

**ANÁLISIS DE UN TALUD A ESCALA PARA EVALUAR SU
COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO CUALITATIVO**

**EDICSON CORTES RUIZ
WALDIR DURFRED DURAN ROJAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

**ANÁLISIS DE UN TALUD A ESCALA PARA EVALUAR SU
COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO CUALITATIVO**

**EDICSON CORTES RUIZ
WALDIR DURFRED DURAN ROJAS**

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil

**Director:
HEBENLY CELIS LEGUIZAMO
Msc. en Geotecnia**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

En la vida se presentan diferentes caminos, propósitos y objetivos, cumplirlos no es fácil, pero ¿qué sentido tendría si así lo fuera?, sentir el esfuerzo de conseguir o realizar algo no tiene punto de comparación, porque entre más difícil sea alcanzar una meta mayor será la satisfacción de lograrla, solo Dios permite alcanzar todo y a él va dedicado este gran triunfo.

Mi historia de vida va dedicada a la perseverancia, el esfuerzo y la motivación de realizar todo lo propuesto para realizar todos mis logros.

A mi madre, MARÍA HELENA RUIZ, por siempre creer en mí, por ser la base de toda mi vida, por nunca bajar los brazos a momentos difíciles, la palabra gracias queda muy pequeña para lo mucho que haz echo por mí, eres una guerrera un ejemplo a seguir, por siempre eternamente agradecido, ojalá la vida me alcance para devolverte todo lo que siempre haz echo por mí, este triunfo va dedicado a ti, TE AMO.

A mi hermano, ALEXIS CORTES, por vivir una aventura más a mi lado, por ser un gran apoyo, guiándome en momentos en que mi vida se estaba tornando confusa pero tus consejos y tu apoyo lo arreglaban todo, gracias por ser mi hermano y más que eso mi mejor amigo, sé que nunca dejaste de creer en mí y mis capacidades, este triunfo es por ti, TE AMO.

A mi novia JULIANA BELTRÁN, por enseñarme las cosas lindas de la vida, por tener siempre en mi la fe de realizar las cosas, por ser mi gran apoyo en momentos difíciles, por siempre ver el lado positivo a las cosas, demostrarme todo el amor, cariño y comprensión, este triunfo es por ti, TE AMO.

A mi familia por todo su apoyo y comprensión, en especial a FERCHO y DELFY, por todos los consejos que me han dado, y siempre estar conmigo, porque la unión hace la fuerza, a ustedes también les dedico este triunfo.

A mi compañero WALDIR DURÁN, un amigo de verdad, confianza, sinceridad, lealtad y alegría las cualidades que lo hacen ser una gran persona, pasamos 7 años cumpliendo cada logro, gracias por vivir conmigo esta etapa de vida, más que un amigo un hermano.

A mis amigos JEY, CESAR, DIEGO, MECHAS, y a todos los que aportaron su granito de arena en este logro, aprendí muchas cosas de ustedes, cada uno con una personalidad diferente, pero siendo unas maravillosas personas.

EDICSON CORTES RUIZ

A Dios por darme la salud, paciencia, sabiduría y entendimiento.

A mi madre por apoyarme en cada momento, por darme el primer empujón para comenzar este proyecto de vida.

A mi padre por estar siempre disponible para mí, por darme una solución para cada problema que presenté durante este camino.

A mi familia por estar pendientes en cada momento y por alentarme a salir adelante

A Jennifer por haber estado acompañándome durante una gran parte de mi formación, apoyándome y dándome ánimo en los momentos más críticos

A Edic mi compañero de tesis, juego, carrera, de todo, por haberme ayudado a dar pasos cruciales.

A mi groso grupo de amigos que fueron acompañantes desde primer semestre hasta este momento

A la selección de futsala masculino por ser mis amigos dentro y fuera de la cancha

A mi papá en el futsala, rene "la rana" por creer en mí y enseñarme todo acerca de este lindo deporte.

A mi profe isidro por depositar su confianza en mí y además ser un amigo incondicional.

Al final es solo un pequeño paso para llegar a ser grande, ser una persona íntegra. ¿Muchas experiencias vividas y unas más por vivir, ahora sí tocará salir a producir o no....?

WALDIR DURFRED DURÁN ROJAS

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS.....	15
1.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2. METODOLOGÍA	16
2.1 MATERIALES	16
2.1.1 Lámina de acrílico.....	16
2.1.2 Suelo extraído.....	16
2.2 ELABORACIÓN DEL MODELO FÍSICO.....	17
2.2.1 Elaboración de la urna de acrílico.....	18
2.3 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO EXTRAÍDO	22
2.3.1 Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos.....	22
2.3.2 Ensayo límites de Atterberg del suelo.....	24
2.3.2.1 Límite líquido.....	25
2.3.2.2 Límite Plástico.....	26
2.3.3 Ensayo Relaciones de humedad-Peso unitario seco en los suelos (Proctor Modificado)	26
2.3.4 Ensayo de corte directo	27
2.3.5 Clasificación del tipo de suelo.....	29
2.4 DIMENSIONAMIENTO DEL MODELO A ESCALA DEL TALUD.....	30
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	33
3.1 ANÁLISIS DE LA PRUEBA DE CARGA	33
4. CONCLUSIONES	36
5. RECOMENDACIONES.....	37
BIBLIOGRAFÍA.....	38

