

EFFECTO DE OCLUSIÓN DE DRENAJE EN ESTABILIDAD DE TALUDES EN PRESAS DE TIERRA CON SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS

Yaumara Viviana Alayo Castellanos¹, Isaida Flores Berenguer², Jenny García Tristá³, Yoermes González Haramboure⁴

¹ Ingeniera Civil, Dirección Municipal de Planificación Física de San Miguel del Padrón, Miranda #20511 e/ Calzada de Güines y Segunda, Reparto La Rosalía, La Habana. Cuba. E-mail: alayo92@yahoo.es

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

En la actualidad, la construcción de presas de tierra confiere a la estabilidad de taludes una importancia ingenieril de primer orden, tanto por el aspecto económico como por las consecuencias indeseables debidas a sus fallos. En el diseño de presas de tierra, un tema apenas analizado es la oclusión del drenaje, asociado a la pérdida de estabilidad del talud aguas abajo. La presente investigación se fundamenta en modelar presas de tierra de 22 metros de altura con suelos parcialmente saturados incluyendo sus cimentaciones, con prisma de drenaje, al cual se le modificará paulatinamente el área, para garantizar una funcionalidad del mismo entre 100% y 40% del área original de diseño, bajo condiciones de saturación parcial y total del material de la cortina. Se utiliza el programa computacional GeoStudio, específicamente con las herramientas: SIGMA/W, SEEP/W y SLOPE/W. Los métodos de cálculo empleados serán el Método de Elementos Finitos y el método de Morgenstern-Price, para explorar la influencia de la oclusión del drenaje en la estabilidad del talud aguas abajo en presas de tierra. Se concluye que no existe influencia del análisis bajo condiciones de saturación parcial en la estabilidad al considerar la oclusión del drenaje, para el caso de estudio analizado.

Palabras claves: estabilidad de taludes, succión, suelos parcialmente saturados, oclusión del drenaje.

EFFECT OF DRAINAGE OCCLUSION ON SLOPE STABILITY IN EARTHEN DAMS WITH PARTIALLY SATURATED SOILS

ABSTRACT

At present, the construction of earth dams confers on the stability of slopes an engineering importance of the first order, as much for the economic aspect as for the undesirable consequences due to their failures. In the design of earth dams, a topic that has hardly been analyzed is the occlusion of drainage, associated with the loss of stability of the slope downstream. The present investigation is based on modeling 22-meter-high ground dams with partially saturated soils including their foundations, with a prism for drainage, to which the area will be gradually modified, to guarantee functionality between 100% and 40% of the area. original design area, under conditions of partial and total saturation of the curtain material. The computer program GeoStudio is used, specifically with the tools: SIGMA / W, SEEP / W and SLOPE / W. The calculation methods used will be the Finite Element Method and the Morgenstern-Price method, to explore the influence of drain occlusion on the stability of the slope downstream on land dams. It is concluded that there is no influence of the analysis under conditions of partial saturation on the stability when considering the occlusion of the drain, for the case study analyzed.

Keywords: drainage occlusion, partially saturated soils, slope stability, suction

Nota Editorial: Recibido: mayo 2021; Aceptado: junio 2021

1. INTRODUCCIÓN

En Cuba, el principal uso de las presas de tierra está dado en la agricultura (el riego), aunque hay algunas dedicadas al abastecimiento de agua a la población y la industria, y otras al control de inundaciones [1]. Las presas de tierra se han utilizado desde la antigüedad con el objetivo de contener agua para beneficiar la agricultura, suplir las necesidades de la población y evitar las crecidas por inundaciones de los ríos; actualmente presentan una serie aun mayor de beneficios, debido a la implementación de las hidroeléctricas y su utilización como forma de energía no contaminante.

Las presas de tierra se construyen porque generalmente son más económicas y resisten mejor los asentamientos de la cimentación que las de hormigón u otros materiales más rígidos. Las mismas son constituidas por materiales provistos por la naturaleza: los suelos, los cuales no sufren procesos químicos significativos de transformación, siendo tratados y colocados mediante procedimientos de compactación muy bien establecidos y estudiados.

Se catalogan según el objetivo para el cual se construyen; dependiendo del propósito de diseño pueden ser: de almacenamiento y reguladoras o para el control de avenidas; las primeras a su vez pueden ser para el riego, para la generación de energía, para abasto y para recreación; y las segundas se separan en: presas que almacenan el agua por un corto período de tiempo, presas de distribución (en las cuales el agua embalsada recarga el manto freático), presas de arrastres o diques de retención y presas de derivación. En general las presas pueden ser construidas para satisfacer más de una finalidad. De acuerdo a la forma en que resisten el empuje de agua, se clasifican en: presas de gravedad, de arco, de contrafuertes y ancladas; y según los materiales que las componen pueden ser: de hormigón (las cuales surgieron con el desarrollo del hormigón como material de construcción), de otros materiales y de materiales sueltos (que están formadas por rocas o tierras sueltas sin cementar en las que se busca conseguir una correcta impermeabilización, por lo que suelen utilizarse las arcillas para su construcción). Estas últimas, a la vez, pueden tener secciones homogéneas, mixtas o graduadas.

El objetivo de esta investigación es analizar la influencia de la oclusión del drenaje en la estabilidad del talud aguas abajo en una presa de tierra de 22 metros de altura, homogénea, con prisma de drenaje. Para ello, se considera que el dren empleará entre el 100% y el 40% de su capacidad total a partir de reducciones en su área útil.

