**XII SIMPOSIO INTERNACIONAL DE ESTRUCTURAS Y GEOTECNIA**

**Análisis de estabilidad de taludes en presas de tierra incorporando la mecánica de suelos parcialmente saturados**

***Slope stability analysis incorporating unsaturated soil mechanics***

Ing. Lismary Cordero Mejias1, Ing. Claudia María Rodríguez Rodríguez 2,

Dr. Cs. Gilberto Julio Quevedo Sotolongo 3.

1. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, lismary@emproyvc.co.cu
2. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, claudiamrr@uclv.cu
3. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, quevedo@uclv.edu.cu

En la actualidad, el análisis de estabilidad de taludes en presas de tierra se realiza solamente en el plano de la mecánica de suelos saturados, aunque es conocida la existencia de zonas parcialmente saturadas que aportan resistencia durante los diferentes estados de carga de estas estructuras. El presente artículo incorpora a dicho análisis la mecánica de suelos parcialmente saturados durante la etapa de final de construcción al emplear diferentes métodos de obtención del estado resistente del suelo: la curva característica del suelo Laguna de Oxidación de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas y, por otro lado, sus parámetros de resistencia obtenidos mediante el ensayo de Corte Directo y corregidos a través de los ajustes de Fredlund y Vanapalli. La geometría de la presa está definida a partir de los criterios de dimensionamiento para las condiciones de Cuba y acorde a las obras de este tipo existentes en el país. Para la modelación se emplea el software GeoStudio 2012, específicamente los componentes SIGMA/W para la calibración del modelo bidimensional y SLOPE/W para efectuar el análisis de estabilidad. De esta manera, se establece una comparación entre los métodos empleados yes obtenido el incremento que se produce en el factor de seguridad del talud aguas abajo mediante el empleo del método de equilibrio límite Fellenius, siendo posible también evaluar su significación ingenieril para los grados de saturación 100%, 98%, 90% y 80%.

**Palabras claves:** Factor de seguridad, Grado de saturación, Presas de tierra.

**Abstract:**

At present, the slope stability analysis in earth dams is performed only in thesaturated soils mechanics field, although it is known the existence of unsaturated zones that provide resistance during the different load states of these structures. The present article incorporates to this analysis the unsaturated soil mechanics during the end of construction stage by using different methods to obtain the strength state of the soil: the water content function of the Oxidation Lagoon of the Central University “Marta Abreu” of Las Villas and, on the other hand, its resistance parameters obtained by the Direct Cut test and corrected through the Fredlund and Vanapalli adjustment methods. The geometry of the dam is defined based on the sizing criteria for the Cuban conditions and according to the works of this type existing in the country. For the modeling, is used the software GeoStudio 2012, specifically the SIGMA/W component for the two-dimensional model calibration and the SLOPE/W component for the stability analysis. In this way, a comparison is established among the used methods. The increase that occurs in the safety factor of the downstream slope is obtained by using the Fellenius limit equilibrium method, and its engineering significance is evaluated for the saturation degrees 100%, 98%, 90% and 80%.

**Keywords:** Safety factor, Saturation degree, Earth dams

1. **Introducción**

La aparición el pasado siglo de la mecánica de suelos en el escenario científico universal amplió considerablemente las posibilidades del diseño geotécnico. Las nuevas teorías para explicar el comportamiento mecánico del suelo hicieron posible el surgimiento de métodos de diseño mucho más racionales para estructuras como terraplenes, cimentaciones y presas de tierra, construidas hasta el momento a partir de la experiencia acumulada. La mayoría de las formulaciones hechas entonces consideraban al suelo en estado saturado, situación extrema que ignoraba la coexistencia con una tercera fase: el aire; sin embargo, la idea de que en los poros del suelo puede existir agua y aire a la vez es tan antigua como el propio surgimiento de la mecánica de suelos, de hecho, Terzaghi (1943) en su libro Mecánica Teórica de Suelos, dedica varios capítulos al tema.

