

Efecto de desembalse en la estabilidad de presas de tierra: dos casos de estudio en Cuba.

Yoermes Glez Haramboure e-mail: yoermes@civil.cujae.edu.cu
Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH),
Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE).

Isaida Flores Berenguer e-mail: isaidafb@civil.cujae.edu.cu
Centro de Estudio de Construcciones y Arquitectura Tropical (CECAT),
Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE).

Jenny García Tristán e-mail: jenny@civil.cujae.edu.cu
Centro de Estudio de Construcciones y Arquitectura Tropical (CECAT),
Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE).

RESUMEN

El fenómeno de desembalse rápido puede ser inducido por fallas estructurales o la operación descontrolada de obras de toma. Su ocurrencia puede afectar la estabilidad del talud aguas arriba de las presas de tierra, llegando a producir su deslizamiento. En la presente investigación se realiza el análisis de estabilidad de dos presas de tierra de sección homogénea, por el método de Morgenstern-Price, considerando comportamientos saturado y parcialmente saturado de distintos suelos arcillosos en el terraplén. Para aplicar el método de análisis se utiliza el programa Slope/W, contenido en el paquete de programas GeoStudio. Se estudia la influencia de las condiciones geotécnicas y el comportamiento mecánico de los suelos. Finalmente, para la Presa Cauto El Paso se proponen funciones de operación que garantizan la seguridad del talud.

Palabras clave: desembalse rápido, estabilidad de taludes, presas de tierra, suelos parcialmente saturados.

"Rapid drawdown effect on the stability of earth dams: two case studies from Cuba"

ABSTRACT

Rapid drawdown can be induced by structural failures or uncontrolled operation of the floodgates. Their occurrence may affect the upstream slope stability in earth dams, producing landslides. This investigation carries out the analysis of stability of two earth dams with homogeneous section, by the Morgenstern-Price analysis method, considering saturated and partially saturated behaviors of different clay soils in the embankment. The analysis method is applied by means of Slope/W program code, contained in Software GeoStudio. It is studied the influence of geotechnical conditions and mechanical behavior of soils. Finally, for the Cauto El Paso Dam, operating functions are proposed, that guarantee the security of the embankment.

Keywords: rapid drawdown, slope stability, earth dams, unsaturated soils.

INTRODUCCIÓN

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, para establecer un equilibrio entre los usos del agua y las necesidades de los ecosistemas vitales, promover el desarrollo sostenible, la democracia, la participación, la equidad y el respeto por los derechos de las poblaciones más vulnerables (Loaiza et al. 2012).

En Cuba existen unas 242 presas que clasifican como grandes, según establece la ICOLD (International Commission on Large Dams). De ellas, el 98,8% son de tierra o materiales locales, y el 96,3% tiene edad de construidas superior a los 25 años. Estudios recientes demuestran que el orden actual de ocurrencia de fallas (en su mayoría no catastróficas) de presas de tierra en Cuba, difiere ligeramente con respecto al resto del mundo y es, de mayor a menor frecuencia: deslizamientos de taludes, rebase de la cortina, sifonamiento, pérdidas por filtraciones y agrietamiento (Haramboure y Guedes, 2020).

Los deslizamientos de taludes se producen debido a que el peso de la masa de suelo es mayor que su propia resistencia a cortante en una superficie dada y suelen considerarse en tres etapas de vida de las presas: al final de la construcción, durante la operación y luego de un desembalse rápido. Todas las fallas de importancia reportadas por deslizamientos del talud aguas arriba han ocurrido como consecuencia de un desembalse rápido y, aunque no han causado el colapso de la presa o la pérdida de agua en el embalse, sí provocan situaciones de peligro al tapar conductos y galerías (Armas y Horta 2010). El desembalse rápido puede ser causado por una falla previa de la presa, o su operación no controlada.

El presente artículo describe el efecto de desembalse por operación, sobre la estabilidad del talud aguas arriba en dos presas cubanas de categoría III según proyecto: Presa Herradura y Presa Cauto El Paso. Se desarrollan dos condiciones de trabajo: máxima demanda por obras de toma actuales, y la misma incrementada por la colocación de una turbina de Pequeña Central Hidroeléctrica (PCHE), con el objetivo de revisar la seguridad del talud durante las operaciones, y corregirlas en caso necesario.

DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Para seleccionar los casos de estudio se utilizaron los criterios de inclinación del talud aguas arriba, velocidad de descenso del nivel de agua y características de la sección de la presa. En el criterio de inclinación del talud aguas arriba, se consideraron taludes con mayor inclinación que 1:3. En el criterio de velocidad de descenso del nivel de agua se consideraron los casos en que la máxima operación de las obras de entrega pudiera generar altas velocidades de descenso (v_{des}), consideradas por la literatura en el rango de desembalse rápido $v_{des} \geq 0,3 \text{ cm/h}$ (Tapia y Beltrán 2019). Por último, se consideró la sección de presa homogénea de arcilla como de mayor vulnerabilidad al desembalse rápido, atendiendo a los bajos parámetros de resistencia de este material, y la baja permeabilidad o altos valores de succión en la condición de saturación parcial, que impide una rápida disipación de la presión de poros (García et al. 2016).

