

# Variación de pendiente del talud aguas abajo en presas de tierra con suelo de la formación Capdevilla en estado parcialmente saturado

**Isaida Flores Berenguer**

[isaidafb@civil.cujae.edu.cu](mailto:isaidafb@civil.cujae.edu.cu)

**Jenny García Tristán**

[jenny@civil.cujae.edu.cu](mailto:jenny@civil.cujae.edu.cu)

**Yoermes González Haramboure**

[yoermes@civil.cujae.edu.cu](mailto:yoermes@civil.cujae.edu.cu)

Especialidad: Ingeniería civil

Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE).

**Resumen:** Se realizó un análisis estadístico luego de variar la pendiente del talud aguas abajo en una presa de tierra de 20 m de altura con colchón de drenaje y sin contemplar la cimentación de esta, considerando el suelo saturado y parcialmente saturado. Se presentó un caso de estudio para el suelo de la formación cubana Capdevilla, y a partir de utilizar las herramientas SEEP/W y SLOPE/W, del programa GeoStudio 2012 y el programa Statgraphics (versión 5), se obtuvo la línea de corriente superior de la red de flujo y el factor de seguridad del talud aguas abajo para diversas combinaciones de cohesión y ángulo de fricción internas fijadas por el programa estadístico. Se realiza un posterior análisis donde se observa que es posible aumentar la pendiente del talud aguas abajo para el caso planteado y que el factor más influyente en la estabilidad es la cohesión del suelo.

**Palabras clave:** estabilidad de taludes; curva característica; suelo parcialmente saturado; presas de tierra.

## Downstream slope variation on an earth dams from Capdevilla soil formation in partially saturated state

**Abstract:** After varying the downstream slope in a 20 m high earth dam with a drainage mattress and without considering its foundation, considering the saturated and partially saturated soil, a statistical analysis was carried out. A case study was presented for the soil of the Cuban Capdevilla formation, and from the use of the SEEP / W and SLOPE / W tools, from the GeoStudio 2012 program and the Statgraphics program (version 5); the upper flow line was obtained from flow network and the safety factor of the downstream slope for various combinations of internal cohesion and friction angle fixed by the statistical program. A subsequent analysis is carried out where it is observed that increasing the downstream slope is possible for the proposed case and the stability is the most influential factor in the cohesion of the soil.

**Keywords:** slope stability; characteristic curve; partially saturated soil; Earth dams

## Introducción

La estabilidad de taludes en presas de tierra es uno de los problemas fundamentales que existen dentro de la mecánica de suelos a nivel internacional. Dado que las presas de tierra cumplen diferentes funciones dentro del marco económico y social de cualquier país, resulta necesario obtener diseños racionales y seguros de estas. En los últimos años, la mecánica de suelos parcialmente saturados ha venido cobrando importancia y su aplicación se impone en países con climas tropicales, como Cuba, donde el suelo difícilmente se encuentra en estado de saturación total, siendo las presas de tierra uno de los casos principales para esta posible aplicación.

Los suelos parcialmente saturados se componen por tres fases: la sólida, la líquida y la gaseosa, de forma tal, que los espacios vacíos entre partículas se encuentran ocupados por aire y agua. En los suelos parcialmente saturados aparece un nuevo parámetro que es necesario medir: la succión. La manera de obtener la succión y caracterizar a los suelos parcialmente saturados es a través de su curva característica, a partir de la cual se modifican los parámetros de resistencia, tales como la cohesión y el ángulo de fricción interna. La succión puede hacer variar el volumen del suelo, sin embargo, su magnitud depende de la humedad del medio poroso (Alfaro, 2008).

Debajo del nivel freático las presiones intersticiales (o presión neutra) serán positivas. Inmediatamente arriba del nivel freático, en la zona no saturada, ocurre una camada capilar con un grado de saturación de aproximadamente 100 % y que puede tener una espesura variable de hasta 10 m en función del tipo de suelo. Arriba de esa capa el suelo presenta presiones intersticiales o de poro negativas y que resultan de la diferencia de las presiones del aire ( $u_a$ ) y del agua ( $u_w$ ). La diferencia entre esas presiones ( $u_a - u_w$ ) es llamada de succión matricial y se corresponde a una de las dos variables de tensión que describen el comportamiento de un suelo no saturado (Alfaro, 2008).

