



Ingeniería y Desarrollo

ISSN: 0122-3461

ISSN: 2145-9371

Fundación Universidad del Norte

Flores Berenguer, Isaida; González Haramboure, Yoermes; García Tristá, Jenny
Estabilidad de taludes en presas de tierra considerando el ángulo de succión del suelo no saturado
Ingeniería y Desarrollo, vol. 40, núm. 1, 2022, Enero-Junio, pp. 71-91
Fundación Universidad del Norte

DOI: <https://doi.org/10.14482/inde.40.01.620.123>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85273159004>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UAEM
redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto



ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

<https://dx.doi.org/10.14482/inde.40.01.620.123>

Estabilidad de taludes en presas de tierra considerando el ángulo de succión del suelo no saturado

Slope stability in earth dams considering the suction angle of unsaturated soil

ISAIDA FLORES BERENGUER *

YOERMES GONZÁLEZ HARAMBOURE **

JENNY GARCÍA TRISTÁ ***

*Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE).

Departamento de Estructuras, Cuba. Profesora Asistente.

isaidafb@civil.cujae.edu.cu. Máster en Ingeniería Civil.

Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0001-8492-0928>

**Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE).

Centro de Investigaciones Hidráulicas, Cuba. Profesor titular.

yoermes@civil.cujae.edu.cu. Doctor en Ciencias Técnicas.

Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0001-8613-6264>

***Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE).

Departamento de Estructuras, Cuba. Profesora titular.

jenny@civil.cujae.edu.cu. Doctora en Ciencias Técnicas.

Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0003-3072-8011>

Correspondencia: Isaida Flores Berenguer: Teléfono móvil: (+53) 53100782.

Teléfono oficina: (+53) 72663822.

Dirección particular: n.º 50, entre Avenida 25 y Avenida 27.

Playa. La Habana, Cuba.



Resumen

Esta investigación tuvo como objetivo analizar el efecto del suelo no saturados al introducir la curva característica y el ángulo de succión en el análisis de la estabilidad de taludes en presas de tierra homogéneas. Para ello, se considera una presa de tierra con 22 metros de altura de cortina, teniendo en cuenta los estados: final de construcción y operación, considerando dos suelos tipo CH en la cortina y tres suelos tipo SC en la base. Se empleó el ángulo de succión calculado a partir del ángulo de fricción interna y el grado de saturación del suelo, y se comparó el resultado obtenido con el correspondiente a la curva característica experimental de los mismos suelos. Se empleó el programa GeoStudio 2018 y el Método de Elementos Finitos, combinando las componentes SEEP/W y SLOPE/W. El resultado fundamental revela que es posible considerar el estado no saturado del suelo de manera directa mediante el ángulo de succión, a partir de nuevas relaciones respecto al ángulo de fricción interna del suelo y en función del nivel de agua de la presa analizada.

Palabras clave: ángulo de succión, estabilidad de taludes, final de construcción, operación, suelos no saturados.

Abstract

The present investigation consists of analyzing the effect of unsaturated soil by introducing the characteristic curve and the suction angle in the analysis of slope stability in homogeneous earth dams. To achieve this, an earthen dam with a curtain height of 22 meters is considered, taking into account the following states: end of construction and operation, considering two CH-type soils in the curtain and three SC-type soils at the base. For the present study, the suction angle calculated from the angle of internal friction and the degree of saturation of the soil is used, comparing this result with that corresponding to the experimental characteristic curve of the same soils. The GeoStudio 2018 program, and the Finite Element Method combining the SEEP/W and SLOPE/W components are used. The fundamental result reveals that it is possible to consider the unsaturated state of the soil directly through the suction angle, based on new relationships with respect to the internal friction angle of the soil and depending on the water level of the analyzed dam.

Keywords: end of construction, operation, suction angle, slope stability, unsaturated soils.

INTRODUCCIÓN

En el suelo con determinado grado de saturación (inferior al 100 %) se requiere cierta fuerza para reducir el contenido de agua del mismo; este efecto se puede explicar mediante la succión. Esta tiene dos componentes: la capilar y la adsorbente, y está asociada a la capacidad de un suelo no saturado de absorber o retener el agua de sus poros y generar una tensión interna. La parte capilar depende de la distribución y tamaño de poro; la parte adsorbente está en función de la composición mineralógica de la parte sólida, así como también de la composición química del líquido [1], [2].

Este parámetro está compuesto de dos partes fundamentales: la succión mátrica (asociada a las fuerzas capilares que se generan entre la matriz del suelo y el agua) y la succión osmótica (la presión negativa por efecto de las sales disueltas en el agua). En ese contexto, la magnitud de la succión total corresponde al trabajo total de las fuerzas de capilaridad, absorción y ósmosis. Se ha estudiado experimentalmente el efecto de las componentes de la succión sobre el comportamiento del suelo, y se ha concluido 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 [2]-[5].

La curva característica del suelo expresa la 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 (ω), grado de saturación (S) o humedad volumétrica. Para relacionar la succión y la humedad de equilibrio presente en los suelos se obtiene de la curva característica, que puede ser caracterizada a partir de las trayectorias típicas en secado o humedecimiento, entre las que aparece el fenómeno de la histéresis [2], [6]. En estudios realizados por Vanapalli [7] se reporta que la curva característica depende de varios factores, tales como la estructura del suelo, el contenido inicial de agua, la relación de vacíos, el tipo de suelo, la textura, la mineralogía, la historia tensional y el método de compactación. Adicionalmente, la curva característica se emplea para determinar otras propiedades, tales como la permeabilidad, la resistencia al corte y el comportamiento volumétrico de los suelos parcialmente saturados [8]. En la construcción de las cortinas de presas de tierra se emplean fundamentalmente suelos arcillosos con altos contenidos de finos, que presentan elevados valores de succión.

La definición conceptual de la resistencia al corte de un suelo (saturado o no) es la máxima resistencia por unidad de área que soporta el suelo a lo largo de un plano. En el caso de un medio saturado, la resistencia al corte se rige por el criterio de falla Mohr-Coulomb, que define la resistencia al corte por las variables σ' , y la variable de estado esfuerzo efectivo [2], [8], [9].

El objetivo de esta investigación fue analizar el comportamiento del factor de seguridad en presas de tierra al incluir directamente el ángulo de succión del suelo

correspondiente a un grado de saturación determinado. La hipótesis planteada es que es posible obtener una variación del factor de seguridad con la incorporación del ángulo de succión en el análisis, que no difiere del comportamiento del suelo cuando se incorpora la curva característica en su totalidad. Igualmente, se plantea que es posible establecer una relación entre el ángulo de succión y el ángulo de fricción interna del suelo que se ajuste a las condiciones de los suelos arcillosos y al estado de carga que presente la presa en el momento del análisis.

BASES TEÓRICAS

La envolvente de falla extendida para los suelos parcialmente saturadas toma la forma matemática mostrada en la ecuación 1 [2], [10], [11]:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (1)$$

Donde

c' : Cohesión efectiva.

ϕ' : Ángulo de fricción interna efectivo.

ϕ^b : Ángulo definido por la rotación de incremento de esfuerzo normal respecto a la succión experimentada por el suelo.

En la ecuación 1 se observa que para los suelos parcialmente saturados, la relación de Mohr-Coulomb establecida ofrece la transición hacia la condición de saturación total. En este caso, la succión mátrica toma un valor igual a cero si la presión de poros debida al agua iguala a la presión de poros debida al aire, lo cual ocurre a medida que en el suelo se incrementa el grado de saturación [9].