Sea el volumen útil ($V_{\text{útil}}$) la diferencia entre los volúmenes de aguas normales (V_{NAN}) y aguas muertas (V_{NVM}) y el gasto máximo de entrega por obras de toma $Q_{\text{máx-op}}$, se calcula el tiempo mínimo de operación como:

$$t_{\text{mín-op}} = \frac{V_{\text{útil}}}{Q_{\text{máx-op}}} \quad (1)$$

Luego, la velocidad máxima de desembalse ($v_{\text{máx-des}}$) se calcula, tomando en cuenta la diferencia de cotas (Δh) entre el Nivel de Aguas Normales (NAN) y el Nivel de Volumen Muerto (NVM):

$$v_{\text{máx-des}} = \frac{\Delta h}{t_{\text{mín-op}}} \quad (2)$$

Los valores característicos de estas magnitudes para los casos de estudio se relacionan en la tabla 1.

Tabla 1. Características generales de los casos de estudio.

Presa	Talud Aguas Arriba (V:H)	V_{NAN} (Hm^3)	V_{NVM} (Hm^3)	Δh (m)	$Q_{\text{máx-op}}$ (m^3/s)	$t_{\text{mín-op}}$ (días)	$v_{\text{máx-des}}$ (cm/h)
Herradura	1:2,5	58,31	5	8,5	24,91	24,77	1,46
Cauto El Paso	1:2,5	330	9	16	55	67,55	0,99

La colocación de una Pequeña Central Hidroeléctrica (PCHE) incrementa el gasto de operación en $20 \text{ m}^3/\text{s}$ y propicia la ocurrencia del desembalse rápido (tabla 2).

Tabla 2. Condiciones de operación máxima actual incrementada con PCHE.

Presa + PCHE	$Q_{\text{máx-op}}$ (m^3/s)	$t_{\text{mín-op}}$ (días)	$v_{\text{máx-des}}$ (cm/h)
Herradura	44,91	13,74	2,58
Cauto El Paso	75	49,54	1,35

Los cálculos de velocidad de desembalse se han realizado sobre la hipótesis de que el caudal de entrada a los embalses es muy pequeño o nulo, solo existe el gasto de salida por obras de toma y la cota inicial es el Nivel de Aguas Normales. Además, se consideran funciones de desembalse (relación cota del embalse vs. tiempo) lineales y continuas para ambas presas, como recomiendan Tapia y Beltrán (2019) para presas de materiales locales con características geométricas similares a las que aquí se estudian (figura 1).

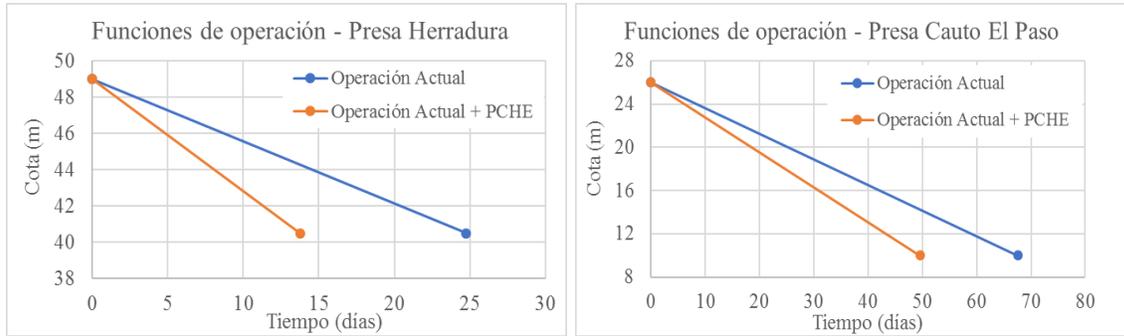


Figura 1. Funciones de desembalse de las presas Herradura y Cauto El Paso, para las condiciones de operación actual e incrementada con una PCHE.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se consideraron en el terraplén de las presas cuatro alternativas de suelos arcillosos de clasificación CH (arcilla de alta compresibilidad) típicos utilizados en la construcción de presas homogéneas en Cuba, cuyos parámetros geotécnicos fundamentales se describen en la tabla 3. Para la condición de saturación parcial, se consideraron las curvas características correspondientes a la rama de secado (figura 2), obtenidas para estos cuatro suelos por Tristá (2015) y Rodríguez (2017).

Tabla 3. Parámetros geotécnicos de los suelos considerados en la sección homogénea del terraplén de las presas en estudio.

