

Influencia de la permeabilidad del suelo no saturado en los taludes de presas de tierra

Ing. Isaida Flores Berenguer (*)

e-mail: isaidafb@civil.cujae.edu.cu

Ing. Ivelisse Castro Martínez (*)

e-mail: ivecastro@nauta.cu

Dra. Ing. Jenny García Tristá (*)

e-mail: jenny@civil.cujae.edu.cu

Dr. Ing. Yoermes González Haramboure (*)

e-mail: yoermes@civil.cujae.edu.cu

(*) Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.

RESUMEN

Esta investigación propone incrementar la pendiente del talud aguas abajo en una presa de tierra de 30 metros de altura, homogénea y conformada por diversas combinaciones cortina-cimiento con suelos de las formaciones Mariel y Toledo, en estado saturado y parcialmente saturado, mediante la incorporación de las curvas de conductividad hidráulica y las curvas características de los suelos. Se realiza el análisis para colchón y prisma de drenaje utilizando los programas SIGMA/W, SEEP/W y SLOPE/W y el método de Morgestern-Price para estimar el factor de seguridad del talud aguas abajo. Se obtiene como resultado que es posible tener pendientes más empinadas al incluir las leyes de la mecánica de suelos no saturados en el análisis de la estabilidad de taludes en presas de tierra.

Palabras clave: curva de conductividad hidráulica, estabilidad de taludes, presa de tierra, suelo parcialmente saturado, variación de pendiente.

Influence of unsaturated soil permeability on the slopes of earth dams

ABSTRACT

This investigation aims to increase the slope of the downstream slope in an earth dam 30 meters high, homogeneous and made up of various combinations in curtain-foundation with soils of the Mariel and Toledo formations, in saturated and partially saturated states, by incorporating the hydraulic conductivity curves and the characteristic curves of the soils. The analysis for mattress and drainage prism are performed using the SIGMA / W, SEEP / W and SLOPE / W programs and the Morgestern-Price method to estimate the safety factor of the slope downstream. It is obtained as a result that it is possible to have steeper slopes by including the laws of unsaturated soil mechanics in the analysis of the stability of slopes in earth dams.

Keywords: hydraulic conductivity curve, slope stability, earth dam, partially saturated soil, slope variation.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha continuado implementando la aplicación de las leyes de la mecánica de suelos no saturados a diversos problemas geotécnicos, una de cuyas ramas más importantes es la estabilidad de taludes, debido a la complejidad de su análisis. En Cuba, este tema no se ha abordado con profundidad, a pesar de que la estabilidad de taludes es una de las principales causas de falla en las presas de tierra del país.

El diseño de una presa comprende disímiles parámetros que se extienden desde el tipo de presa, el nivel de agua máximo, el ancho de la corona, la pendiente de los taludes aguas arriba y aguas abajo, hasta el drenaje a utilizar. La forma en la que serán evacuadas las aguas del interior del terraplén afecta significativamente la permeabilidad y el grado de saturación del suelo, parámetros ambos fundamentales para el cálculo del factor de seguridad de los taludes al incluir en el análisis la mecánica de suelos no saturados.

En esta investigación se propone una variación de la pendiente del talud aguas abajo en una presa de tierra homogénea de 30 metros de altura de cortina, conformada con los suelos de las formaciones Mariel y Toledo, cuyos parámetros de resistencia al corte los caracterizan como: un suelo friccional (el primero), y uno cohesivo (el segundo). La presa es analizada en estado de operación, considerando dos sistemas de drenaje diferentes: colchón y prisma. El análisis del flujo de filtración y la estabilidad de taludes considera la curva de conductividad hidráulica obtenida a partir de la curva característica de succión del suelo parcialmente saturado.

BASES TEÓRICAS

En los suelos parcialmente saturados, el coeficiente de permeabilidad varía en función del contenido de humedad, relación que se establece a través de la curva característica de succión. La succión se puede definir como la capacidad que presenta un suelo para retener o absorber agua en sus poros, lo que origina fuerzas internas dentro de su masa e influye significativamente en su comportamiento tenso-deformacional. La curva característica de succión es la genuina expresión de la relación que existe entre el grado de saturación y la succión en el suelo y está directamente asociada con su granulometría y estructura. Por ello, la relación entre contenido de agua y succión varía en función del tipo de suelo (Das 2011).

El coeficiente de permeabilidad para suelos no saturados no es constante sino que varía fundamentalmente con el contenido de humedad, con el grado de saturación (S_r) o con la succión (S).

Se han realizado estudios que relacionan el grado de saturación (S_r), definido como la relación porcentual entre el volumen de agua entre el volumen total de poros, y la permeabilidad no saturada (k_{unsat}). Esta última se suele expresar como un porcentaje de la permeabilidad del mismo suelo en estado saturado (k_{sat}) (Tristán et al. 2016).

En la mecánica de suelos no saturados, el potencial de agua está referido al movimiento del agua de un punto a otro dentro de la masa de suelos, mientras que el potencial mátrico está directamente relacionado con la succión del suelo. Los elementos que componen la succión total (ST) son la succión mátrica (Sm) y la succión osmótica (So). El valor de la succión mátrica

depende en gran medida de las características morfológicas del suelo analizado, mientras que la succión osmótica está asociada a la disolución de sales en el agua y la difusión de estas dentro del suelo.

La succión matricial y la succión osmótica pueden cuantificarse mediante distintos métodos y procedimientos clasificados en directos e indirectos. El intervalo de medida de las succiones está en relación al tipo de equipo utilizado, así como del contenido de humedad presente, y el tipo de muestras (inalteradas o remoldeadas) utilizadas durante el ensayo (Tristá 2015).