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Lámina de acrílico de espesor (15 mm).....	16
Figura 2. Suelo extraído de la excavación, Edificio de Ingeniería Mecánica.	17
Figura 3. Máquina hidráulica universal de ensayos mecánicos " MTS Single Ended Actuator".....	18
Figura 4. Proceso de Corte lámina de acrílico con la sierra eléctrica	19
Figura 5. Proceso de lijar y raspar las secciones que conforman la urna.	19
Figura 6. Cloruro de metileno agente adherente entre las secciones de lámina....	20
Figura 7. Aplicación del cloruro de metileno a las secciones de lámina	20
Figura 8. Ensamble, termo-formado y refuerzo de la urna de acrílico	21
Figura 9. Urna de acrílico para el modelo práctico del talud.	22
Figura 10. Gráfica de la curva granulométrica del suelo en estudio	24
Figura 11. Gráfica Porcentaje de Humedad vs N° golpes (límite líquido)	25
Figura 12. Gráfica Densidad seca (gr/cm^3) vs Contenido de humedad (%).....	27
Figura 13. Gráfica Esfuerzo Cortante τ (kg/m^2) vs Esfuerzo Normal σ (kg/m^2).	28
Figura 14. Criterio de fallo Mohr-Coulomb.	28
Figura 15. Zona de aplicación de la carga vertical.....	32
Figura 16. Gráfica esfuerzo vs deformación.	33
Figura 17. Fractura por compresión en la zona II	34
Figura 18. Falla en forma de cuña triangular con ángulo de 90° del talud	35

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Distribución granulométrica del suelo en los tamices	23
Tabla 2. Distribución de porcentaje de Gravas, Arenas y Finos del suelo.	24
Tabla 3. Resultados del ensayo para determinar el límite líquido del suelo.	25
Tabla 4. Resultados del ensayo para determinar el límite plástico del suelo.	26
Tabla 5. Distribución de valores del ensayo de Corte Directo	27
Tabla 6. Propiedades mecánicas de las arenas arcillosas	29
Tabla 7. Resumen características del material	30
Tabla 8. Pendientes típicas para taludes en relleno	30

RESUMEN

Título: Análisis de un talud a escala para evaluar su comportamiento geotécnico cualitativo*

Autores: Edicson Cortes Ruiz
Waldir Durfred Duran Rojas**

Palabras Clave: Talud, geotecnia, asentamiento, compactación, modelo a escala.

En este proyecto se diseñó e implementó un modelo a escala de un talud que será usado con fines educativos para brindarle al estudiante la posibilidad de observar el proceso de falla mediante la aplicación de una carga. Para la construcción del modelo se requirió, una urna en acrílico reforzada de 65 cm x 30 cm x 50 cm y grosor 15 mm, el material de suelo utilizado fue clasificado como una arena arcillosa SC mediante las normas I.N.V.E 123-125-126-13, de igual forma se determinaron los parámetros de densidad seca 1.85 gr/cm^3 y humedad óptima 12% de compactación mediante la norma I.N.V.E 142-13, por último, mediante la norma I.N.V.E 154-13 se determinó el ángulo de fricción de 41° y una cohesión de 0.79 kg/cm^2 . El talud fue compactado con una relación en su pendiente de 1.5H:1V y se empleó un protocolo de carga estática vertical de 1 mm/min aplicado por "MTS Single Ended Actuator" que generó un asentamiento en la corona del talud de 23.4 mm con un esfuerzo máximo de 1312 kPa. Se observó una falla dentro del talud en forma de cuña triangular con ángulo de 90° , influenciada por las condiciones de confinamiento y el proceso de compactación empleados, se debe obtener información más detallada que pueda controlar la mayor cantidad de parámetros para la caracterización de un talud, ya sea utilizando simulaciones en softwares especializados y/o caracterización minuciosa de los mismos, comparando los resultados obtenidos y así implementar este modelo práctico para usos educativos.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías físico mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directora: Hebenly Celis Leguizamo

ABSTRACT

Title: Analysis of a slope at scale to evaluate its qualitative geotechnical behavior *

Authors: Edicson Cortes Ruiz
Waldir Durfred Duran Rojas**

KEYWORDS: Slope, Geotechnics, Slump, Compression, Scale model

In this investigation was designed and deployed a scale which was used for educative purposes to provide the student a possibility of observe the failure process through the implementation of weight. For the construction of the model was requested a reinforced acrylic urn of 65 cm x 30 cm x 50 cm and 15 mm of thickness the flooring material used was marked as new clayey sand SC by the rule I.N.V.E 123-125-126-13, likewise identified the parameters of the dry density 1.85 gr/cm^3 and optimum moisture 12% of compactation by the rules I.N.V.E 142-07, and least by the rule I.N.V.E 154-13 was established an angle of friction of 41° and a cohesion of 0.79 kg/cm^2 . The slope was marked with a relation in the descent of 1.5H:1V and was deployed a vertical static loading protocol of 1 mm/min implemented for "MTS Single Ended Actuator" that created a settlement at the top of the slope of 23.4 mm with a maximum effort of 1312 kPa. It was noted a fail inside the slope in the shape of a triangular wedge with an angle of 90° , influenced by the conditions of confinement and the process of compactation used, must also be obtained a detailed information it can control as much parameters for the characterization of a slope, either by using specialized software simulations and/or detailed characterization of themselves, comparing the results obtained and then implement this practical model for education.

* Proyecto de grado

** Faculty of physical mechanical engineering. School of Civil Engineering. Directora: Hebenly Celis Leguizamo

INTRODUCCIÓN

La geotecnia es una de las ramas más desafiantes de la ingeniería civil, debido a que se desarrolla en torno al suelo, material complejo en la definición de sus características y propiedades, debido a esto, las soluciones de los problemas en esta disciplina pueden llegar a ser una labor bastante complicada, en algunas ocasiones en las que diversos factores influyen en el comportamiento de los materiales involucrados, no obstante, esta ardua tarea se ha visto simplificada desde la aparición de los métodos numéricos¹, en la actualidad existen modelos informáticos que realizan simulaciones ideales con énfasis en el conocimiento teórico utilizando diferentes softwares especializados para el estudio de la estabilidad de taludes, pero teniendo como falencia que excluyen sus componentes prácticos, debido a la carencia de instrumentos que permitan observar los procesos y factores evidenciados en la ejecución de proyectos en campo².

Debido a la ausencia de un laboratorio específico para la asignatura de estabilidad de taludes se generan falencias en la unión del conocimiento teórico y práctico, por la falta de herramientas útiles que permitan observar la representación real de un problema ; por ende se propone implementar un modelo a escala que podrá ser usado con fines educativos brindando la posibilidad a los estudiantes de experimentar detalladamente la fase de caracterización y análisis mediante los diferentes métodos de aplicación³, permitiendo observar el proceso de falla que conlleve a esclarecer los conceptos expuestos en clases.