Parámetro Geotécnico	Suelo A	Suelo B	Suelo C	Suelo D
Peso específico saturado γ_{sat} (kN/m ³)	17,14	18,42	18,97	19,71
Gravedad específica G_s (adimensional)	2,6	2,74	2,72	2,82
Ángulo de fricción interna efectivo ϕ' (°)	27,8	22	33,4	14,5
Cohesión efectiva c' (kPa)	38,7	29	3,4	49,6
Permeabilidad horizontal saturada k_x (m/s)	3,47E-8	8,00E-8	1,03E-8	4,80E-8
Relación de anisotropía k_y/k_x (adimensional)	0,083	0,083	0,083	0,083
Índice de compresibilidad volumétrica m_v (kPa ⁻¹)	1,00E-5	1,00E-5	1,00E-5	1,00E-5
Índice de poros e (adimensional)	1,14	0,982	0,842	0,803
Contenido Volumétrico de Agua para 100% de saturación θ_s (m ³ /m ³).	0,533	0,495	0,457	0,445

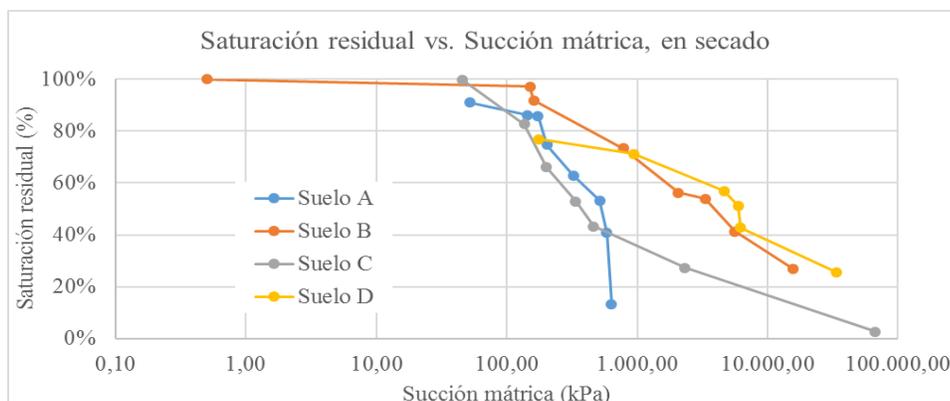


Figura 2. Curvas características de los suelos estudiados.

El cimiento y el prisma de drenaje se consideraron materiales con comportamiento saturado, cuyos parámetros se relacionan en la tabla 4.

Tabla 4. Parámetros geotécnicos del cimiento y el prisma de drenaje.

Parámetro Geotécnico	Cimiento	Drenaje
Peso específico saturado γ_{sat} (kN/m ³)	19,5	21
Ángulo de fricción interna efectivo ϕ' (°)	39	40
Cohesión efectiva c' (kPa)	20	0
Permeabilidad horizontal saturada k_x (m/s)	0,01	1,00E-6
Relación de anisotropía k_y/k_x (adimensional)	1	1
Índice de compresibilidad volumétrica m_v (kPa ⁻¹)	1,00E-5	1,00E-5

En el análisis de estabilidad de taludes, el método sueco de las dovelas ha sido desarrollado y perfeccionado por numerosos investigadores, haciéndose particularmente preciso a partir de la aplicación de las teorías de Morgenstern-Price, en las que se asume existe una función que relaciona las fuerzas de cortante y las fuerzas normales entre dovelas, y se establece una relación entre los componentes de las fuerzas de interconexión, como se muestra en la ecuación 3 (Morgenstern and Price, 1965).

$$F = \lambda f(X)E \quad (3)$$

Donde X, E son las fuerzas de interconexión relacionadas entre sí y λ es el factor de escala. La función $f(X)$ se selecciona de forma arbitraria y su influencia es poco sustancial.

El método de Morgenstern-Price satisface todas las ecuaciones de equilibrio y puede aplicarse a cualquier superficie de deslizamiento. Si bien se puede considerar cualquier forma de función en el análisis, una función irreal puede resultar en problemas de convergencia en la solución de las ecuaciones para el factor de seguridad. En la práctica es común definir la estabilidad de un talud en términos de un factor de seguridad (FS), obtenido habitualmente de un análisis matemático determinístico cuyas formulaciones deben tener en cuenta la mayoría de los factores que afectan la estabilidad. Para los suelos parcialmente saturados, la envolvente de falla

extendida de Mohr-Coulomb toma la forma matemática que se muestra en la ecuación 4 (Fredlund and Rahardjo 1993):

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (4)$$

Donde σ_n es la tensión normal en la falla, el término $(u_a - u_w)$ es la succión, dada por la diferencia entre presión de poro de aire u_a y presión de poro de agua u_w , c' es la cohesión efectiva, φ' es el ángulo de fricción interna efectivo, y φ^b es el ángulo de succión del suelo.