Los equipos utilizados para aplicar métodos directos son: el tensiómetro, la técnica de traslación de ejes, la técnica de la columna de agua negativa, el desecador de vacío, la placa de succión, la membrana de presión y las técnicas osmóticas. Los métodos indirectos miden las condiciones de equilibrio de humedad del suelo en lugar de la succión y los equipos utilizados para esta técnica son: los equipos de presión de vapor, los psicrómetros, el papel de filtro, la porosimetría y los sensores de conductividad eléctrica y térmica.

La curva característica del suelo obtenida mediante ensayos de laboratorio, puede simularse a partir de diversas formulaciones empíricas de varios autores, como es el caso de la ecuación de Van Genuchten, quien desarrolló una función continua, con tres parámetros de ajuste. La expresión matemática del modelo se muestra en la ecuación 1 (Tristá 2015).

$$S_r = (|1 + |\alpha S|\eta) - m, S < 0 \text{ y } S_r = 1, S \geq 0 \quad (1)$$

donde: S_r es el grado de saturación, α y η son parámetros de ajuste, S es la succión total de la muestra y:

$$m = 1 - 1/\eta \quad (2)$$

Además de las formulaciones empíricas, existen métodos indirectos para generar la curva característica de succión, los cuales varían en términos de metodología y complejidad, pudiendo distinguirse tres grupos principales: los métodos basados en la distribución del tamaño de poros, los métodos inversos y las funciones de pedotransferencia. Entre los métodos basados en el tamaño del poro se encuentra la función de Van Genuchten, que será la utilizada en la presente investigación.

El método de Van Genuchten para obtener la permeabilidad no saturada del suelo parte de la obtención de la curva característica del suelo analizado. Posteriormente se determina un coeficiente de permeabilidad (K_r) para los diferentes grados de saturación presentes en la muestra, a partir de la ecuación 3.

$$K_r = \frac{[1 - (\alpha\psi)^{\eta-1}(1 + (\alpha\psi)^{\eta})^{-m}]^2}{[1 + (\alpha\psi)^{\eta}]^{m/2}} \quad (3)$$

donde: ψ es la succión del suelo y α , η y m son los parámetros de ajuste de la simulación de la curva característica de Van Genuchten.

Finalmente, la permeabilidad del suelo no saturado queda planteada en la ecuación 4.

$$K_{unsat} = K_{sat} * K_r \quad (4)$$

donde: K_{unsat} es la permeabilidad no saturada del suelo para los diferentes K_r ,
y K_{sat} es el valor de permeabilidad saturada obtenida en el laboratorio.

Las presas de tierra se clasifican según su resistencia al empuje de las aguas, los materiales que la componen y su función. Pueden ser de almacenamiento o reguladoras, de gravedad, de arco, de contrafuerte o ancladas, de hormigón o de materiales sueltos (homogéneas, mixtas o graduadas).

(Molina et al. 2016) contabilizaron los fallos en presas de tierra en Cuba, luego de realizar visitas a las empresas de aprovechamiento hidráulico de todas las provincias del país durante el año 2016, identificando un total de 52 casos. En base a estos estudios, el orden actual de ocurrencia de las causas más comunes de falla en presas de tierra en Cuba, difiriendo ligeramente con respecto al resto del mundo es: el deslizamiento de los taludes, el rebase de la cortina, el sifonamiento, las pérdidas por filtraciones y el agrietamiento.

Se denomina deslizamiento a la rotura o desplazamiento del cuerpo del talud, que origina el movimiento de toda o casi toda la masa de suelo que lo compone. Los deslizamientos se producen como consecuencia de excavaciones o socavaciones al pie del talud o por desintegración gradual de la estructura del suelo, aumento de las presiones intersticiales por la filtración de las aguas, entre otros.

Según Sanhueza y Rodríguez (2013) el factor de seguridad expresa la reducción de la resistencia a cortante del suelo para que se produzca el deslizamiento a lo largo de la superficie de falla y representa la determinación cuantitativa del índice de riesgo de que esta ocurra.

Para el análisis de la estabilidad de taludes existe una subdivisión para los métodos de equilibrio límite en función de la precisión de los resultados, donde es posible encontrar el grupo de los métodos exactos y el de los no exactos. Se basan en la selección de una superficie teórica de rotura en el talud, el criterio de rotura de Mohr-Coulomb y la definición de un factor de seguridad (Sanhueza y Rodríguez 2013).

El método empleado para realizar esta investigación es el propuesto por Morgenstern-Price (ecuaciones 5 y 6), el cual se clasifica dentro de los métodos precisos para el análisis de la estabilidad suponiendo la subdivisión de la masa de suelos en dovelas.

Plantea una relación entre las fuerzas de interconexión que puede ser una función seleccionada arbitrariamente, dado que tiene poca influencia, aunque los resultados deben revisarse para garantizar que sean físicamente aceptables.

La masa se subdivide en dovelas infinitésimas, a las cuales se imponen las ecuaciones de equilibrio en la traslación horizontal, vertical y de rotura en las bases, las cuales se extienden por integración a toda la superficie de falla. Es posible aplicarlo a cualquier superficie de falla.

$$c' \left(\sec^2 \frac{\alpha}{FS} \right) + \tan \phi' \left(\frac{dW}{dx} - \frac{dX}{dx} - \tan \alpha \frac{dE}{dx} - \sec \alpha \frac{dU}{dx} \right) = \frac{dE}{dx} - \tan \alpha \left(\frac{dX}{dx} - \frac{dW}{dx} \right) \quad (5)$$

La ecuación 5 introduce el factor de seguridad en la relación de fuerzas, 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, ϕ' es el ángulo de fricción interna efectivo y α es la inclinación de la base de la dovela respecto a la horizontal.

