

Estabilidad de taludes en presas de tierra bajo el efecto de las precipitaciones y el desembalse considerando el aporte de los suelos parcialmente saturados.

Stability of slopes in earth dams under the effect of rainfall and discharge, considering the contribution of partially saturated soils.

Isaida Flores Berenguer, Yoermes González Haramboure y Jenny García Tristá

Introducción

La geotecnia surge en 1925 a partir de las investigaciones llevadas a cabo por Karl Terzaghi, impulsado por la necesidad de construir nuevas y más complejas obras de ingeniería para las que resultaba imprescindible conocer el comportamiento del suelo sobre el que estarían sustentadas o con el que serían conformadas. Dentro de este último grupo, se encuentran las presas de tierra, consideradas estructuras esenciales para el desarrollo económico de Cuba por las numerosas aplicaciones que poseen para la solución de las necesidades de la población y la industria. Al ser construidas con materiales locales, representan un ahorro económico considerable, aunque sus fallos están asociados generalmente a las propiedades de los suelos empleados y su manejo.

En las últimas décadas el mundo académico dedicado a la geotecnia ha pasado de considerar al suelo en su fase más desfavorable: la saturada, a considerar estados de saturación parcial, a partir de incluir, en los análisis, la curva característica de succión vs. saturación lo que ha permitido realizar, en etapas de diseño y explotación de las presas de tierra, el análisis de fenómenos complejos como la variación de la resistencia a cortante y la permeabilidad en función de la saturación, su evolución en el tiempo y bajo diversas condiciones de carga, así como modificar las ecuaciones para incluir las variables asociadas al estado de saturación parcial (Fredlund & Rahardjo, 1993). El principal problema en la inclusión de las variables relacionadas a este estado para el estudio geotécnico es la dificultad de obtenerlas mediante ensayos de laboratorio, pues estos resultan costosos, complejos y demorados. Por ello se han implementado métodos matemáticos que posibiliten obtener los parámetros de la curva característica del suelo a partir de los ensayos tradicionales (Zapata, 1999; Arya & Paris, 1981; Fredlund & Xing, 1994; Van Genuchten, 1980; Torres, 2011).

Actualmente, existen en Cuba 242 presas clasificadas como grandes según el Comité Internacional de Grandes Presas (ICOLD por sus siglas en inglés). El monto total invertido en la construcción de estas estructuras sobrepasa los 900 mil millones de pesos en moneda total. A partir de un estudio desarrollado por (Haramboure & Guedes, 2020) se detectaron 51 grandes casos de fallas geotécnicas e hidráulicas no catastróficas, y 1 caso de falla catastrófica de presas de tierra en Cuba, contabilizados hasta 2016. La mayoría de ellos no fueron oficialmente registrados, y las soluciones fueron dadas a pie de obra. La

investigación arrojó que la principal causa de estas fallas son los deslizamientos de taludes (Figura 1).

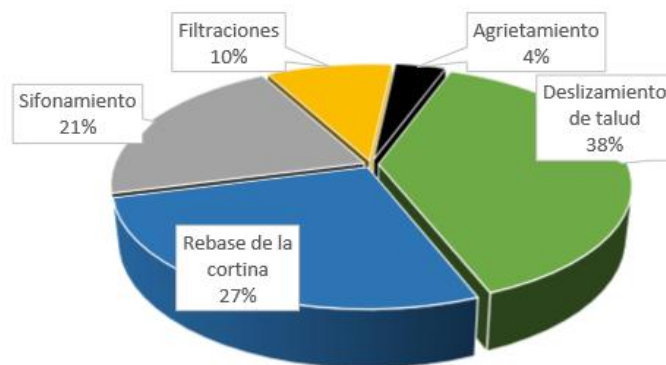


Figura 1. Orden de ocurrencia de fallos en presas de materiales sueltos en Cuba.
(Haramboure et al., 2017)

