

Estudio de Estabilidad de Taludes en Presas de Tierra en Condiciones No Saturadas Cuando Ocurre Descenso Rápido de Nivel de Agua

Grover Romer LLANQUE AYALA^{a,1}, Francisco CHAGAS DA SILVA FILHO^b,
Rosiel FERREIRA LEME^b y Claudio Fernando MAHLER^a

^a*Programa de Ingeniería Civil-COPPE, Universidad Federal de Rio de Janeiro.*

^b*Departamento de Ingeniería Hidráulica e Ambiental, Universidad Federal de Ceará.*

Resumen. Recientemente, la condición no saturada del suelo viene siendo considerada en los análisis de estabilidad de taludes con la popularización de distintos softwares que permiten considerar simultáneamente la influencia de distintas variables en la solución de los problemas. En este sentido, el presente trabajo tuvo por objetivo consolidar distintos conceptos de suelos no saturados utilizados en el análisis de estabilidad de taludes en presas de tierra sometidas a la condición de descenso rápido de nivel de agua. Esta investigación fue desarrollada en una sección hipotética tradicional de características geométricas típicas para este tipo de estructuras, el material de la sección transversal de la estructura es considerado homogéneo, clasificado como arena arcillosa (SC). Los parámetros geotécnicos del material utilizado fueron obtenidos de resultados de ensayos laboratoriales de caracterización, compactación, permeabilidad y de compresión triaxial en estados saturado y no saturado, además de obtención de la curva de retención del suelo. El estudio verificó la estabilidad del talud aguas arriba cuando se da la situación de descenso rápido de nivel de agua para el mismo se realizó el modelado del flujo transitorio en un periodo de 330 días y el análisis de estabilidad de taludes de la sección hipotética presentada. Los resultados obtenidos verifican que los valores críticos de estabilidad para el talud aguas arriba pueden conseguir una menor inclinación de la que usualmente es aplicado en la práctica, debiéndose esto al aumento de resistencia del suelo debido a la influencia de la succión, parámetro importante en los suelos en estado no saturado.

Palabras Clave. Descenso rápido, estabilidad, no saturado, succión, reservatorio.

1. Introducción

Con el cuerpo de la presa de tierra una vez construido, muchos son los obstáculos que el ingeniero encuentra en la evaluación de la seguridad de los taludes de la presa, donde se debe tener en cuenta evaluar distintas situaciones para la estabilidad de cada uno de éstos. En el caso del talud agua abajo, su estabilidad se evalúa en situaciones de régimen permanente, cuando el nivel de agua se presenta constante durante un largo período de tiempo. Por otro lado, durante la fase de construcción de la presa de tierra, debe evaluarse la estabilidad tanto del talud aguas arriba y del talud aguas abajo. Para situaciones en las

¹ Grover Romer Llanque Ayala, Departamento de Ingeniería Civil - COPPE, Estudiante de Doctorado Universidad Federal de Rio de Janeiro, Brasil, groverllanque@gmail.com.

que se produzca el descenso rápido de nivel de agua, se debe tener en cuenta el análisis de la estabilidad de talud aguas arriba.

Una evaluación más realista de la estabilidad durante el descenso del embalse es mediante la consideración de aspectos de los suelos no saturados, como por ejemplo la influencia de la conductividad hidráulica en la disipación de la presión de poros.

Este trabajo tiene por objetivo verificar la estabilidad del talud aguas arriba en presas de tierra sometidas a un descenso rápido de nivel de agua para una sección hipotética tradicional que se emplea en la construcción habitual de este tipo de estructuras y en el contexto de suelos no saturados utilizando herramientas de análisis de elementos finitos que permitan reconocer la influencia de esta condición presentada en la estabilidad del talud y la seguridad en presas de tierra, utilizando la plataforma SEEP/W para el modelado del flujo y SLOPE/W el análisis de estabilidad de taludes.

2. Estabilidad de Taludes en condición de descenso rápido de nivel de agua

La Figura 1 ilustra un ejemplo de una presa homogénea destacándose la inclusión en el pie de talud aguas abajo un filtro para conferir estabilidad y drenar la sección aguas abajo, así como un enrocado en la sección de talud aguas arriba que permite proteger el talud de la acción destructiva de las olas [1].