Esta investigación tiene por objetivo realizar una variación en la pendiente del talud aguas abajo de una presa de tierra homogénea, de 20 m de altura, conformada por el suelo de la formación Capdevila. Esto para definir, a partir de análisis estadísticos, si la variación de pendiente propuesta garantiza la constructibilidad y la estabilidad del talud aguas abajo, luego de fijar un factor de seguridad mayor o igual a 1, variando la cohesión y el ángulo de fricción interna del suelo en rangos preestablecidos en

investigaciones realizadas previamente y combinándolos entre ellos; considerando, a su vez, los estados saturados y parcialmente saturados en cada caso.

### **Bases teóricas**

La succión se ha reconocido como una variable fundamental en la comprensión de la mecánica de suelos parcialmente saturados (Pérez, 2001). La succión está asociada a la facilidad de un suelo determinado de absorber o retener el agua de sus poros y genera una tensión interna en la masa de suelo. Es una de las variables principales en el estudio esfuerzo-deformación de los suelos. Como está asociada al fenómeno de la capilaridad es mucho más apreciable en suelos con mayor contenido de finos, aproximadamente del 10-15 % de su peso total.

La succión total ( $S_T$ ) está formada por dos componentes: la succión matricial ( $S_m$ ) y la succión osmótica ( $S_o$ ). La primera está asociada con las fuerzas capilares que se presentan entre la matriz de suelo y el agua. La succión osmótica, por su parte, se debe a la difusión de solutos en el suelo. La magnitud de la succión total corresponde al trabajo total de las fuerzas de capilaridad, absorción y ósmosis.

Por otro lado, la succión matricial ( $S_m$ ) es igual a la succión total cuando el agua del suelo es idéntica al agua pura o a la solución con la misma composición del agua del suelo, quedando apenas el efecto de la matriz del suelo (capilaridad y adsorción); por lo que puede ser definida como la diferencia existente entre la presión de aire de poros ( $u_a$ ) y la presión de agua de poros ( $u_w$ ).

La succión osmótica es igual a la succión total cuando el suelo se encuentra saturado, quiere decir, cuando la componente matricial no ocurre, actuando solo el efecto de la concentración de los solutos.

Se ha estudiado experimentalmente el efecto que tienen los componentes de la succión (osmótica y matricial) sobre el comportamiento del suelo. Se concluye que es representativa la influencia de la succión matricial sobre la respuesta deformacional y resistente del suelo, no siendo así el efecto de la succión osmótica (Alanís, 2012; Fredlund, 2003; Tristán, 2015; Mohamed, Vanapalli & Saatcioglu, 2011).

La curva característica del suelo es una relación entre la cantidad de agua en el suelo y la succión. La cantidad de agua en el suelo generalmente se cuantifica en términos de

humedad gravimétrica ( $\omega$ ), grado de saturación ( $S_r$ ) o humedad volumétrica ( $\theta$ ) (Fredlund, 2003).

La succión en los suelos está estrechamente relacionada con su humedad y su capacidad de absorción, por ende, el origen de la obtención de la curva característica del suelo se debe a la necesidad de vincular la succión y la humedad de equilibrio presente en los suelos. A partir de la obtención de la curva característica es posible deducir que para valores bajos del grado de saturación la succión adopta valores altos, mientras que cuando nos acercamos a la saturación del suelo la succión va desapareciendo.

La curva de retención del suelo puede expresarse por medio del contenido de humedad ( $\omega$ ), por el grado de saturación ( $S_r$ ), o por el índice de vacíos ocupado por el agua ( $e$ ). Esta puede ser definida como la variación de la succión con la capacidad de retención del agua en los macro y micro poros del suelo. Los valores corresponden al tipo de suelo, con una determinada densidad, y la naturaleza de esa relación está directamente asociada a la granulometría y mineralogía del suelo (Fredlund & Rahardjo, 1993).