Según [11], los parámetros de resistencia para los suelos parcialmente saturados se ven afectados por la influencia de la succión, y estos se pueden obtener a partir de los parámetros de resistencia del suelo saturado [1]. Igualmente, plantean que la relación existente entre y viene dada en función del parámetro de Bishop. Aplicando el criterio considerado por [1] se obtiene el ángulo de succión mediante la ecuación 2.

$$\phi^b = \arctan(S \tan \phi') \quad (2)$$

La envolvente de falla extendida de Mohr-Coulomb puede obtenerse en el plano, donde el parámetro ϕ^b se considera igual o menor que el ángulo ϕ' .

Las presas de tierra son obras de ingeniería construidas para almacenar y distribuir las reservas de agua con el objetivo de obtener beneficios económicos y sociales [2]; siendo característico de estas la red de flujo que se genera en el interior del terraplén que funge como dique. Para referirse a la estabilidad de taludes se emplea el factor de seguridad (FS), obtenido a través de un análisis matemático de diversas variables, entre las que están involucradas la forma de la superficie de falla y las características de los suelos componentes del talud, entre otras. El valor del factor de seguridad se obtiene al realizar la comparación del esfuerzo cortante de falla con la resistencia cortante del suelo, en cualquier plano posible de falla del talud, y debe cumplir siempre como requisito, el ser mayor o igual al valor del factor que se establece por norma o se fija en proyecto [2].

Para obtener el FS mediante el empleo del Método de Elementos Finitos (MEF) en el GeoStudio (2018) se establece la ecuación 3.

$$FS = \frac{\sum F_r}{\sum F_m} \quad (3)$$

Donde

F_r : Resistencia cortante total disponible.

F_m : Esfuerzo cortante total movilizado a lo largo de la superficie de falla.

Al dividir la masa deslizante en dovelas, se obtiene que la resistencia cortante total disponible de cada dovela se calcula multiplicando la resistencia a cortante del suelo en la base por su longitud. Por lo tanto, a partir de la forma modificada de la ecuación de Mohr-Coulomb para un suelo parcialmente saturado, la fuerza de resistencia disponible se muestra en la ecuación 4.

$$F_r = s\beta = (c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b)\beta \quad (4)$$

Donde

s : Fuerza de corte efectiva del suelo en la base de la dovela.

β : Longitud de la base de la dovela.

σ_n : Tensión normal en el centro de la base de la dovela.



El esfuerzo cortante total movilizado a lo largo de la superficie de falla de cada dovela se calcula multiplicando la tensión tangencial movilizada (τ_m) en la base de la dovela y la longitud de la base (ecuación 5), mientras que las fuerzas en los nodos (f) dependen de la matriz de interpolación de las funciones $\langle N \rangle$ y los valores de fuerza en los puntos de Gauss {F} (ecuación 6).

$$F_m = \tau_m \beta \quad (5)$$

$$f = \langle N \rangle \{F\} \quad (6)$$

La fuerza normal resultante y la fuerza cortante movilizada se muestran en las ecuaciones 7 y 8. Ambas dependen de las fuerzas normales ($\sigma_x; \sigma_y$) y cortante (τ_{xy}) en la base de cada dovela, así como del ángulo positivo formado en el momento de aplicación de la carga (θ).

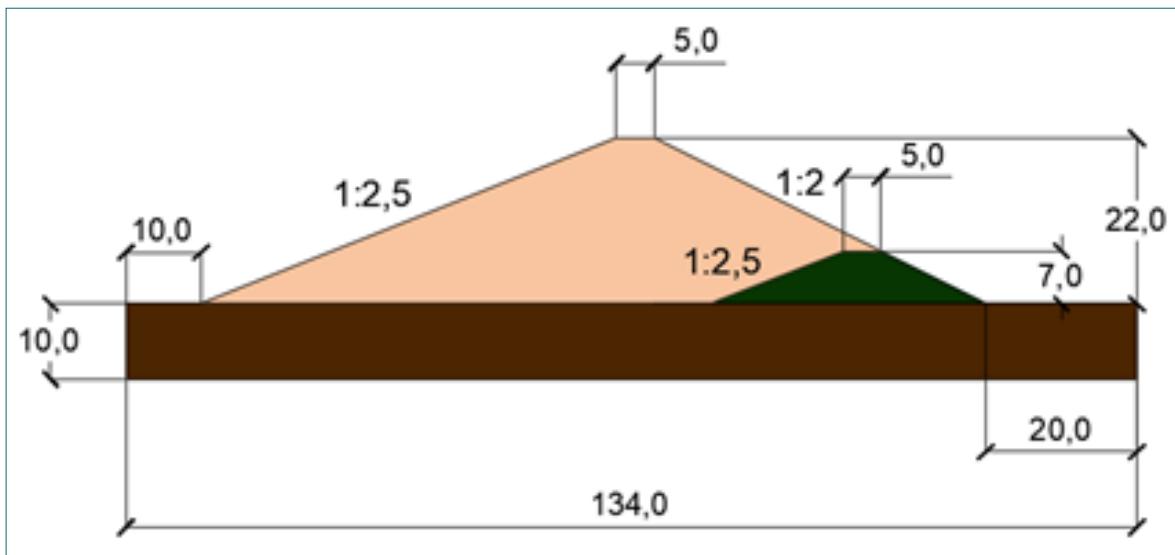
$$\sigma_n = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (7)$$

$$\tau_m = \tau_{xy} \cos 2\theta \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta \quad (8)$$

El paquete de programas recogidos dentro del GeoStudio 2018, comercializados por la empresa GeoSlope International Ltd., se basa en los diversos análisis que comprenden el suelo como componente fundamental. Es utilizado para el diseño y revisión de cimentaciones, análisis de estabilidad de presas, en la determinación de la red de flujo, estabilidad de taludes, terraplenes, entre otras estructuras. Este paquete presenta la posibilidad de calcular el factor de seguridad de taludes en presas de tierra a partir de la implementación del Método de Elementos Finitos [6]. En esta investigación se utilizan de forma acoplada dos de sus componentes: SEEP/W y SLOPE/W.

METODOLOGÍA PROPUESTA

Tras una revisión de la base de datos del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), el 69 % de las presas de tierra cubanas son homogéneas; de ellas, el 62 % presenta altura de cortina inferior a veintidós metros y cuyos procesos de construcción y mantenimiento se realizaron con base en la mecánica de suelos tradicional [6]. El modelo analizado es el de la presa de tierra mostrada en la figura 1.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 1. MODELO GEOMÉTRICO (METROS).

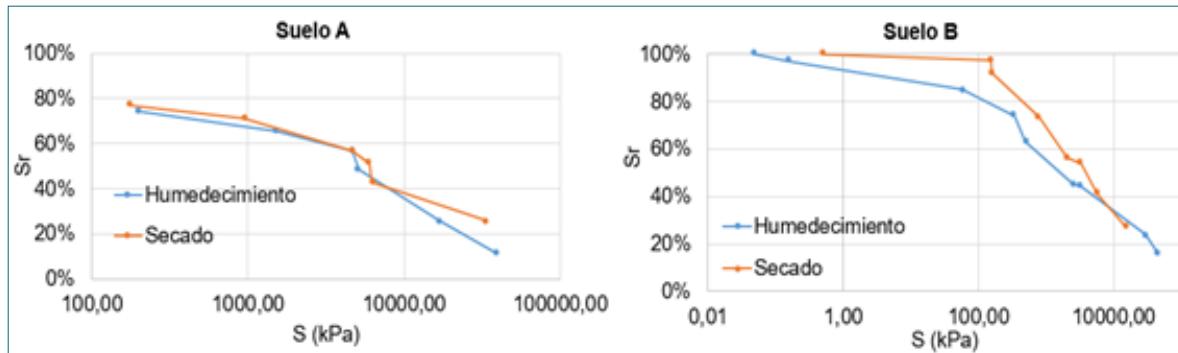
Como material de cortina se usan dos tipos de suelos con clasificación CH (arcillas de alta compresibilidad), pero diferentes valores de sus parámetros físico-mecánicos (tabla 1). En la base se modelan tres suelos con clasificación SC (arena arcillosa). A partir de la combinación de los tipos de suelos en la cortina y la base se establecen relaciones entre el ángulo de succión y de la curva característica de suelo no saturado. La relación de permeabilidad establecida es $k_x = 12k_y$ [2], [12].