El inconveniente del uso del ángulo de succión φ^b como una constante es que asume un incremento lineal de la envolvente de falla extendida de Mohr-Coulomb con la succión del suelo, lo que tiende a sobrestimar la resistencia al corte del suelo parcialmente saturado, particularmente cuando la succión del suelo es muy alta. Como mejor alternativa al uso del ángulo de succión φ^b se implementó la ecuación (5) propuesta por Vanapalli et al. (1996).

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \left[(\tan \varphi') \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \right] \quad (5)$$

Donde θ_w es el contenido volumétrico de agua, θ_s es el contenido volumétrico saturado de agua y θ_r es el contenido volumétrico residual de agua. Ello permite estimar la resistencia al corte del suelo parcialmente saturado, en función de la curva característica y de los parámetros de resistencia al corte del suelo saturado.

En este estudio se aplicó el método de Morgenstern-Price para determinar los factores de seguridad del talud aguas arriba, a través del módulo de análisis SLOPE/W del programa de cómputo GeoStudio, versión 2012. El programa implementa la ecuación 5 para considerar el comportamiento parcialmente saturado del suelo durante el proceso de desembalse (GEO-SLOPE 2012a). Previamente al análisis en SLOPE/W se aplicó el módulo SEEP/W para establecer las condiciones de flujo de filtración a través del terraplén y el cimiento, para la condición del embalse en nivel de aguas normales (régimen permanente) (GEO-SLOPE 2012b). La variación del flujo de filtración durante el desembalse se modeló también a través del módulo SEEP/W en régimen impermanente con las funciones de operación antes expuestas (figura 1). Se efectuó el cálculo de factor de seguridad mínimo del talud en cinco etapas del desembalse: 0%, 25%, 50%, 75% y 100%.

Para las presas de categoría III como las que aquí se analizan, Armas y Horta (2010) recomiendan un factor normativo $FS_{norma} = 1,10$ que garantiza estabilidad y seguridad en condiciones de trabajo normales, por lo que se utilizará este valor como referencia para evaluar la aceptación o no del proceso de desembalse.

RESULTADOS

Evolución del factor de seguridad mínimo durante el desembalse.

Se determinó el factor de seguridad (FS) del talud aguas arriba de cada presa, en cinco etapas y dos velocidades de desembalse, considerando dos comportamientos mecánicos de los suelos de la sección homogénea: comportamiento saturado (forma de análisis tradicional, en la que no se

considera el efecto de la succión mátrica en la resistencia a cortante) y comportamiento parcialmente saturado (en el que sí se considera el efecto de la succión mátrica).

La evolución del factor de seguridad mínimo calculado en el talud aguas arriba de las presas Herradura y Cauto El Paso se describe en las figuras 3 y 4, respectivamente. En ambos casos es posible apreciar que los mayores valores se obtienen considerando la existencia del suelo A (de comportamiento cohesivo-friccional y mayores parámetros de resistencia a cortante) en la sección homogénea. Los menores valores corresponden al suelo C, de comportamiento predominante friccional. Los suelos B y D muestran comportamiento similar, siendo el primero de comportamiento cohesivo friccional menos resistente y el segundo predominantemente cohesivo.

La Presa Herradura muestra altos valores del factor de seguridad mínimo en el talud aguas arriba durante todo el proceso de desembalse generado por la operación de las obras de toma actuales a máxima capacidad. Con el incremento de esta operación por la construcción de la PCHE, los factores de seguridad mínimo se reducen, siendo los menores en las etapas de 75% de desembalse y suelo C en la sección homogénea del terraplén: $FS_{mín} = 1,27$ considerando comportamiento saturado y $FS_{mín} = 1,12$ considerando comportamiento de saturación parcial. En ambos casos se cumple que $FS_{mín} > FS_{norma}$, por lo que el régimen de operación no pondrá en peligro la estabilidad del talud.

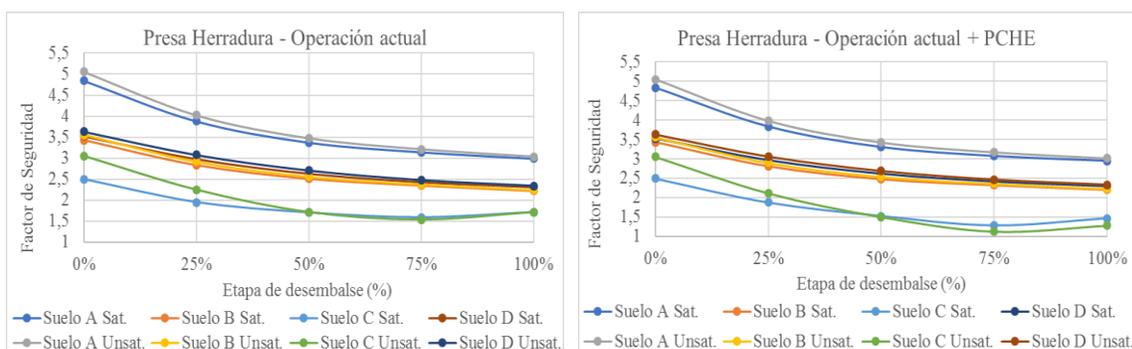


Figura 3. Evolución del factor de seguridad mínimo durante desembalse por operación en Presa Herradura.