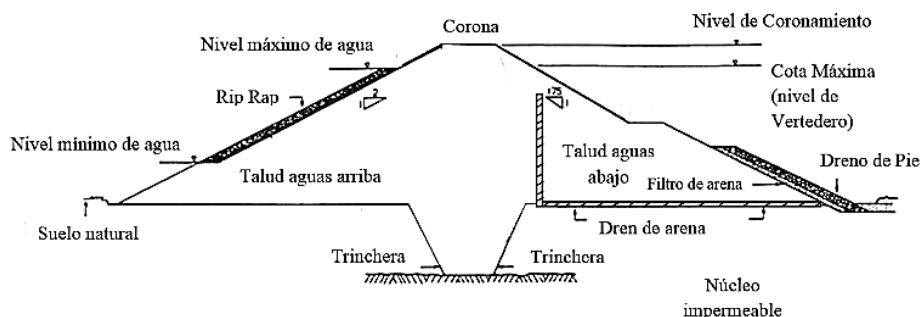


Figura 1. Perfil de una presa de tierra homogénea.

2.1. Descripción del Fenómeno de Descenso Rápido de Nivel de Agua

La condición conocida como "descenso instantáneo o rápido" es a menudo prioritaria en el establecimiento de los taludes aguas arriba en una presa de tierra, porque es la solicitud que presta al cuerpo de la presa condiciones desfavorables a la estabilidad del talud [2].

El descenso rápido del nivel del embalse corresponde a una situación desfavorable para el talud aguas arriba en una presa de tierra. Tal fenómeno ocurre después de un cierto periodo donde el nivel del embalse permaneció elevado, de forma que cuando el nivel de agua del embalse desciende no se permita la completa disipación de las presiones intersticiales en el interior del cuerpo de la presa simultáneamente al descenso del nivel del agua. Sin embargo, dependiendo del tipo de material, el suelo en estado no saturado puede tener un aumento de resistencia durante el descenso rápido, conforme las presiones de poros disipadas y el aumento de succión que ocurra principalmente en el talud aguas arriba.

De acuerdo con Sherard [3], en un estudio previo a 12 presas pudo determinar con respecto a esta situación que las fallas debido a descenso rápido de nivel de agua se presentaron en una velocidad de descenso promedio a partir de 10 a 15 cm/día.

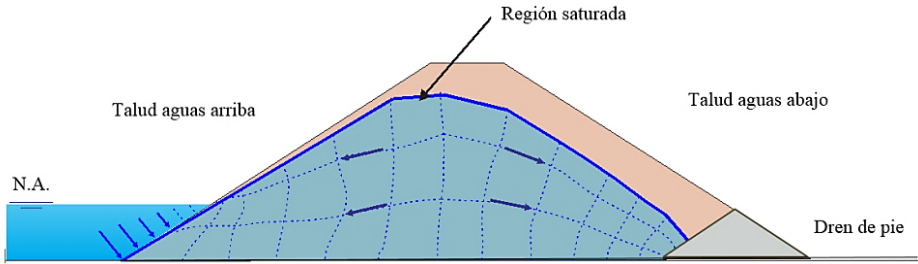


Figura 2. Descenso rápido de nivel de agua.

El efecto de esta alteración del nivel de agua provocada en una presa de tierra es esencial para comprender el fenómeno del descenso rápido, debe tenerse en cuenta que sucede al suelo, no sólo en términos de resistencia, sino también en términos de disipación o no de las presiones de poros intersticiales que permanecen en el interior del cuerpo de la presa de tierra mismas que puedan provocar inestabilidad en el talud.

2.2. Factores de Seguridad para Estudios de Estabilidad de Taludes

Una vez considerado todos los aspectos presentados anteriormente, la norma [4] propone distintos factores de seguridad para distintas condiciones de riesgo, así también se tiene una recomendación de Factores de Seguridad de Presas de [5] que indica de 1.0 a 1.2 para una situación de descenso rápido. En la Tabla 1 se mencionan distintos factores de seguridad para distintas situaciones críticas a la estabilidad de taludes en una presa de tierra.

Tabla 1. Factores de Seguridad.

