

INFLUENCIA DEL ESTADO TENSO-DEFORMACIONAL EN LA ESTABILIDAD- DE TALUDES CON SUELOS NO SATURADOS

Anny Valdés Rodríguez¹, Isaida Flores Berenguer², Jenny García Tristá³, Yoermes González Haramboure⁴

¹ Ingeniera Civil, Empresa de Construcción y Montaje Mariel, Carretera Quiebra Hacha km 8 1/2, Península de Angosta, Vista del Mar, Mariel, Matanzas. Cuba. E-mail: anny@ecmmariel.cu

² Ingeniera Civil, Máster en Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría", Calle 114, # 11901, e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao. La Habana. Cuba. E-mail: isaidafb@civil.cujae.edu.cu

³ Ingeniera Civil, Doctora en Ciencias Técnicas, Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría", Calle 114, # 11901, e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao. La Habana. Cuba. E-mail: jenny@civil.cujae.edu.cu

⁴ Ingeniero Hidráulico, Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría", Calle 114, # 11901, e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao. La Habana. Cuba. E-mail: yoermes@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN

Dentro de la Mecánica de Suelos moderna el estudio de los suelos parcialmente saturados ha sido de gran importancia en los últimos años. En la presente investigación se modelan presas de tierra homogéneas con sus cimentaciones, para una altura de cortina de 20 y 30 metros; con suelo Vía Blanca en la cortina y suelo Mariel en la cimentación. El tipo de drenaje definido para todos los casos es el colchón de drenaje y el estado de carga es el de operación. El modelo se ejecuta en el programa GeoStudio (2012), con las herramientas: SIGMA/W, SEEP/W y SLOPE/W. Se realiza la comparación entre el comportamiento en estado saturado y parcialmente saturado, a partir de la introducción de la curva característica de los suelos de estudio mediante el Método de Elementos Finitos, y se analiza la influencia del estado tenso-deformacional dentro de la estabilidad del talud aguas abajo, al considerar la presencia o no de agua dentro de la cortina de la presa. Pudiendo notarse una variación significativa entre los resultados obtenidos aplicando el Método de Elementos Finitos respecto a los Métodos de Equilibrio Límite tradicionales.

Palabras claves: estabilidad de taludes, presas de tierra, succión, suelos parcialmente saturados.

INFLUENCE OF THE TENSO-DEFORMATIONAL STATE ON THE STABILITY OF SLOPES WITH NON-SATURATED SOILS

ABSTRACT

Within the modern Soil Mechanics, the study of partially saturated soils has been of great importance in recent years. In the present investigation, homogeneous earth dams are modeled with their foundations, for a curtain height of 20 and 30 meters; with Vía Blanca floor in the shade and Mariel floor in the foundation. The type of drainage defined for all cases is the drainage mattress and the state of loading is that of operation. The model is executed in the GeoStudio program (2012), with the tools: SIGMA / W, SEEP / W and SLOPE / W. The Finite Element Method makes the comparison between the behavior in a saturated and partially saturated state, from the introduction of the characteristic curve of the study soils, and the influence of the tensile-deformational state within the stability of the soil is analyzed. Downstream slope, when considering the presence or not of water within the curtain of the dam. Being able to notice a significant variation between the results obtained by applying the Finite Element Method with respect to the Traditional Limit Balance Methods.

Keywords: earth dams, partially saturated soils, slope stability, suction.

Nota Editorial: Recibido: enero 2020; Aceptado: junio 2020

1. INTRODUCCIÓN

En el estudio del comportamiento geotécnico de los suelos se han diferenciado dos estados en los que estos se encuentran: saturado y parcialmente saturado. Existen diversos problemas geotécnicos en la actualidad a los que se les da solución mediante la Mecánica de Suelos Parcialmente Saturado, en lugar de la Mecánica

de Suelos tradicional [1–3].