El método del papel de filtro mide la succión total y matricial. Mediante este se determina el potencial del agua en el suelo por medio del potencial del agua retenida en un medio poroso (papel de filtro). La muestra de suelo y el papel de filtro son presentados a la humedad en equilibrio, ya sea en contacto directo (succión matricial) o indirecto (succión total), en un ambiente a temperatura constante.

En este caso, un papel de filtro con características de retención conocidas es colocado en un recipiente hermético junto con una muestra de suelo. Al alcanzar el equilibrio se tendrá que el potencial de la humedad en el filtro es igual al potencial de la humedad del suelo. El contacto directo entre el papel de filtro y el suelo permite que el agua en fase líquida y los solutos se puedan intercambiar de manera libre, mientras que la separación entre el papel de filtro y el suelo hay una barrera de vapor de agua, que evita el movimiento del soluto. Las curvas de calibración del método se obtienen generalmente de los procesos de humedecimiento y secado del papel de filtro mediante la transferencia de vapor. Usando las curvas de retención, es posible evaluar el potencial de la humedad del suelo, por medio de la medida gravimétrica del filtro.

## Materiales y métodos

El problema planteado atiende a la necesidad de reducir los costos en movimiento de tierra en la construcción de presas de tierra. Como caso de estudio se plantea una presa homogénea, de 20 m de altura, sin berma y como tipo de drenaje se supone el colchón de drenaje. No se considera la cimentación de la presa en ninguno de los análisis. El suelo seleccionado fue el suelo arcilloso de la formación Capdevila de La Habana (Tristá, 2015). Las características iniciales del modelo definido se muestran en las Tablas 1, 2, 3 y 4.

Tabla 1. Características geométricas del modelo

Altura de cortina	Pendiente aguas arriba	Pendiente aguas abajo	Ancho de corona	Nivel de agua máximo
20 m	1:2,5	1:2	5 m	17 m

Tabla 2. Características geométricas del colchón de drenaje

Longitud	Espesor propuesto
60 m	1 m

Tabla 3. Datos del suelo de la formación Capdevila

Peso específico húmedo ( $\gamma_f$ )	17,6 kN/m <sup>3</sup>
Rango de cohesión (c)	0-20 kPa
Rango de fricción interna ( $\phi$ )	15-30°
Permeabilidad	1,16e-006 m/seg

Dado que la cohesión y el ángulo de fricción interna del suelo se muestran en rangos, se empleó un diseño de experimentos de tipo 3<sup>2</sup>, donde las variables independientes son la cohesión y el ángulo de fricción del suelo y la variable dependiente es el factor de seguridad (*FS*) del talud aguas abajo de la presa de tierra. Se definió que para que la presa se considere estable y segura el *FS* debe ser mayor o igual a 1.

Para el colchón de drenaje se consideró la utilización de una grava de permeabilidad infinita, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 4. Datos del colchón de drenaje

Peso específico húmedo ( $\gamma_f$ )	21 kN/m <sup>3</sup>
Cohesión (c)	0 kPa
Fricción interna ( $\phi$ )	48°
Permeabilidad	10 m/seg

Para la realización del ensayo de succión mediante el método indirecto del papel de filtro se utilizó la norma (ASTM-D5298, 2003). Las curvas características para el suelo de estudio se muestran en la Figura 1 (Tristá, 2015).

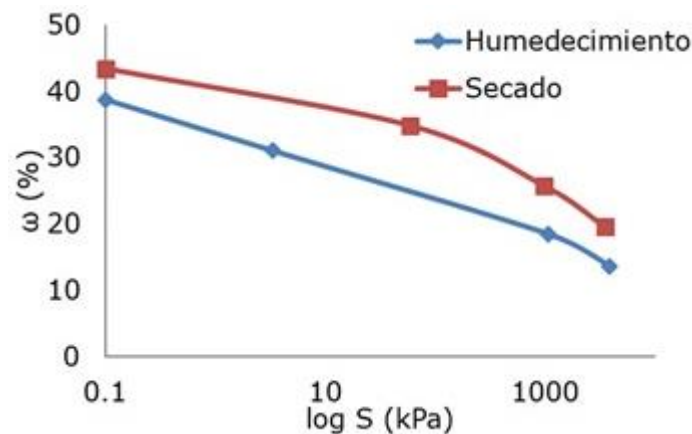


Figura 1. Curva característica del suelo de la formación Capdevilla.