¹ MILÁN Y. V., CASTRO R. P., y LACABA R. G., "Evaluación De Riesgos Por Deslizamiento En Taludes Y Laderas Del Sector Este Del Municipio Moa", 2011

² AZZONI A., LA BARBERA G., ZANINETTI A., "Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model". Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech Abstr., pp. 709-724, 1995

³ VARNES D. J., "Slope movement types and processes. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.).", Transportation and Road Research Board, 1978.

El propósito de esta proyecto es proponer un modelo a escala de un talud, compuesto por una urna fabricada manualmente en acrílico, la cual seguirá las especificaciones adecuadas de diseño para su elaboración , a su vez se tiene en cuenta la clasificación del tipo de suelo con el que se caracteriza el talud⁴, sus propiedades (densidad máxima seca, humedad óptima de compactación, ángulo de fricción y cohesión), obtenidas mediante los ensayos que se basan en las normas pertinentes para su determinación⁵ y por último se realiza la prueba de carga, para así poder observar de forma más detallada a través del tiempo el proceso de falla y asentamiento del modelo práctico del talud.

Los resultados obtenidos de la prueba de carga permiten generar la gráfica (esfuerzo vs deformación), la cual indica el asentamiento y esfuerzo máximo presentes en la masa de suelo, a su vez en el modelo práctico se ilustra la respectiva falla, que será clasificada por su tipo, dependiendo de la forma obtenida, si se desea realizar un análisis exhaustivo, se deberá obtener información más detallada que pueda controlar la mayor cantidad de parámetros para la caracterización de un talud, ya sea utilizando simulaciones en softwares especializados y/o una caracterización minuciosa de los mismos, comparando los resultados obtenidos y así implementar este modelo práctico para usos educativos.

⁴ MORA R. y ROJAS E., “Análisis del efecto del humedecimiento en la falla de talud en el km 240 + 000 del cuerpo A de la autopista Cuernavaca – Acapulco”, Ingeniería, vol. 3, pp. 17–28, 2009.

⁵ ESCOBAR TORO L. J. y VALENCIA GONZÁLES Y., “Análisis De Estabilidad Y Probabilidad De Falla De Dos Taludes De Suelo Tropical En La Autopista Medellín – Bogotá En El Tramo De Vía Entre Marinilla Y Santuario .”, Boletín de Ciencias de la Tierra, vol. 31, pp. 51–64, 2012.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar un prototipo a escala que permita analizar de manera cualitativa el comportamiento de un talud.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

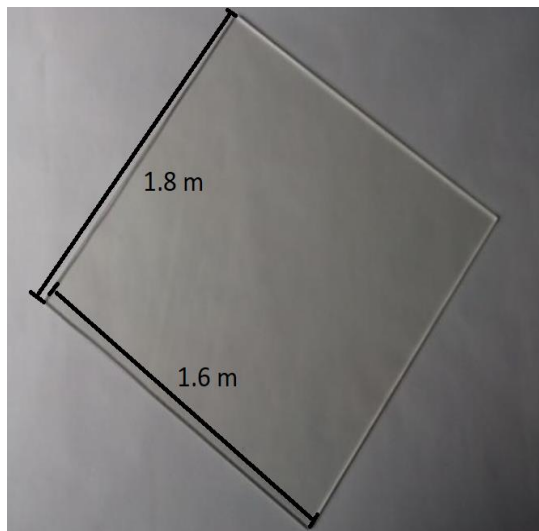
- Recopilar información bibliográfica a cerca de modelos prácticos de estabilidad de taludes que permita elegir el prototipo adecuado para la aplicación del proyecto.
- Proponer el modelo práctico con base en la información recopilada, en la cual se evidencie de forma práctica el comportamiento del talud mediante el análisis pertinente.
- Elaborar el modelo elegido para el talud propuesto, teniendo en cuenta los materiales a emplear, el tipo de suelo a caracterizar y su respectivo proceso de falla.
- Realizar los ensayos de carga al modelo práctico en el laboratorio, teniendo en cuenta su respectivo análisis del proceso de falla del talud y la respectiva toma de datos de los resultados obtenidos.

2. METODOLOGÍA

2.1 MATERIALES

2.1.1 Lámina de acrílico Lámina de acrílico adquirida en la empresa Acrílicos&Metales Metalcril ubicada en la ciudad de Bucaramanga, Santander; con dimensiones de 15 (mm) de espesor, 1.8 (m) de largo x 1.6 (m) de ancho ver (Figura 1), aspecto transparente, una de sus propiedades mecánicas significativas es la resistencia a altas presiones⁶, con este material se va a realizar el modelo práctico del talud.

Figura 1. Lámina de acrílico de espesor (15 mm).



2.1.2 Suelo extraído Material compuesto en diferentes proporciones por partículas finas y gruesas, extraído de la excavación realizada para la construcción del edificio de ingeniería mecánica en la Universidad Industrial de Santander, ubicada en la

⁶ ACRILICO Y POLICARBONATO Propiedades del acrílico. [En línea]. Disponible en: <http://www.acrilico-y-policarbonato.com/acrilico-propiedades.html>

ciudad de Bucaramanga ver (Figura 2). La cantidad requerida para la elaboración del talud en el modelo práctico fue de 80 (Kg) de suelo con una humedad en campo del 7,5%.

Figura 2. Suelo extraído de la excavación, Edificio de Ingeniería Mecánica.



2.2 ELABORACIÓN DEL MODELO FÍSICO

Para llevar a cabo la elaboración y caracterización del modelo físico se tienen en cuenta tres etapas: Elaborar la urna de acrílico basándose en su respectivo diseño para cumplir con la función asignada, caracterizar el suelo extraído, teniendo en cuenta los ensayos (Granulometría, Proctor modificado, Límites de Atterberg y Corte directo) a realizar apoyándose en las normas que rigen cada uno de ellos, realizar el modelo físico del talud propuesto y cargarlo mediante la máquina hidráulica universal de ensayos mecánicos " MTS Single Ended Actuator" ver (Figura 3).