Situación	FS
Final de Construcción	1,3
Flujo Permanente de largo plazo	1,5
Descenso Rápido	1,0 a 1,2

El factor de seguridad asociado al descenso rápido puede ser el menor entre todas las acciones consideradas críticas a la estabilidad de una presa de tierra que están relacionadas con las consecuencias de la ruptura de una presa de tierra en esta situación. Teniendo en cuenta que, en una fase de descenso, la masa de agua almacenada en el depósito es reducida, el posible colapso de la presa será considerada en una baja probabilidad de ocurrencia.

3. Parámetros geotécnicos utilizados en los análisis

En la Tabla 2 se presenta el resumen de los resultados de ensayos de caracterización y compactación realizados para el suelo estudiado de tipo arena arcillosa (SC) en el

laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Federal de Ceará según [6] para la simulación de sección típica.

Tabla 2. Resumen de resultados.

Resultados		
Composición (%)	Grava	3
	Arena	59
	Limo	10
	Arcilla	28
Límites de consistencia (%)	LL	26
	LP	17
	IP	9
Densidad específica (g/cm3)	Gs	2.62
Clasificación	SUCS	SC
	HRB	A-2-4
Normal		
Ensayo de Compactación	Wo (%)	14.7
	Y _d (g/cm ³)	1.84

Siendo: LL = límite líquido; LP = límite plástico; IP = índice de plasticidad; Wo = humedad óptima y Y_d = peso específico aparente seco.

3.1. Curva característica del suelo

La determinación de la succión del suelo se realizó mediante la técnica del papel de filtro que consiste en colocar una muestra de suelo en contacto con un papel de filtro de calibración conocida en un ambiente herméticamente cerrado hasta que el sistema entre en equilibrio, teniendo cuidado en realizar un manejo adecuado de las herramientas utilizadas en la prueba [7]. Con base en los valores obtenidos del ensayo de papel filtro fue trazada una curva que interpola los puntos obtenidos. Para esta curva ajustada fue utilizada la ecuación propuesta por [8]. Por medio de una planilla electrónica la curva de retención fue trazada partiendo de un campo de succión que varía de 0 a 100.000 kPa conforme indica la Figura 3.

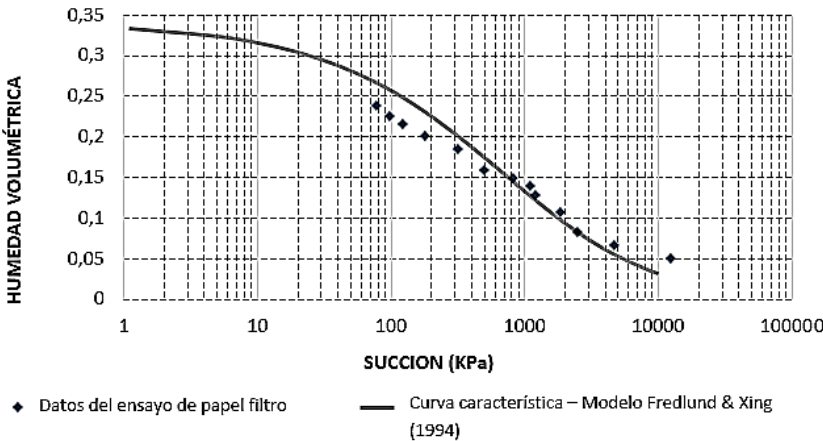


Figura 3. Relación Succión vs humedad.

3.2. Propiedades hidráulicas del suelo

El ensayo de conductividad hidráulica fue realizado con muestras deformadas basadas en la norma [9] para ensayos de carga variable, cuyo resultado obtenido fue un coeficiente de permeabilidad de $2,6 \times 10^{-7}$ m/s para la muestra estudiada, este valor fue utilizado en los estudios de movimiento de agua en el interior de la presa para definir las condiciones de flujo en el material estudiado.

3.3. Propiedades mecánicas del suelo

El procedimiento utilizado para evaluar la resistencia del suelo fue a partir de ensayos de compresión triaxial, dicho ensayo realizado en condiciones saturadas y no saturadas. En las condiciones saturadas del suelo, los ensayos fueron de tipo consolidado y drenado CD. Y en los ensayos no saturados fueron ejecutados sin control de succión debido a que hubo un control de humedad de forma a ensayar las muestras con valores de succión más próximos posibles de las fajas de valores establecidos en función de la metodología adoptada.