En el análisis de la estabilidad de taludes se utiliza el método de Morgenstern-Price, asumiendo que existe una función que relaciona las fuerzas de cortante y las fuerzas normales entre dovelas. Se establece una relación entre los componentes de las fuerzas de interconexión como se muestra en la ecuación.

$$X = \lambda f(x)E$$

Donde X, E son las fuerzas de interconexión relacionadas entre sí y  $\lambda$  es el factor de escala.

La función  $f(x)$  se selecciona de forma arbitraria y su influencia es poco sustancial. La particularidad del método es que la masa se subdivide en franjas infinitésimas, a las cuales se imponen las ecuaciones de equilibrio en la traslación horizontal y vertical y de rotura en la base de las franjas. A partir de este punto se obtiene la ecuación de fuerzas:

$$c' \left( \sec^2 \frac{\alpha}{FS} \right) + \tan \phi' \left( \frac{dW}{dx} - \frac{dX}{dx} - \tan \alpha \frac{dE}{dx} - \sec \alpha \frac{dU}{dx} \right) = \frac{dE}{dx} - \tan \alpha \left( \frac{dX}{dx} - \frac{dW}{dx} \right)$$

Donde FS es el factor de seguridad, dW es el peso de la franja infinitésima, dU son las presiones neutras en la base,  $c'$  es la cohesión efectiva,  $\phi'$  es el ángulo de fricción interna efectivo y  $\alpha$  es la inclinación de la base de la dovela respecto a la horizontal.

Se escribe otra ecuación de equilibrio, en este caso, de momento, proponiendo una restricción de la rotación con respecto a la base:

$$X = \frac{d(E_y)}{dx} - \gamma \frac{dE}{dx}$$

Este método satisface todas las ecuaciones de equilibrio y puede aplicarse a cualquier superficie de deslizamiento.

El grupo de programas comprendidos dentro del GeoStudio 2012 se basan en diversos análisis donde el suelo es el componente fundamental. En este caso se utilizan dos de sus herramientas: el SEEP/W y el SLOPE/W.

### Resultados y discusión

Inicialmente, se realizó el análisis para el modelo con la pendiente 1:2 con suelo de la formación Capdevila, tanto en estado saturado como al incorporar la rama en humedecimiento de la curva característica. La presa inicial propuesta se muestra en la Figura 2.

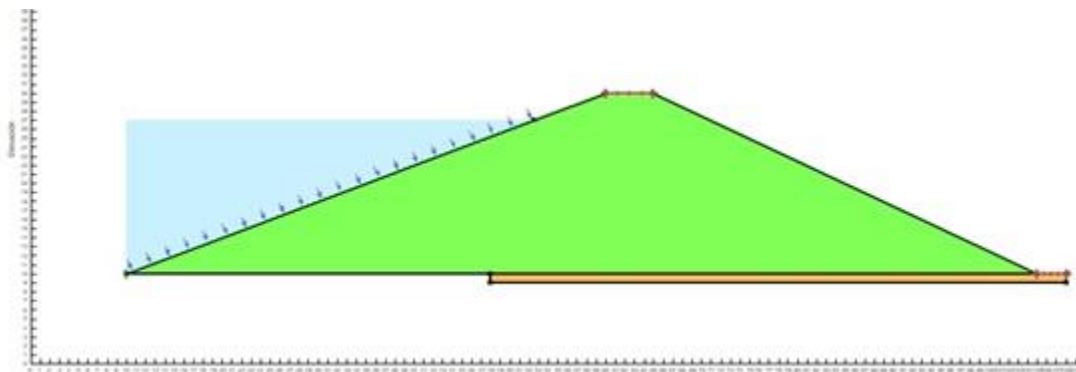


Figura 2. Presa inicial con pendiente del talud aguas abajo de 1:2.

Una vez realizada la modelación se obtuvieron los resultados que se muestran en las Figuras 3 y 4.