2. BASES TEÓRICAS

En Cuba las presas de tierra se construyen fundamentalmente con materiales sueltos, siendo las secciones homogéneas las más abundantes, este tipo de presa se constituye de un solo material, como, por ejemplo: arena, arcilla, limo; también pueden tener materiales que no contribuyan a la estabilidad como son el enrocamiento aguas arriba y la protección de la corona. Además, se puede encontrar las secciones graduadas, las cuales constan de materiales diferentes colocados en cierto orden y en cantidades similares; y las secciones mixtas, que constan de dos materiales (uno permeable y otro resistente), con filtros entre ellos [2].

La construcción de presas de tierra también ha evolucionado significativamente. Actualmente es posible contar con 242 embalses a lo largo de toda la Isla. A partir de datos reunidos por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, el 62% del total de presas construidas, presentan alturas de cortina inferior a 22 metros.

El propósito de los drenajes es transportar las aguas de escorrentía para disminuir el volumen de material saturado en presas y de esta forma controlar rápida y eficientemente la filtración. Los requisitos que debe poseer un drenaje son: la capacidad suficiente para evacuar el agua, sin que se ocluyan por colmatación y no permitir el sifonamiento, por lo que en caso necesario deben tener capas de filtro [3].

Para el drenaje en presas, existen diferentes sistemas de drenaje a ser ubicados en el interior del terraplén, y para su construcción es de gran importancia tener en cuenta las variantes de comparación de origen técnico-económica. Algunos de esos sistemas de drenaje se muestran en la figura 1.

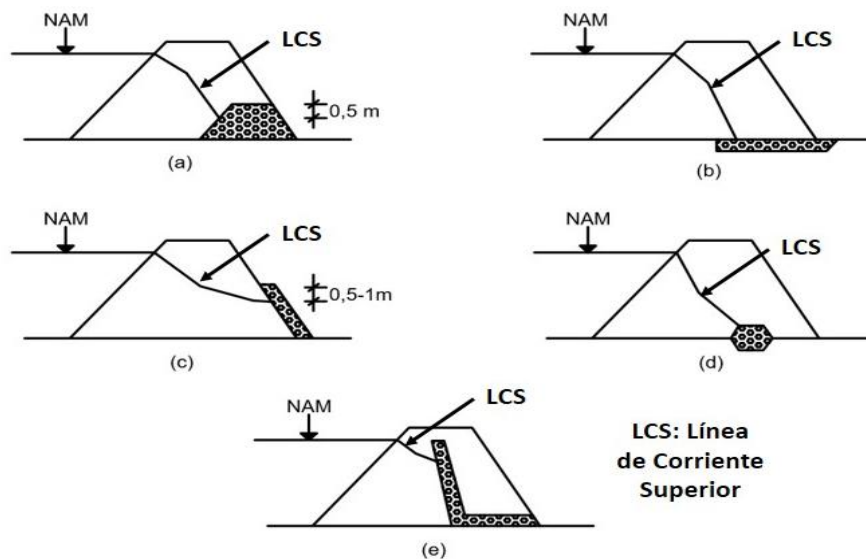


Figura 1: Tipos de drenajes en presas de tierra: (a) Prisma de drenaje, (b) Colchón de drenaje, (c) Drenaje inclinado, (d) Drenaje de franja, (e) Drenaje central [1]

El tipo de drenaje más utilizado en Cuba es el prisma de drenaje, dado que, en presas de tierra homogéneas, con este tipo de drenaje se adquiere mayor seguridad (cuando el cimiento de la presa es rocoso, o más rígido que el terraplén) ya que la superficie de falla más perjudicial del talud pasará por encima del prisma.

El prisma de drenaje debe hacerse como regla en áreas de la presa situadas en el cauce del río, cuando esta se construye sin ataguías o el río se cierra por relleno de rocas colocadas en el agua. Es una solución frecuente para las presas de materiales locales y las presas homogéneas. Aumenta la estabilidad del talud aguas abajo debido a que las superficies de falla más peligrosas pasarán sobre el prisma, lográndose una mayor seguridad de la obra [1].

Las condiciones de trabajo fijan el ancho del prisma en su parte superior, siendo este como mínimo de tres metros. Por otra parte, la elevación de la corona del prisma está sujeto al nivel máximo de las aguas por una reserva para oleaje que no debe ser menor de 0,5 m.

La oclusión del drenaje en presas provoca una sobreelevación de la línea de corriente superior (LCS), que se asocia, a su vez, a un decrecimiento del factor de seguridad, lo que implica la falla del talud aguas abajo, que puede ser más o menos profunda, dependiendo del nivel de oclusión existente [3].

Un elemento necesario que se debe tener en cuenta con respecto a los taludes en presas de tierra es el análisis de su estabilidad, que es la seguridad de una masa de tierra contra la falla o movimiento. Comúnmente se refiere la estabilidad de los taludes en términos de un factor de seguridad (FS), que se puede obtener partiendo de un determinado análisis matemático; teniendo en cuenta los factores que generalmente afectan la estabilidad, como son: la geometría del modelo, los parámetros de la geología, las cargas dinámicas, los flujos de agua, las propiedades de los suelos que lo conforman, entre otros.

La mecánica de suelos ha dedicado varios años a la investigación de la estabilidad de taludes, planteando métodos de cálculo vigentes hasta el presente y otros que han sido perfeccionados para un mejor entendimiento del fenómeno. Al aplicar el método de equilibrio límite de Morgenstern-Price se asume que existe una función que relaciona las fuerzas de cortante y las fuerzas normales entre dovelas. Esta función puede considerarse constante o puede considerarse de otro tipo. Se establece una relación entre los componentes de las fuerzas a partir de lo planteado en la ecuación 1.

$$X = \lambda f(x)E \quad (1)$$

Donde:

$f(x)$: Función que describe la forma en cómo varía la relación X/E a lo largo de la superficie de deslizamiento.