La ecuación 6 establece el equilibrio de momento, proponiendo una restricción de la rotación con respecto a la base:

$$X = \frac{d(E\gamma)}{dx} - \gamma \frac{dE}{dx} \quad (6)$$

El método de Morgenstern-Price presenta una de las formulaciones matemáticas más rigurosas dentro de los Métodos de Equilibrio Límite, y la forma de obtener un resultado satisfactorio es a través de programas computacionales. Por su exactitud, es ampliamente utilizado en investigaciones relacionadas con la estabilidad de taludes, a diferencia de otros métodos matemáticos menos complejos.

El Programa GeoStudio de 2007 es una herramienta de gran utilidad para resolver problemas de Mecánica de Suelos, dado que comprende un conjunto de módulos de trabajo con opciones enfocadas a distintos tipos de análisis relacionados con los suelos, en particular flujo de filtración (SEEP/W) y estabilidad de taludes (SLOPE/W).

En esta investigación se hace uso de ambas aplicaciones, con el SEEP/W se determina la línea de corriente superior generada por el nivel de agua máxima en la presa de tierra, para lo cual es preciso definir factores tales como: la permeabilidad de los suelos, la geometría del modelo y las condiciones de bordes.

La permeabilidad puede definirse constante para toda la masa del terreno o variable, en función de la succión al introducir la curva característica del suelo, a partir de considerar un análisis “Saturado” o “Saturado/No saturado”.

Ambas condiciones se evalúan en la presente investigación. Las condiciones de borde planteadas son las de “Presión Cero” en la superficie del drenaje, “Superficie Potencial de Filtración” en la superficie del talud aguas abajo y el nivel de agua máxima correspondiente en la superficie del talud aguas arriba. Estos elementos devuelven la Línea de Corriente Superior (LCS) que genera el flujo de agua, para ser utilizada posteriormente en otros análisis.

Con el SLOPE/W se plantea el método de Morgenstern-Price para el cálculo del factor de seguridad a partir de la función de medio seno y con condiciones de filtración extraídas del análisis en el SEEP/W.

La superficie de deslizamiento establecida es a partir de considerar “Cuadrícula y Radio”, lo que garantiza que se evalúen diversas superficies de falla dentro de las cuales se encuentra la de

menor valor de factor de seguridad. Aunque el SLOPE/W cuenta con diversos métodos para el cálculo de la estabilidad de taludes, el de Morgenstern-Price resulta ser uno de los más exactos y complejos en su solución matemática, por lo que se ha generalizado su uso con el desarrollo de las herramientas computacionales.

CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS ESTUDIADOS

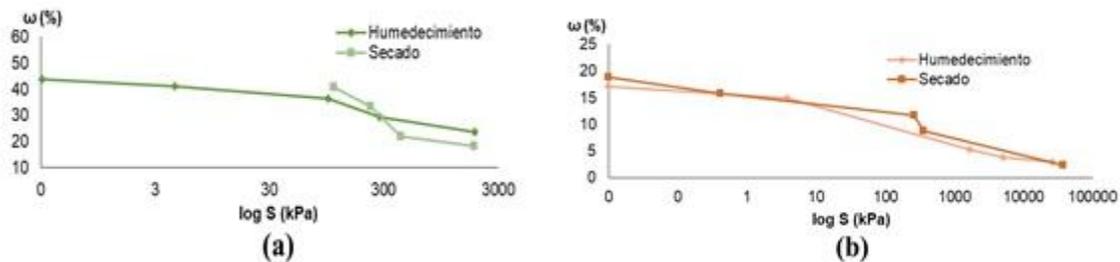
En la realización de los ensayos de los suelos estudiados y su clasificación se siguieron las orientaciones expuestas en las normas cubanas vigentes sobre: granulometría, peso específico, límites de consistencia, ensayos de compactación Proctor, cortante directo y succión en los suelos (ASTM-D5298 1994).

Los resultados utilizados en la modelación se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Características de los suelos empleados en la modelación

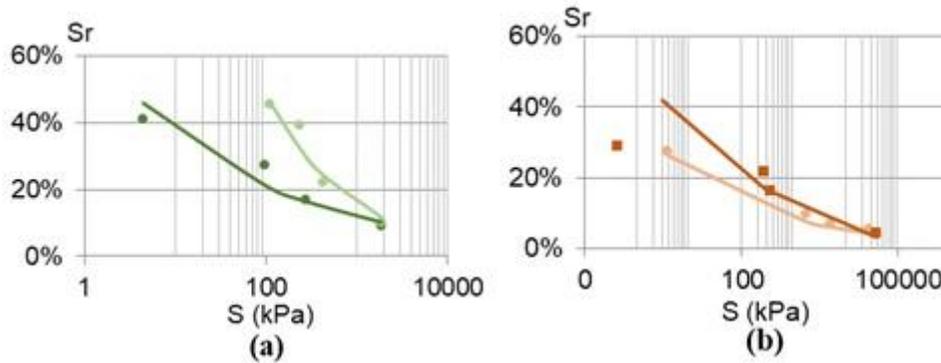
Suelos	Peso específico húmedo (γ_f) (kN/m ³)	Permeabilidad saturada vertical (k_{sat}) (m/s)	Módulo de elasticidad (E) (kPa)	Índice de compresibilidad volumétrica (Mv)	Cohesión (c) (kPa)	Ángulo de fricción interna (ϕ) (°)
Mariel	20,48	$3,52 \times 10^{-6}$	150000	$1,00 \times 10^{-5}$	0	47
Toledo	21,18	1×10^{-8}	65000	$1,00 \times 10^{-5}$	95	7,5

