arroja resultados correctos dado que el modelo numérico descarta los resultados que matemáticamente no son posibles de obtener.
- La mejor condición de modelación numérica para obtener la posible superficie de falla alejando verticalmente la frontera del modelo. En este caso, el modelo numérico arrojó un factor de seguridad de 1.42.
- Los resultados experimentales se acercan más a la modelación descrita anteriormente, sin embargo, por las restricciones físicas del tamaño de la caja, se observa que la superficie de falla no se alcanza a desarrollar completamente en el modelo, por lo tanto, los resultados no son completamente comparables.
- Debido a que la instalación de los micropilotes en el modelo fue hincado y no pre-excavado, puede que este proceso modificara los esfuerzos del suelo antes del ensayo en la centrífuga afectando los resultados.

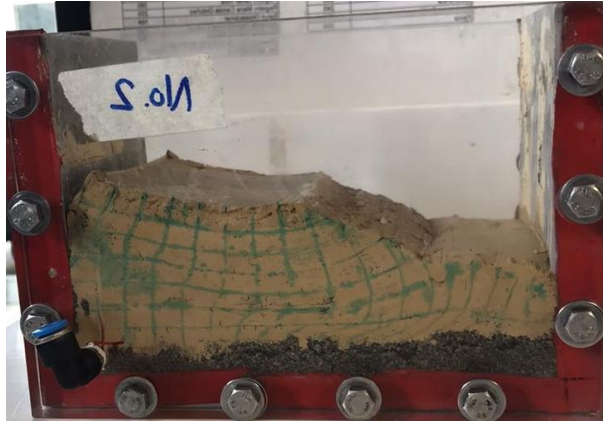


Figura No. 27 - Modelo Ensayado de terreno con micropilotes. Fuente: Elaboración propia.

7.3. Análisis de estabilidad usando Nails

Como segunda alternativa de estabilización, se propuso la instalación de Nails para el modelo No. 3. Para modelar esto en Slide se usaron Nails con resistencia a la tensión de 100 kN y de acuerdo con lo descrito en la Tabla No. 5 se colocaron en el programa Slide como se muestra en la Figura No. 28.

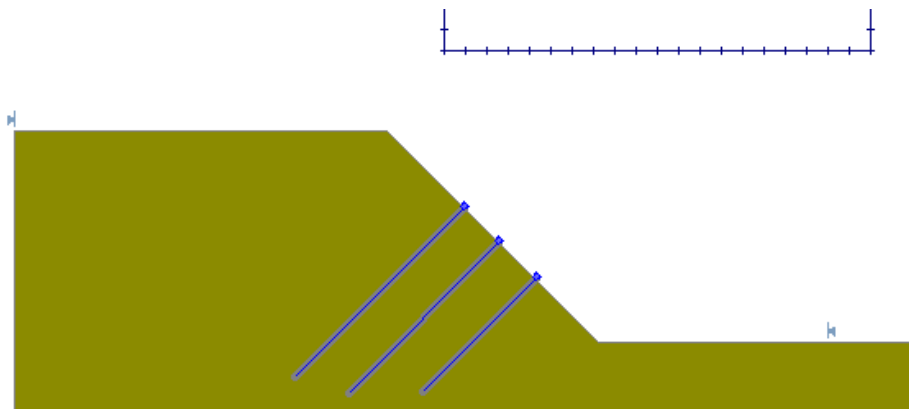


Figura No. 28 - Factor de seguridad para prototipo con Nails. Fuente: Software Slide

Posteriormente, se calcula el modelo con el método de Bishop simplificado, resultado el cual se muestra en la Figura No. 29, la cual muestra que el software arroja un factor de seguridad de 1.414.