λ : Constante que representa el porcentaje de la función, $f(x)$, usada para resolver las ecuaciones del factor de seguridad.

La interacción entre dovelas puede considerarse a partir de la ecuación 2.

$$E_R = E_L + (W - (X_R - X_L)\tan\alpha - \frac{S_m}{\cos\alpha} \quad (2)$$

Dónde:

E_R ; E_L : Fuerzas normales entre dovelas.

La función $f(x)$ se puede considerar cualquier forma de función en el análisis, sin embargo, una función irreal puede resultar en problemas de convergencia en la solución de las ecuaciones para el factor de seguridad.

El Método de Elementos Finitos (MEF) 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 mecánicas y geométricas de los taludes [4].

Para el análisis de la estabilidad, el MEF se basa en la ecuación (3):

$$FS = \frac{\sum S_r}{\sum S_m} \quad (3)$$

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 (4).

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

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 (5).

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

Para obtener las fuerzas normales y las fuerzas cortantes movilizadas se utiliza la ecuación (6).

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

Donde f es la fuerza en el nodo, $\{N\}$ 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 (7) y la fuerza cortante movilizada, que es paralela a la base de la dovela, ecuación (8) se muestran a continuación:

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

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

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.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

A partir de estudios realizados por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), de las secciones transversales típicas proyectadas en todas las presas del país, la totalidad de estas obras son de categoría III con alturas de cortina inferior a 25 metros, por lo que se muestra el modelo de una presa de tierra de 22

metros de altura, homogénea, sin berma y con prisma de drenaje, con características geométricas correspondientes a lo propuesto por Armas y Horta [1], como se muestra en la figura 2.

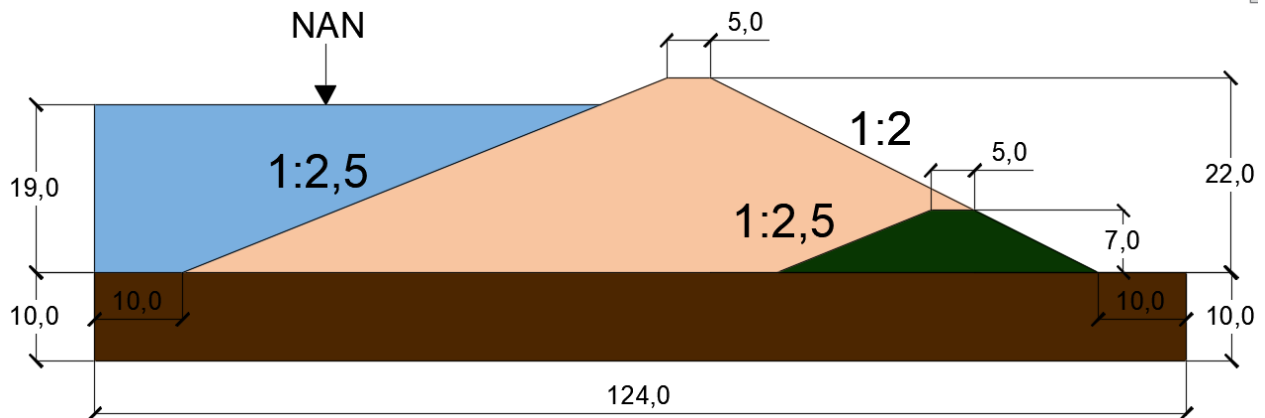


Figura 2: Geometría del modelo (todas las unidades en metros) [2].

El nivel de agua definido para el caso de estudio, es de 19 metros, que corresponde con el estado de operación de la presa, el cual resulta más desfavorable si se produce la oclusión del drenaje, dado que es el mayor volumen que puede ser contenido por diseño.

Se utilizó en la cortina un suelo arcilloso cuyas propiedades fueron extraídas de Rodríguez [5], mientras que para la base se utilizó un suelo arenoso con propiedades generales a partir de lo que plantean Das [6] y Coduto [7]. La permeabilidad, en la naturaleza, se puede diferenciar en ambos sentidos, horizontal y vertical, de forma numérica, por lo tanto, se proponen valores diferentes para k_x y k_y . Los resultados correspondientes se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Propiedades de los suelos de la cortina, la base y el drenaje.

Características de los suelos	Cortina	Base	Drenaje
Peso específico húmedo (γ_f) (kN/m ³)	14,45	19,5	21
Ángulo de fricción interna efectivo (ϕ') (°)	14,5	39	40
Cohesión efectiva (c') (kPa)	49,6	20	0
Permeabilidad saturada (k_x) (m/s)	4,80E-08	1,00E-06	0,001
Módulo de elasticidad (E) (kPa)	23000	85000	18000
Índice de compresibilidad volumétrica (M_v)	9,80E-05	1,00E-05	1,00E-05
Coefficiente de Poisson (μ)	0,33	0,4	0,27
Relación de permeabilidad	$k_x = 12k_y$	$k_x = k_y$	$k_x = k_y$
Clasificación (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos)	CH (arcilla de alta compresibilidad)	SC (arena arcillosa con grava)	Grava arenosa

Las curvas características del suelo fue obtenida a partir de la norma ASTM-D5298 [8], 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 3.