Las presas de tierra son estructuras fundamentales para el desarrollo económico y social de un país, por lo que su adecuada funcionalidad es un tema relevante en la implementación del estudio de la estabilidad de taludes con suelos parcialmente saturados [4], [5].

El objetivo principal del diseño y construcción de presas de tierra es garantizar que no se produzcan fallas graves o catastróficas. Desde el punto de vista de resistencia, el problema fundamental que se genera es la forma en que la presa absorberá la presión que le transmite el agua sin romperse y sin transmitir al terreno natural más carga de la que éste puede soportar. Otra característica básica en el diseño es localizar las presiones indeseadas dentro de la estructura provocadas por la penetración del agua en todos los intersticios y disipar el exceso de presión que esta condición genera [4], [6], [7]. Un aspecto sumamente importante a tener en cuenta respecto a las presas de tierra, es la estabilidad de los taludes, específicamente del talud aguas abajo, los cuales son propensos a la ocurrencia de diversas fallas. Estas fallas son las roturas y desplazamientos del suelo que conforma el talud, originando un movimiento de toda la masa que participa, pudiendo provocar el colapso de la presa [8], [9].

El factor de seguridad del talud, expresa la reducción de la resistencia a cortante del suelo para que se produzca el deslizamiento a lo largo de la superficie de falla. Existen diversos métodos para obtenerlo, en los últimos años se ha implementado el Método de Elementos Finitos (MEF), el cual permite realizar análisis elasto-plásticos que tienen como enfoque determinar las cargas de colapso; a partir de las cuales se pueden calcular los factores de seguridad, que dependen de las características mecánica y geométricas de los taludes [6].

Para el análisis de la estabilidad, el MEF se basa en la ecuación (1):

$$FS = \frac{\sum S_r}{\sum S_m} \quad (1)$$

Donde S_r es la resistencia cortante total disponible y S_m es el esfuerzo cortante total movilizado a lo largo de la superficie de falla.

La fuerza de resistencia disponible de cada dovela se calcula multiplicando la resistencia al corte del suelo en el centro de la base de la dovela por la longitud de la base. 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 (2).

$$S_r = s\beta = (c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b)\beta \quad (2)$$

Donde s es la fuerza de corte efectiva del suelo en el centro de la base de una dovela, β es la longitud de la base de una dovela y σ_n es la tensión normal en el centro de la base de una dovela.

De manera similar, 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 el centro de la base de la dovela y la longitud de la base, según la ecuación (3).

$$S_m = \tau_m\beta \quad (3)$$

Para obtener las fuerzas normales y las fuerzas cortantes movilizadas se utiliza la ecuación (4).

$$f = \langle N \rangle \{F\} \quad (4)$$

Donde f es la fuerza en el nodo, $\langle N \rangle$ es la matriz de la interpolación de funciones y $\{F\}$ son los valores de fuerza en los puntos de Gauss.

La fuerza normal resultante, que es perpendicular a la base de la dovela, ecuación (5) y la fuerza cortante movilizada, que es paralela a la base de la dovela, ecuación (6) se muestran a continuación:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (5)$$

$$\tau_m = \tau_{xy} \cos 2\theta - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta \quad (6)$$

Donde σ_x : es la fuerza total en la dirección de “x” en el centro de la base, σ_y es la fuerza total en la dirección de “y” en el centro de la base, τ_{xy} es la fuerza cortante en las direcciones de “x”, “y” en el centro de la base y θ es el ángulo formado por la dirección positiva de “x” en el momento de aplicación de la fuerza normal.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de los ensayos a los suelos estudiados y su posterior clasificación se siguieron las orientaciones de las normas cubanas vigentes [10–12]. La permeabilidad, en la naturaleza, se puede diferenciar en cada sentido: horizontal y vertical, de forma numérica, por lo tanto, se propone la una relación de permeabilidad en cada caso. Los resultados correspondientes se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Propiedades de los suelos de la cortina y la cimentación.