Figura 3. Máquina hidráulica universal de ensayos mecánicos " MTS Single Ended Actuator".



2.2.1 Elaboración de la urna de acrílico La urna de acrílico se elaboró con la ayuda de la empresa Acrílicos&Metales Metalcristal, que permitió el uso de sus equipos y trabajadores, este proceso se dividió en diferentes etapas, las cuales serán descritas a continuación:

Se utiliza una sierra eléctrica de hoja circular de 7 ¼ (pulgada) con 36 dientes marca DeWalt, para realizar el respectivo corte de la lámina de acrílico basándonos en el diseño de la urna, la cual tendrá unas dimensiones de 50 (cm) x 30 (cm) x 65 (cm) refiriéndose a su alto, ancho y profundidad, se desarrolla este procedimiento para la base y paredes de la urna ver (Figura 4).

Figura 4. Proceso de Corte lámina de acrílico con la sierra eléctrica



Luego de finalizar el respectivo corte de la lámina, se realiza el proceso de lijar y raspar cada una de las secciones de la urna, para corregir cualquier imperfección generada en el paso anterior y así evitar problemas que puedan ocurrir en el proceso de ensamble ver (Figura 5).

Figura 5. Proceso de lijar y raspar las secciones que conforman la urna.



Para terminar la elaboración de la urna, se procede a realizar el ensamble de cada una de las secciones, para ello se utiliza cloruro de metileno que actúa como agente adherente entre las partes ver (Figura 6).

Figura 6. Cloruro de metileno agente adherente entre las secciones de lámina.



El cloruro de metileno se aplica en todo el perímetro de las secciones de lámina con una jeringa de aguja de 5 (mm), se procede a dejar secar durante 24 horas para que adquiera rigidez y estabilidad entre ellas ver (Figura 7).

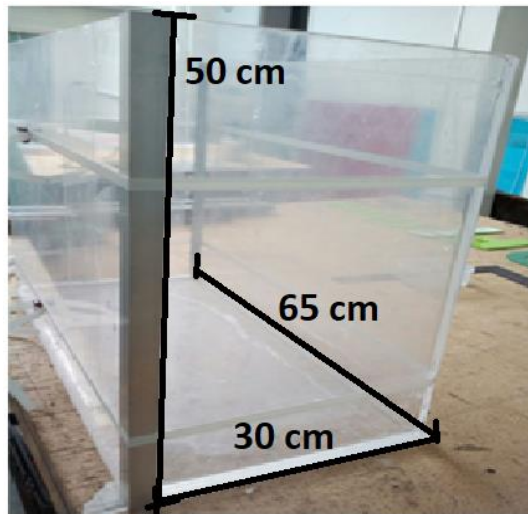
Figura 7. Aplicación del cloruro de metileno a las secciones de lámina



Finalizado el proceso de ensamble, se realiza el termo-formado en las esquinas de la urna, este método consiste en utilizar una pistola de calor a una temperatura óptima entre los 163°C y los 176°C, en la cual el acrílico adquiere una textura suave

y flexible, que permite que sea moldeado para darle cualquier forma deseada⁷, en este caso se optó por una forma curva que formará un solo elemento en las esquinas para evitar fracturas o fisuras, debido a las altas cargas a las que será sometido en las uniones y así minimizar los puntos frágiles de la urna, se deja enfriar durante 6 horas para recuperar la rigidez original del material, se refuerza con dos perfiles de aluminio con ángulo de 90° grados para proporcionarle mayor resistencia ver (Figura 8).

Figura 8. Ensamble, termo-formado y refuerzo de la urna de acrílico



Finalmente, la urna quedó como se muestra ver (Figura 9), se utilizaron abrazaderas de acero inoxidable para brindarle mayor resistencia al acrílico y así evitar la expansión en sus caras laterales debido a la alta carga que será sometido.

⁷ Ibíd.

Figura 9. Urna de acrílico para el modelo práctico del talud.



2.3 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO EXTRAÍDO

La caracterización del suelo se basa en realizar 4 ensayos, Determinación de tamaños de partículas, Límites de Atterberg, Proctor Modificado y Corte directo, guiándose de las normas estipuladas por el INVIAS (Instituto Nacional de Vías)⁸, que permiten la elaboración del talud en el modelo práctico.

2.3.1 Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos La realización de este ensayo permite la determinación de la distribución de tamaños de las partículas del suelo⁹, este proceso estará guiado por la norma I.N.V E-123-13¹⁰, Los resultados obtenidos del ensayo de granulometría al suelo en estudio,

⁸ INVIAS “Portal Web, Instituto Nacional De Vías”. [En línea]. Disponible en: <https://www.invias.gov.co/>

⁹ NARSILIO G. A. y SANTAMARINA C., “Clasificación de suelos: fundamento físico, prácticas actuales y recomendaciones”, Georgia Institute of Technology, vol. 2, p. 18, 2008

¹⁰ I.N.V.E–123-07, “Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos”, núm. 200, pp. 2–7, 2013.

muestran la distribución en porcentaje y peso del material retenido en cada uno de los tamices utilizados para este análisis, como se observa ver (Tabla 1).