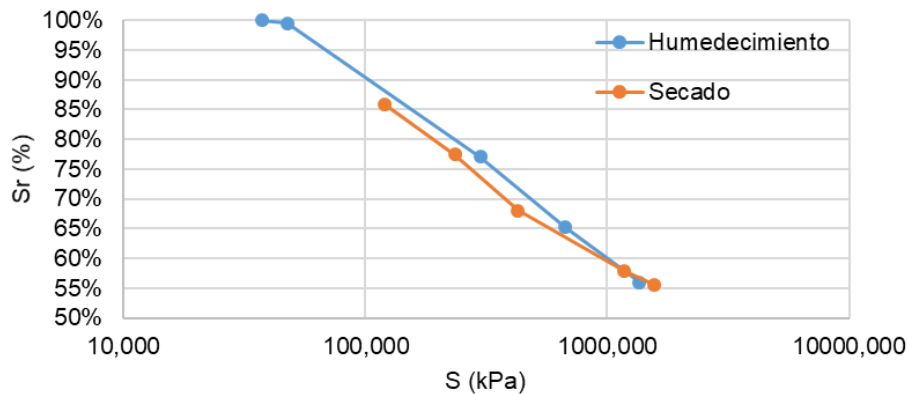


Figura 3: Curva característica del suelo de Cortina [5].

La oclusión del drenaje se va a considerar a partir del área del mismo con tres aproximaciones: con una reducción en altura, con una reducción de lado y con una reducción general. Se considera que el drenaje utilizará en cada caso el 100%, 90%, 80%, 70%, 60%, 50% y 40% de área original de diseño, mostrada en la figura 4.

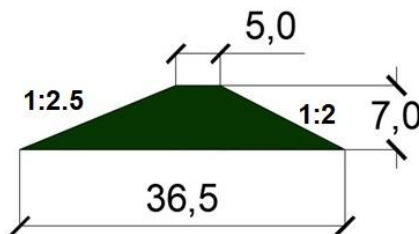


Figura 4: Geometría inicial del drenaje (todas las unidades en metros).

Si se considera que la oclusión se produce de la corona del drenaje hasta la base del mismo, decreciendo a razón de 10% en cada caso y manteniendo las pendientes iniciales, se obtienen las geometrías modificadas que se muestran en la figura 5.

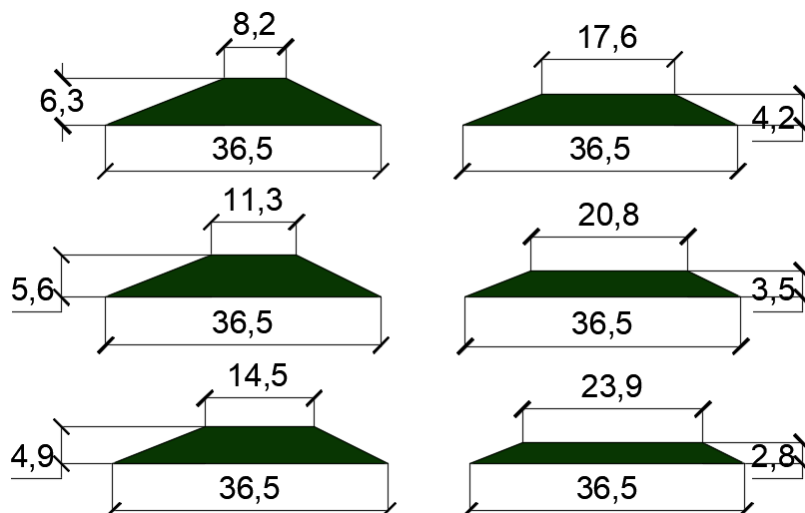


Figura 5: Geometría modificada del drenaje a partir de la reducción en altura (todas las unidades en metros).

Al considerar que la oclusión se produce lateralmente en el drenaje decreciendo a razón de 10% en cada caso, se obtienen las geometrías modificadas que se muestran en la figura 6.

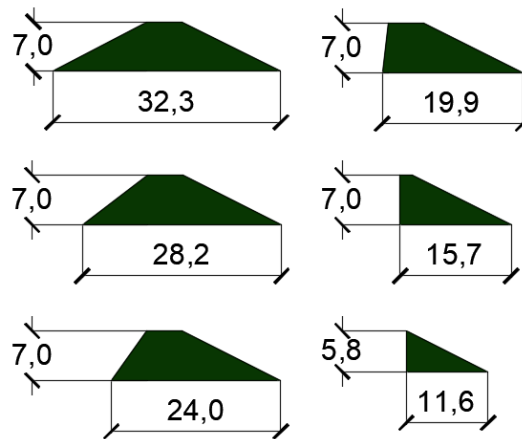


Figura 6: Geometría modificada del drenaje a partir de la reducción del lado (todas las unidades en metros).

Al considerar que la oclusión se produce de manera general, provocando decrecimientos en la corona y en el lado del drenaje, a razón de 10% en cada caso, se obtienen las geometrías modificadas que se muestran en la figura 7.