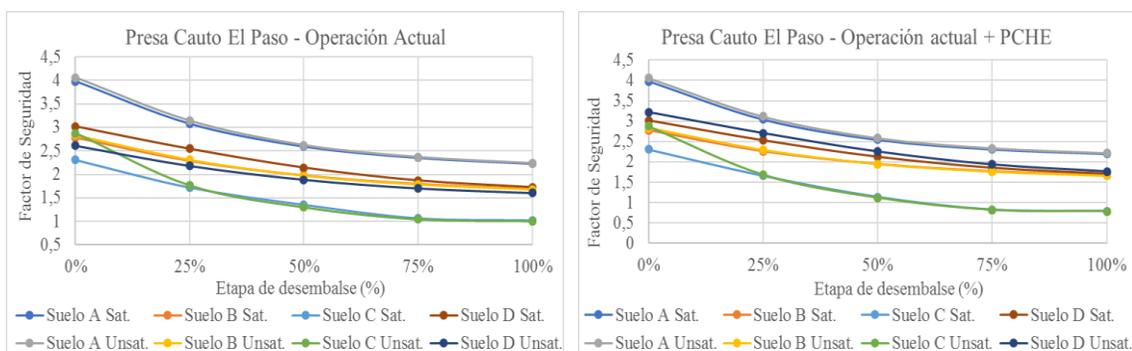


Figura 4. Evolución del factor de seguridad mínimo durante desembalse por operación en Presa Cauto El Paso.

La Presa Cauto El Paso muestra resultados más desfavorables al considerarse la presencia del suelo C en la sección homogénea. En las condiciones de máxima operación de las obras de toma actuales, el factor de seguridad mínimo se reduce drásticamente. En la etapa de 75% de desembalse, $FS_{mín} = 1,06$ considerando comportamiento saturado y $FS_{mín} = 1,05$ considerando comportamiento de saturación parcial. En la etapa de 100% de desembalse, $FS_{mín} = 1,02$ considerando comportamiento saturado y $FS_{mín} = 1,01$ considerando comportamiento de saturación parcial. Por tanto, una vez superado el 50% de desembalse, el talud aguas arriba deja de ser seguro. Más grave aún es la situación de la presa si se adiciona una PCHE a la máxima operación actual. En ese caso, en la etapa de 75% de desembalse, $FS_{mín} = 0,83$ considerando comportamiento saturado y $FS_{mín} = 0,82$ considerando comportamiento de saturación parcial. En la etapa de 100% de desembalse, $FS_{mín} = 0,79$ considerando comportamiento saturado y $FS_{mín} = 0,79$ considerando comportamiento de saturación parcial. Al ser $FS_{mín} < 1$ el talud es inestable, de ahí que debe corregirse el proceso de operación para no provocar la falla de la presa.

Influencia de la saturación parcial en análisis de estabilidad.

El análisis del comportamiento del factor de seguridad mínimo durante el proceso de desembalse de las dos presas permite observar que, en un mismo suelo, el desempeño del talud considerando comportamiento saturado (suelos denominados Sat. en los gráficos de las figuras 3 y 4) y parcialmente saturado (suelos denominados Unsat. en los gráficos de las figuras 3 y 4) es muy similar, ya que sus curvas de “factor de seguridad versus etapa de desembalse” prácticamente se superponen en la mayoría de los casos. Con fines comparativos, se considera la diferencia porcentual entre factores de seguridad calculados para dos modelos con condiciones “a” y “b” distintas por una sola variable independiente (tipo de suelo, velocidad de desembalse, etc.), expresada en tanto por ciento, como:

$$Dif_{\%} = \frac{FS_a - FS_b}{FS_b} \times 100 \quad (6)$$

En este análisis, la diferencia porcentual se refiere a la variación de los factores de seguridad calculados considerando suelos con comportamiento parcialmente saturado (condición “a”) respecto a los calculados considerando suelos con comportamiento saturado (condición “b”) (figuras 5 y 6). Los valores de $Dif_{\%}$ negativos indican los casos en que el factor de seguridad de comportamiento saturado (FS_b) es mayor que el de comportamiento parcialmente saturado (FS_a).