Tabla 1. Distribución granulométrica del suelo en los tamices

PESO MUESTRA (gr)		700,0			
PESO MUESTRA LAVADA POR TAMIZ N° 200 (gr)		552,0			
PESO LAVADO PASA TAMIZ N° 200 (gr)		148,0			
TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO			Pasa (%)
		Retenido		Acumulado (%)	
		Parcial (gr)	Parcial (%)		
3"	76,2	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
2"	50,8	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
1 1/2"	38,10	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
1"	25,40	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
3/4"	19,05	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
1/2"	12,70	9,3	1,33%	1,33%	98,67%
3/8"	9,52	11,1	1,59%	2,91%	97,09%
N° 4	4,75	23,2	3,31%	6,23%	93,77%
N° 10	2,000	41,9	5,99%	12,21%	87,79%
N° 20	0,840	35,2	5,03%	17,24%	82,76%
N° 40	0,420	80,0	11,43%	28,67%	71,33%
N° 60	0,250	180,7	25,81%	54,49%	45,51%
N° 100	0,149	111,0	15,86%	70,34%	29,66%
N° 200	0,074	55,7	7,96%	78,30%	21,70%
Fondo	151,9	21,70%	100,00%	0,00%
		700,0	100,0%		

Teniendo en cuenta la distribución granulométrica del suelo ver (Tabla 1), este puede agruparse en tres grupos: Gravas (Diferencia entre el 100% de la muestra menos el porcentaje que pasa el tamiz N°4), Finos (Porcentaje que pasa el tamiz N°200) y Arenas (Diferencia entre el 100% de la muestra menos la sumatoria del porcentaje de gravas y finos)¹¹, estos resultados están enunciado en ver (Tabla 2).

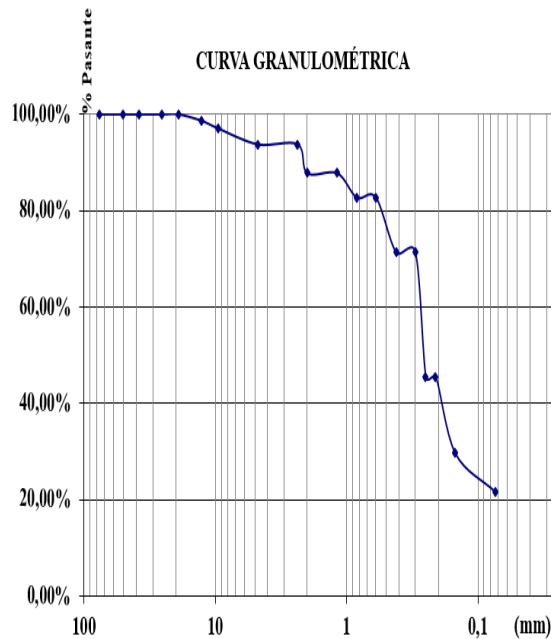
¹¹ GABRIELS D. y LOBO D., "Methods for determining granulometry and bulk density of the soil", Venesuelos, vol. 14, pp. 37–48, 2011

Tabla 2. Distribución de porcentaje de Gravas, Arenas y Finos del suelo.

GRAVAS = (100-% PASA 4)	
ARENAS = 100-(GRAVAS + FINOS)	
FINOS = % PASA TAMIZ 200	
GRAVAS:	6,23%
ARENAS:	72,07%
FINOS:	21,70%

Se presenta la respectiva gráfica de la curva granulométrica del suelo, en su ordenada, los valores del porcentaje que pasa cada uno de los tamices y en su abscisa, la abertura en milímetros de cada uno de ellos ver (Figura 10).

Figura 10. Gráfica de la curva granulométrica del suelo en estudio



2.3.2 Ensayo límites de Atterberg del suelo La aplicación de este ensayo permite la determinación de los límites de Atterberg: límite líquido, límite plástico y el índice de plasticidad¹².

¹² CALVELLO M., LASCO M., VASSALLO R., y DI MAIO C., "Compressibility and residual shear strength of smectitic clays: influence of pore aqueous solutions and organic solvents", Rivista Italiana Di Geotecnica, vol. 1, núm. Gennaio-Marzo, pp. 34-46, 2005

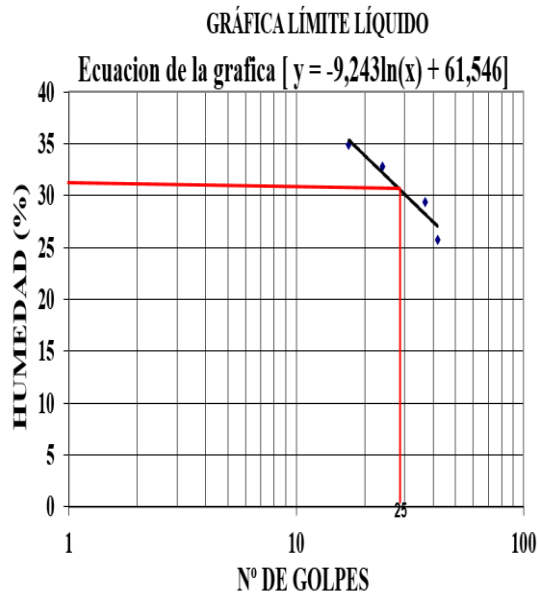
2.3.2.1 Límite líquido El ensayo a realizar estará guiado por la norma I.N.V E-125-13¹³, Los resultados obtenidos para la determinación del límite líquido, se enunciarán en ver (Tabla 3), corresponden al porcentaje de humedad presente en las 4 muestras de suelo seleccionadas.

Tabla 3. Resultados del ensayo para determinar el límite líquido del suelo.

LÍMITE PLÁSTICO				
Nº de cápsula	8	9	21	5
W (cápsula + suelo humedo) gramos	16.5	20.8	19.6	24.9
W (cápsula + suelo seco) gramos	13.4	17.1	16.4	21.5
W (cápsula) gramos	4.5	5.5	5.5	8.3
W (contenido agua)	3.1	3.7	3.2	3.4
W (suelo seco)	8.9	11.6	10.9	13.2
Porcentaje de humedad (W%)	34.83	31.90	29.36	25.76

Se procede a realizar la gráfica porcentaje de humedad vs número de golpes, teniendo en cuenta los valores que se pueden observar en ver (Tabla 3).

Figura 11. Gráfica Porcentaje de Humedad vs N° golpes (límite líquido)



¹³ I.N.V.E-125-13, "Determinación del límite líquido de los suelos", p. 13, 2013.

Se determina que el valor del límite líquido para el suelo en estudio es de 31.8%, expresado en porcentaje de humedad.