El elemento que distingue a un suelo parcialmente saturado de uno en estado de saturación total es la succión, propiedad que puede ser representada a través de la curva característica del suelo, la cual no es más que la relación gráfica establecida entre la succión y el contenido de humedad. Muchos métodos de obtención de la succión y estimación de la curva característica han sido desarrollados a lo largo del tiempo debido a la estrecha relación que existe entre esta propiedad y otras tan importantes como la conductividad hidráulica, la resistencia al corte y, de manera general, la estabilidad de aquellas obras ingenieriles que utilicen al suelo como principal material de construcción.

Unas de las principales aplicaciones de la mecánica de suelos parcialmente saturados es el análisis de estabilidad de taludes en presas de tierra. Durante la etapa de final de construcción, en el suelo de la cortina de la presa existe una presión de poros debido a la consolidación y, al no producirse filtraciones ni generarse una red de flujo, se considera que este no se encuentra drenado, lo cual permite entonces afirmar que, durante esta etapa, la cortina se encuentra parcialmente saturada en su totalidad. A pesar de esto, el análisis de estabilidad durante la etapa de final de construcción es desarrollado en la actualidad considerando que la cortina de la presa se encuentra saturada. Esta simplificación del estado real del suelo excluye el incremento de la resistencia al corte que se produce debido al aumento de las tensiones efectivas, el cual es a su vez provocado por la presencia de presión de poros negativa en la región parcialmente saturada. En nuestro país existen muy pocas investigaciones previas que hayan evaluado a fondo el aporte de las zonas parcialmente saturadas al estado resistente del suelo, así como el nivel de significación de este incremento por lo que es necesario estudiar cómo varía el análisis de estabilidad de taludes en presas de tierra al incorporar la mecánica de suelos parcialmente saturados.

1. **Metodología**

Con el avance de la tecnología, las propiedades de los suelos parcialmente saturados han sido incluidas en el diseño y revisión de obras geotécnicas. Un ejemplo de ello lo constituye el software GeoStudio 2012, el cual es una suite de programas geotécnicos donde se encuentra SLOPE/W, componente que permite realizar el análisis de estabilidad de taludes, y que se puede aplicar a diversas geometrías y características de los materiales **(**[**López Pineda, 2012**](#_ENREF_4)). Con la ayuda de esta herramienta, será posible analizar la influencia que ejerce en el comportamiento del factor de seguridad el método empleado para la obtención del estado resistente del suelo. Para ello se modelan tres situaciones principales. En la primera se introduce en SLOPE/W el punto de la curva característica del suelo correspondiente al grado de saturación analizado para obtener el factor de seguridad correspondiente, empleando siempre los valores de cohesión, ángulo de fricción interna y peso propio saturados obtenidos del ensayo de Corte Directo. Para el segundo y tercer caso no se introduce en el programa la curva característica, sino que se especifican los valores de C, 𝛷 y Ɣ ajustados para cada grado de saturación por los métodos de Fredlund y Vanapalli respectivamente. Los grados de saturación empleados son 100%, 98%, 90% y 80%. Para todos los modelos se considerará la cimentación de la presa como un lecho de roca.

SLOPE/W recomienda el uso de la curva característica del suelo para modelar el incremento de la resistencia a cortante que se produce en el mismo debido a la succión. Para ello, implementa la expresión de Vanapalli et. al. (1996) que se muestra a continuación:

$s=c´+\left(σ\_{\begin{array}{c}n\\ \end{array}}-U\_{\begin{array}{c}a\\ \end{array}}\right)tanɸ´+\left(U\_{\begin{array}{c}a\\ \end{array}}-U\_{\begin{array}{c}w\\ \end{array}}\right)\left[\left(\frac{θ\_{\begin{array}{c}w\\ \end{array}}-θ\_{r}}{θ\_{\begin{array}{c}s\\ \end{array}}-θ\_{r}}\right)tanɸ´\right]$ **1**

En la Expresión 1, $θ\_{\begin{array}{c}s\\ \end{array}}$ es el contenido volumétrico saturado de agua y $θ\_{r}$ el contenido volumétrico residual de agua.

Por otro lado, Fredlund y Vanapalli también proponen expresiones analíticas mediante las cuales es posible obtener los parámetros de resistencia del suelo parcialmente saturado a partir de los obtenidos para el suelo saturado.