Para clasificar los suelos estudiados se empleó el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), obteniendo como resultado que ambos suelos se clasifican como SC (arena arcillosa con grava). Las curvas características de los suelos estudiados, fueron obtenidas a partir de la norma ASTM-D5298 (1994) utilizando el método del papel del filtro, con papel tipo Whatman 42. Los resultados se muestran las figuras 1(a) y 1(b).



**Figura 1. (a) Curva característica del suelo de la formación Mariel
(b) Curva característica del suelo de la formación Toledo**

Los resultados de la obtención de las curvas de ajuste por el método de Van Genuchten se muestran en las figuras 2(a) y 2(b), los coeficientes obtenidos aparecen en la tabla 2.



**Figura 2. (a) Curva de ajuste de la formación Mariel
(b) Curva de ajuste de la formación Toledo**

Tabla 2. Coeficientes de las curvas de ajuste para los suelos de las formaciones Mariel y Toledo

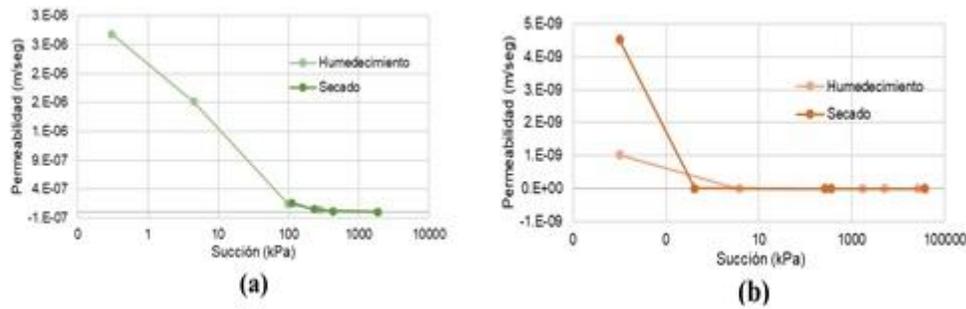
Suelo	Humedecimiento		Secado	
	α	η	α	η
Mariel	0,05	1,25	0,04	1,50
Toledo	200	1,20	25	1,25

Luego de hacer un análisis estadístico de los resultados de los ajustes para ambos suelos, se obtuvo que los coeficientes R^2 son mayores que 90% y los errores son menores que el 10% para ambas ramas de la curva característica para los suelos de las formaciones Mariel y Toledo, a partir de lo planteado por (Tristán 2015) como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Coeficientes de las curvas de ajuste para los suelos de las formaciones Mariel y Toledo

Suelo	Humedecimiento		Secado	
	R^2	Error	R^2	Error
Mariel	0,9710	0,0423	0,9606	0,0530
Toledo	0,99748	0,07104	0,90650	0,06918

En las figuras 3(a) y 3(b) se muestran las curvas de conductividad hidráulica para ambos suelos, obtenidas a partir de la formulación de Van Genuchten para las ramas en humedecimiento y en secado de la curva característica.



**Figura 3. (a) Curva de conductividad hidráulica para el suelo de la formación Mariel
(b) Curva de conductividad hidráulica para el suelo de la formación Toledo**

CASOS DE ESTUDIO

Para analizar el problema se definió una altura de cortina de 30 metros, constituida por un único suelo cada vez, dado que la presa es homogénea. La cimentación planteada presenta un único estrato y una profundidad de 40 metros.

Se establecen dos tipos de drenaje: colchón y prisma, a partir de los criterios establecidos por (Armas y Horta 1987) y conformados por el mismo material. La variable modificada es la pendiente del talud aguas abajo, que inicialmente se plantea como 1:2 y luego como 1:1,5.

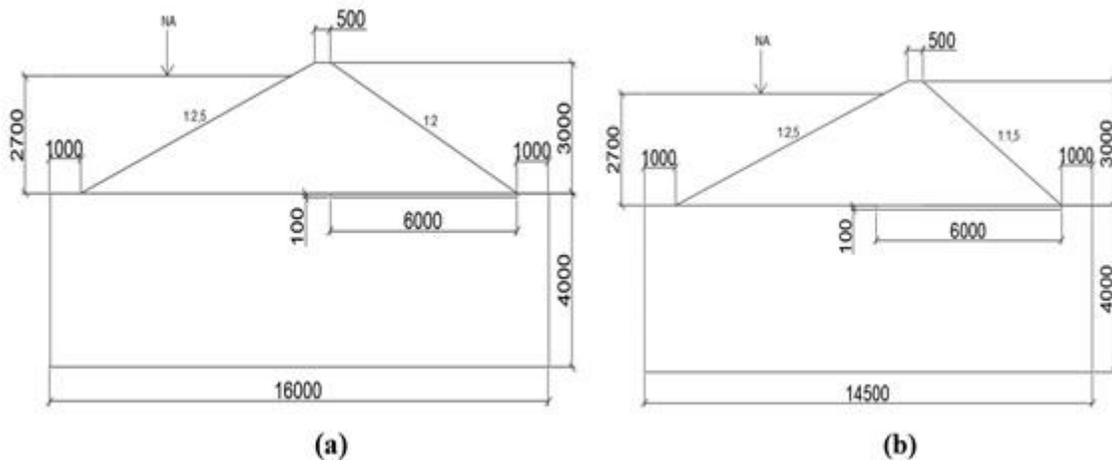
Las restantes variables que intervienen en el problema son: la succión, que corresponde a cada uno de los dos suelos considerados en las combinaciones, el tipo de drenaje, que, a su vez, modifica la línea de corriente superior y los parámetros físico-mecánicos de los suelos considerados en el estudio.