2.3.2.2 Límite Plástico Para determinar el límite plástico e índice de plasticidad del suelo en estudio, se empleó la norma I.N.V E-126-13¹⁴, los resultados obtenidos de este ensayo de laboratorio se enuncian en ver (Tabla 4), corresponden al porcentaje de humedad presente en las 2 muestras de suelo seleccionadas.

Tabla 4. Resultados del ensayo para determinar el límite plástico del suelo.

LÍMITE PLÁSTICO		
N° de cápsula	4	10
W (cápsula + suelo humedo) gramos	15.8	20.1
W (cápsula + suelo seco) gramos	14.6	17.6
W (cápsula) gramos	8.5	5.5
W (contenido agua)	1.2	2.5
W (suelo seco)	6.1	12.1
Porcentaje de humedad (W%)	19.67	20.66

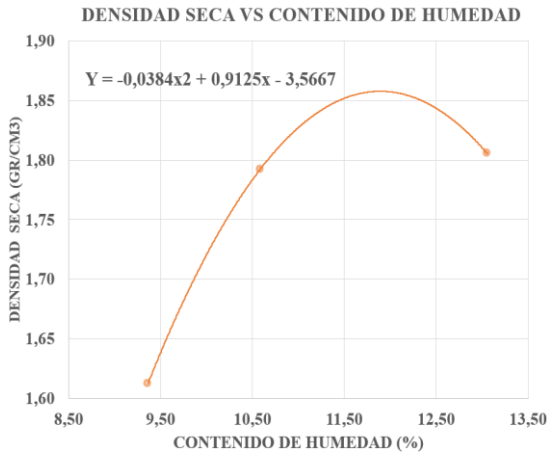
El límite plástico se obtiene de calcular el promedio del porcentaje de humedad (W%), teniendo en cuenta los valores en ver (Tabla 4), el valor determinado es de 20.2 %, se obtiene el respectivo índice de plasticidad, el cual es de 11.6%.

2.3.3 Ensayo Relaciones de humedad-Peso unitario seco en los suelos (Proctor Modificado) Este ensayo se emplea para determinar la relación entre la humedad y la masa unitaria de los suelos compactados (Proctor Modificado), se regirá por la norma I.N.V.E-142-13¹⁵. Se determinan los parámetros de la humedad óptima de compactación y la densidad máxima seca del suelo, como se observa en ver (Figura 12), donde el pico más alto de la gráfica corresponde a los valores de las variables establecidas.

¹⁴ I.N.V.E-126-13, “Límite plástico e índice de plasticidad de suelos”, p. 7, 2013.

¹⁵ I.N.V.E-142-13, “Relaciones de humedad – peso unitario seco en los suelos ” (ensayo modificado de compactación)

Figura 12. Gráfica Densidad seca (gr/cm³) vs Contenido de humedad (%).



Los respectivos valores de los parámetros en estudio serán:

- Humedad óptima de compactación: 12%
- Densidad máxima seca: 1.8537 gr/cm³

2.3.4 Ensayo de corte directo Este ensayo se emplea para la determinación de la resistencia de una muestra de suelo, sometida a esfuerzo o deformaciones que simulen las que existen en terreno producto de la aplicación de una carga, basándose en la norma I.N.V E-154-13¹⁶, los resultados obtenidos muestran los valores de esfuerzos cortantes y normales que se les han aplicado a las probetas, como se enuncia en ver (Tabla 5).

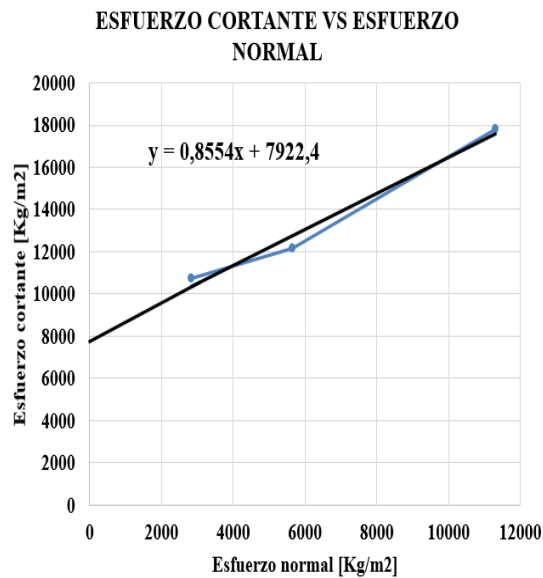
Tabla 5. Distribución de valores del ensayo de Corte Directo

PROBETA	CARGA VERTICAL (Kg)	CARGA HORIZONTAL MAXIMA (Kg)	ESFUERZO NORMAL (Kg/m ²)	ESFUERZO CORTANTE (Kg/m ²)
1	0,0028	30,4	2829,41	10751,78
2	0,0028	34,35	5658,83	12148,8
3	0,0028	50,35	11317,66	17807,63

¹⁶ I.N.V.E-154-13, “Determinación de la resistencia al corte método de corte directo (CD) (Consolidado Drenado)”

Teniendo en cuenta (Tabla 5), se determinan los parámetros del suelo en estudio como lo son: el ángulo de fricción y cohesión, realizando la gráfica de esfuerzo cortante vs esfuerzo normal como se observa en ver (Figura 13).

Figura 13. Gráfica Esfuerzo Cortante τ (kg/m²) vs Esfuerzo Normal σ (kg/m²).



Se realiza un ajuste a una ecuación de orden lineal a la gráfica y de acuerdo al criterio de fallo de Mohr-Coulomb ver (Figura 14) se puede obtener los parámetros que necesitamos.