TABLA 1. PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS DE LOS SUELOS DE ESTUDIO [2]

Características de los suelos de la cortina	Suelo A	Suelo B
Peso específico húmedo (γ_f) (kN/m ³)	18,53	16,32
Gravedad específica (G_s)	2,82	2,74
Ángulo de fricción interna efectivo (ϕ') (°)	14,5	22
Cohesión efectiva (c') (kPa)	49,6	29
Permeabilidad saturada (k_x) (m/s)	4,80E-08	8,00E-08
Módulo de elasticidad (E) (kPa)	23000	22000
Índice de compresibilidad volumétrica (m_v)	9,80E-05	1,00E-05
Coeficiente de Poisson (μ)	0,33	0,33

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de la curva característica correspondientes a los suelos empleados se muestran en la figura 2.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 2. CURVAS CARACTERÍSTICAS EXPERIMENTALES DE LOS SUELOS.

Para la obtención del ángulo de succión (ϕ^b), se ofrecen valores en un intervalo entre 50 y 100 % de grado de saturación, pues para menores valores de saturación se obtienen succiones demasiado elevadas, que pocas veces se alcanzan en la naturaleza [13]. Los resultados correspondientes se muestran en la tabla 2, donde Sr es el grado de saturación.

TABLA 2. VALORES DEL ÁNGULO ϕ^b DE LOS SUELOS

Sr	Suelo A	Suelo B
1,0	14,5	22
0,9	13,1	19,8
0,8	11,7	17,7
0,7	10,3	15,6
0,6	8,8	13,6
0,5	7,4	11,4

Fuente: elaboración propia.

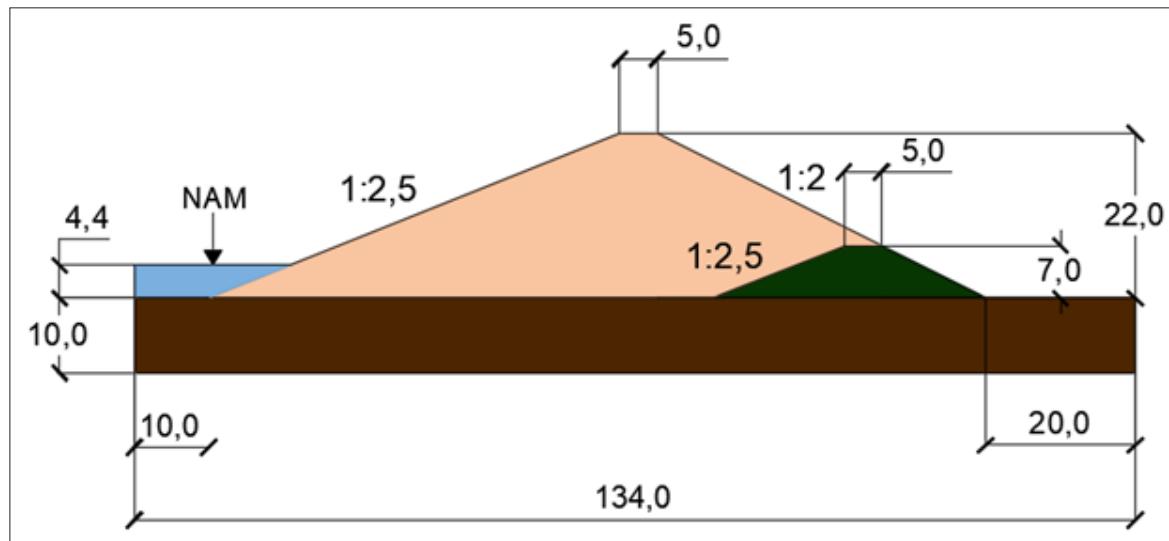
Las tres bases estudiadas se tienen en cuenta considerando el estado de saturación total, mientras que el drenaje fue definido considerando que debe ser un material grueso con alta permeabilidad [14], [15]. La relación de permeabilidad establecida en todos los casos es unitaria [2]. Las propiedades correspondientes se muestran en la tabla 3.

TABLA 3. PROPIEDADES DE LOS SUELOS DE LA BASE Y EL DRENAJE [2]

Características de los suelos	C1	C2	C3	Drenaje
Peso específico húmedo (γ_f) (kN/m ³)	17,5	18,5	19,5	21
Ángulo de fricción interna (ϕ) (°)	35	37	39	40
Cohesión (c) (kPa)	10	15	20	0
Permeabilidad saturada (k_x) (m/s)		1,00E-06		0,001
Módulo de elasticidad (E) (kPa)	65000	75000	85000	18000
Índice de compresibilidad volumétrica (m_v)		1,00E-05		1,00E-05

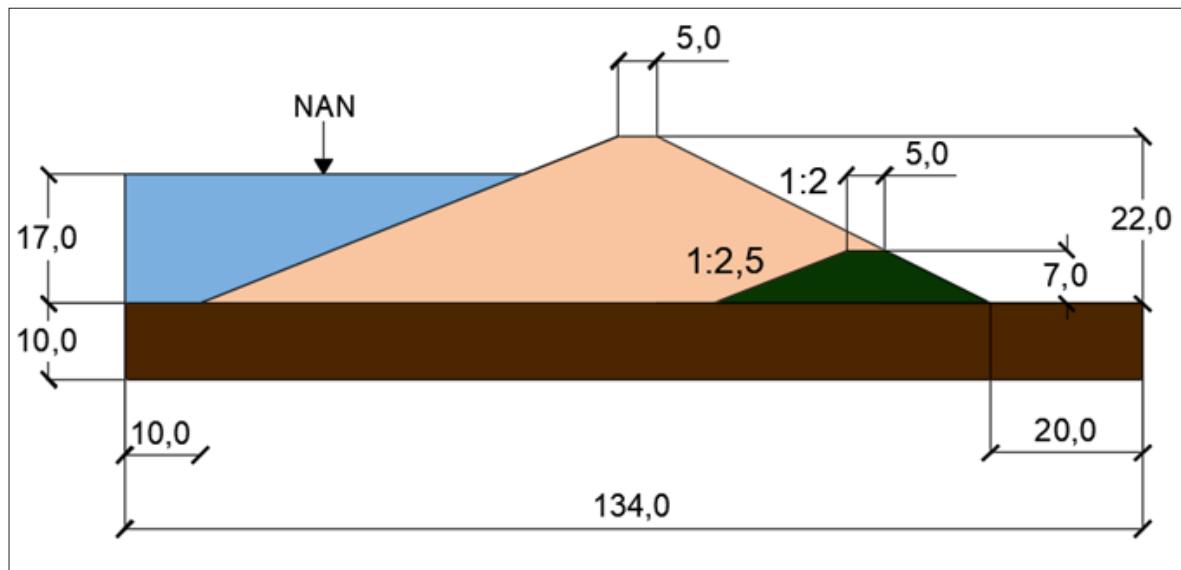
Fuente: elaboración propia.

Para los estados de operación y final de la construcción se emplearon los niveles de aguas normales (NAN) o muertas (NAM), como se muestra en las figuras 3 y 4.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 3. FINAL DE LA CONSTRUCCIÓN (METROS).