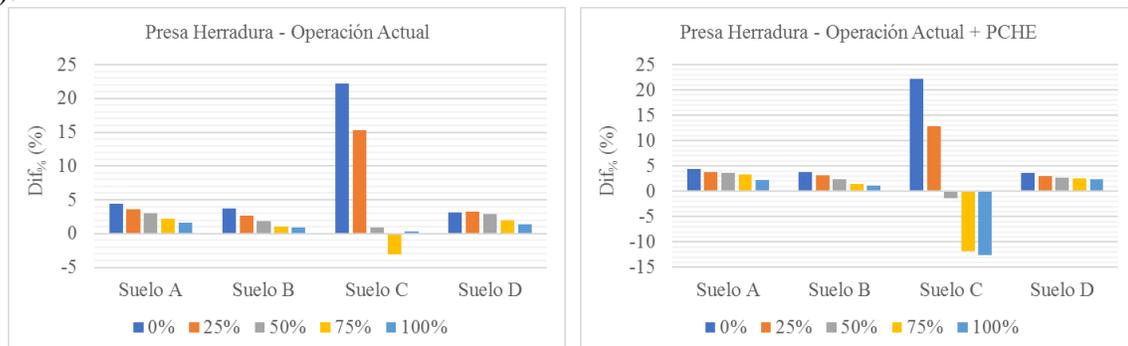


Figura 5. Diferencia porcentual entre factores de seguridad considerando comportamiento saturado, respecto a comportamiento parcialmente saturado. Presa Herradura.

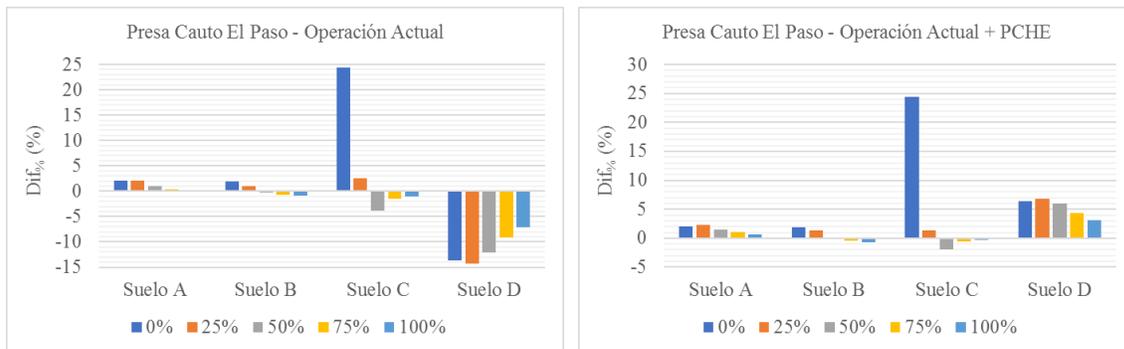


Figura 6. Diferencia porcentual entre factores de seguridad considerando comportamiento saturado, respecto a comportamiento parcialmente saturado. Presa Cauto El Paso.

En la Presa Herradura, para las dos velocidades de desembalse estudiadas, se observa que únicamente el suelo C (de comportamiento predominante friccional) muestra diferencias porcentuales superiores a 5% entre los factores de seguridad de las dos condiciones de saturación.

En la Presa Cauto El Paso las mayores diferencias corresponden al suelo D (de comportamiento predominante cohesivo), con excepción del suelo C en la etapa de 0% de desembalse, etapa que no es de interés en la presente investigación.

En general, al inicio del desembalse los factores de seguridad en la condición de suelo saturado son mayores. Su diferencia respecto a los de la condición de suelo parcialmente saturado disminuye en el transcurso del proceso, llegando a ser muy similares o menores que estos una vez ocurrido el 100% de desembalse.

Si se considera que la etapa de 100% de desembalse se caracteriza por ser la de menores factores de seguridad, o sea, es la etapa de mayor peligro, puede apreciarse que en dos casos (suelo C en la Presa Herradura con régimen de operación incrementado por la PCHE y suelo D en la Presa Cauto El Paso con régimen de operación máxima actual), la diferencia en valor absoluto entre los factores de seguridad calculados en ambas condiciones del suelo (saturado y parcialmente saturado) es superior al 5%, siendo menor el factor de seguridad calculado en comportamiento de saturación parcial. Dicho comportamiento puede atribuirse a las características de resistencia a cortante de estos suelos (suelo C predominantemente friccional y suelo D predominantemente cohesivo), al índice de poros (en ambos suelos C y D este parámetro es de menor valor que en los suelos A y B) o al contenido volumétrico de agua en la etapa inicial del desembalse (menor en los suelos S y D que en los suelos A y B). Estudios posteriores pueden estar dirigidos a establecer cuál de estas variables determina el fenómeno observado.

Corrección a la función de desembalse de Cauto El Paso.

La operación a máxima demanda de la Presa Cauto El Paso, considerando la presencia de suelo friccional tipo C, resulta peligrosa si supera el 50% del proceso de desembalse de forma continuada. Por ello, se estudiaron variantes de operación que garanticen en todo momento la

estabilidad del talud aguas arriba. Este análisis se realizó únicamente considerando el comportamiento de suelo en saturación parcial, es decir, considerando el efecto de la succión mátrica en la resistencia a cortante, ya que resultó el de menores factores de seguridad en el análisis anterior y representa mejor el comportamiento real de los suelos.