Para definir las combinaciones de los suelos que conforman la cortina y el cimiento de la presa, se muestra el cuadro resumen correspondiente en la tabla 4.

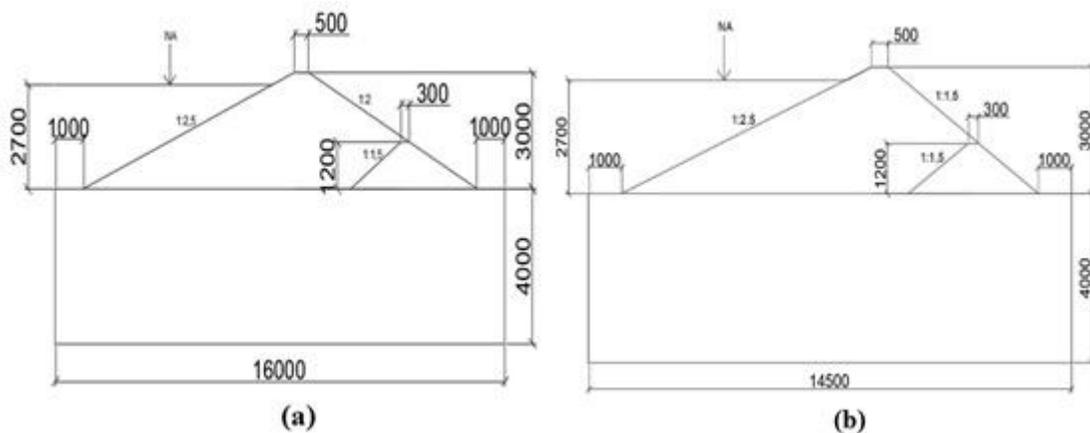
Tabla 4. Combinaciones cortina-cimiento propuestas

Combinaciones		
No.	Cortina	Cimiento
1	Mariel	Mariel
2	Mariel	Toledo
3	Toledo	Mariel
4	Toledo	Toledo

Las dos variantes de geometrías estudiadas se muestran en las figuras 4 (a), (b) y figuras 5 (a), (b), todas las unidades mostradas son en milímetros.



**Figura 4. (a) Modelo inicial con colchón de drenaje
(b) Modelo final con colchón de drenaje**



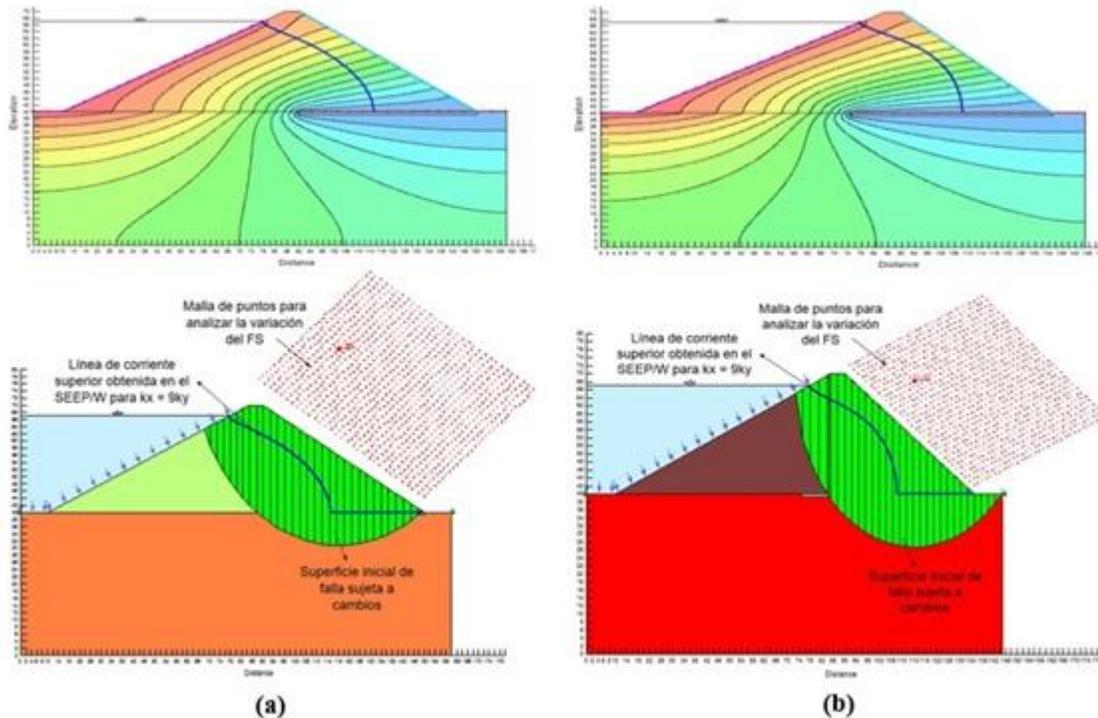
**Figura 5. (a) Modelo inicial con prisma de drenaje
(b) Modelo final con prisma de drenaje**

Ambos drenajes estarán conformados por una grava arenosa con peso específico húmedo de 21 kN/m^3 , un ángulo de fricción interna de 48° , una permeabilidad en la dirección de “x” igual a 10 m/s y una razón de permeabilidad igual a 1 (Coduto 2001), (Das 2001).