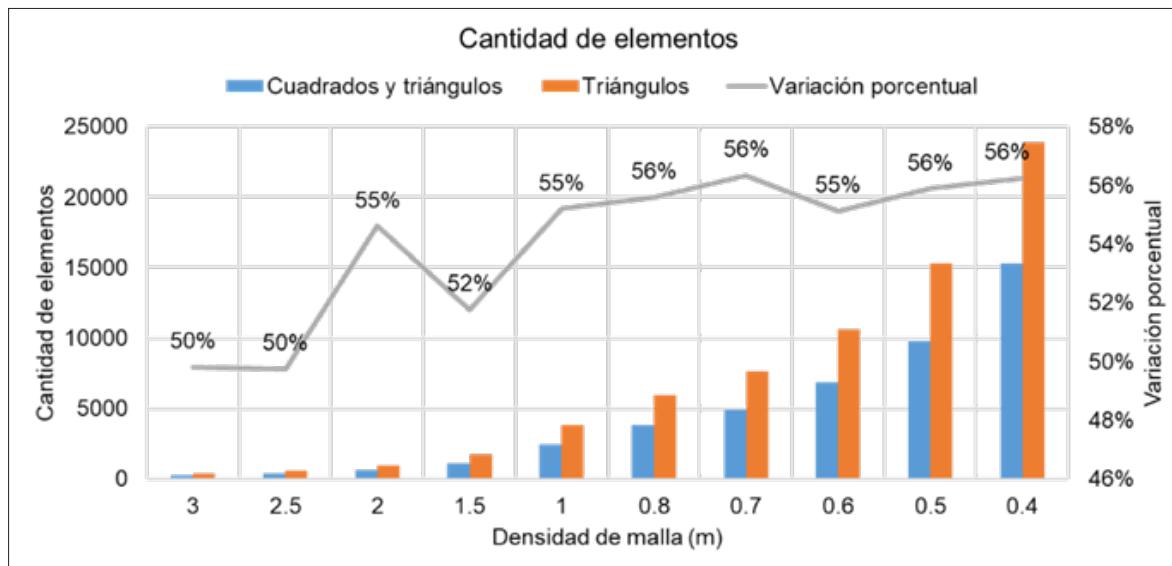
Fuente: elaboración propia.

FIGURA 4. OPERACIÓN (METROS).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para realizar el análisis utilizando el MEF, se modela la estructura con la herramienta SEEP/W, donde se realiza la calibración de la malla que se va a emplear. Aunque la modelación tridimensional ofrece una representación más realista del problema en cuestión, para taludes con geometrías constantes y poco complejas un modelo bidimensional presenta resultados adecuados para el análisis de la estabilidad [16] factored based on the spacing distance, corresponds to extending anchors indefinitely in the third dimension. A three-dimensional (3D). Igualmente, se ha demostrado que el factor de seguridad crítico para el análisis tridimensional es más alto que el factor de seguridad bidimensional, independientemente de la estratigrafía y de la pendiente [17], [18].

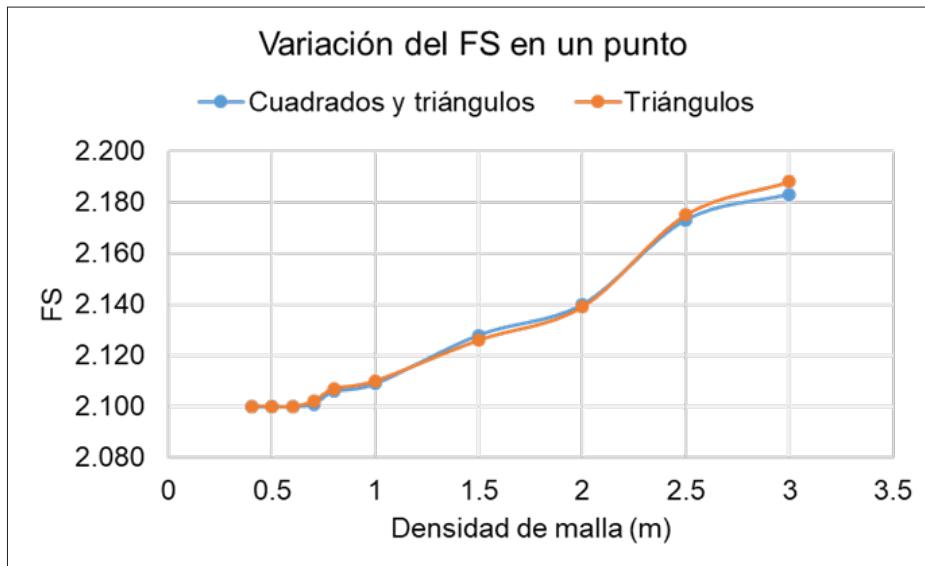
El GeoStudio 2018 permite implementar varios tipos de elementos, dependiendo de la geometría del modelo en cuestión. Los resultados para la presa de tierra analizada se muestran en la figura 5.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 5. TIPOS Y CANTIDAD DE ELEMENTOS.

En la figura 5 se observa que para elementos triangulares solamente, el incremento es superior al 50 % en todos los casos respecto a los resultados obtenidos al definir cuadrados y triángulos. Para analizar la variación del factor de seguridad en un punto con las variaciones de los tipos de elemento y de densidades de malla, se muestra la figura 6 [2].

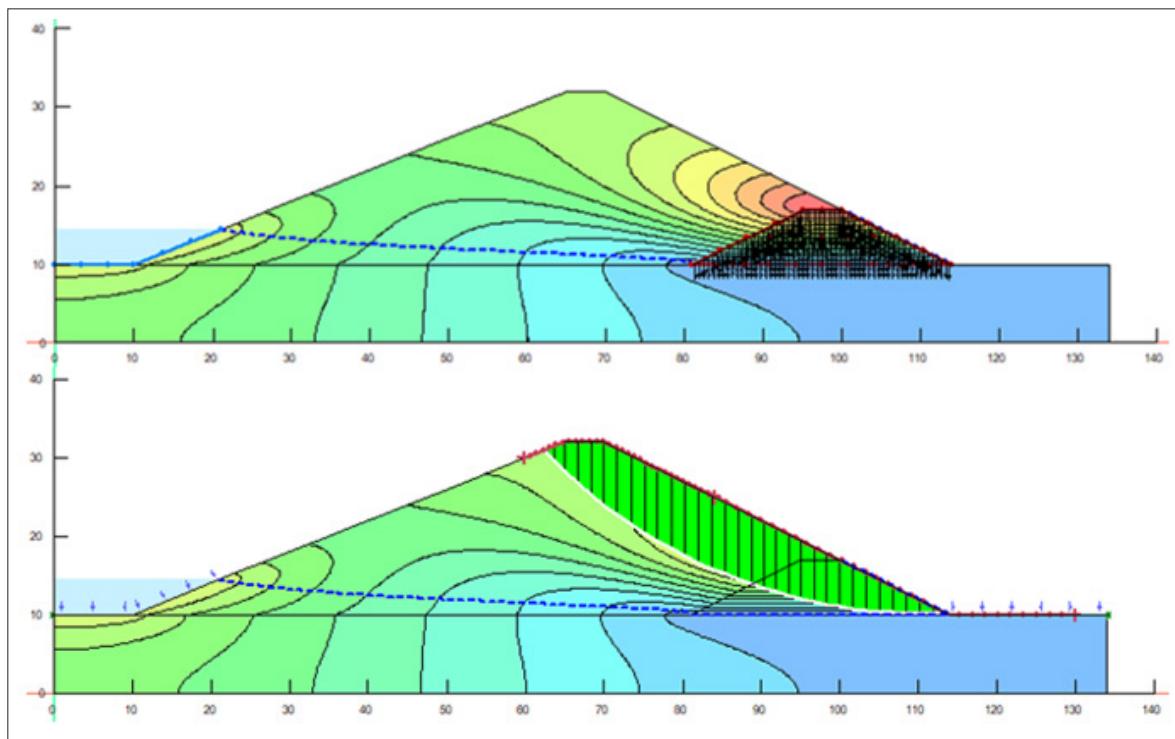


Fuente: elaboración propia.