* Método de Ajuste de Fredlund

$C\_{unsat}=C\_{sat}+\left(U\_{\begin{array}{c}a\\ \end{array}}-U\_{\begin{array}{c}w\\ \end{array}}\right)tanɸ^{b}$ **(1)**

$ɸ\_{unsat}=ɸ\_{sat}$ **(2)**

Donde (ua-uw) es la succión matricial y 𝛷𝑏 es el ángulo definido por la rotación de incremento del esfuerzo normal respecto a la succión experimentada por el suelo, que indica la tasa de aumento de la resistencia al corte relativo a la succión matricial, cumpliéndose siempre que 𝛷𝑏 < 𝛷𝑢𝑛𝑠𝑎𝑡 (García Tristá, 2015)

Siendo entonces

𝛷𝑏 = arctan (𝑆𝑟 tan𝛷𝑠𝑎𝑡) **(3)**

Donde Sr es el grado de saturación y 𝛷𝑠𝑎𝑡 es el ángulo de fricción interna.

* Método de Ajuste de Vanapalli

C𝑢𝑛𝑠𝑎𝑡 = C𝑠𝑎𝑡 + (𝑢𝑎 − 𝑢𝑤)𝑏 ∗ (tan𝛷𝑠𝑎𝑡 − 𝑆𝑟𝛹 tan𝛷𝑠𝑎𝑡) + (𝑢𝑎 − 𝑢𝑤)𝐴𝑉𝑅𝑆𝑟𝛹 tan𝛷𝑠𝑎𝑡 (**4**)

𝛷𝑢𝑛𝑠𝑎𝑡 = 𝛷𝑠𝑎𝑡 + 𝛹𝑑 (**5**)

Donde Ψ es el factor de ajuste del modelo y depende del índice de plasticidad del suelo (IP), (𝑢𝑎 − 𝑢𝑤)𝑏 es el valor de entrada de aire de la curva característica del suelo y (𝑢𝑎 − 𝑢𝑤)𝐴𝑉𝑅 es el valor de la succión del intervalo a analizar.

El suelo de la cortina de la presa fue extraído de la laguna de oxidación que se encuentra en la facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, geográficamente situada en las coordenadas 613 200 E – 291 850 N de la hoja carta número 4283-III, (Santa Clara, Villa Clara), escala 1:10 000 ICGC. 1980. Para su caracterización se realizaron los ensayos correspondientes a granulometría, plasticidad, peso específico, compactación, succión por el método del papel de filtro, consolidación saturada y Corte Directo, cuyos resultados se muestran a continuación.

**Granulometría, límite de consistencia y peso específico**

La determinación de la granulometría del suelo se realizó bajo las especificaciones de la norma cubana **(**[**NC-20, 1999**](#_ENREF_6)**)** correspondiente a: “Geotecnia. Determinación de la granulometría de los suelos”. A continuación, en la Figura 1 se reflejan los resultados granulométricos de las muestras del suelo analizado.

**Figura 1.** Curva granulométrica promedio de las muestras del suelo.

La determinación de la plasticidad del suelo se realizó bajo las exigencias de la norma cubana **(**[**NC-58, 2000**](#_ENREF_8)**)** correspondiente a: “Geotecnia. Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos”; mientras que, para obtener el peso específico relativo a los sólidos, se tuvieron en cuenta las especificaciones de la norma cubana **(**[**NC-19, 1999**](#_ENREF_5)**)** correspondiente a: “Geotecnia. Determinación del peso específico de los suelos”. La clasificación del suelo se realizó a partir de los resultados obtenidos de granulometría y límites de consistencia, bajo las orientaciones de la norma cubana **(**[**NC-59, 2000**](#_ENREF_9)**)** correspondiente a “Geotecnia. Clasificación geotécnica de los suelos”. A continuación, en la Tabla 1 se ofrece una relación de los resultados obtenidos mediante los ensayos mencionados anteriormente.