Para la determinación del parámetro de resistencia ϕ^b que relaciona el aumento de resistencia de un suelo no saturado en función de la succión actuante, fue utilizado el criterio de Mohr-Coulomb extendido conforme es presentado por [10].

$$c'_1 = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \tag{1}$$

siendo c'_1 = cohesión efectiva debido al aumento de succión mátrica; c' = cohesión efectiva; $(u_a - u_w)$ = succión mátrica; ϕ^b = incremento de resistencia debido al aumento de succión mátrica y ϕ' = ángulo de fricción interna.

A continuación, en la Tabla 3 se presentan los resultados del presente ensayo.

Tabla 3. Resumen de resultados ensayo triaxial.

Humedad Inicial del ensayo (%)	Succión estimada (kPa)	σ_1 (kPa)	σ_3 (kPa)	c'_1 (kPa)	ϕ' (°)	ϕ' medio (°)	c' (kPa)	ϕ^b (°)
12%	279	25	290.9	72.1	25.4	26.6	11.7	12.0
		50	354.1					
		100	479.9					
10%	603	25	534.4	142.3	27.7			
		50	617.5					
		100	742.9					

4. Análisis realizados

El trabajo consistió en estudiar el flujo y la estabilidad del talud aguas arriba para una sección típica en una presa de tierra para una sección hipotética tradicional de características geométricas detalladas a continuación: altura 50m, ancho de corona 5m, ancho de *rip-rap* de 1m, profundidad de fundación de 3m, talud aguas arriba 2,5H: 1V, talud aguas abajo 2H: 1V, sección de material homogéneo de tipo SC.

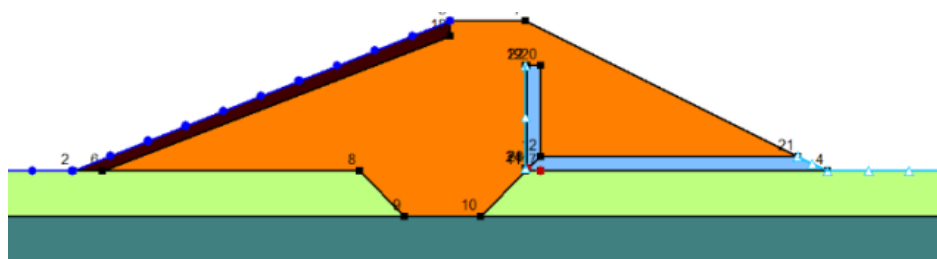


Figura 4. Sección presa homogénea: H=50m, Talud aguas arriba 2,5H: 1V, Talud aguas abajo: 2H: 1V.

Los análisis de estabilidad del talud aguas arriba consideran solamente hasta el primer estrato de fundación que es de 3 metros, no se considera el segundo estrato que está conformado de roca cuya variación en cuanto a flujo y estabilidad no tiene considerable relevancia en esta sección.

4.1. Propiedades Hidráulicas de los Materiales

El programa SEEP/W realiza una estimativa directa de la función de permeabilidad a través de la curva característica y del coeficiente de permeabilidad por medio de la ecuación propuesta por [8].

La Figura 5 presenta la función de permeabilidad vs la succión para el suelo compactado, con un intervalo de succión estimado de 0 a 10.000 kPa. En la presente función se puede observar que para altos valores de succión el coeficiente de permeabilidad reduce significativamente por cuenta de la presencia de aire entre los vacíos del suelo, para valores por debajo de 1,8 kPa no se observó variaciones en la función de permeabilidad debido a la insuficiente energía que ejerce la tensión superficial entre las fases de agua y aire en el interior de los poros del suelo.