FIGURA 6. COMPORTAMIENTO DEL FS EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD DE MALLA.

En la figura 6 se observa que el FS disminuye al reducir la densidad del mallado. La variación es de 4 % para ambos tipos de elementos analizados, lo cual no resulta significativo [2]. A partir de una densidad de 0,6 metros, el FS no muestra variaciones; por lo tanto se selecciona una malla conformada por cuadrados y triángulos con una densidad de 0,6 metros.

El deslizamiento de taludes al final de la construcción tiene lugar en el talud aguas abajo y la presión de poros generada se debe al flujo de filtración establecido por el NAM de la presa. Los resultados obtenidos en el GeoStudio se muestran en la figura 7.

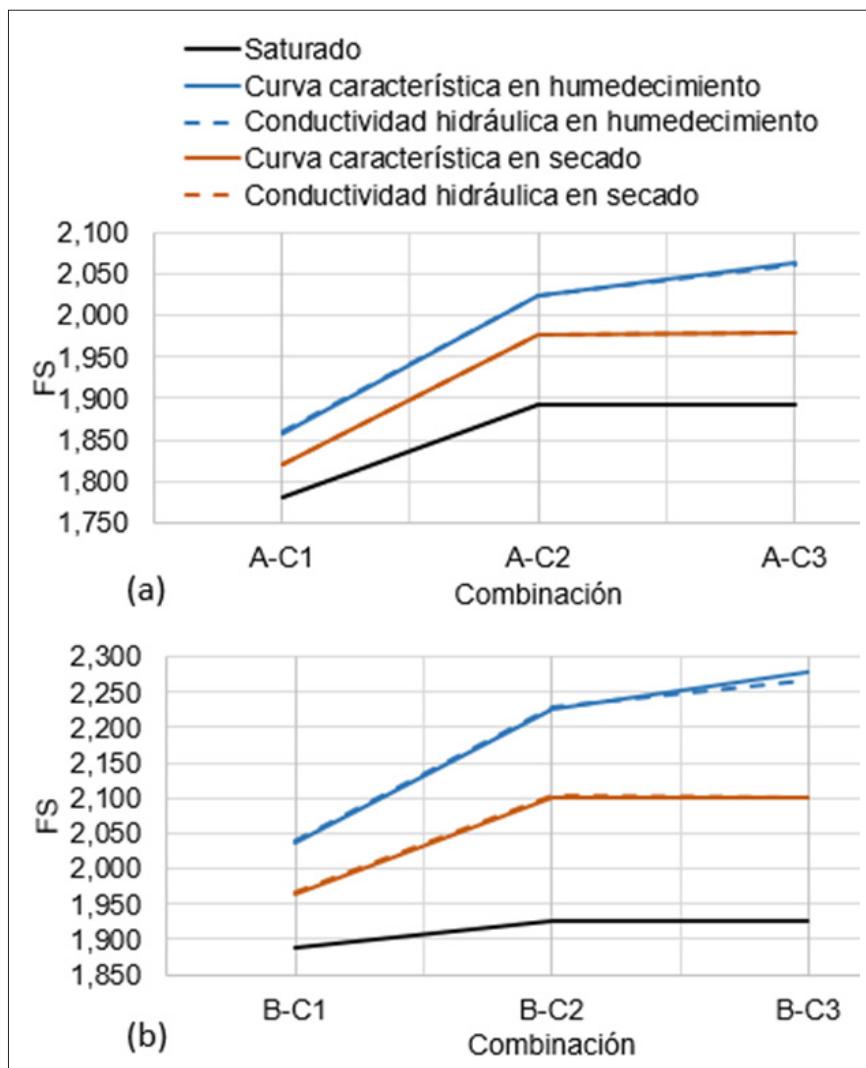


Fuente: elaboración propia.

FIGURA 7. MODELO AL FINAL DE LA CONSTRUCCIÓN.

El análisis del factor de seguridad se realiza en el SLOPE/W, trasladando los resultados del SEEP/W, considerando la curva característica experimental, el ángulo de succión (ϕ^b) y la curva de conductividad hidráulica.

Los resultados para el FS considerando las curvas características y de conductividad hidráulica para ambos suelos y las tres bases se muestran en la figura 8.



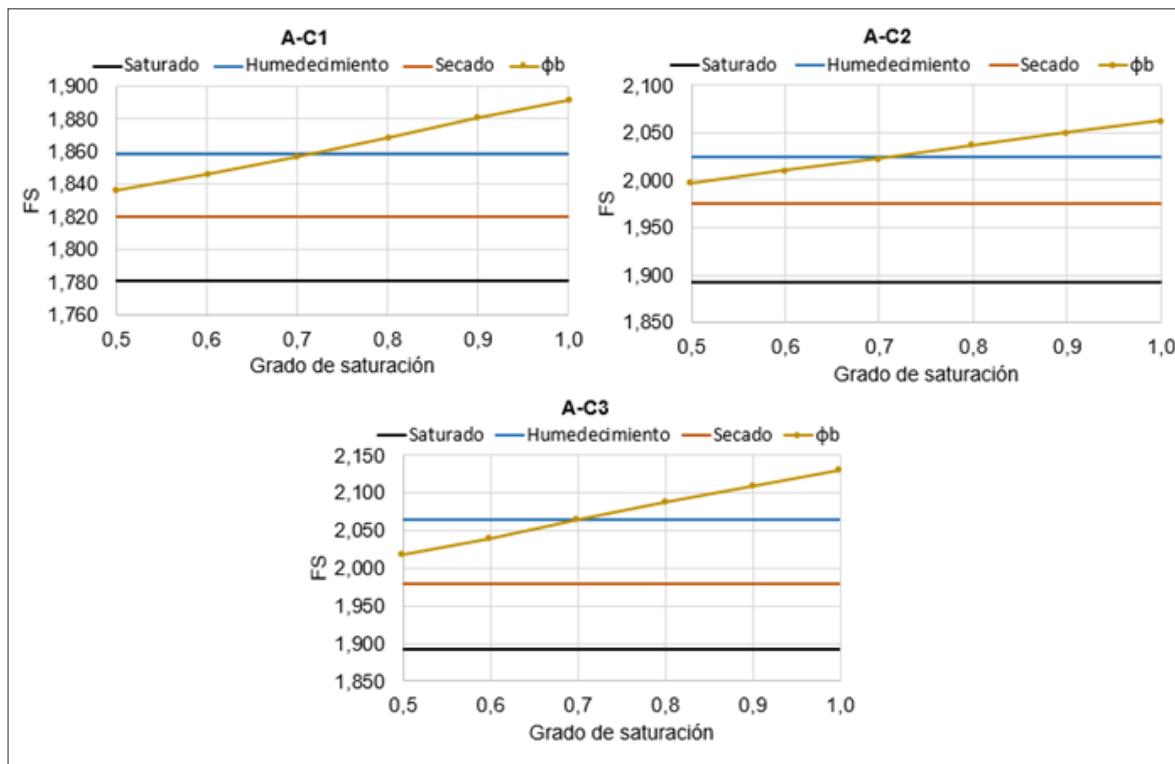
Fuente: elaboración propia.