Características de los suelos	Suelo Vía Blanca	Suelo Mariel
Peso específico húmedo (γ_f) (kN/m ³)	17,50	20,48
Gravedad específica (Gs)	2,76	2,70
Ángulo de fricción interna efectivo (ϕ') (°)	26,5	47
Cohesión efectiva (c') (kPa)	46	0
Permeabilidad saturada (k_x) (m/s)	2,49E-09	3,52E-06
Módulo de elasticidad (E) (kPa)	65000	150000
Índice de compresibilidad volumétrica (Mv)	1,00E-05	1,00E-05
Coefficiente de Poisson (μ)	0,33	0,33
Relación de permeabilidad	$k_x = 9k_y$	$k_x = 9k_y$
Clasificación (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos)	MH (limo elástico y tipo grava con arena)	SC (arena arcillosa con grava)

Las curvas características de los suelos estudiados, fueron obtenidas a partir de la norma ASTM-D5298 [13], utilizando el método del papel del filtro, con papel tipo Whatman No. 42. Los resultados para el suelo de la cortina se muestran la Figura 1.

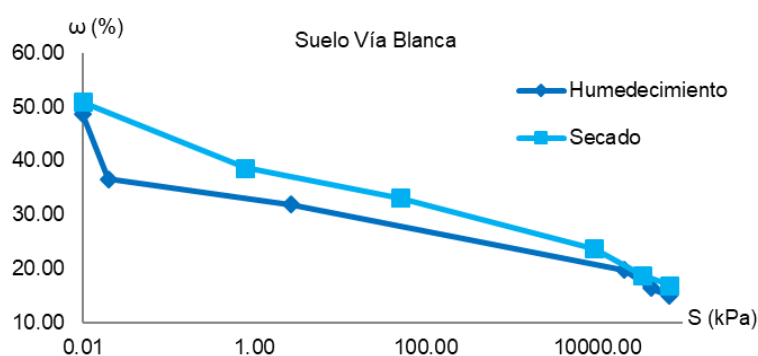


Figura 1: Curva característica del suelo de la formación Vía Blanca

Para el caso del colchón de drenaje, el material se definió de acuerdo a las características que debe cumplir el mismo, como son: una alta permeabilidad y que debe ser un material grueso tipo grava [14]. Los resultados se muestran en la Tabla 2

Tabla 2: Propiedades del colchón de drenaje.

Peso específico húmedo (kN/m ³)	21	Ángulo de dilatación (°)	18
Cohesión (kPa)	0	Permeabilidad (k_x)	10
Fricción interna (°)	48	Relación de permeabilidad	$k_x = k_y$
Módulo de elasticidad (kPa)	18 000		

Los casos de estudio son presas de tierra de 20 y 30 metros de altura de cortina, con colchón de drenaje y cimentación rectangular, mostradas en las figuras 2 y 3, considerando que las unidades son en metros.

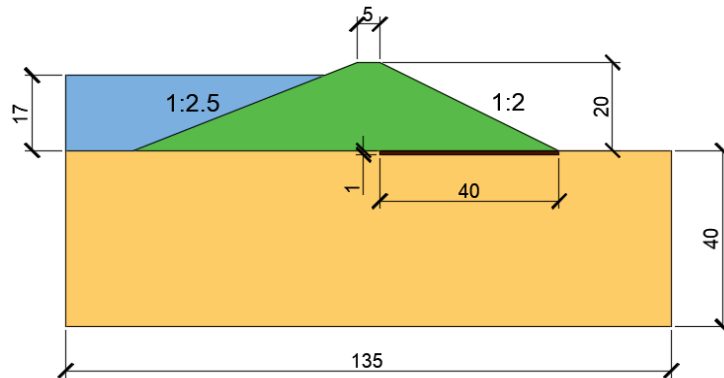


Figura 2: Presa de tierra con 20 metros de altura de cortina (todas las unidades en metros)