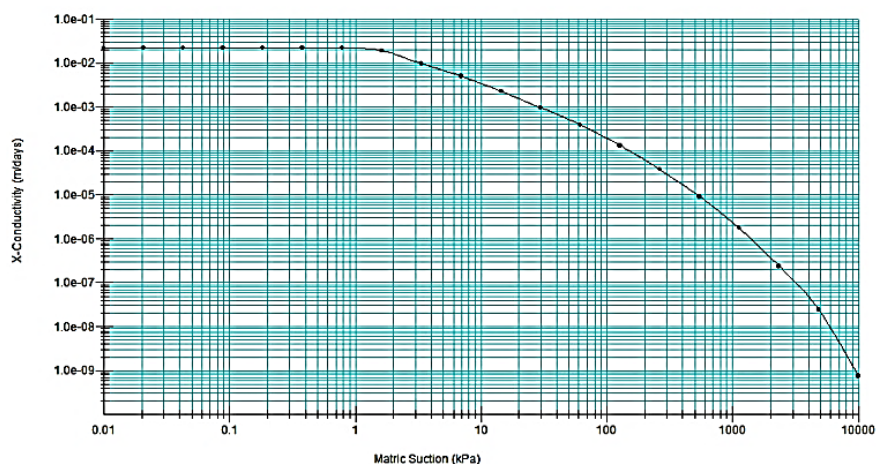


Figura 5. Función de Permeabilidad vs la succión para el suelo compactado.

Con relación a los demás materiales presentes en el cuerpo de la presa de tierra no hubo la necesidad de estimar las funciones de permeabilidad, debido a que los mismos constituyen elementos de drenaje interno que están sometidos a valores de succión muy

bajos. De esta forma se presenta en la Tabla 4 los coeficientes de permeabilidad que fueron considerados constantes.

Tabla 4. Coeficientes de permeabilidad.

Suelo	Kv (m/s)	Kv/ Kx		Función de Permeabilidad
Suelo Compactado SC	2.6x10-7	0.11	Anisotrópico	No Linear
Dren vertical	1.0x10-5	1.00	Isotrópico	Linear
Dren horizontal	1.0x10-5	1.00	Isotrópico	Linear
Rip-Rap	1.0x10-3	1.00	Isotrópico	Linear

4.2. Análisis de Flujo – Plataforma SEEP/W2007

La sección de la presa hipotética estudiada fue discretizada en una malla de 2249 elementos finitos que fueron generados automáticamente por el programa SEEP/W y distribuido uniformemente en siete regiones con elementos triangulares de seis nodos.

4.2.1. Condición de flujo establecido

La condición inicial a la cual estará sometida la presa será a una condición de flujo establecido, esta ocurre tiempo después de estar en funcionamiento con el embalse lleno, esta condición corresponde al inicio del análisis transitorio que se realizó para un periodo de tiempo de 330 días, en la Figura 6 se presenta la distribución de la presión de poros en la sección de la presa hipotética en condiciones de flujo establecido.

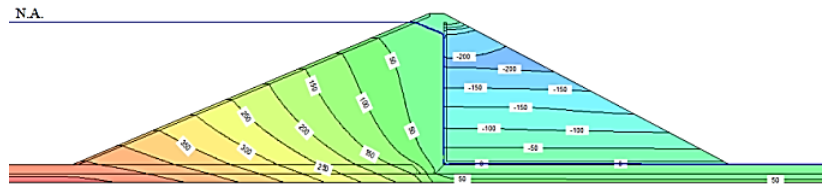
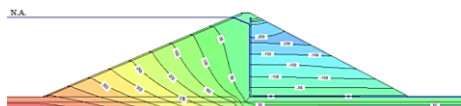
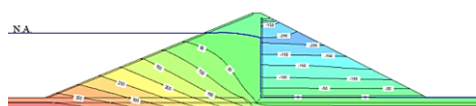
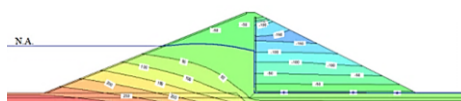
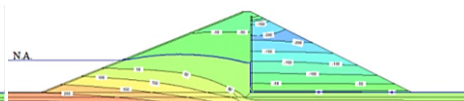
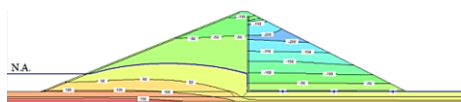
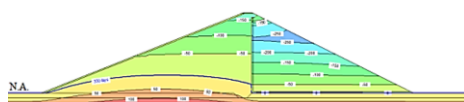


Figura 6. Condición de flujo establecido (día 0).