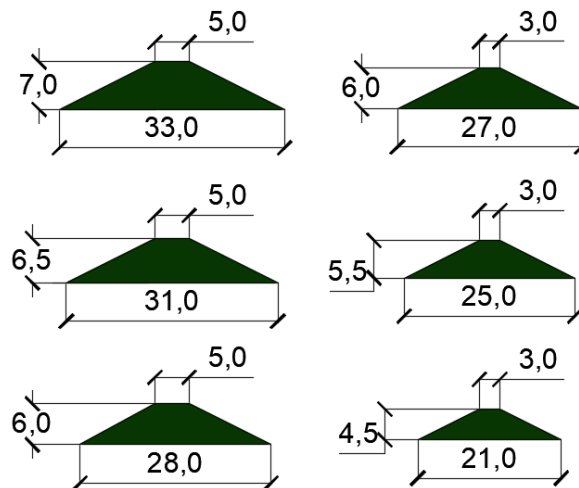


Figura 7: Geometría modificada del drenaje a partir de la reducción general (todas las unidades en metros).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analiza el proceso de oclusión del drenaje, a partir de las consideraciones planteadas. Para realizar los análisis, se incluyen en la modelación las dos ramas de la curva característica del suelo de la cortina, garantizando los resultados en estado saturado y parcialmente saturado, con el objetivo de observar la influencia de las leyes de la Mecánica de Suelos Parcialmente Saturados en la oclusión del prisma de drenaje en presas de tierra. La geometría inicial se muestra en la figura 8.

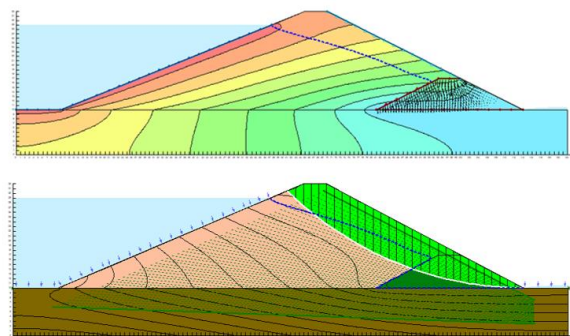


Figura 8: Línea de corriente superior y superficie de falla para el 100% del área del drenaje.

Los resultados obtenidos a medida que se reduce la altura del prisma de drenaje se muestran en la figura 9.

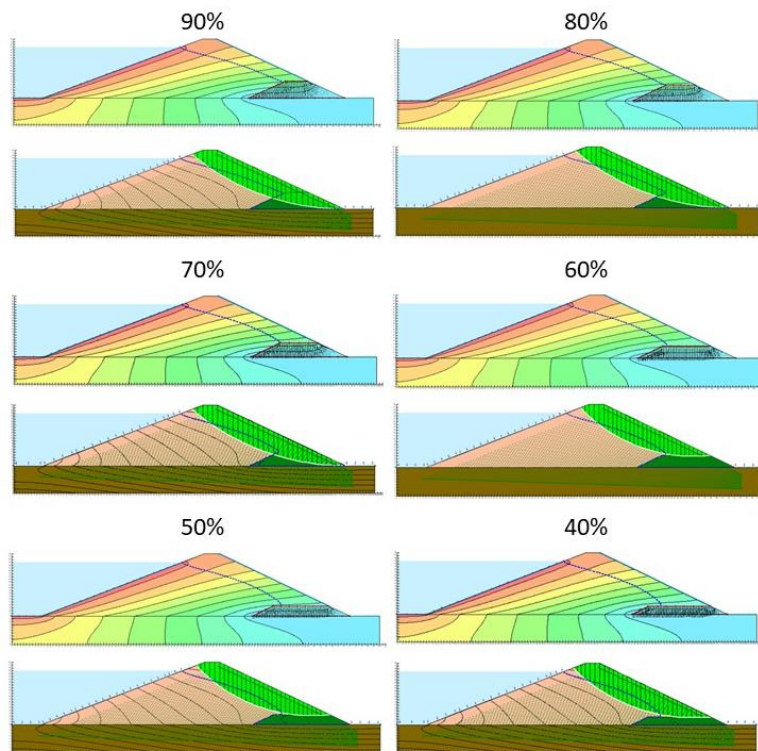


Figura 9: Líneas de corriente superior y superficies de falla al reducir la altura del drenaje.

En la figura 9 se muestra que, aunque se reduce la altura del drenaje y se eleva ligeramente la LCS, no se produce una elevación tal que ponga en peligro la estabilidad del talud aguas abajo, y el drenaje, a pesar de reducirse el 40% de su altura, continúa funcionando, aunque con mayor semejanza a un colchón de drenaje que a un prisma.

Los resultados de la variación del FS en estado saturado y parcialmente saturado por el MEF y el de M-P se muestran en la figura 10.

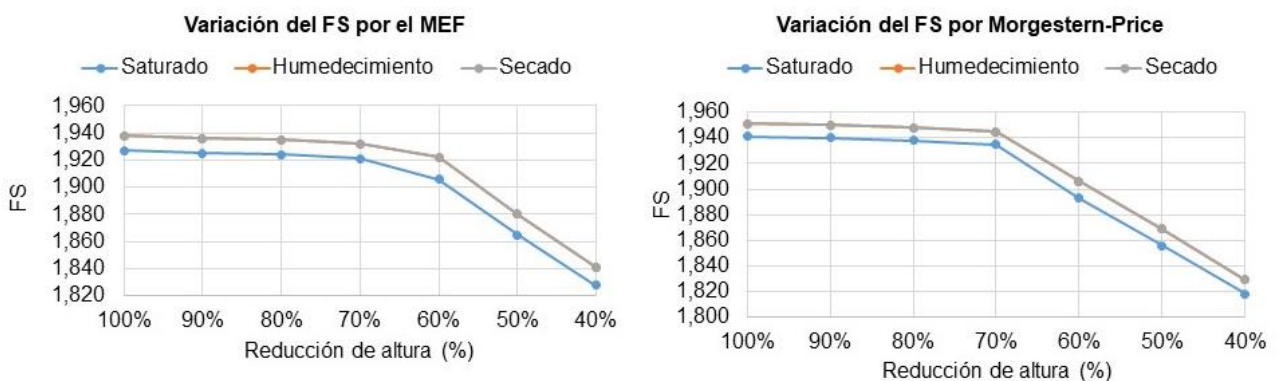


Figura 10: Variación del FS al reducir la altura del drenaje.