Aunque ninguna de estas fallas de taludes condujo a la destrucción total de la obra, sí implicaron erogar recursos monetarios y materiales en su reparación. De las 20 presas afectadas por esta causa, el 40% han presentado alguna falla de estabilidad del talud en los primeros 5 años de construidas, evidenciando errores o deficiencias en el proceso constructivo (Haramboure & Guedes, 2020). Sin embargo, este tipo de fallo puede presentarse en cualquier momento de la vida útil de la obra, por lo cual es motivo de vigilancia y monitoreo permanente. La edad de falla de las presas que han presentado problemas de estabilidad de taludes se muestra en la Figura 2, de donde se observa que no existe un patrón en la ocurrencia de este tipo de fallos en las presas cubanas, aunque puede señalarse que, de las 20 presas falladas, 16 de estas fallas han ocurrido en el talud aguas abajo y de ellas, al menos 11 han sucedido inmediatamente después de intensas lluvias (Haramboure et al., 2017).

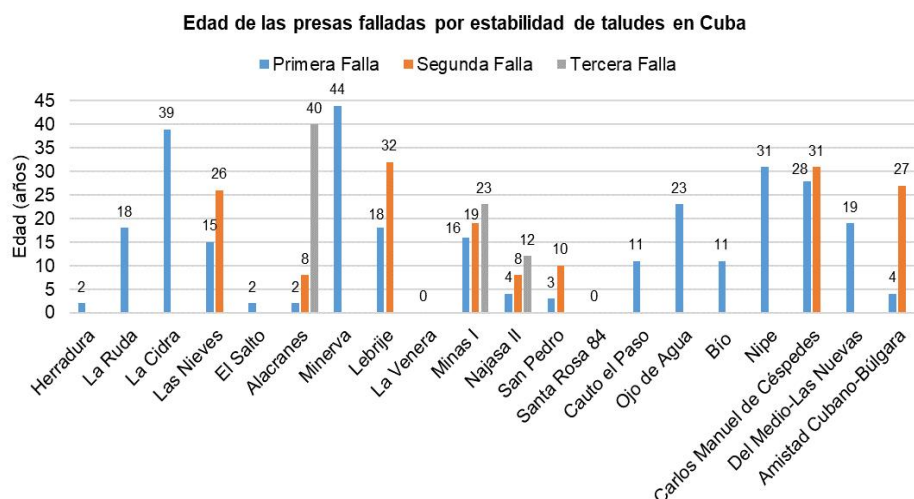


Figura 2. Edad de las presas afectadas por estabilidad de taludes en Cuba hasta 2016.
(Haramboure et al. 2017)

Estudios recientes demuestran que el efecto de las lluvias sobre el talud de las presas está asociado directamente a la permeabilidad no saturada del suelo y a la duración e intensidad de la lluvia (Ahmed, Kang, & Khan, 2016; Huat, Ali, & Low, 2006; Mora & Rojas, 2012; Tran, Thu, & Lee, 2015).

Según (Mora & Rojas, 2012) algunos taludes que permanecen estables durante muchos años pueden presentar deslizamientos cuando ocurre un período de lluvia extraordinaria y (Gofar & Lee, 2008) plantean que la lluvia antecedente también es un factor preponderante en este tipo de fallos. Ante la dificultad de medir el efecto de la lluvia en el momento en que esta ocurre sobre el talud (Huang, Leong, & Rahardjo, 2018) presentan los métodos numéricos como una alternativa válida para estos análisis.