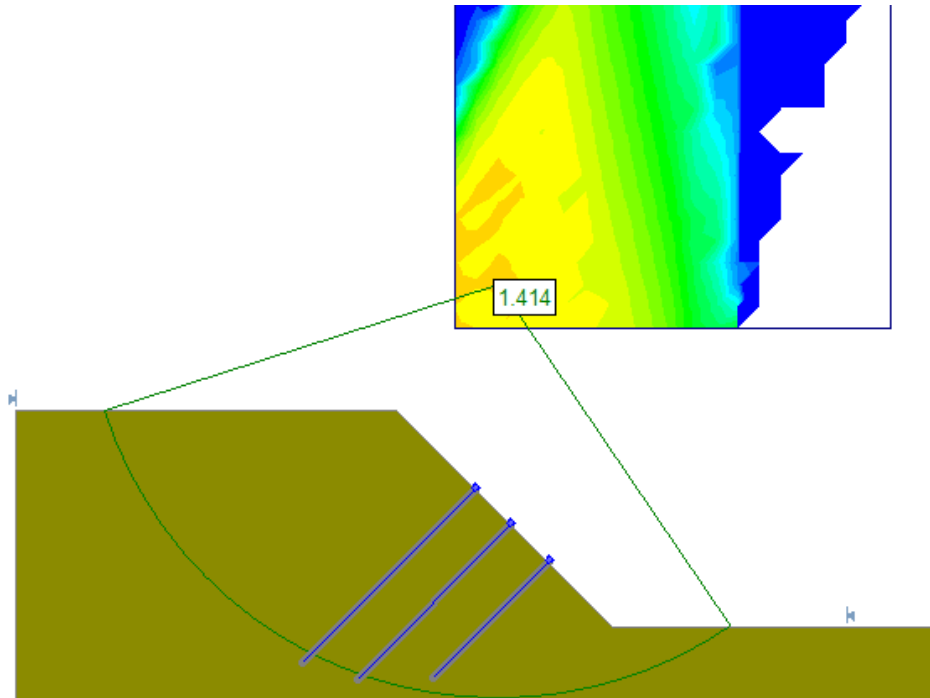


Figura No. 29 - Modelo del prototipo de talud con micropilotes. Fuente: Software Slide

A continuación, en la Figura No. 30 se muestra el resultado después de ensayar el Modelo No 3 en la centrífuga durante 4 minutos a 150 gravedades.

Comparando los resultados obtenidos con el modelo numérico y el mecanismo de falla del talud modelado en centrífuga, se pueden establecer los siguientes aspectos:

- En el modelo No. 3 con alternativa de estabilización con Nails, se observa un factor de seguridad e 1.41. Al compararlo con el modelo sin técnica de estabilización este factor no difiere mucho, esto puede ser debido a que posiblemente se necesitan más Nails para estabilizar el talud.
- Es necesario tener en cuenta que el material usado para hacer los Nails en el prototipo es cementado y para el modelo físico se usaron Nails de alambre dulce, material que es muy dúctil y posiblemente no asemeja bien las condiciones de los Nails.
- Al comparar las superficies de falla en la Figuras No. 29 y No. 30 se observa que la condición de modelación numérica se asemeja a la condición del modelo físico. Sin embargo, se observan diferencias mínimas en la posición de la superficie de falla con respecto a la parte alta del talud, esto puede ser probablemente debido a que el modelo experimenta peso propio del suelo menor al del prototipo a causa de las leyes de escala.

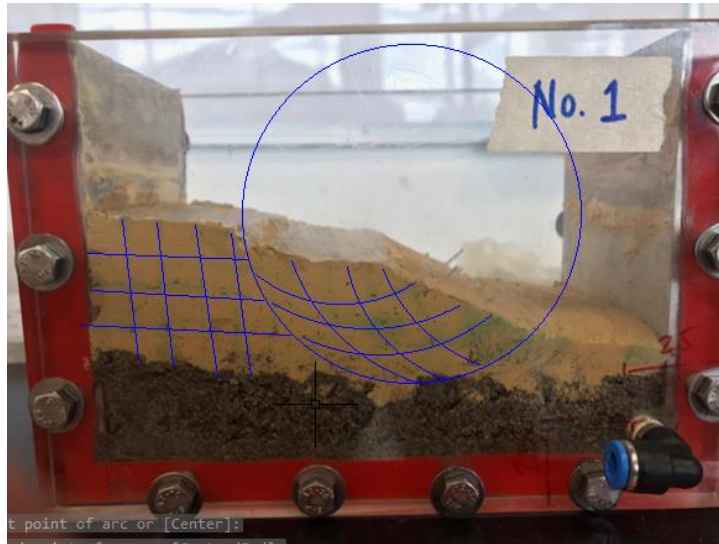


Figura No. 30 - Modelo Ensayado de terreno con Nails. Fuente: Elaboración propia.

8. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados del proyecto y el análisis realizado se concluye lo siguiente:

- No fue posible estabilizar el talud debido a que las alternativas de estabilización no se lograron simular correctamente en los modelos físicos realizados.
- Para el modelo con terreno natural se tiene un factor de seguridad mínimo de 1.4 hallado con el software Slide y de 1.5 hallado con el método analítico Bishop simplificado, esto indica un error del 7%.
- En el modelo con alternativa de estabilización de micropilotes se obtuvo un Factor de Seguridad de 1.424, superficie de falla similar a la obtenida en modelación física. No obstante, ya que la superficie de falla no se alcanza a desplegar completamente a lo largo del talud, por las dimensiones del modelo, este modelo no es lo suficientemente comparable con los otros dos modelos.
- En el modelo con alternativa de estabilización con Nails, se observa un factor de seguridad e 1.41, que comparado con el Factor de seguridad de 1.4 del talud no difiere en gran magnitud.
- Finalmente, en los 3 ensayos se puede observar una superficie de falla rotacional, sin embargo, se evidencia una grieta de tracción de mayor espesor en las alternativas de estabilización, siendo de mayor magnitud la de la alternativa con micropilotes, ya que se considera que esta fue más efectiva que los Nails.

8.1. Recomendaciones y trabajos futuros

- Existe incertidumbre en el contenido de humedad inicial, por lo tanto, para futuros trabajos se recomienda tomar muestras antes del ensayo en centrífuga para incluir este valor en el modelo numérico.
- Usar un factor de seguridad para los materiales reales Vs los materiales usados en el modelo.
- Antes de realizar los ensayos en la centrífuga, verificar las propiedades del suelo efectuando ensayos de SPT o veleta en la muestra de suelo.
- Preparar la malla al momento de ensayar la muestra en la centrífuga, de manera que el colorante no alcance a ser absorbido por el suelo y se visualice de manera clara la superficie de falla.
- Tomar las imágenes desde el mismo ángulo antes y después de hacer los ensayos para hacer un análisis más detallado superponiendo una imagen con otra de manera que se facilite la comparación entre cada ensayo y entre los ensayos y los taludes del software de elementos finitos.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Azizi, F. (1999). Applied analyses in geotechnics (1st ed, Chapter 13).
- Ayala, F (1998). Manual de taludes (1st ed, Capítulo 7).
- Suárez, J (2009). Deslizamientos (Vol. 1, Capítulos 1 y 4).
- López, C (2019). Diapositivas de modelación física.
- López C. (2019). Eficiencia, bases del concurso Que no falle el talud. Obtenido de <https://www.escuelaing.edu.co/escuela/eficiencia/2019/concursos.php>
- Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). Soil strength and slope stability. John Wiley & Sons.
- Hurtado, J. E. A. (1994). Análisis de estabilidad de taludes. Ciencia y Tecnología- Facultad de Ingeniería Civil, 62.
- Geologiaweb. (2018). Deslizamientos, tipos de deslizamientos y movimientos en masa. Obtenido de <https://geologiaweb.com/ingenieriageologica/deslizamientos/tipos-de-deslizamientos/>
- Harris, C., Smith, J. S., Davies, M. C., & Rea, B. (2008). An investigation of periglacial slope stability in relation to soil properties based on physical modelling in the geotechnical centrifuge. *Geomorphology*, 93(3-4), 437-459.
- Viswanadham, B. V. S., & Mahajan, R. R. (2007). Centrifuge model tests on geotextile-reinforced slopes. *Geosynthetics International*, 14(6), 365-379.
- Cruz, L. A. B., & Cardona, J. C. C. Modelación En Centrífuga De Túneles Poco Profundos En Arcillas De La Sabana De Bogotá.
- Vargas Losada, J. C. (2003). Modelación física en centrífuga, de un muro pantalla apuntalado en suelos blandos de Bogotá (Master's thesis, Bogotá-Uniandes).
- Romero Yate, Y. A., Pacheco Díaz, L. A., Velásquez, B., & José, E. (2007). Análisis de un muro de gravedad a escala reducida.
- Carcedo, F. J. A., & Posse, F. J. A. (2006). Manual de ingeniería de taludes (No. 3). IGME.

- Mason, H. B., Trombetta, N. W., Chen, Z., Bray, J. D., Hutchinson, T. C., & Kutter, B. L. (2013). Seismic soil–foundation–structure interaction observed in geotechnical centrifuge experiments. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 48, 162-174.
- Singh, D. N., & Kuriyan, S. J. (2002). Estimation of hydraulic conductivity of unsaturated soils using a geotechnical centrifuge. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(3), 684-694.
- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. (2001). *Slope stability and stabilization methods*. John Wiley & Sons.
- Murillo Feo, C. A. (2006). *Caracterización geotécnica de estructuras multicapas en centrífuga empleando ondas de superficie* (Doctoral dissertation, Bogotá-Uniandes).