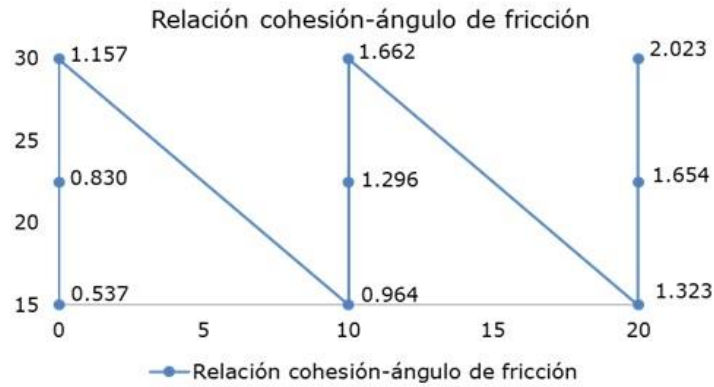


Figura 3. Combinaciones del suelo Capdevila saturado con pendiente 1:2.

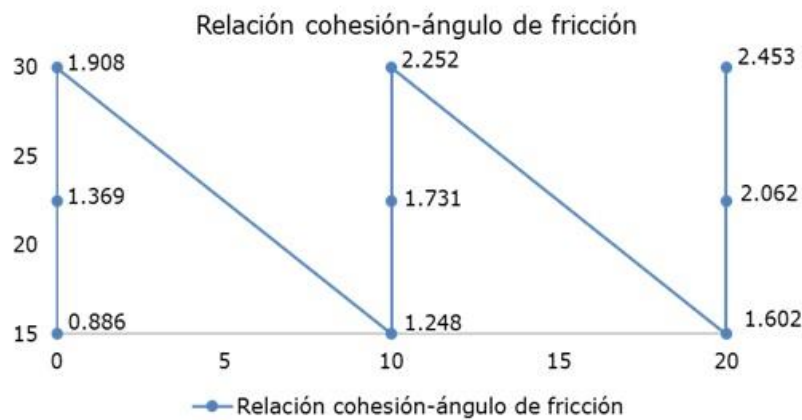


Figura 4. Combinaciones del suelo Capdevila parcialmente saturado con pendiente 1:2.

En las figuras anteriores se observa que, para las mismas combinaciones planteadas, existe un incremento del factor de seguridad obtenido en estado parcialmente saturado respecto al conseguido en estado saturado; este incremento se muestra en la Figura 5.

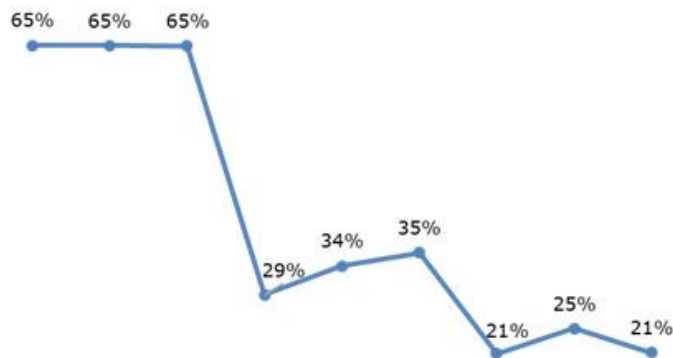


Figura 5. Incremento porcentual del factor de seguridad saturado y parcialmente saturado del suelo Capdevila con pendiente 1:2.

A medida que aumenta la cohesión del suelo, el incremento del factor de seguridad entre los dos estados se reduce y su valor aumenta significativamente. La influencia de las diferentes variables que intervienen en el análisis se muestra en las Figuras 6 y 7.

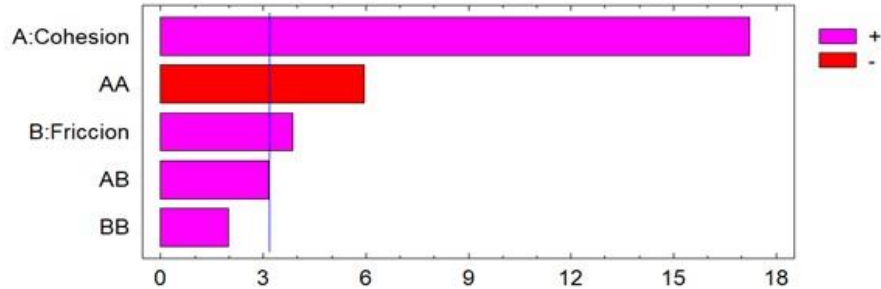


Figura 6. Diagrama de Pareto para el suelo de la formación Capdevila saturado con pendiente 1:2.