Figura 14. Criterio de fallo Mohr-Coulomb.

$$\tau = \sigma \tan(\phi) + c$$

Fuente INGEAS S.A.S, n.d

Los respectivos valores de los parámetros en estudio serán:

- Ángulo de fricción del suelo: 41°
- Cohesión del suelo: 0.792 kg/cm²

2.3.5 Clasificación del tipo de suelo La clasificación del tipo de suelo, depende de los resultados obtenidos en los ensayos de los límites de Atterberg (líquido, plástico e índice de plasticidad), dichos valores son:

- Límite líquido (LL): 31.8%
- Límite plástico (LP): 20.2%
- Índice de plasticidad (IP): 11.6%

Se determina que el tipo de suelo en estudio es una arena arcillosa (SC)¹⁷. Las propiedades mecánicas de permeabilidad, resistencia al cortante, manejabilidad, entre otras, se observan en ver (Tabla 6).

Tabla 6. Propiedades mecánicas de las arenas arcillosas

TIPO DE SUELO	PERMEABILIDAD	RESISTENCIA A LA TUBIFICACION	RESITENCIA AL CORTANTE	COMPRESIBILIDAD	MANEJABILIDAD
SC	IMPERMEABLE	ALTA	ALTA A MEDIA	COMPRESIBILIDAD BAJA SI MAS DEL 60% DEL MATERIAL ES GRUESO (TAMAÑO SUPERIOR A LA MALLA NO.4), SI EL MATERIAL CONTIENE MENOS DEL 35% DE MATERIAL GRUESO, SE PUEDE ESTIMAR LOS ASENTAMIENTOS CON BASE EN LA COMPRESIBILIDAD DE FINOS.	BUENA A CORRECTA

Fuente Ingeas S.A.S

A continuación, se presenta los resultados obtenidos de la caracterización del suelo, como se puede observar en ver (Tabla 7).

¹⁷ GARZÓN ROCA J., GARRIDO DE LA TORRE M. E., HIDALGO SIGNES C., "Clasificación de un suelo según SUCS", 2017

Tabla 7. Resumen características del material

Características del material		Unidad
Tipo de suelo	Arena Arcillosa	SC
% Grava	6,23	%
% Arena	72,07	%
% Finos	21,7	%
Límite Líquido	31,8	%
Límite Plástico	20,2	%
Índice plasticidad	11,7	%
Densidad seca	1,85	gr/cm ³
Humedad Óptima	12	%
Angulo de Fricción	41	grados
Cohesión	0,79	kg/cm ²

2.4 DIMENSIONAMIENTO DEL MODELO A ESCALA DEL TALUD

El dimensionamiento de la pendiente del talud se propuso de acuerdo ver (Tabla 8), por tratarse de una arena arcillosa se escogió la relación 1.5H:1V. Las otras medidas se establecieron de acuerdo al tamaño de la urna y la relación, las cuales fueron largo 65 cm, ancho 30 cm, alto 35 cm.

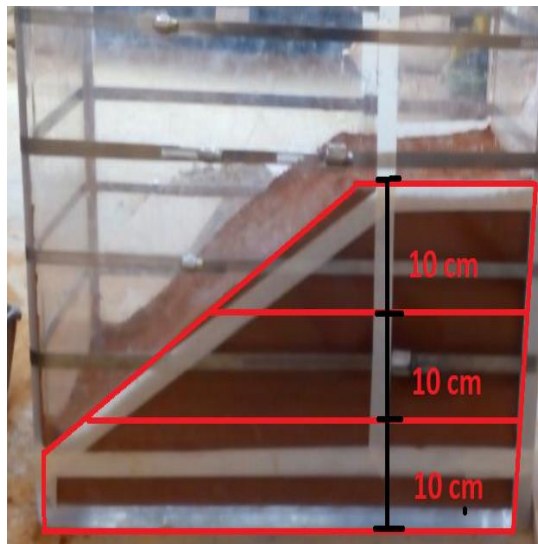
Tabla 8. Pendientes típicas para taludes en relleno

MATERIAL DE RELLENO	ALTURA DE RELLENO (m)	PENDIENTE
Arena o grava de buena calidad SW, GM, GC, GW, GP	Menos de 5 5 a 15	1.5H:1V a 1.8H:1V 1.8H:1V a 2H:1V
Arena de mala calidad SP	Menos de 10	1.8H:1V a 2H:1V
Material rocoso	Menos de 10 10 a 20	1.5H:1V a 1.8H:1V 1.8H:1V a 2H:1V
Suelos areno arcillosos de buena calidad	Menos de 5 5 a 10	1.5H:1V a 1.8H:1V 1.8H:1V a 2H:1V
Suelos arcillosos blandos	Menos de 5	1.8H:1V a 2H:1V

Fuente: SUAREZ DÍAZ

El suelo se compactó con 25 golpes en 3 capas de 10 cm de espesor c/u con la humedad obtenida del Proctor modificado, para este proceso se utilizó un compactador manual de placa manteniendo una energía constante para cada golpe de compactación, se utilizaron unos ejes en madera verticales para garantizar la relación de pendiente propuesta, la masa de suelo requerida para elaborar el talud fue de 63 [Kg], como se observa en ver (Figura 14).

Figura 14. Compactación del talud por capas de altura 10 cm



En el proceso de carga se aplicó una fuerza vertical en una superficie rectangular de 24 cm de largo por 30 cm de ancho, utilizando un protocolo de carga estático de 1 (mm/minuto) que proviene de la máquina "MTS Single Ended Actuator" ver (Figura 15), este evento se considera como un proceso de baja velocidad para esta máquina.

Figura 15. Zona de aplicación de la carga vertical



Se consideró el modelo práctico del talud como un sistema confinado, debido a su modo de ensamble ya que es un conjunto entre la urna de acrílico que posee un grosor considerable (15 mm) y las abrazaderas de acero inoxidable, que impiden la expansión lateral producida por los esfuerzos que se generan en el suelo.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 ANÁLISIS DE LA PRUEBA DE CARGA

Realizado el proceso de carga al modelo del talud, se obtiene la gráfica (esfuerzo vs deformación), como se ilustra en ver (Figura 16), se observa los valores correspondientes a las deformaciones y esfuerzos presentes en la masa de suelo.

Figura 16. Gráfica esfuerzo vs deformación.