**Tabla 1.** Límites de consistencia, peso específico y clasificación de las muestras de suelo analizadas.

|  |
| --- |
| Parámetros |
| Límite Líquido | Límite Plástico | Índice de Plasticidad | Peso específico relativo(Gs) | Método de Clasificación |
| SUCS | AASHTO |
| 93 | 29 | 64 | 2,6 | CH (Arcilla Alta Compresibilidad) | A-7-6 (82) |

**Ensayo de compactación**

El ensayo se efectuó bajo las exigencias de la norma cubana **(**[**NC-54-141, 1978**](#_ENREF_7)**)** correspondiente a: “Geotecnia. Proctor Estándar y Proctor Modificado”. Los resultados se presentan a continuación en la Figura 2.

ωóptima =23,5%

Ɣdmáx = 12,5 kN/m3

**Figura 2.** Curva de ($γ\_{d} vs ω)$ promedio, para la energía Proctor Estándar de las muestras del suelo estudiado

**Empleo de la técnica del papel de filtro para la determinación de la curva característica del suelo**

Se empleó la técnica del papel de filtro para la determinación de la curva de retención de agua del suelo pues es factible su aplicación en las condiciones cubanas. En este método se determina el potencial del agua en el suelo por medio del potencial del agua retenida en un medio poroso llamado papel de filtro. Se determina la succión matricial al ser esta una de las variables independientes del estado tensional de los suelos parcialmentes saturados debido a su relación directa con la presión negativa de agua en los poros de acuerdo a lo planteado por **(**[**Fredlund, 2005**](#_ENREF_3)**)** . Para obtener la succión se tomó como base la norma **(**[**ASTM-D5298, 2010**](#_ENREF_2)**)** correspondiente a: “Determinación de la succión en los suelos” empleando en el ensayo el papel de filtro Whatman 42. Después de conformadas las muestras, la mitad fueron saturadas por capilaridad por un período mínimo de 24h y, una vez que estas no presentaron variación de masa, se inició la trayectoria de secado para obtener la curva de retención de agua. Con la otra mitad de las muestras se hizo la trayectoria de humedecimiento que fue preparada aplicando directamente agua con la ayuda de un gotero después de la saturación y secado. Durante los procesos de secado y humedecimiento las muestras de suelo se mantuvieron dentro de los anillos **(**[**Tristá, 2015**](#_ENREF_11)**)**. De esta manera fueron obtenidas las ramas de secado y humedecimiento para la curva característica del suelo estudiado como se observa en la Figura 3.

**Figura 3.** Curvas de retención de agua del suelo para la succión matricial.

**Ensayo de corte directo**

Este ensayo se realiza con el objetivo de determinar los parámetros de resistencia del suelo (c y φ), teniendo en cuenta la norma **(**[**NC-325, 2004**](#_ENREF_10)**)** correspondiente a: “Geotecnia. Determinación de la resistencia al esfuerzo cortante directo (aparato de caja de corte pequeño)”. Para la realización de este ensayo se elaboraron muestras compactadas con la energía del Proctor Estándar. A cada una de las muestras se le aplicó una carga vertical de 50, 100, 200 y 400 kPa. A partir de los esfuerzos máximos de las muestras de suelo ensayadas fueron determinados los parámetros de resistencia mostrados en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Parámetros de resistencia del suelo saturado.

|  |
| --- |
| Parámetros |
| Cohesión, C = 58,84 kPa | Ángulo de fricción interna, ϕ =15,04 º |

A partir de los parámetros para el suelo saturado y empleando las expresiones 1, 2, 3, 4 y 5, se obtienen las propiedades físico-mecánicas del suelo parcialmente saturado para cada grado de saturación como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1**. Resumen de las propiedades del suelo de la cortina.

|  |  |
| --- | --- |
| **Método Ajuste de Fredlund** | **Método de Ajuste de Vanapalli** |
| **Sr (%)** | **C (kPa)** | **𝛷 (°)** | **Ɣ (kN/m3)** | **Sr (%)** | **C (kPa)** | **𝛷 (°)** | **Ɣ (kN/m3)** |
| **100** | 58,84 | 15,01 | 15,43 | **100** | 58,84 | 15,01 | 15,43 |
| **98** | 70,71 | 16,25 | 17,32 | **98** | 72,69 | 16,25 | 17,3175 |
| **90** | 86,63 | 16,25 | 16,94 | **90** | 92,82 | 16,25 | 16,94 |
| **80** | 101,98 | 16,25 | 16,412 | **80** | 113,42 | 16,25 | 16,412 |