En la figura 10 se observa, que el FS decrece a medida que se reduce el área del prisma, aunque en todos los casos se mantienen las condiciones de estabilidad y seguridad del talud aguas abajo. Las ramas de la curva característica no muestran una influencia significativa en los valores de FS, aunque el resultado obtenido considerando el suelo en estado parcialmente saturado es superior a obtenido con el suelo saturado.

En la figura 11 se muestra la variación existente entre los FS obtenidos con el 100% del área y los obtenidos para el 40% del área, utilizando MEF y M-P, en estado saturado y parcialmente saturado.

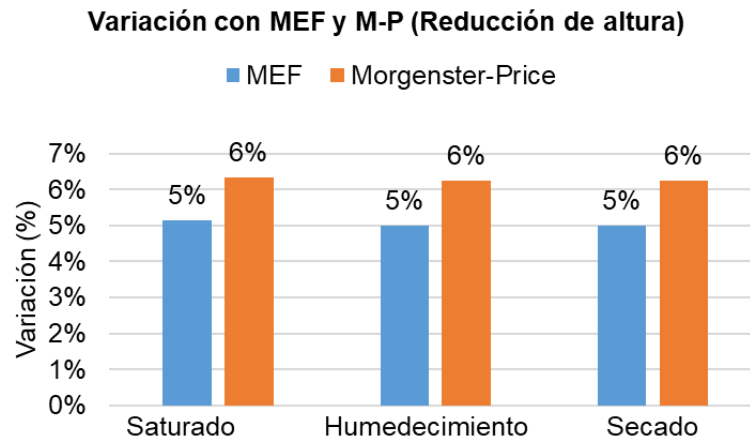


Figura 11: Variación porcentual entre 100% y 40% para estado saturado y parcialmente saturado al reducir la altura del drenaje.

En la figura 11 se observa que en todos los casos la variación es cercana al 5%, lo que puede considerarse poco significativa desde el punto de vista ingenieril cuando se produce la obstrucción del drenaje afectando solo la altura del mismo.

Los resultados obtenidos a medida que se reduce el lado del prisma de drenaje se muestra en la figura 12. En esta figura se observa, como a medida que se ocluye el drenaje en función de una reducción lateral, la LCS asciende hasta que llega a la superficie del terreno, lo que está asociado a la falla de los taludes [3]. En este caso, cuando se produce la oclusión en niveles superiores al 50% del área del drenaje diseñada, este deja de cumplir su función y puede provocarse el colapso del talud aguas abajo.

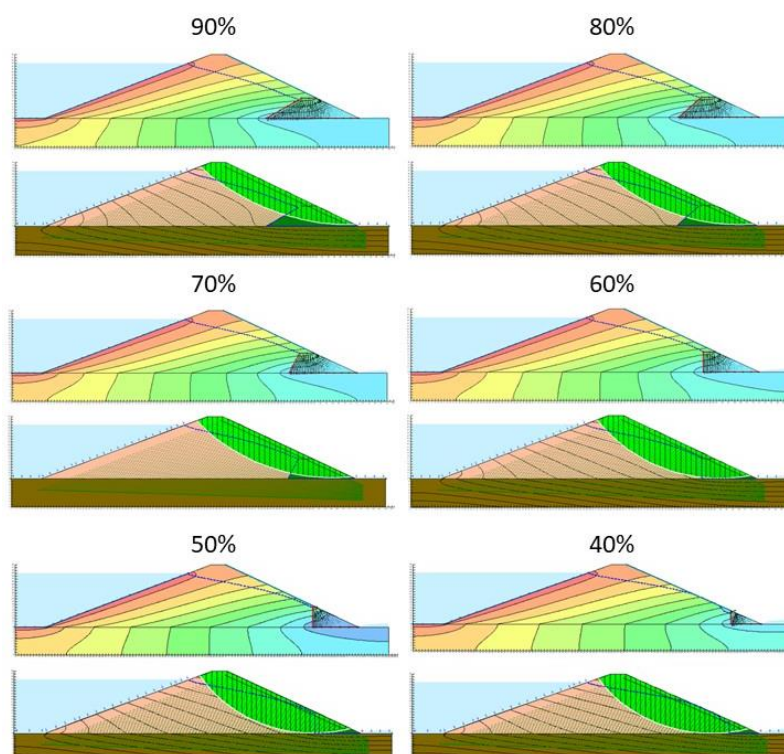


Figura 12: Líneas de corriente superior y superficies de falla al reducir el lado del drenaje.

Los resultados de la variación del FS en estado saturado y parcialmente saturado por el MEF y el de M-P se muestran en la figura 13.