FIGURA 8. RESULTADOS DEL ESTUDIO AL FINAL DE LA CONSTRUCCIÓN. (a) FS PARA EL SUELO A CON AMBAS CURVAS. (b) FS PARA EL SUELO B CON AMBAS CURVAS.

En las figuras 8 (a) y (b) no se observan diferencias entre los FS obtenidos para ninguno de los suelos empleando las curvas características y de conductividad hidráulica. Sin embargo, entre la rama en secado y la rama en humedecimiento existe una diferencia de hasta 5 % para el suelo A y 8 % para el suelo B. Entre el suelo saturado y parcialmente saturado se presenta una diferencia de hasta 10 % para el suelo A y 19 % para el suelo B. Este comportamiento se asocia a las restantes propiedades físicomecánicas de los suelos, como la cohesión y el ángulo de fricción interna. Adicionalmente, el FS aumenta si lo hacen las propiedades de la base; por lo tanto, para las

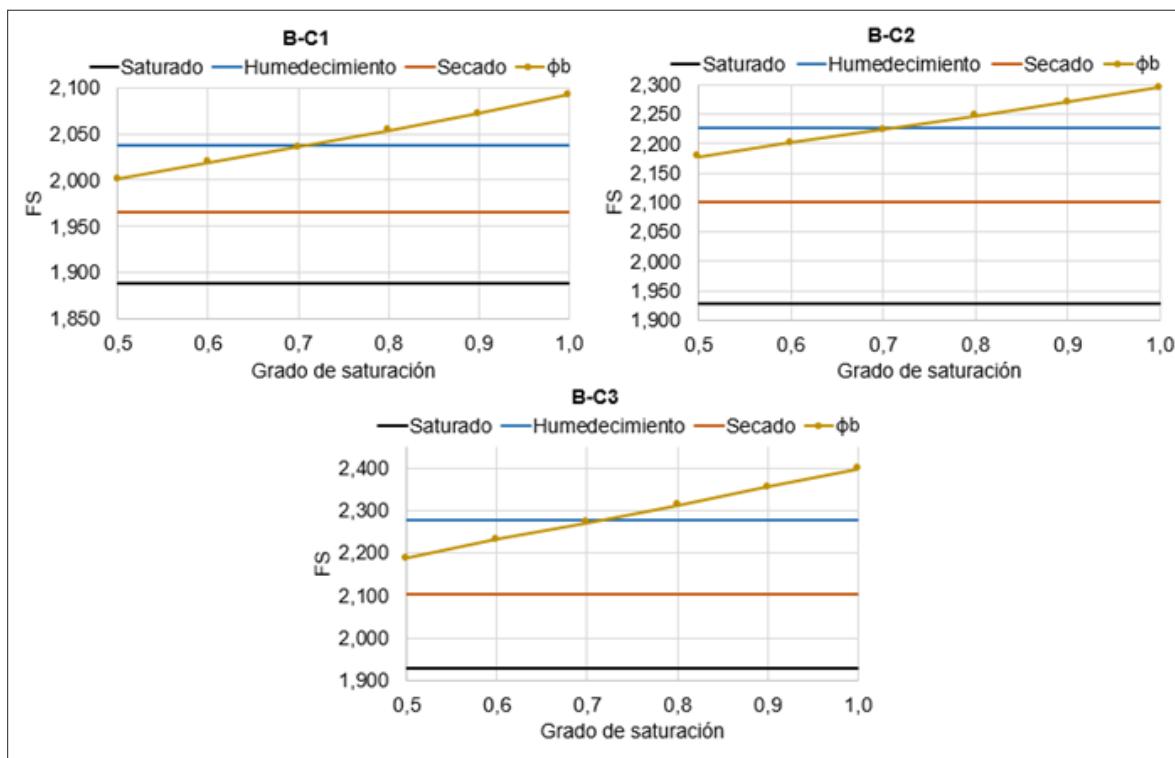
combinaciones con la base tipo C₁ se obtuvieron FS inferiores a las correspondientes con la base tipo C₃, sin importar si el suelo de la cortina se encontraba saturado o parcialmente saturado.

El comportamiento del ángulo de succión en la etapa de final de la construcción para cada caso, comparando solo con el suelo saturado y la curva característica, se muestra en las figuras 9 y 10.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 9. COMPORTAMIENTO DEL FS CONSIDERANDO EL ÁNGULO DE SUCCIÓN PARA EL SUELO A AL FINAL DE LA CONSTRUCCIÓN.



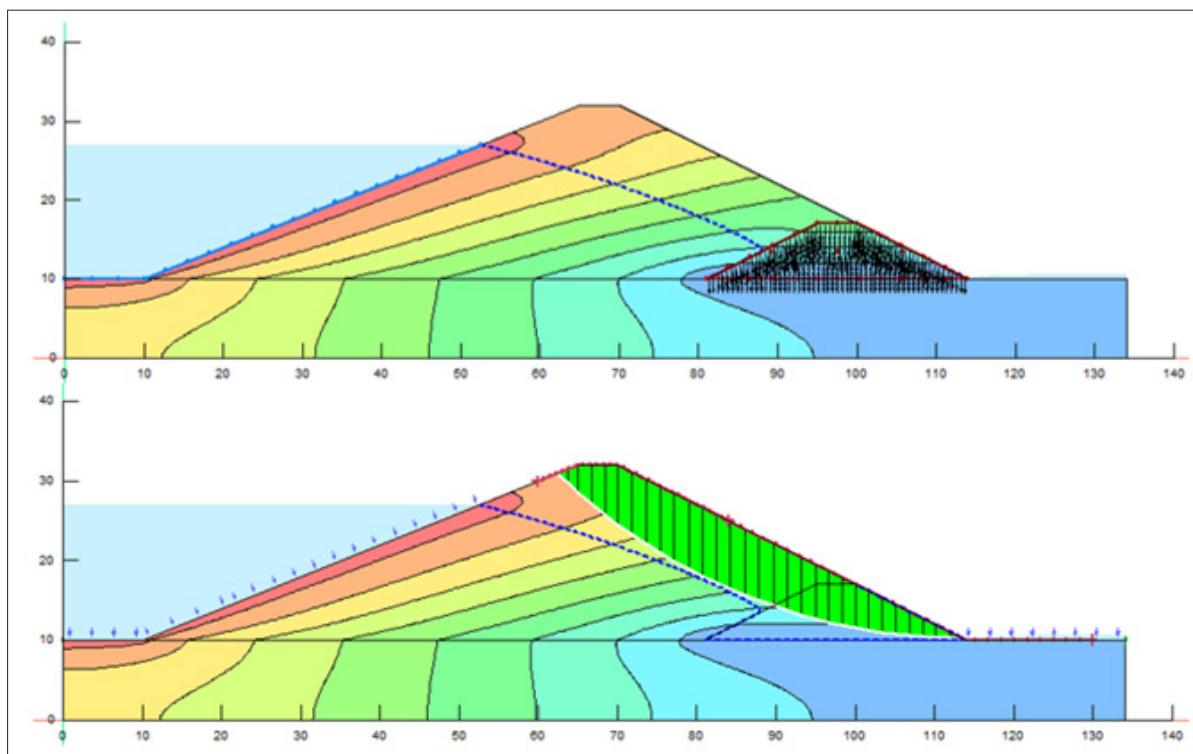
Fuente: elaboración propia.

FIGURA 10. COMPORTAMIENTO DEL FS CONSIDERANDO EL ÁNGULO SE SUCCIÓN PARA EL SUELO B AL FINAL DE LA CONSTRUCCIÓN.

En las figuras 9 y 10 se observa que para el suelo A se obtienen valores de FS inferiores a los obtenidos con las curvas para los ángulos de succión considerados dentro del mismo rango. Mientras que para el suelo B los valores de FS dentro del rango analizado son superiores a los máximos alcanzados con las curvas características o las curvas de conductividad hidráulica.