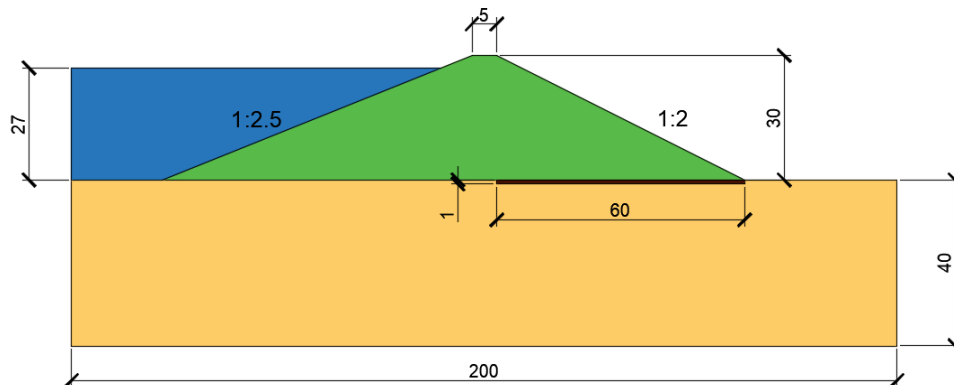


Figura 3: Presa de tierra con 30 metros de altura de cortina (todas las unidades en metros)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para realizar la calibración del modelo, los patrones de mallas seleccionados, teniendo en cuenta la geometría de la presa, fueron los cuadrados y triángulos, pues es el que garantiza mayor exactitud dada la geometría no uniforme de los elementos [15]. El resultado de la densidad de malla en función del asentamiento producido en la corona de la presa se muestra en la figura 4.

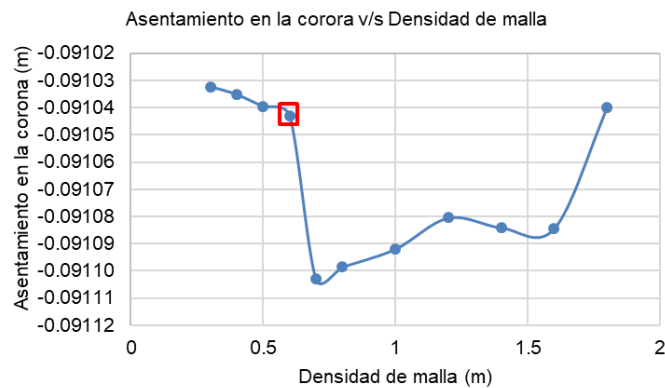


Figura 4: Calibración de la malla de elementos finitos

Atendiendo a los resultados mostrados en la figura anterior, se selecciona una densidad de malla de 0,6 metros.

Al realizar un análisis de deformaciones y esfuerzos por el centro de la cortina de la presa, antes y después de considerar el estado de operación del embalse, se obtienen los resultados que se muestran en las figuras 5 y 6, para la presa de 20 metros de altura de cortina.