En la cortina de la presa, debido al proceso de compactación del suelo realizado en capas horizontales, la permeabilidad de los mismos se diferencia numéricamente en el sentido horizontal y vertical, por lo que se propone una razón de permeabilidad de 0,111, que corresponde a una relación de permeabilidad $k_x=9k_y$.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En las figuras 6 (a) y 6 (b) se muestran los resultados obtenidos en la modelación con el SEEP/W y el SLOPE/W para el colchón de drenaje, con pendientes del talud aguas abajo de 1:2 y 1:1,5.



**Figura 6. (a) Modelación con pendiente 1:2 y colchón de drenaje.
(b) Modelación con pendiente 1:1,5 y colchón de drenaje.**

Los factores de seguridad obtenidos en cada caso, considerando el suelo en estado saturado y con las ramas en secado y humedecimiento de la curva de conductividad hidráulica obtenida por el método de Van Genuchten, se muestran en las figuras 7 (a) y 7 (b).

Puede observarse que el comportamiento del *FS* para las cuatro combinaciones es similar entre los dos tipos de pendientes planteadas. Se evidencia un incremento del factor de seguridad cuando se considera el análisis con la curva característica ajustada por Van Genuchten y con la curva de conductividad hidráulica, con respecto al obtenido para el estado saturado. La variación porcentual de estos incrementos se muestra en la figura 8, empleándose la ecuación 7 mostrada a continuación.

$$\% \text{ Incremento} = \frac{FS_{(1:1,5)} - FS_{(1:2)}}{FS_{(1:1,5)}} * 100 \quad (7)$$

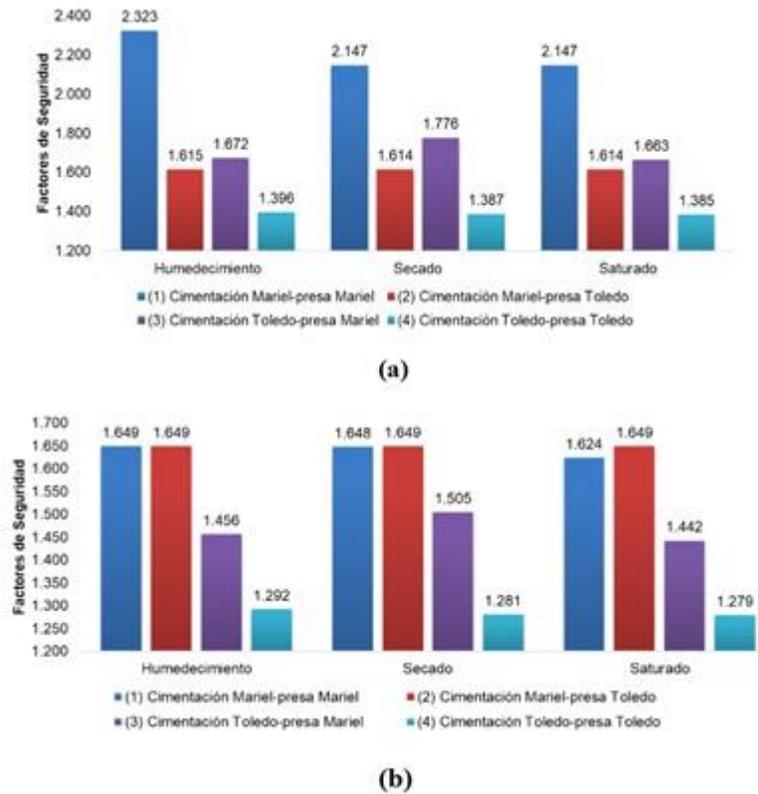


Figura 7. (a) FS con pendiente del talud aguas abajo 1:2
(b) FS con pendiente del talud aguas abajo 1:1,5

Al aumentar la pendiente el factor de seguridad se reduce, dado que, para la superficie de falla supuesta (circular) adoptada en el método de análisis, disminuye el volumen de suelos que se opone al deslizamiento (volumen de dovelas negativas). Por ello, aunque la resistencia a cortante es la misma, se afecta el equilibrio global de momento y disminuye el factor de seguridad del talud.