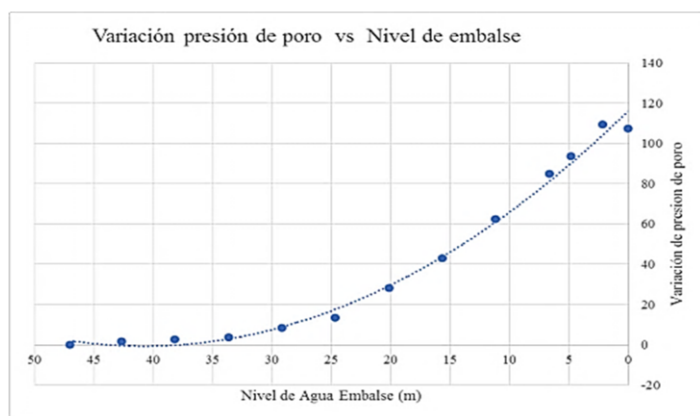
La Figura 6 muestra la distribución de presión negativa de presión de poros para el talud aguas abajo que se distribuyen de una forma lineal. Destacar que esta representación de valores no será real, sin embargo la alternativa fue adoptada debido a las dificultades de determinar una distribución de presión de poros real en campo por tratarse de una sección hipotética comúnmente utilizada, según recomendaciones presentadas por [11].

4.2.2. Simulaciones Transitorias Durante el Vaciado del Reservatorio

Para las simulaciones transitorias bi-dimensionales se consideró un descenso del nivel de agua del embalse a una velocidad de 15 cm/día como indica [12], apreciando que el avance de la línea freática no fue simultaneo al descenso de nivel de agua, los análisis fueron realizados para un periodo de tiempo de 330 días, siendo de esta forma verificadas las alteraciones de la presión de poros día a día evaluando los impactos del fenómeno de descenso rápido en la succión presente en el cuerpo de la presa de tierra. En las figuras siguientes son presentados los resultados de los análisis de flujo transitorio para distintos periodos analizados de la presa de sección hipotética estudiada.

**Figura 7.** Descenso de nivel de agua (día 1).**Figura 8.** Descenso de nivel de agua (día 60).**Figura 9.** Descenso de nivel de agua (día 120).**Figura 10.** Descenso de nivel de agua (día 180).**Figura 11.** Descenso de nivel de agua (día 240).**Figura 12.** Descenso de nivel de agua (día 330).

En las simulaciones realizadas se observó que el descenso de nivel de agua del embalse no es simultáneo al descenso de la línea freática, se observa cierto retraso de avance de la línea freática en relación al nivel de agua del embalse, debido a la baja permeabilidad del cuerpo de talud de la presa, en la Figura 13 se toma como referencia un punto medio del talud aguas arriba donde se observa esta variación de la presión de poro que se va generando a medida que el descenso de la línea freática va retrasándose con respecto al nivel del embalse, se percibió que para niveles altos de agua en el embalse es poca la variación de presión de poros y con el pasar de los días a medida que el nivel del embalse se reduce hasta su nivel mínimo y con el nivel de la línea freática retrasado en su nivel máximo, se obtuvieron considerables variaciones de presión de poros generados, para luego estos irse disipando de manera que en el interior del talud entre en equilibrio evidenciándose esto de manera que la variación de presión de poros ira reduciendo a medida que la línea freática vaya descendiendo.

**Figura 13.** Variación presión de poro vs Nivel del embalse.

Al no poderse disipar con libertad la presión de poros en el interior de la masa de suelo, en ciertas ocasiones ocurrirá la inestabilidad en el cuerpo de talud, que dependerá

en gran parte las propiedades geo mecánicas del material que la conforma, la velocidad con la que se dé el descenso de nivel de agua en el embalse y la disipación de presión de poros del interior de talud, se observó también que por encima de la línea freática la presencia de succión a consecuencia de las presiones intersticiales negativas de alguna forma tiende a incrementar la resistencia en el sector de talud aguas arriba.

Por el lado del talud aguas abajo los valores de succión no sufren muchas variaciones debido a la presencia del drenaje vertical en el núcleo de la presa de tierra donde este elemento limita el movimiento de la línea freática solamente para el talud aguas arriba donde se encuentra el nivel de agua actuante, de este modo en esta sección aguas abajo se tendrá leves variaciones en la distribución de presión de poros negativas.