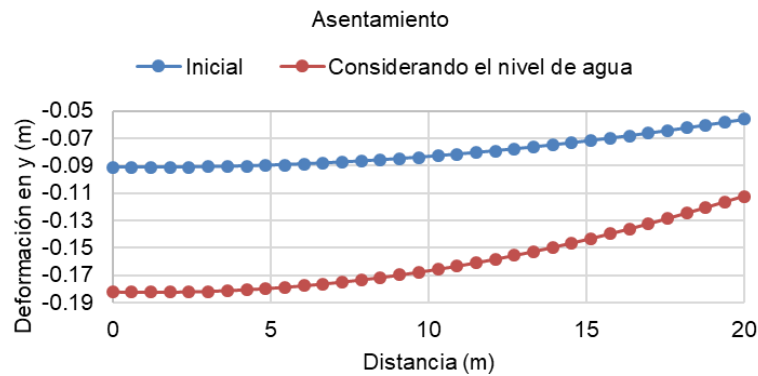


Figura 5: Deformación producida por el centro de la presa de 20 metros de altura

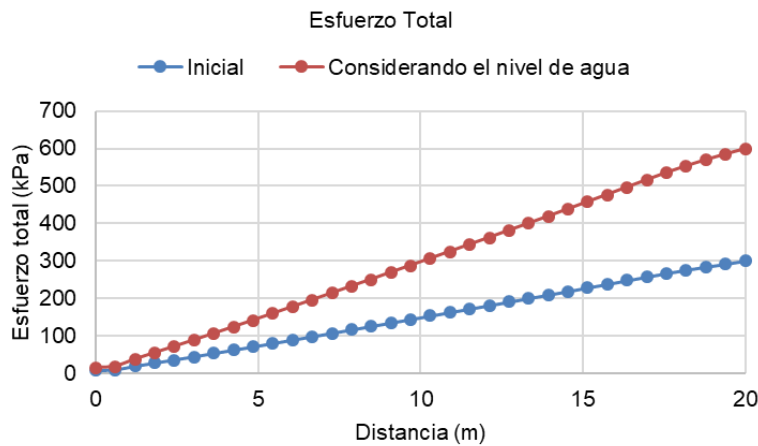


Figura 6: Esfuerzo total producido por el centro de la presa de 20 metros de altura

En las figuras 5 y 6 se observa que cuando se considera la influencia del nivel del agua dentro de la cortina de la presa, ocurre un aumento de las deformaciones y los esfuerzos internos que se producen. Estos incrementos son del orden de los 10 cm en cuanto a los asentamientos y de 300 kPa en cuanto a las tensiones.

Luego, se obtuvieron los factores de seguridad en estado saturado y parcialmente saturado, bajo las mismas condiciones expuestas previamente. Los resultados se muestran en la figura 7.

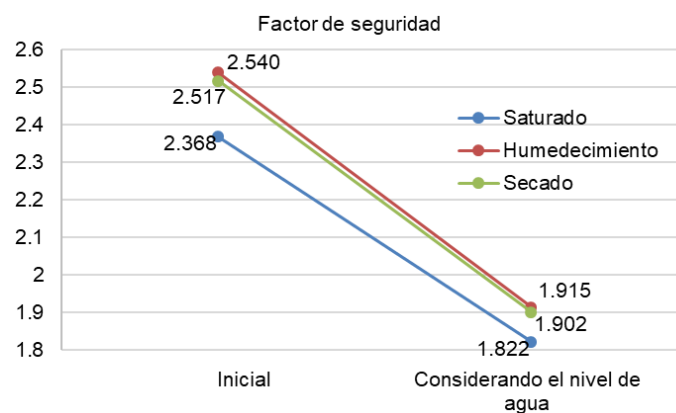


Figura 7: Factores de seguridad saturados y parcialmente saturados, antes y después de incluir el estado de operación de la presa de 20 metros de altura

En la figura 7 se aprecia un decrecimiento del factor de seguridad cuando se analiza considerando el nivel de

agua en el interior de la cortina, este decrecimiento es del orden del 30% para el suelo en estado saturado y parcialmente saturado. Se observa, que, para todos los casos, los factores de seguridad obtenidos en estado parcialmente saturado son superiores a los del suelo saturado, con una variación de alrededor del 5% en todos los casos.

Los resultados de los asentamiento y tensiones que se producen en la presa con 30 metros de altura de cortina se muestran en las figuras 8 y 9.