La primera variante se denomina de “operación interrumpida”. Considera que las obras de toma actuales se operan a máxima capacidad hasta el 50% del desembalse, es decir, que la velocidad de desembalse es $v_{des} = 0,99\text{cm/h}$ sostenida durante 33,775 días, deteniéndose el proceso durante un tiempo t_{inter} , con obras de toma totalmente cerradas para que ocurra la disipación de las presiones de poro retenidas en el talud saturado. Posteriormente se reanuda la operación en iguales condiciones. Para garantizar suficiente drenaje de las presiones de poro, se determinó que la interrupción mínima es $t_{inter} = 21$ días, para el cual el factor de seguridad mínimo al final del desembalse es $FS_{min} = 1,103$ lográndose que $FS_{min} > FS_{norma}$. El tiempo total de desembalse con esta función de operación es 88,55 días (ver figura 7).

La segunda variante se denomina de “operación retardada”. Se considera que las obras de toma actuales operan de forma continuada y a una capacidad inferior a la máxima, generando una velocidad de desembalse que garantice en todo momento la estabilidad y seguridad del talud. Para garantizar suficiente drenaje de las presiones de poro durante todo el proceso, se determinó que el tiempo mínimo de desembalse por operación continuada debe ser $t_{min-op} = 78$ días (ver figura 7), que equivale a una velocidad de desembalse $v_{des} = 0,85\text{cm/h}$ y produce un factor de seguridad mínimo al final del desembalse $FS_{min} = 1,10$ con lo que se garantiza que $FS_{min} = FS_{norma}$ y el talud aguas arriba se mantiene estable y seguro.

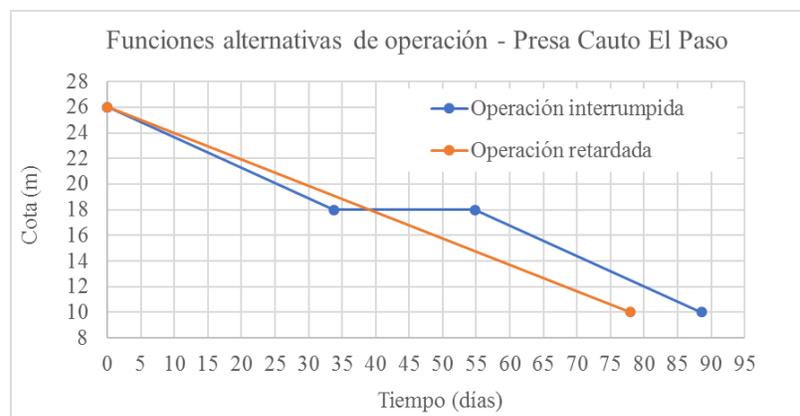


Figura 7. Funciones alternativas que garantizan la operación segura de la Presa Cauto El Paso.

En la variante de “operación retardada” se aplica la ecuación 1 a fin de determinar el gasto máximo admisible de operación $Q_{máx-op}$ para garantizar el desembalse seguro, considerando $t_{min-op} = 78$ días y volumen útil $V_{util} = 321\text{Hm}^3$. Se obtiene que $Q_{máx-op} = 47,63\text{m}^3/\text{s}$, lo que significa que las obras de toma trabajan al 86,6% de su capacidad.

La adición de la PCHE a la Presa Cauto El Paso puede considerarse en la segunda alternativa de operación, reduciendo el gasto de las obras de toma actuales a $27,63\text{m}^3/\text{s}$ (el 50% de su capacidad) para garantizar la entrega de $20\text{m}^3/\text{s}$ a la turbina, con lo que se garantiza la

generación eléctrica durante 78 días sin afectar la seguridad de la presa. En la primera alternativa, la operación de la PCHE impone la utilización de las obras de toma al 63,6% con el período de 21 días de interrupción de entregas.

CONCLUSIONES

- El desembalse rápido por operación en las condiciones actuales tiene mayor afectación en la Presa Cauto El Paso considerando la presencia de suelo C en la sección homogénea del terraplén, donde los factores de seguridad del talud aguas arriba llegan a ser inferiores al normativo si se realiza una operación continuada a máxima capacidad de las obras de toma.
- El incremento del gasto de salida en la Presa Cauto el Paso por la construcción de una PCHE con demanda de $20\text{m}^3/\text{s}$ conduce a la inestabilidad del talud aguas arriba, una vez superado el 50% del desembalse bajo operación máxima continuada y considerando la presencia de suelo C en la sección homogénea del terraplén.
- El talud aguas arriba de la Presa Herradura no se afecta ante la ocurrencia de desembalse rápido por operación continuada de obras de toma a máxima capacidad o la adición de una PCHE, en ninguna de las condiciones geotécnicas estudiadas.
- En ambos casos de estudio los factores de seguridad del talud aguas arriba se reducen durante el proceso de desembalse, con independencia del tipo de suelo en el terraplén, ocurriendo los menores valores en la etapa de 100% de desembalse, la que se debe considerar como crítica o de mayor atención.
- De las 16 combinaciones de velocidad de desembalse, caso de estudio y tipo de suelo en el terraplén, solo en dos (suelo C en la Presa Herradura con $v_{des} = 2,58\text{cm}/\text{h}$ y suelo D en la Presa Cauto El Paso con $v_{des} = 0,99\text{cm}/\text{h}$) se observó diferencia superior a 5% entre el factor de seguridad de suelo saturado y parcialmente saturado, transcurrido el 100% de desembalse.
- En los suelos con comportamiento cohesivo-friccional A y B, la diferencia entre el factor de seguridad de suelo saturado y parcialmente saturado fue siempre inferior al 5% durante todo el proceso de desembalse, en los dos casos de estudio y para las dos velocidades consideradas.
- Se proponen dos funciones de operación corregidas que garantizan la estabilidad del talud aguas arriba de la Presa Cauto El Paso. La “operación interrumpida” considera 21 días de recuperación (sin entrega por obras de toma), insertados en el 50% del desembalse a máxima demanda. La “operación retardada” restringe la velocidad de desembalse a $0,85\text{cm}/\text{h}$.