Las cuatro fallas restantes han sido en el talud aguas arriba, el cual es susceptible a sufrir fallas por desembalse rápido, que pueden ser causados por cambios en la operación de la presa que provocan la reducción de los niveles de agua en el embalse. En la descripción del fenómeno físico que se genera en el interior de la cortina de la presa cuando se produce el desembalse (Boushehrian, Rezaee, & Vafamand, 2017) demuestran la disipación de la presión de poros a medida que se reduce el nivel del agua en la presa. (Romer, Ayala, Chagas, & Silva, 2019) plantean que este fenómeno ocurre después de un cierto periodo donde el nivel del embalse permanece elevado, de forma que, cuando el nivel de agua descende, no ocurre la completa disipación de las presiones intersticiales en el interior del cuerpo de la presa simultáneamente al descenso del nivel del agua, criterio comprobado por (Pinyol, Alondo, Corominas, & Moya, 2013). (Pinyol, Alonso, & Olivella, 2008) estudiaron el efecto del desembalse entre la altura de la cortina sobre el grado de saturación en un perfil del talud aguas arriba revelando una elevada semejanza entre los modelos computacionales y las lecturas piezométricas en las presas, y relacionando el nivel del agua en el interior de la cortina con el tiempo del desembalse. (Sherard, 1953), en un estudio a 12 presas, consideró que el desembalse rápido está asociado a una velocidad de descenso promedio del nivel del agua de entre 10 a 15 cm/día, lo que corresponde con lo planteado por (Armas & Horta, 1987) para el estudio de las presas cubanas. Sin embargo, estudios más recientes (Haramboure, Flores, & Tristá, 2021) consideran que menores velocidades de descenso también pueden inducir el desembalse rápido. Una vez que se produce el fenómeno del desembalse, es posible aplicar los criterios de la mecánica de suelos no saturados, donde una parte del talud aguas arriba se encontraría en la condición de saturación parcial.

El análisis de la estabilidad de taludes en presas de tierra es un problema complejo debido a la variabilidad de las propiedades de los suelos, donde se incluyen los parámetros asociados a los estados de saturación parcial, la carencia de datos originales y la falta de instrumentación en las presas. Ante esta situación surge como alternativa la aplicación de los métodos matemáticos y la simulación computacional, a través de programas de cómputo que conjugan la teoría clásica con métodos numéricos (Flores, Castro, Tristá, & Haramboure, 2019; Flores, Tristá, & Haramboure, 2020; Haramboure et al., 2021). Uno de los problemas fundamentales en el estudio de la estabilidad en presas de tierra mediante modelos computacionales es la cantidad de variables independientes que pueden asociarse a los fallos, lo que limita la capacidad de generalización en las investigaciones, cuando las condiciones para las que se generó un modelo específico cambian. En los últimos años, con los avances obtenidos en el campo de la inteligencia artificial se han desarrollado trabajos

que avalan el empleo de esta herramienta para resolver problemas complejos asociados a la estabilidad de presas de tierra (Costa, 2016; Flores, Tristá, & Haramboure, 2021; Hariri-Ardebili & Pourkamali-Anaraki, 2018; Komasi, Mohammadzadeh, & Beiranvand, 2019; Pham, Shirzadi, Bui, Prakash, & Dholakia, 2017; Salazar, Toledo, Oñate, & Morán, 2015; Santillán, Fraile-Ardanuy, & Toledo, 2014). El vínculo primario entre la inteligencia artificial y los modelos computacionales se basa en que, para conseguir que una máquina opere y devuelva resultados esperados, es necesario realizar un proceso de entrenamiento y validación, que se asocia directamente a los modelos computacionales. La ventaja fundamental es la capacidad de generalización de los resultados, lo que implica que, una vez preparada la herramienta computacional, esta puede sustituir la ejecución de numerosos modelos computacionales individuales para obtener resultados de similar fiabilidad.

Situación Problemática

Las precipitaciones y el desembalse rápido han sido causa frecuente de fallas por estabilidad de taludes de las presas de tierra en Cuba. Investigaciones recientes señalan que el análisis de estabilidad basado en la condición más crítica: la saturación total, no es el más acertado para describir el comportamiento de los suelos que conforman los diques y cortinas de estas presas en condiciones en que varía su saturación, por lo que resulta necesario considerar el comportamiento de los suelos no saturados, a fin de realizar un pronóstico más acertado de su estabilidad en ambas condiciones de carga.