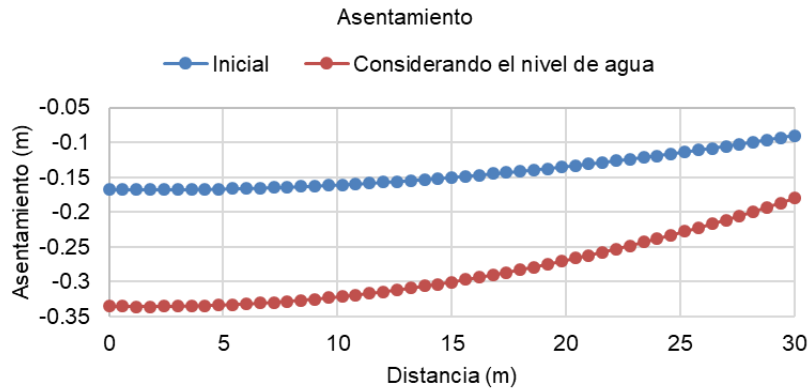


Figura 8: Deformación producida por el centro de la presa de 30 metros de altura

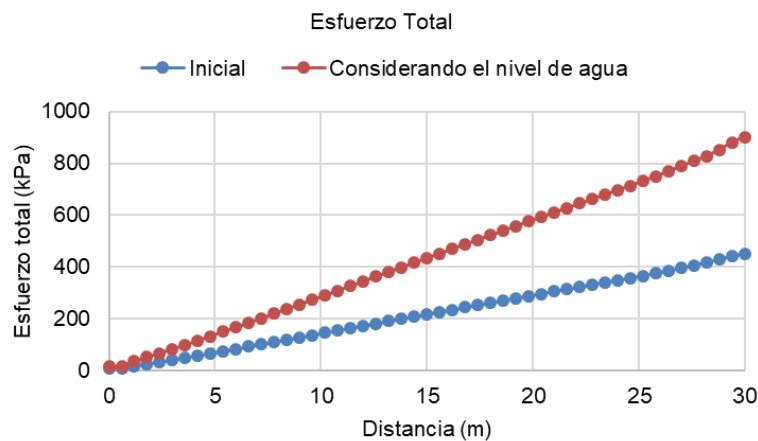


Figura 9: Esfuerzo total producido por el centro de la presa de 30 metros de altura

En las figuras 8 y 9 se observa que ocurre un aumento de las deformaciones y los esfuerzos internos que se producen respecto a la presa de 20 metros de altura de cortina, con 50% de incremento. En cuanto a los asentamientos, estos aumentan cuando se considera el nivel de agua, cerca de 20 cm, mientras que las tensiones se incrementan en 450 kPa.

Luego, se obtuvieron los factores de seguridad en estado saturado y parcialmente saturado, bajo las mismas condiciones expuestas previamente. Los resultados se muestran en la figura 10.

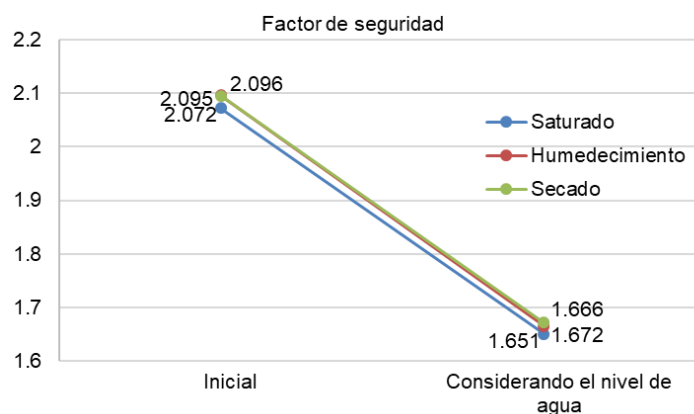


Figura 10: Factores de seguridad saturados y parcialmente saturados, antes y después de incluir el estado de operación de la presa de 30 metros de altura

En la figura 10 se observa un decrecimiento del factor de seguridad cuando se analiza considerando el nivel de agua en el interior de la cortina, este decrecimiento es de 25% para el suelo en estado saturado y parcialmente saturado. Se observa, que, para todos los casos, los factores de seguridad obtenidos en estado parcialmente saturado son superiores a los del suelo saturado, con una variación del 1% en todos los casos, lo que se considera insignificante desde el punto de vista ingenieril.