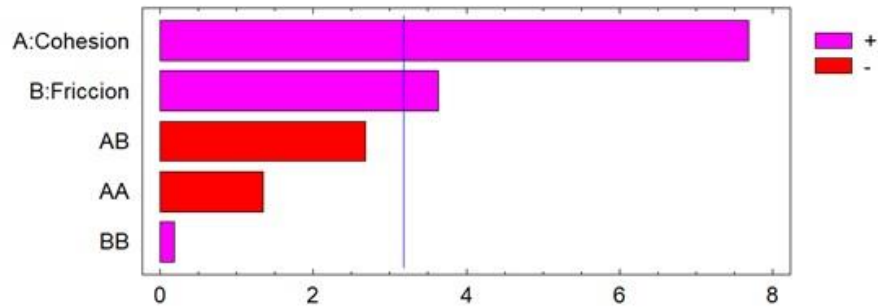


Figura 7. Diagrama de Pareto para el suelo de la formación Capdevilla parcialmente saturado con pendiente 1:2.

Los diagramas de Pareto muestran cada uno de los efectos estimados en disminución del orden de magnitud. La longitud de cada barra es proporcional al efecto estandarizado, que es el efecto estimado dividido por su error estándar. La línea vertical se puede usar para juzgar qué efectos son estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95 %. Para el suelo saturado existen tres variables significativas, mientras que para el suelo parcialmente saturado son dos las representativas. En ambos casos, la variable más influyente es la cohesión.

Luego de realizar la modelación de la presa con pendiente del talud aguas debajo de 1:1.5 el nuevo perfil se muestra en la Figura 8.

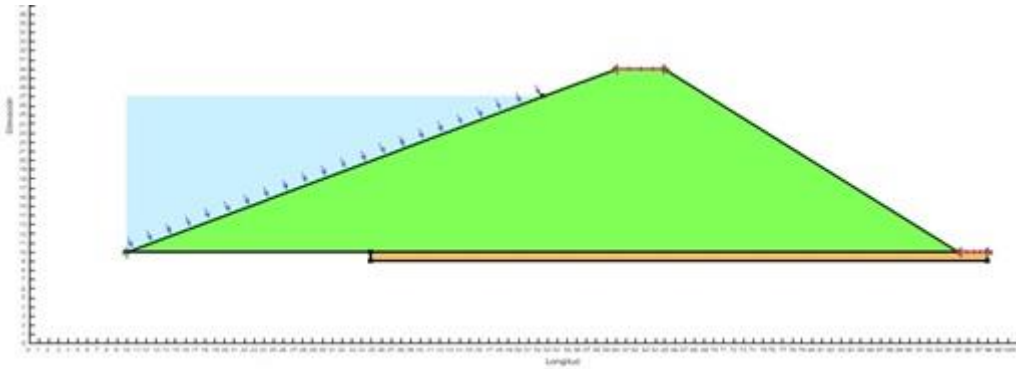


Figura 8. Presa con pendiente del talud aguas abajo de 1:1.5.

Los resultados obtenidos se exponen en las Figuras 9 y 10.