4.3. Análisis de Estabilidad de Taludes – Plataforma SLOPE/W 2007

El método utilizado para el análisis de estabilidad de taludes fue el método de Morgenstern-Price, que es un método consagrado en el medio técnico. El método seleccionado con excelente precisión, donde el cálculo está basado en el equilibrio límite de superficies de ruptura con equilibrio de momentos y de fuerzas [13] y [14].

4.3.1. Análisis de Estabilidad de Taludes Durante el Vaciado del Reservatorio

Los siguientes análisis de estabildades fueron realizados a partir de los resultados de los análisis transitorios de vaciado del embalse para los 330 días de análisis propuesto. Los análisis durante el vaciado del embalse fueron realizados en el talud aguas arriba, por ser el talud de mayor probabilidad de deslizamiento cuando ocurre el fenómeno de descenso rápido de nivel de agua. Los resultados a ser presentados en este ítem consideran en el modelo de cálculo de estabilidad la influencia de la succión en las resistencias de los materiales.

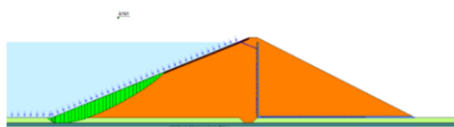


Figura 14. Análisis de Estabilidad - vaciado (día 1).

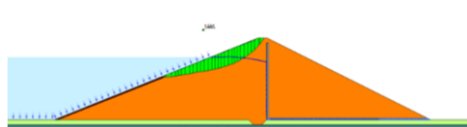


Figura 15. Análisis de Estabilidad - vaciado (día 60).

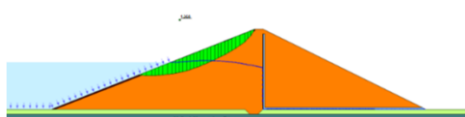


Figura 16. Análisis de Estabilidad - vaciado (día 120).

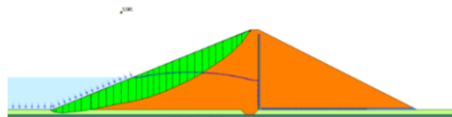


Figura 17. Análisis de Estabilidad - vaciado (día 180).

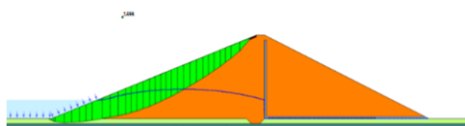


Figura 18. Análisis de Estabilidad - vaciado (día 240).

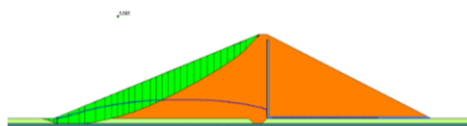


Figura 19. Análisis de Estabilidad - vaciado (día 330).

Las simulaciones de estabilidad de taludes mostraron que en relación a los resultados presentados en las figuras anteriores, acontece una reducción del factor de seguridad a medida que transcurre los días hasta atender un valor de factor de seguridad mínimo en el cuerpo de talud de la presa, seguidamente empezó a cambiar esta situación y se tuvo un incremento en el valor de factor de seguridad hasta llegar al final de las etapas analizadas, como se observa en la Figura 20.

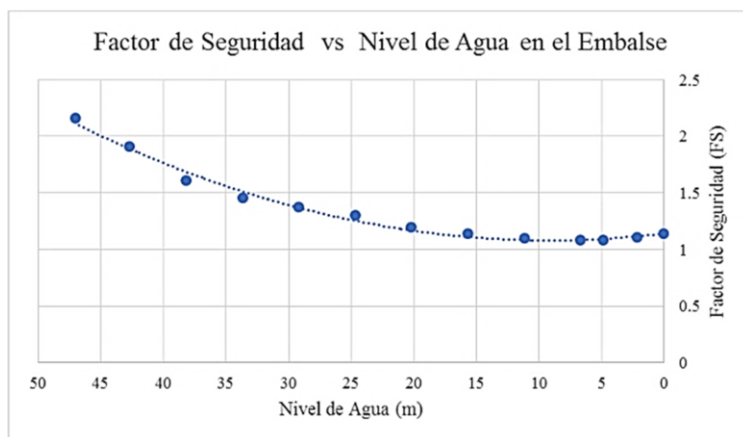


Figura 20. Variación Factor de Seguridad vs Nivel de agua en el embalse.