Diversos autores [9], sugieren que el valor del ángulo de succión se fije como $\phi^b = \phi'$ o $\phi^b = 1/2 \phi'$ en función del caso analizado. A partir de los resultados obtenidos para estos suelos, se sugiere de forma general $\phi^b = 0,7 \phi'$ que en los análisis al final de la construcción. Dado que cuando $\phi^b = \phi'$ se obtienen valores de factores de seguridad muy superiores a los obtenidos con las curvas características experimentales.

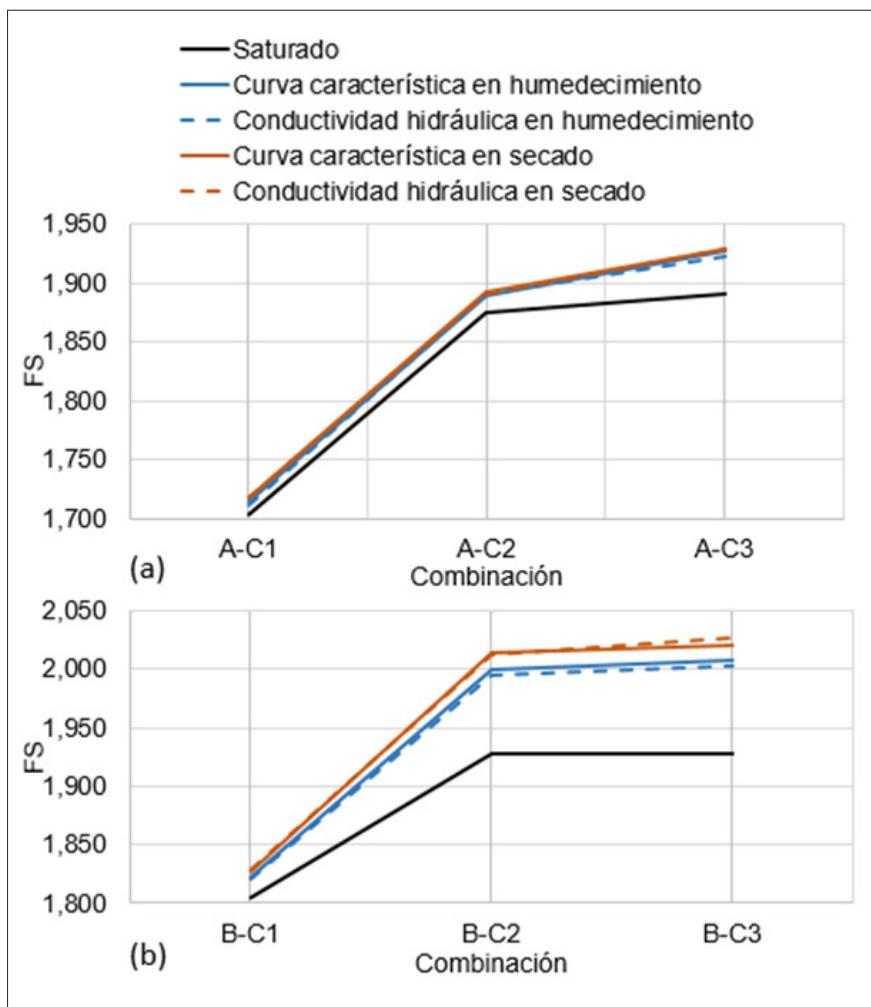
El análisis de la estabilidad de taludes en el estado de operación se considera en el talud aguas abajo y la presión de poros generada es debido al NAN en la presa [2]. Los modelos correspondientes, empleando el GeoStudio 2018, se muestran en la figura 11.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 11. MODELO EN OPERACIÓN.

Los resultados de los FS en operación, considerando las curvas características y la hidráulica para ambos suelos y las tres bases, aparecen en la figura 12.

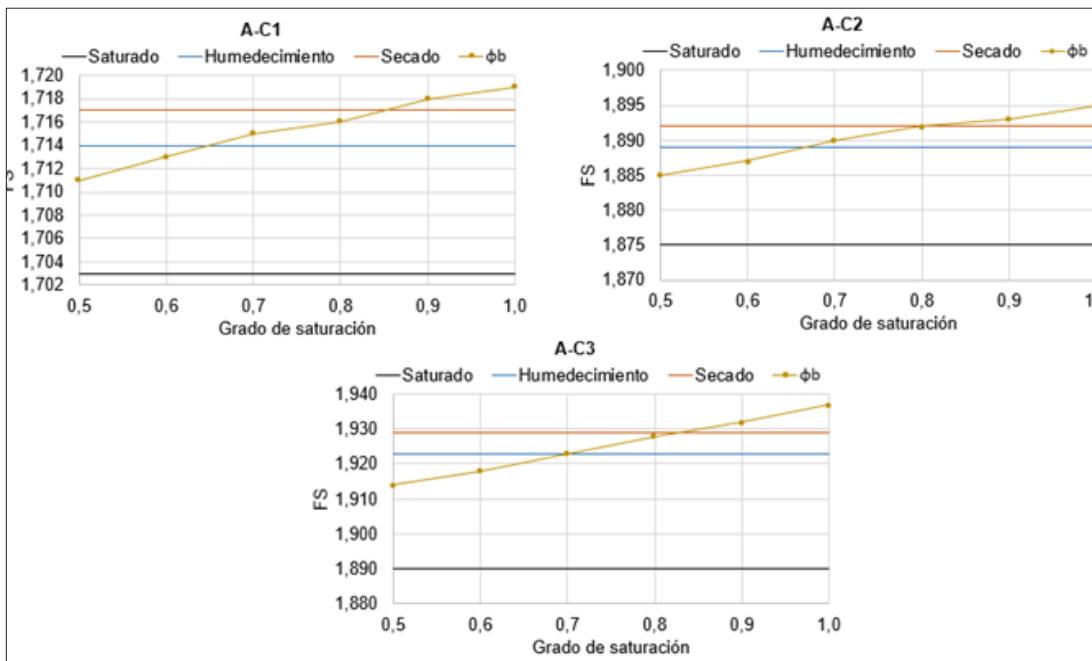


Fuente: elaboración propia.

FIGURA 12. RESULTADOS DEL ESTUDIO EN OPERACIÓN. (A) FS PARA EL SUELO A CON AMBAS CURVAS. (B) FS PARA EL SUELO B CON AMBAS CURVAS.