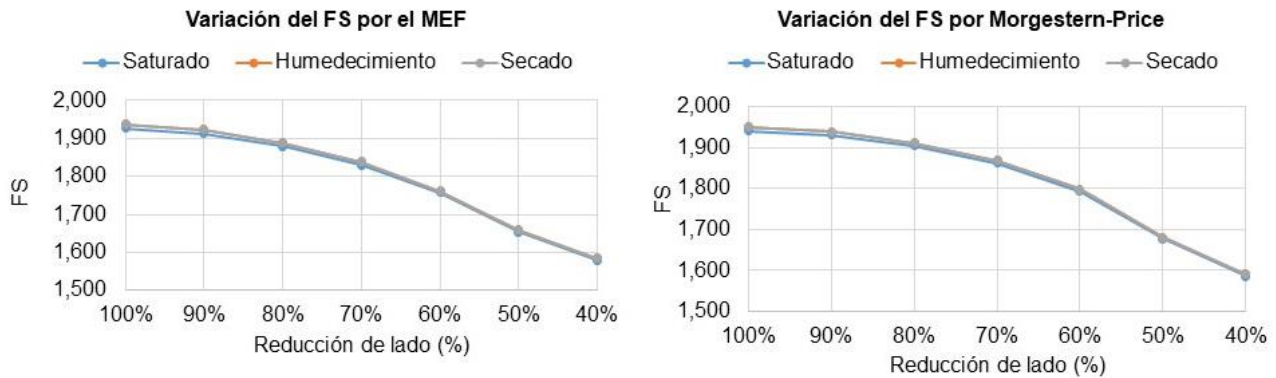


Figura 13: Variación del FS al reducir lateralmente el drenaje.

En la figura 13 se observa, que el FS decrece a medida que se reduce el área del prisma, aunque por cálculo se mantienen las condiciones de estabilidad y seguridad del talud aguas abajo, pues en ningún caso, este valor es inferior a 1, se aprecia que el drenaje deja de cumplir su función, por lo que se considera que la presa puede estar sujeta a la falla del talud aguas abajo. Las ramas de la curva característica no muestran una influencia significativa en los valores de FS y el resultado obtenido considerando el suelo en estado parcialmente saturado es similar al obtenido con el suelo saturado solamente.

En la figura 14 se muestra la variación existente entre los FS obtenidos con el 100% del área y los obtenidos para el 40% del área, utilizando MEF y M-P, en estado saturado y parcialmente saturado. Se observa en esa figura que en todos los casos la variación es de 18%, lo que puede considerarse significativo desde el punto de vista ingenieril cuando se produce la obstrucción del drenaje afectando solo el lado del mismo.

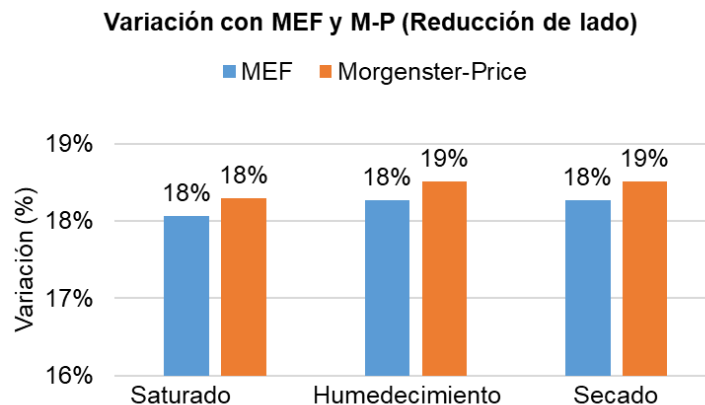


Figura 14: Variación porcentual entre 100% y 40% para estado saturado y parcialmente saturado al reducir lateralmente el drenaje.

Los resultados obtenidos para una reducción general del prisma de drenaje se muestran en la figura 15.

En la figura 15 se observa, como a medida que se ocluye el drenaje en función de una reducción lateral, la LCS asciende, aunque no se produce una elevación tal que ponga en peligro la estabilidad del talud aguas abajo, y el drenaje, a pesar de reducirse el 40% de su altura, continúa cumpliendo su función.

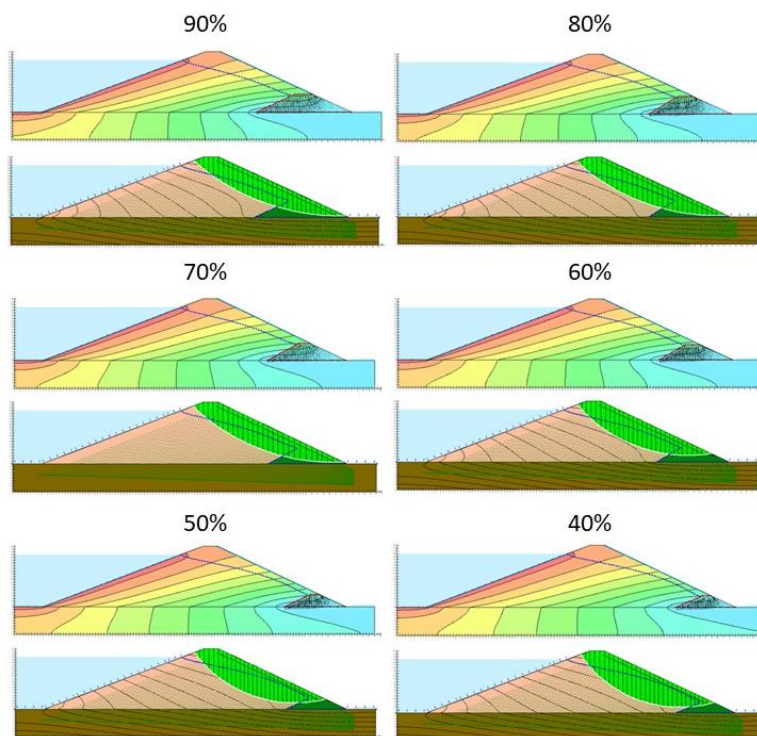


Figura 15: Líneas de corriente superior y superficies de falla para la reducción general del drenaje.

Los resultados de la variación del FS en estado saturado y parcialmente saturado por el MEF y el de M-P se muestran en la figura 16.