La reducción del factor de seguridad se debe al hecho que disminuye la presión estabilizadora que ejercía el agua sobre el talud aguas arriba, en consecuencia la presión de poro al no poderse disipar a la misma velocidad que desciende el nivel de agua del embalse hace que los esfuerzos efectivos no crezcan con la misma rapidez, de tal manera que las fuerzas desestabilizadoras se incrementan con mayor velocidad que las fuerzas estabilizadoras hasta un cierto nivel donde ocurrirá lo contrario, donde el factor de seguridad ira incrementándose debido a que de a poco se fueron disipando las presiones intersticiales y por la influencia de la succión presente en el talud aguas arriba, pues el suelo más superficial está sometido a niveles de succión más elevados que tiende a aumentar la resistencia a medida que se da la disipación de la presión de poros en el cuerpo de la presa de tierra.

5. Conclusiones y Recomendaciones

En las simulaciones de flujo realizadas durante el periodo de vaciado de la presa Hipotética, fue posible determinar el avance de la región de saturación, bien como el desenvolvimiento de las presiones de poros a lo largo del periodo simulado. Los análisis de estabilidad referente al periodo de vaciado mostraron que ocurre la disminución del factor de seguridad a medida que se incrementa los días analizados conforme al vaciado del embalse, en esta situación presenta cambios significativos a medida que ocurren las alteraciones de las presiones de poros provocadas por el régimen transitorio del flujo.

La influencia de la succión presente en el cuerpo de la presa de tierra proporciona el aumento de la resistencia del suelo constatando la importancia del empleo de los conceptos de la mecánica de suelos no saturados en los estudios de estabilidad de taludes

de presas de tierra, pues los resultados más precisos y menos conservadores de la metodología pueden servir de base para definir proyectos más económicos.

Los taludes de diseño dependerán de las propiedades geomecánicas de los materiales empleados (resistencia al corte y permeabilidad en condiciones saturadas y no saturadas) y de la velocidad del descenso del embalse en el talud aguas arriba que será un fenómeno a considerar debido a la inestabilidad que se pueda ocasionar en el interior de la presa durante esta situación

Referencias

- [1] STEPHENS, T. *Manual sobre pequenas barragens de terra* - Guia para a localização, projecto e construção. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, (2011).
- [2] CRUZ, P.T. *100 Barragens Brasileiras*: Casos históricos, Materiais de Construção e Projeto, São Paulo: Oficina de Textos, (1996), 648p.
- [3] SHERARD, J.L., "Influence of Soil Properties and Construction Methods on the Performance of Homogeneous Earth Dams," Technical Memorandum 645, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, (1953).
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Estabilidade de encostas* - ABNT. NBR 11682, (2009).
- [5] U.S. ARMY CORPS OF ENGINEER. *Engineering and design Slope Stability*. Publication. U.S. Government Printing. Washington, DC, (2013).
- [6] LLANQUE AYALA, G.R. *Verificação da estabilidade do talude de montante em barragem de terra submetida a rebaixamento rápido realizada com ensaios em solos não saturados e modelagem numérica*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza (2018).
- [7] MARINHO, F. A. M.. Medição de Sucção com o Método do Papel Filtro. *X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*, 2, p. 515-522, (1994).
- [8] FREDLUND, D. G.; XING, A., Equations for the Soil-Water Characteristic Curve, *Canadian Geotechnical Journal*, 521-532, (1994).
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável* - NBR 14545/2000, (2000).
- [10] LU, N., & LIKOS, W. J. *Unsaturated Soil Mechanics*. Ed. John Wiley & Sons, USA. (2004).
- [11] KRAHN JOHN, "Stability modelling with SLOPE/W - An Engineering Methodology". GEO-SLOPE/W International Ltd., Alberta, Canada, (2004).
- [12] BUREAU OF RECLAMATION, *Design of Small Dams*, A Water Resources Technical Publication. U.S. Government Printing. Washington, DC, (2002).
- [13] GEOSTUDIO INTERNATIONAL. *Seepage Modeling with SEEP/W 2007*. Calgary, Alberta, Canadá, (2007) a.
- [14] GEOSTUDIO INTERNATIONAL. *Seepage Modeling with SLOPE/W 2007*. Calgary, Alberta, Canadá, (2007) b.