4. CONCLUSIONES

EL trabajo permitió concluir que para ambas alturas de cortina analizadas, se observa que, luego de incluir el nivel de agua a partir del cual la presa de tierra se considera en estado de operación, existe un incremento de los asentamientos y las tensiones que se generan en ambos casos. Para la presa de 20 metros, los asentamientos en la base aumentan 10 cm y las tensiones lo hacen en el orden de los 300 kPa. Para la presa de 30 metros, los asentamientos aumentan 20 cm y las tensiones lo hacen para un valor de 450 kPa. Estableciendo una relación entre ambas alturas, puede concluirse que los asentamientos aumentan en orden del 50% y las tensiones lo hacen para un 6,7%; por lo que, existe una mayor influencia en los asentamientos que en las tensiones al comparar ambas alturas analizadas. En cuanto al factor de seguridad, para ambos casos existe una reducción de los valores obtenidos al incluir el estado de carga de operación en el análisis. Para la presa de 20 metros, este decrecimiento es de 30%, mientras que para la presa de 30 metros es de 25%. Al comparar el análisis en estado saturado y parcialmente saturado, en la presa de 20 metros se observa una variación de 5% entre ambos estados, mientras que en la de 30 metros, esta variación es del 1%. Es válido el empleo del MEF para el cálculo del factor de seguridad en presas de tierra sin importar la altura de cortina, y la influencia del estado tenso-deformacional que se genera en el interior de la estructura afecta la estabilidad, tanto en el estado saturado como para ambas ramas de la curva característica del suelo parcialmente saturado.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. G. Fredlund and H. Rahardjo, *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York: John Wiley & Sons, 1993, p. 567.
- [2] 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. URL: <http://tesis.cujae.edu.cu:8080/xmlui/handle/123456789/5336>
- [3] J. Tristá, W. Cobelo, and G. Quevedo, "Bearing capacity of footings in unsaturated soils employing analytic methods," *Ingeniería y Desarrollo. Universidad del Norte.*, vol. 35, no. 417–430, 2017.
- [4] 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. URL: <http://repositorio.unam.mx/contenidos>
- [5] J. G. Tristá, G. Quevedo, and W. Cobelo, "Relación entre tiempo de consolidación y permeabilidad no saturada en presas de tierra," *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. XXXVII, no. 2, pp. 94–107, 2016.

- [6] X. Li Liu and R. Flores Berrones, "Análisis elastoplástico de estabilidades estática y seudoestática de cortinas de enrocamiento," *Ingeniería hidráulica en México*, vol. XXIII, no. 1, pp. 157–170, 2008.
- [7] R. Schiava and G. Etse, "Análisis flujo-mecánico de suelos parcialmente saturados," *Mecánica Computacional*, vol. XXI, pp. 841–853, 2002.
- [8] Y. González, O. Guedes, and S. Rodríguez, "Las fallas en presas de tierra. Caso de Estudio: falla por estabilidad de taludes en función de las condiciones de drenaje." La Habana, p. 122, 2017.
- [9] S. Molina, O. Álvarez, and Y. González, "Análisis y solución de la patología en presa de Cuba: Estado del arte." La Habana, p. 8, 2016.
- [10] NC 58, "Geotecnia. Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos." p. 20, 2000.
- [11] NC 20, "Geotecnia. Determinación de la granulometría de los suelos." p. 22, 1999.
- [12] NC 325, "Geotecnia. Determinación de la resistencia al esfuerzo cortante directo (aparato de caja de corte pequeño)." p. 41, 2004.
- [13] ASTM-D5298, "Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper," vol. 11. pp. 1–6, 1994.
- [14] D. Coduto, *Foundation design*, 2nd. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2001, p. 875.
- [15] I. Flores, "Modificación de las pendientes de los taludes en presas de tierra bajo condiciones de saturación parcial," Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", 2019.