Se observa en la gráfica ver (figura 17), diferentes etapas en el proceso las cuales se distribuyen en 3 zonas:

Zona I: Se observa una menor pendiente probablemente debido al acoplamiento entre el pistón de la máquina y la superficie del talud. La duración de este proceso fue de 22 minutos, una deformación máxima de 9.2 [mm] y un esfuerzo generado de 87 [kPa].

Zona II: Se observa un aumento en la pendiente de gráfica debido a esto se contempla la primera fractura por compresión de la masa de suelo, como se ilustra en ver (Figura 17). Este proceso tiene una duración de 13 minutos, una deformación máxima en la falla de 16 [mm] y un esfuerzo generado de 543 [kPa].

Figura 17. Fractura por compresión en la zona II



Zona III: Se observa una caída en la pendiente de la gráfica, también se presenta una falla en forma de cuña triangular con un ángulo de 90° [18], como se observa en ver (Figura 18). La duración de este proceso es de 4 minutos, una deformación máxima en la falla de 23.4 [mm] y un esfuerzo máximo generado de 1312 [kPa].

Figura 18. Falla en forma de cuña triangular con ángulo de 90° del talud



4. CONCLUSIONES

La poca información existente acerca de la realización de este tipo de modelos a escala hace que su elaboración sea compleja, debido a la influencia de diversos factores dentro del comportamiento de sus propiedades y características para poder representar un problema que se asemeje lo más posible a la realidad.

Se presentó una falla en forma de cuña triangular con un ángulo de 90° en el modelo práctico, debido principalmente al esfuerzo sometido dentro de la zona de aplicación generando un asentamiento de 23.4 [mm] en la corona del talud, realizando una comparación con otros modelos de taludes artificiales, se observó un patrón en este tipo de falla.

El tipo de falla observada en el modelo a escala se produce con menor frecuencia en el estudio de la estabilidad de taludes, generada principalmente por cuatro factores, la rigidez del suelo, el proceso de construcción del talud por capas, el confinamiento del sistema (urna-suelo) y a una mayor aplicación de carga en las esquinas de la corona del talud.

Al finalizar el proceso de falla, se verificó la humedad en el suelo, presentando una pérdida del 4% con respecto a la original dada por el ensayo de Proctor modificado y a su vez una disminución en su densidad máxima seca de 0.27%.

5. RECOMENDACIONES

Se recomienda obtener información más detallada que pueda controlar la mayor cantidad de parámetros para la caracterización de un talud, ya sea utilizando simulaciones en softwares especializados y/o caracterización minuciosa de los mismos, comparando los resultados obtenidos y así implementar este modelo práctico para usos educativos.

Se sugiere utilizar otras dimensiones en la urna de acrílico para disminuir el confinamiento del modelo y así obtener un análisis diferente en el proceso de falla del talud.

BIBLIOGRAFÍA

ACRILICO Y POLICARBONATO “Propiedades del acrílico”. [En línea]. Disponible en: <http://www.acrilico-y-policarbonato.com/acrilico-propiedades.html>.

AZZONI A., LA BARBERA G., ZANINETTI A., “Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model”. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech Abstr.*, pp. 709-724, 1995.

CALVELLO M., LASCO M., VASSALLO R., y DI MAIO C., “Compressibility and residual shear strength of smectitic clays: influence of pore aqueous solutions and organic solvents”, *Rivista Italiana Di Geotecnica*, vol. 1, núm. Gennaio-Marzo, pp. 34–46, 2005.

ESCOBAR TORO L. J. y VALENCIA GONZÁLES Y., “Análisis De Estabilidad Y Probabilidad De Falla De Dos Taludes De Suelo Tropical En La Autopista Medellín – Bogotá En El Tramo De Vía Entre Marinilla Y Santuario .”, *Boletín de Ciencias de la Tierra*, vol. 31, pp. 51–64, 2012.

GABRIELS D. y LOBO D., “Methods for determining granulometry and bulk density of the soil”, *Venesuelos*, vol. 14, pp. 37–48, 2011.

GARZÓN ROCA J., GARRIDO DE LA TORRE M. E., HIDALGO SIGNES C., “Clasificación de un suelo según SUCS”, 2017.

I.N.V.E–123-07, “Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos”, núm. 200, pp. 2–7, 2013.

I.N.V.E–125-13, “Determinación del límite líquido de los suelos”, p. 13, 2013.

I.N.V.E–126-13, “Límite plástico e índice de plasticidad de suelos”, p. 7, 2013.

I.N.V.E-142-13, “Relaciones de humedad – peso unitario seco en los suelos ”
(ensayo modificado de compactación).

I.N.V.E-154-13, “Determinacion de la resistencia al corte metodo de corte directo
(CD) (Consolidado Drenado)” .

INVIAS “Portal Web, Instituto Nacional De Vías”. [En línea]. Disponible en:
<https://www.invias.gov.co/>.

LEROUEIL S., LOCAT J., VAUNAT J., PICARELLI L., FAURE R., “Geotechnical
characterization of slope movements”. Proceedings of the Seventh International
Symposium on landslides, pp 53-74, 1998

MILÁN Y. V., CASTRO R. P., LACABA y R. G., “Evaluación De Riesgos Por
Deslizamiento En Taludes Y Laderas Del Sector Este Del Municipio Moa”, 2011.

MORA R. y ROJAS E., “Análisis del efecto del humedecimiento en la falla de talud
en el km 240 + 000 del cuerpo A de la autopista Cuernavaca – Acapulco”, Ingeniería,
vol. 3, pp. 17–28, 2009.

NARSILIO G. A. y SANTAMARINA C., “Clasificación de suelos: fundamento físico,
prácticas actuales y recomendaciones”, Georgia Institute of Technology, vol. 2, p.
18, 2008.

SUAREZ J., "Capítulo 10. Control de erosión en taludes y obras de ingeniería", Control de erosión en zonas tropicales, vol. Tomo 1, núm. Geotecnia, pp. 351–372, 1989.

VARNES D. J., "Slope movement types and processes. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.)", Transportation and Road Research Board, 1978.