Planteamiento del Problema

En Cuba resulta necesario realizar un estudio riguroso de la influencia de las precipitaciones y el desembalse rápido en la estabilidad de taludes de las presas de tierra construidas en el país hasta la fecha. Diversas fallas parciales en estas obras geotécnicas han ocurrido en los últimos años, asociadas a los cambios de estado a los que está sometido el suelo cuando pasa de parcialmente saturado a saturado, al producirse precipitaciones constantes o descenso acelerado de los niveles de agua embalsada.

Objetivo general

Determinar la influencia de las precipitaciones y el desembalse en la estabilidad de taludes en presas de tierra en Cuba considerando el comportamiento de los suelos parcialmente saturados.

Metodología

La investigación se desarrolló mediante la aplicación de métodos numéricos y computacionales, combinados con modelación y simulación. Las etapas clave incluyeron:

1. **Recolección de datos:** Se utilizaron datos de laboratorio y de la literatura para caracterizar las propiedades de los suelos empleados en las presas.
2. **Modelación numérica:** Se crearon modelos que integraron estados de carga, geometrías y propiedades de los materiales.
3. **Simulación computacional:** Se ejecutaron modelos numéricos ajustados a datos experimentales para predecir el comportamiento de los suelos bajo condiciones de saturación parcial.

4. **Análisis estadístico:** Los resultados de las simulaciones fueron procesados estadísticamente para identificar patrones y validar los modelos.
5. **Métodos deductivo-inductivos:** Se emplearon para sintetizar los resultados y establecer una metodología robusta para el análisis de estabilidad de taludes.

Resultados

Los resultados confirmaron que las fallas en presas de tierra en Cuba están significativamente influenciadas por las precipitaciones intensas y el desembalse rápido. En el caso de los taludes aguas abajo, el análisis numérico demostró que las lluvias prolongadas incrementan la presión intersticial y reducen la resistencia al corte del suelo, especialmente en suelos con alta permeabilidad no saturada. Para los taludes aguas arriba, se observó que las condiciones de desembalse rápido generan un desbalance en las presiones de poros que compromete su estabilidad.

Discusión

La inclusión de las variables asociadas a la saturación parcial del suelo en el análisis de estabilidad de taludes representa un avance significativo en la geotecnia aplicada. Los resultados obtenidos sugieren que los métodos numéricos y las simulaciones computacionales son herramientas efectivas para predecir el comportamiento de los taludes bajo diferentes condiciones de carga y climáticas. Además, se confirma la necesidad de monitoreo continuo y el uso de modelos adaptativos para gestionar riesgos en estas estructuras.

Conclusiones

1. Las precipitaciones intensas y el desembalse rápido son las principales causas de fallas en la estabilidad de los taludes de presas de tierra en Cuba.
2. El análisis basado en suelos parcialmente saturados proporciona una representación más precisa del comportamiento del suelo bajo condiciones reales de operación.
3. Los métodos numéricos y las simulaciones computacionales son herramientas indispensables para evaluar la estabilidad de taludes y proponer soluciones preventivas.

Referencias bibliográficas

1. Fredlund & Rahardjo, 1993
2. Zapata, 1999;
3. Arya & Paris, 1981;
4. Fredlund & Xing, 1994;
5. Van Genuchten, 1980;
6. Torres, 2011
7. Haramboure & Guedes, 2020
8. Ahmed, Kang, & Khan, 2016;
9. Huat, Ali, & Low, 2006;
10. Mora & Rojas, 2012;

11. Tran, Thu, & Lee, 2015
12. Boushehrian, Rezaee, & Vafamand, 2017
13. Pinyol, Alondo, Corominas, & Moya, 2013
14. Costa, 2016; Flores, Tristá, & Haramboure, 2021;
15. Hariri-Ardebili & Pourkamali-Anaraki, 2018