REFERENCIAS

- Armas R. y Horta E.** (2010). “Presas de Tierra”, Editorial Félix Varela, ISBN: 978-959-07-1141-1, La Habana, Cuba.
- Fredlund, D. and Rahardjo H.** (1993). “Soil mechanics for unsaturated soils”. Ed. John Wiley & Sons. Wiley-Interscience, University of Saskatchewan, ISBN: 0-471-85008-X, Canada.
- García, J., Cobelo, W.D. y Quevedo, G.J.** (2016). “Relación entre tiempo de consolidación y permeabilidad no saturada en presas de tierra”, Ingeniería Hidráulica y Ambiental, vol. XXXVII, N°2, pp. 94-107, ISSN: 1815-591X, La Habana, Cuba.

- GEO-SLOPE** (2012a). “Stability Modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology”. Manual de usuario. Edición de julio 2012. GEO-SLOPE International Ltd. Calgary, Canadá. Extraído de: <http://www.geo-slope.com> en mayo de 2018.
- GEO-SLOPE** (2012b). “Seepage Modeling with SEEP/W. An Engineering Methodology”. Manual de usuario. Edición de julio 2012. GEO-SLOPE International Ltd. Calgary, Canadá. Extraído de: <http://www.geo-slope.com> en mayo de 2018.
- Haramboure Y.G., y Guedes O.** (2020). “Fallas de presas de materiales locales: una actualización de casos históricos”, Monografía, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, ISBN: 978-959-261-604-2, La Habana, Cuba.
- Loaiza W., Reyes A., y Carvajal, Y.** (2012). “Aplicación del Índice de Sostenibilidad del Recurso Hídrico en la Agricultura (ISRHA) para definir estrategias tecnológicas sostenibles en la microcuenca Centella”, Revista Ingeniería y Desarrollo, vol. 30, pp. 160-181, ISSN: 2145-9371, Universidad del Norte, Colombia.
- Morgenstern N.R. and Price V.E.** (1965). “The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces”, Geotechnique, vol. 15, N°1, pp. 79-93, ISSN: 0016-8505, London, UK.
- Rodríguez C.M.** (2017). “Evaluación del comportamiento tenso-deformacional en suelos parcialmente saturados con problemas de inestabilidad volumétrica”, Tesis de Maestría, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Villa Clara, Cuba.
- Tapia G. y Beltrán G.** (2019). “Estudio del comportamiento de una presa en tierra durante desembalse rápido. Caso: Presa Mancilla en Colombia”, Memorias del XVI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Cancún, México. Extraído de <https://www.issmge.org/publications/online-library> en mayo de 2019.
- Tristá J.G.** (2015). “Estudio del comportamiento tenso-deformacional de suelos parcialmente saturados en Cuba”, Tesis de Doctorado, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Villa Clara, Cuba.
- Vanapalli S., Fredlund D.G., Pufahl D.E. and Clifton A.W.** (1996). “Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction”, Canada Geotechnical Journal, vol. 3, pp. 379-92, ISSN: 0008-3674, Ottawa, Canada.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Yoermes Glez Haramboure <https://orcid.org/0000-0001-8613-6264>

Realizó el análisis hidráulico de los casos de estudio. Participó en la elaboración de los modelos computacionales y su ejecución, así como en el análisis de resultados y la redacción del trabajo.

Isaida Flores Berenguer <https://orcid.org/0000-0001-8492-0928>

Participó en la búsqueda de información, la caracterización de los suelos considerados en el estudio, el análisis de resultados de la modelación computacional y la revisión del documento final.

Jenny García Tristá <https://orcid.org/0000-0003-3072-8011>

Participó en el procesamiento de los datos de suelos, haciendo contribuciones en su análisis e interpretación, en la búsqueda de información y en la revisión del documento final.