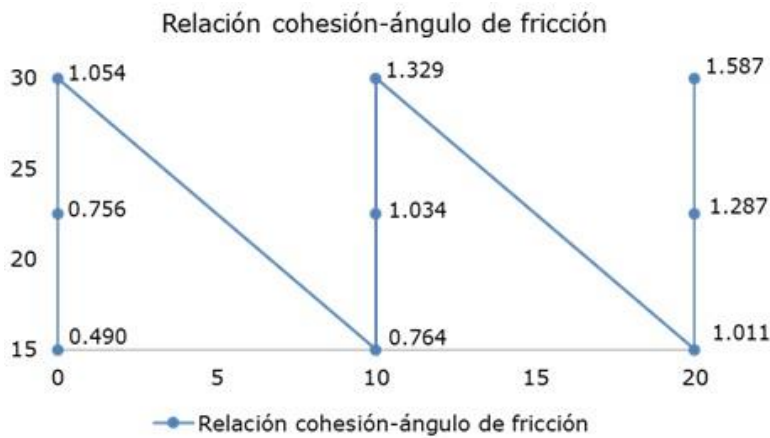


Figura 9. Combinaciones del suelo Capdevila saturado con pendiente 1:1.5.

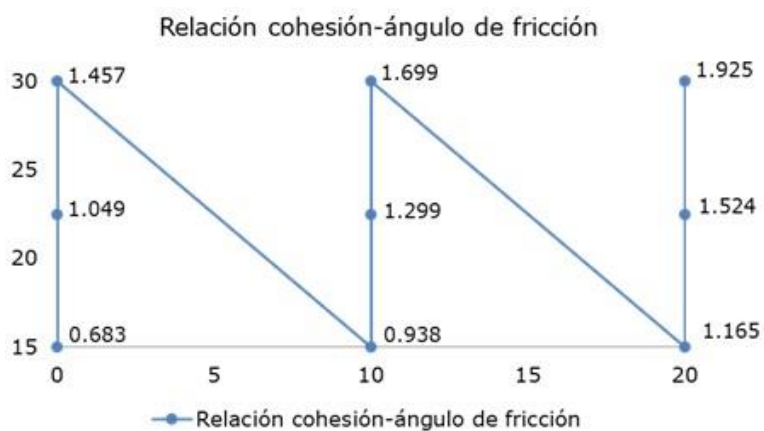


Figura 10. Combinaciones del suelo Capdevila parcialmente saturado con pendiente 1:1.5.

En las figuras anteriores se observa que el suelo mantiene el mismo comportamiento que en los casos con pendiente 1:2, apreciándose un incremento del factor de

seguridad obtenido en estado parcialmente saturado respecto al obtenido en estado saturado; dicho incremento se muestra en la Figura 11.

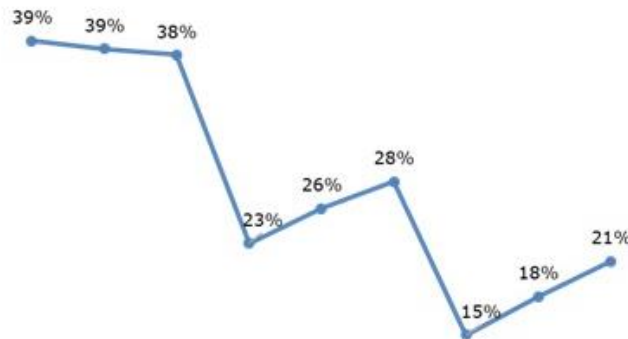


Figura 11. Incremento porcentual del factor de seguridad saturado y parcialmente saturado del suelo Capdevila con pendiente 1:1.5.

A medida que aumenta la cohesión del suelo, el incremento del factor de seguridad entre los dos estados se reduce y su valor aumenta significativamente. La influencia de las diferentes variables que intervienen en el análisis se muestra en las Figuras 12 y 13.

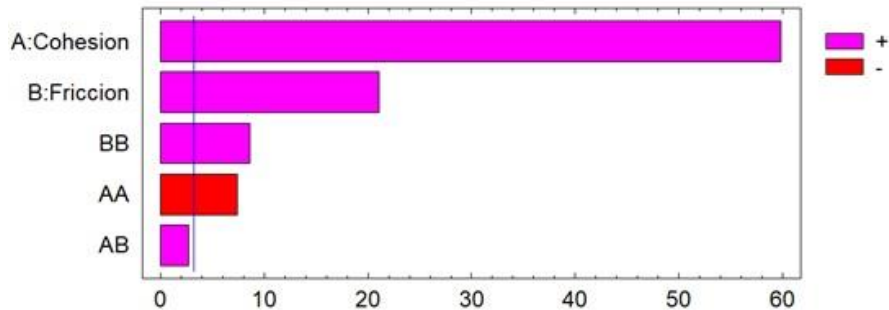


Figura 12. Diagrama de Pareto para el suelo de la formación Capdevila saturado con pendiente 1:1.5.