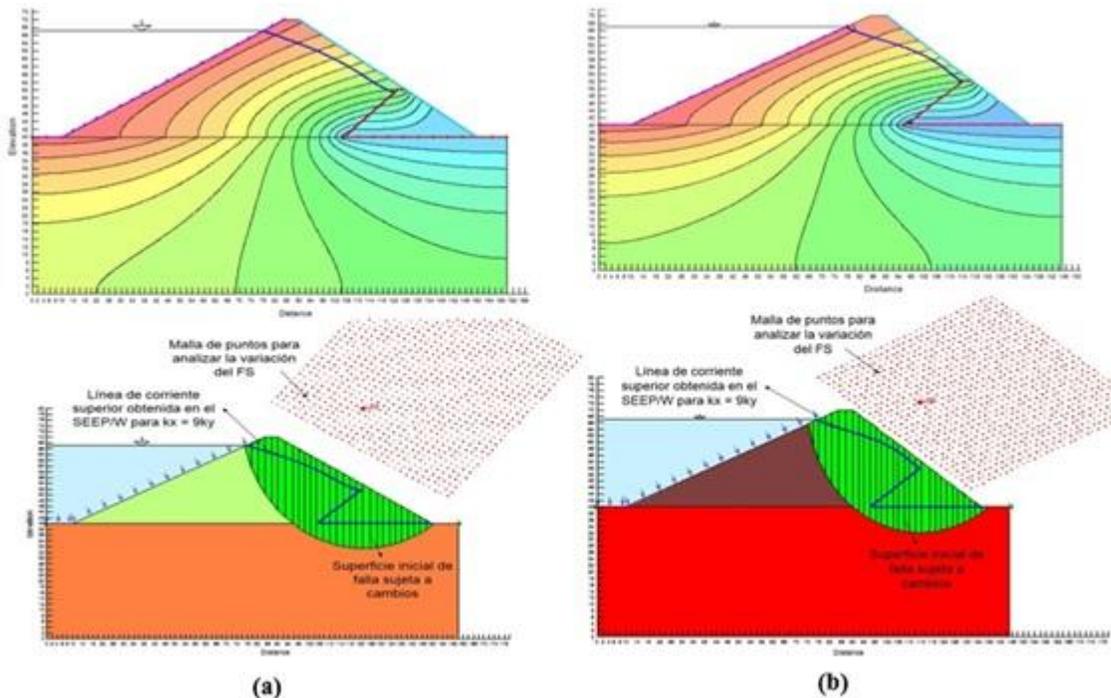
Las mayores variaciones del *FS* se observan en la combinación 1 (Mariel-Mariel), por lo que, para el caso de estudio planteado y con las características de los suelos considerados en el análisis, esta combinación resulta la más influyente en cuanto al cálculo del factor de seguridad mínimo del talud objeto de estudio.



Figura 8. Variación porcentual del factor de seguridad con pendientes 1:2 y 1:1,5 de las combinaciones establecidas, con colchón de drenaje

En la figura 8 se pudo observar que para la combinación 2 (Mariel-Toledo) no existe influencia en ninguno de los análisis realizados, tanto en estado saturado como parcialmente saturado, en relación con la variación de las pendientes del talud aguas abajo.

En las figuras 9 (a) y 9 (b) se muestran los resultados obtenidos en la modelación con el SEEP/W y el SLOPE/W para el colchón de drenaje, con pendientes del talud aguas abajo de 1:2 y 1:1,5.

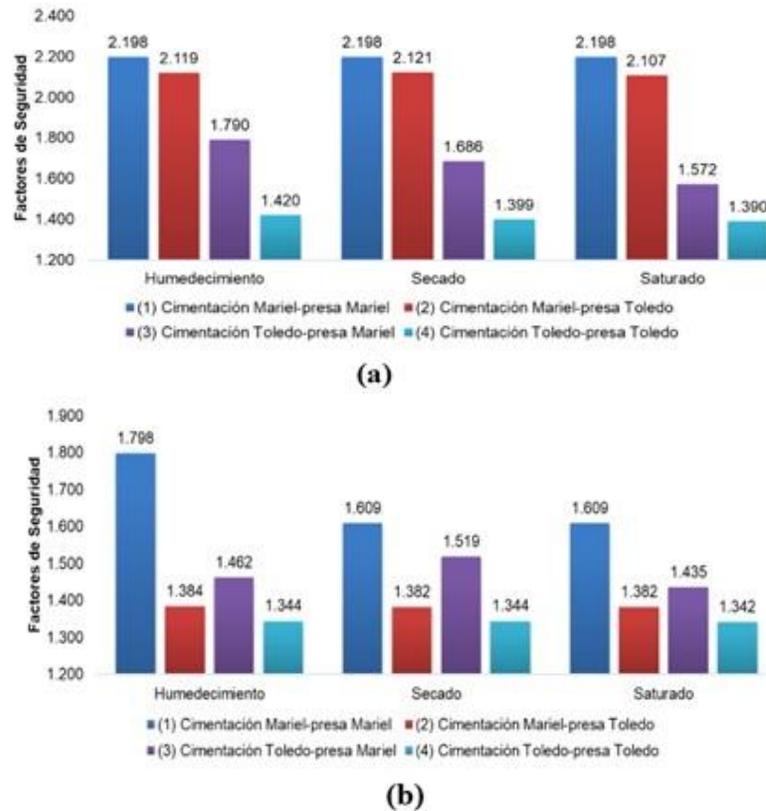


**Figura 9. (a) Modelación con pendiente 1:2 y prisma de drenaje.
(b) Modelación con pendiente 1:1,5 y prisma de drenaje.**

En las figuras 10 (a) y 10 (b) se muestran los resultados correspondientes al comportamiento del factor de seguridad en estado saturado, la rama en humedecimiento y la rama en secado de la curva de conductividad hidráulica obtenida por el método de Van Genuchten para las pendientes del talud aguas abajo 1:2 y 1:1,5.

Al igual que en el caso con colchón de drenaje, se observa que el comportamiento de los factores de seguridad es similar para ambas pendientes analizadas.

Lógicamente existe un incremento de estos FS cuando se analizan los mismos considerando las leyes de la Mecánica de suelos no saturados respecto a la Mecánica de suelos saturados. La variación porcentual de estos incrementos se muestra en la figura 11, empleándose la ecuación 7.