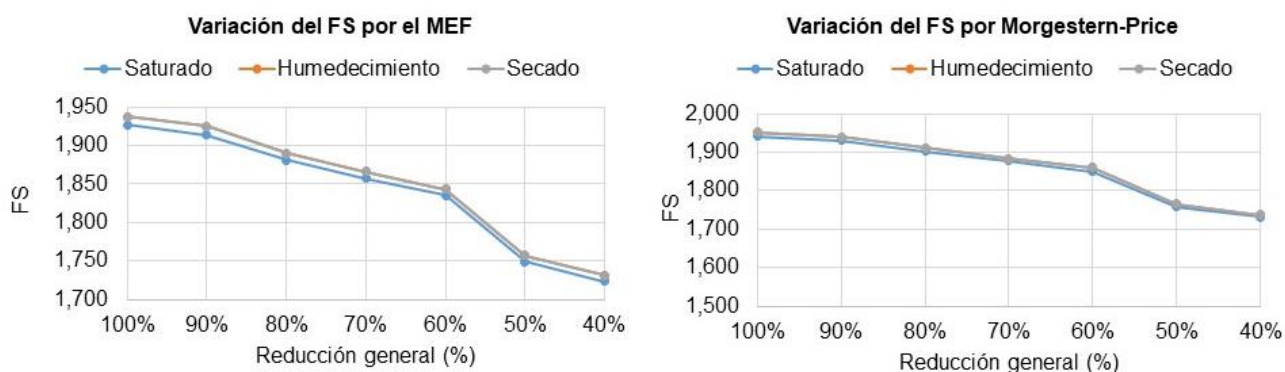


Figura 16: Variación del FS para la reducción general del drenaje.

En la figura 16 se observa, que el FS decrece a medida que se reduce el área del prisma, aunque en todos los casos se mantienen las condiciones de estabilidad y seguridad del talud aguas abajo. Las ramas de la curva característica no muestran una influencia significativa en los valores de FS, aunque el resultado obtenido considerando el suelo en estado parcialmente saturado es ligeramente superior al obtenido con el suelo saturado solamente.

En la figura 17 se muestra la variación existente entre los FS obtenidos con el 100% del área y los obtenidos para el 40% del área, utilizando MEF y M-P, en estado saturado y parcialmente saturado.

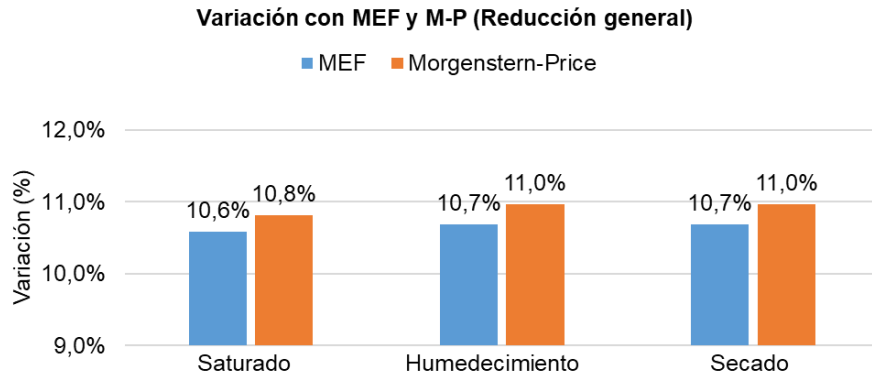


Figura 17: Variación porcentual entre 100% y 40% para estado saturado y parcialmente saturado para la reducción general del drenaje.

En la figura 17 se observa que en todos los casos la variación es de 11%, lo que puede considerarse significativo desde el punto de vista ingenieril. Aunque el drenaje no deja de cumplir su función cuando se produce la obstrucción del general al mismo.

5. CONCLUSIONES

Al analizar la oclusión del prisma de drenaje en función de la pérdida de área para intervalos de utilidad entre 100% y 40% del área de diseño se observa que cuando se pierde sección sólo en altura no existe diferencia significativa en la reducción del FS, el prisma se comporta como un colchón de drenaje. Cuando se pierde sección lateral, el drenaje deja de cumplir su función cuando su área es cercana al 50% del área de diseño y la variación del FS es de 18% para ambos métodos de cálculo utilizados. Cuando se pierde sección de manera general (en altura y lateral al mismo tiempo) el FS se reduce 11%, y aunque la LCS se eleva, el drenaje no deja de cumplir su función. No existe influencia del análisis bajo condiciones de saturación parcial en la estabilidad al considerar la oclusión del drenaje, para el caso de estudio analizado.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Armas and E. Horta, *Presas de Tierra*. La Habana: Editorial ISPJAE, p. 453, 1987.
- [2] 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.
- [3] Y. Haramboure and O. Guedes, "Fallas de presas de materiales locales: una actualización de casos históricos." La Habana, p. 88, 2020.
- [4] J. García Tristá, G. J. Quevedo Sotolongo, and W. D. Cobelo Cristiá, "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.
- [5] C. M. Rodríguez, "Evaluación del comportamiento tenso-deformacional en suelos parcialmente saturados con problemas de inestabilidad volumétrica," Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, 2017.
- [6] B. Das, *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. California: Universidad de California, 2008.
- [7] D. Coduto, *Foundation design*, 2nd. ed. New Jersey: Prentice-Hall, p. 875, 2001.
- [8] ASTM-D5298-10, "Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. The Annual Book of ASTM Standards," *American Society for testing and materials*, vol. 11, pp. 1–6, 2010.