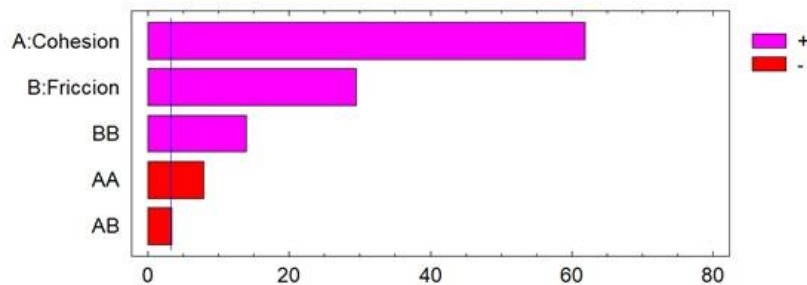


Figura 13. Diagrama de Pareto para el suelo de la formación Capdevila parcialmente saturado con pendiente 1:1.5.

Al modificar la pendiente se aprecia que en estos diagramas de Pareto, al menos cuatro efectos son estadísticamente significativos, con un 95 % de nivel de confianza.

### **Conclusiones**

Para el suelo de la formación Capdevila la variable más influyente en el caso de la estabilidad del talud analizado es la cohesión, por lo que a medida que esta sea mayor en un suelo, también será mayor el factor de seguridad obtenido.

Aunque la cohesión es el parámetro con mayor influencia se aprecia que para todos los casos existe más de una variable preponderante, aunque en ninguno de los casos analizados es significativa la combinación cohesión-fricción.

Se observa un incremento del factor de seguridad para ambas pendientes (1:2 y 1:1.5) al incluir la rama en humedecimiento de la curva característica del suelo, comportamiento típico de las estructuras vinculadas al suelo cuando se incluye el estado de saturación parcial de estos en el análisis.

Con la aplicación de las leyes de la mecánica de suelos parcialmente saturado es posible reducir la pendiente del talud aguas abajo para una presa de tierra de 20 m de altura, constituida con el suelo de la formación Capdevila. Se obtiene en su mayoría factores de seguridad superiores a 1, afectado solamente cuando los valores de cohesión y ángulo de fricción interna del suelo son demasiado bajos.

### **Referencias bibliográficas**

- ALANÍS, A. 2012. *Deformación volumétrica en suelos no saturados*. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. México. Disponible en: <http://hdl.handle.net/123456789/2317>).
- ALFARO, M. 2008. Geotecnia en suelos no saturados. *Revista Académica Colombiana de Ciencias* 32(125): 471-481.
- ASTM-D5298. 2003. Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. ASTM International, West Conshohocken, PA.

- FREDLUND, D. G. 2003. *Implementación de la mecánica del suelo parcialmente saturado en la práctica de la ingeniería geotécnica*. Hombre Nuevo Editores, Medellín, Colombia.
- FREDLUND, D. & RAHARDJO, H. 1993. *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons, USA.
- MOHAMED, F. M.; VANAPALLI, S. K. & SAATCIOGLU, M. 2011. Bearing capacity and settlement behaviour of footings in an unsaturated sand. In: 14<sup>th</sup> Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (p. 1-8). Consultado: 11 enero 2019. Disponible en: <https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/31332220/GEO11Paper173.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1557594027&Signature=e9VRyo%2BS8P6BWuIHG9VyvZxNBQU%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DGEO11Paper173.pdf>
- PÉREZ, J. 2001. Introducción a la mecánica del suelo parcialmente saturado. Programa asignatura Mecánica de suelos. Curso 2002. Consultado: 11 enero 2019. Disponible en: <https://www.scribd.com/document/226223543/Introduccion-a-La-Mec-Del-Suelo-Parcialmente-Saturado>
- TRISTÁ, J. G. 2015. Estudio del comportamiento tenso-deformacional de suelos parcialmente saturados en Cuba. Ingeniería Civil. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.