**Figura 10. (a) FS con pendiente del talud aguas abajo 1:2
(b) FS con pendiente del talud aguas abajo 1:1,5**

El comportamiento del factor de seguridad en este caso es similar al caso con colchón de drenaje, dado que las mayores variaciones se observan en la combinación 1 (Mariel-Mariel), mostrándose nuevamente para el caso de estudio planteado y con las características de los suelos considerados en el análisis, que esta combinación resulta la más influyente en cuanto al cálculo del factor de seguridad mínimo del talud objeto de estudio.

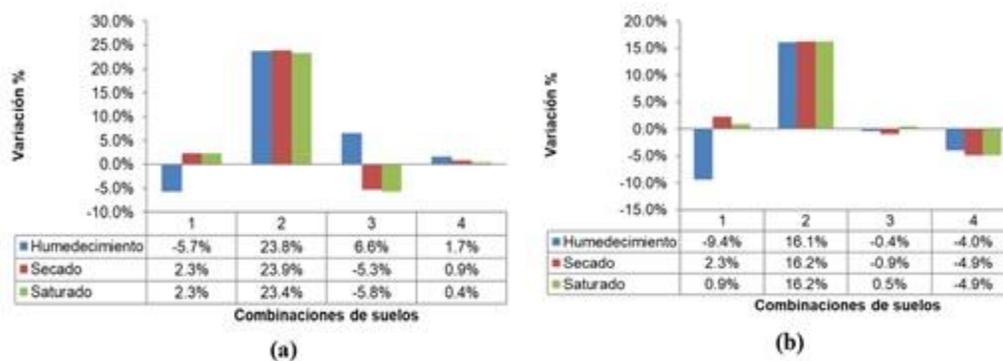


Figura 11. Variación porcentual del factor de seguridad con pendientes 1:2 y 1:1,5 de las combinaciones establecidas, con prisma de drenaje

En las figuras 12 (a) y 12 (b) se muestran las variaciones porcentuales del incremento existente entre el colchón de drenaje y el prisma de drenaje para la pendiente de 1:2 y 1:1,5, en función de los factores de seguridad obtenidos para las combinaciones analizadas, para los suelos en estado saturado, la rama en humedecimiento y en secado de la curva característica, resultados positivos indican aumento del *FS*, y resultados negativos indican disminución del *FS*.

Para este análisis se tomó como referencia el colchón de drenaje, utilizando la ecuación 8 que se muestra a continuación:

$$\% \text{ Incremento} = \frac{FS_{(prisma)} - FS_{(colchón)}}{FS_{(prisma)}} * 100 \quad (8)$$



**Figura 12. (a) Variación porcentual entre drenajes, taludes con pendiente 1:2
(b) Variación porcentual entre drenajes, taludes con pendiente 1:1,5**

El comportamiento del *FS* de los suelos de estudio para los drenajes planteados es variable. El caso donde se presenta mayor incremento para ambos tipos de drenaje es el 2 (Mariel-Toledo), donde hay presencia de suelo friccional en la cortina y suelo cohesivo en la cimentación, siendo este incremento mayor que 20% en talud 1:2 y mayor que 15% en talud 1:1,5.

CONCLUSIONES

- Al incorporar la curva característica del suelo ajustada por Van Genuchten y la curva de conductividad hidráulica en el estado de carga de operación, se obtiene una variación del factor de seguridad tanto para las dos variantes de pendientes como para las dos variantes de drenaje. En función de esta variación, se presentan incrementos mayores de 5 % en las combinaciones con presencia de suelo friccional en la presa.
- A partir de los valores de *FS* alcanzados es posible obtener un incremento constructivo en la pendiente del talud aguas abajo en una presa de 30 m de altura, con colchón y prisma de drenaje, sin afectar la estabilidad y seguridad del mismo.
- En ambas pendientes estudiadas se aprecia que la variación entre los dos sistemas de drenaje analizados tiene mayor influencia en presas con colchón de drenaje, debido a que estas tienen mayor volumen de suelo no saturado en el talud aguas abajo.

REFERENCIAS

- Armas R. y Horta E.** (1987). "Presas de Tierra". Ingeniería Hidráulica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), ISBN 978-959-07-1141-1, La Habana, Cuba.
- ASTM-D5298** (1994). "Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper", American Society for Testing and Materials, vol 11, pp 1–6, Barr Harbor, West Conshohocken, USA.
- Coduto D.** (2001). "Foundation design. Principles and Practices", 2da edición, Ingeniería Civil, ISBN 0-13-589706-8, California State Polytechnic University, Pomona, USA.
- Das B.** (2001). "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", Ingeniería Civil, ISBN 970-686-061-4, California State University, Sacramento, USA.
- Tristá J.** (2015). "Estudio del comportamiento tenso-deformacional de suelos parcialmente saturados en Cuba", Tesis de doctorado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas (UCLV), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana.
- Tristá J., Quevedo G. y Cobelo W.** (2016). "Relación entre tiempo de consolidación y permeabilidad no saturada en presas de tierra". Ingeniería hidráulica y ambiental, vol. 37 (2), pp 94–107, ISSN 1815–591X, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana.
- Molina S., Alvarez O. y González Y.** (2016). "Análisis y solución de la patología en presas de Cuba: Estado del arte". II Foro Internacional de Control de la Calidad y Patología de las Construcciones COPACON, La Habana, Cuba, extraído de: <https://www.researchgate.net/publication/317295636> en marzo de 2017.
- Sanhueza C. y Rodríguez L** (2013). "Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales", Revista de la Construcción vol. 12, no. 1, pp 17–29, ISSN 0718-915X, SciELO, Santiago de Chile, Chile, extraído de: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2013000100003> en febrero de 2016.