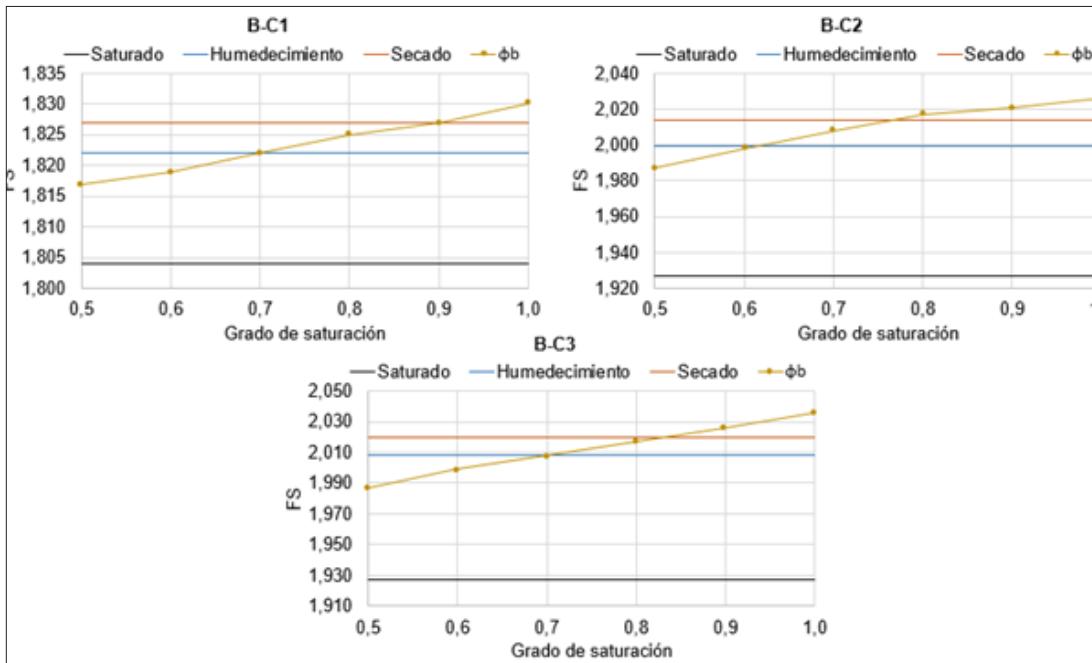
Las figuras 12 (a) y (b) presentan el mismo comportamiento que en las figuras 8 (a) y (b). Sin embargo, los incrementos son inferiores al 1 % entre ambas ramas de la curva característica, sin importar el tipo de suelo. Por otra parte, entre el suelo saturado y parcialmente saturado la variación es de hasta 2 % para el suelo A y hasta 4 % para el suelo B; lo que se explica por la presencia de la línea de corriente superior a una mayor altura dentro de la cortina de la presa, lo cual modifica el comportamiento del FS, reduciendo la influencia de las propiedades de los suelos no saturados. En el análisis del tipo de base, el comportamiento es el mismo que para el estado de final de la construcción.

El comportamiento del ángulo de succión en la etapa de final de la construcción para cada caso se muestra en las figuras 13 y 14.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 13. COMPORTAMIENTO DEL FS CONSIDERANDO EL ÁNGULO SE SUCCIÓN PARA EL SUELO A EN OPERACIÓN.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 14. COMPORTAMIENTO DEL FS CONSIDERANDO EL ÁNGULO SE SUCCIÓN PARA EL SUELO B EN OPERACIÓN.

En las figuras 13 y 14 se observa que para todos los suelos los valores de factor de seguridad dentro del rango analizado oscilan entre los valores de las curvas características o las curvas de conductividad hidráulica.

Varios autores [9], sugieren que el valor del ángulo de succión se fije como $\phi^b = \phi' + \phi^b = 1/2 \phi'$ en función del caso analizado. A partir de los resultados obtenidos para estos suelos, se sugiere de forma general que $\phi^b = 0,8 \phi'$ en los análisis en operación.

CONCLUSIONES

A partir de lo expuesto anteriormente es posible concluir que en el estado de final de construcción con el NAM, se observan incrementos del FS desde 7 hasta 20 % en los modelos estudiados, siendo el FS superior para todos los casos con la base tipo C₃.

El incremento del FS en operación es inferior al 4 %. Por lo tanto, la posición de la línea de corriente superior y el nivel de llenado del embalse influyen de manera directa en el efecto de la succión en la estabilidad, sin importar el método mediante el cual se incluya en el análisis, pudiendo ser mediante la curva característica y la de conductividad hidráulica o con el uso del ángulo de fricción directamente.

Es posible utilizar el ángulo de succión como una constante, pero se recomienda que en el análisis de estabilidad al final de la construcción, el ángulo de succión se calcule empleando la relación $\phi^b = 0,7 \phi'$, mientras que en el estado de operación se utilice la relación $\phi^b = 0,8 \phi'$.

REFERENCIAS

- [1] J. G. Tristá, “Estudio del comportamiento tenso-deformacional de suelos parcialmente saturados en Cuba”, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas; Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, 2015.
- [2] I. Flores, Y. G. Haramboure y J. G. Tristá, “Modificación de pendientes en taludes de presas de tierra bajo condiciones de saturación parcial”, en *Simpósio Internacional de Construcciones*, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, 2021. Disponible en: <https://convencion.uclv.cu/es/event/simposio-internacional-de-construcciones-108/track/modificacion-de-pendientes-en-taludes-de-presas-de-tierra-bajo-condiciones-de-saturacion-parcial-3490>
- [3] A. O. Alanís, “Deformación volumétrica en suelos no saturados”, Universidad Autónoma de Querétaro, 2012. Disponible en: <http://hdl.handle.net/123456789/2317>.
- [4] L. L. Zhang, D. G. Fredlund, M. D. Fredlund y G. Ward Wilson, “Modeling the unsaturated soil zone in slope stability analysis”, Canadian Geotechnical Journal, vol. 51, pp. 1-15, 2014. doi: 10.1139/cgj-2013-0394.

- [5] F. M. O. Mohamed, S. K. Vanapalli y M. Saatcioglu, "Bearing capacity and settlement behaviour of footings in an unsaturated sand", en *Geotechnical Conference*, 2011, pp. 1-8.
- [6] I. Flores, J. G. Tristá y Y. G. Haramboure, "Estabilidad de taludes durante un desembalse rápido en presas de tierra con suelos parcialmente saturados", *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 38, n°. 1, p. 19, 2020. doi: 10.14482/inde.38.1.624.15
- [7] S. K. Vanapalli, D. G. Fredlund y D. E. Pufahl, "The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till.", *Géotechnique*, vol. 49, n°. 2, pp. 143 - 159, 1999.
- [8] D. G. Fredlund, "Determination of unsaturated soil property functions for engineering practice", en *17th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Oct 2019, pp. 3-19. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/341359018>
- [9] J. A. Mendoza, "Influencia de las propiedades no saturadas del suelo en los análisis numéricos de flujo de agua y estabilidad de taludes", Universidad Nacional Autónoma de México, 2018.
- [10] H. Rahardjo, Y. Kim y A. Satyanaga, "Role of unsaturated soil mechanics in geotechnical engineering", *International Journal of Geo-Engineering*, pp. 1-23, 2019. doi: 10.1186/s40703-019-0104-8.
- [11] D. G. Fredlund y H. Rahardjo, *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York: John Wiley & Sons, 1993, p. 567. doi: 10.1002/9780470172759
- [12] R. Armas y E. Horta, *Presas de Tierra*. Ingeniería Hidráulica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana, Cuba.
- [13] D. G. Fredlund, *Implementación de la mecánica del suelo parcialmente saturado en la práctica de la ingeniería geotécnica*. Medellín: Litoimpresos, 2003, p. 96.
- [14] D. Coduto, *Foundation design*, 2nd ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2001, p. 875.
- [15] B. Das, *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. California: Universidad de California, 2008.
- [16] M. Fredlund, G. Gitirana, R. McKeown y H. Lu, "Comparison of 2D and 3D anchor analysis methodologies", p. 10, Oct 2019.
- [17] L. L. Zhang, M. D. Fredlund, D. G. Fredlund y H. Lu, "Comparison of 2-D and 3-D slope stability analyses for unsaturated soil slopes", en *Proceedings of the 67th Canadian Geotechnical Conference*, 2014. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/346650295_Comparison_of_2-D_and_3-D_slope_stability_analyses_for_unsaturated_soil_slopes

- [18] D. G. Fredlund y M. D. Fredlund, “Developments in Landslide Analysis”, p. 23, Nov 2019. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/340438451_Developments_in_Landslide_Analysis (lo resaltado con color amarillo, si este es el título del trabajo, debwe agregarse el nombre de la publicacion (en cursiva); si es el nombre de la publicacion , quitar las comillas y escribirlo con cursiva y agregar el título del trabajo).