**Calibración del modelo**

Para la definición de la geometría del modelo fueron tomadas como referencia 15 presas existentes en la región central del país, además de los criterios de predimensionamiento correspondientes a **(**[**Armas Novoa and Horta Mestas, 1987**](#_ENREF_1)**)** obteniendo la geometría de la cortina de la presa mostrada en la Figura 5. Por otro lado, para establecer las dimensiones de la cimentación es necesario realizar la calibración del modelo en SIGMA/W partiendo de un análisis de tensiones iniciales. Se calibrará primeramente la densidad de la malla para obtener así la discretización del modelo que brinde los resultados más precisos con el menor costo computacional posible, calibrándose posteriormente la profundidad y el ancho.



**Figura 6.** Dimensiones de la cortina de la presa

**0,5 x 0,5 m**

**Figura 6.** Esfuerzo vertical vs Densidad de malla

**0,5 x 0,5 m**

**Figura 7.** Asentamiento vertical vs Densidad de malla

**Figura 7.** Asentamiento vertical vs Densidad de malla

**35m**

**Figura 8.** Esfuerzo vertical vs Profundidad de la cimentación

**35m**

**Figura 9.** Asentamiento vertical vs Profundidad de la cimentación

**221mm**

**Figura 10.** Esfuerzo vertical vs Ancho de la cimentación

**221mm**

**Figura 11.** Asentamiento vertical vs Ancho de la cimentación

**3. Resultados y discusión**

Los valores del factor de seguridad que a continuación se muestran corresponden al método de equilibrio límite de Fellenius, el cual se emplea debido a que ofrece resultados confiables en la etapa de final de construcción y también es recomendado para la inclinación del talud aguas abajo del modelo. En los resultados obtenidos se aprecia cómo aumenta el factor de seguridad a medida que disminuye el grado de saturación del suelo así como el incremento porcentual que este experimenta entre grados de saturación consecutivos, o sea: de 100% a 90% y de 90% a 80% .

19,21%

**Figura 13.** Variación del factor de seguridad con el grado de saturación

Como se aprecia en la figura 13, existe una variación significativa del factor de seguridad con la disminución del grado de saturación durante la etapa de final de construcción al emplear en la modelación los parámetros del suelo ajustados. El incremento promedio en el factor de seguridad obtenido por el método de ajuste de Fredlund es de un 18,3% por cada disminución del 10% en el grado de saturación del suelo de la cortina; mientras que, para el ajuste de Vanapalli, el incremento promedio registrado fue de un 18,7%. Por otro lado, al efectuar la modelación introduciendo punto a punto la curva característica sin variar los parámetros de resistencia del suelo se obtuvo un incremento promedio de 6,8%, aunque para valores del grado de saturación menores de 90% el aumento del factor de seguridad no es significativo, por lo que existe una marcada diferencia en cuanto a su comportamiento con respecto a los casos anteriores.

**Figura 14.** Comparación entre los métodos empleados para la modelación.

Con respecto a las diferencias existentes entre los métodos de ajuste, tanto los valores de los factores de seguridad como las diferencias obtenidas entre ellos, son mayores cuando se utiliza el método de ajuste de Vanapalli. Esta diferencia se hace más significativa a medida que disminuye el grado de saturación. En la Figura 14 se pueden apreciar las diferencias que existen entre los valores promedios de los factores de seguridad obtenidos por los ajustes de Fredlund y Vanapalli con respecto a los obtenidos empleando la curva característica. Al igual que ocurre entre los métodos de ajuste, esta diferencia aumenta con la disminución del grado de saturación, alcanzando un valor de 25.56% para el 80%.

1. **Conclusiones**

La propiedad que distingue a los suelos parcialmente saturados es la succión, la cual puede ser representada a través de la curva característica del suelo. Su empleo en la modelación, así como la corrección del peso específico y los parámetros de resistencia del suelo por los métodos de ajuste de Fredlund y Vanapalli, posibilitan una mejor caracterización de los mismos en el estado de saturación parcial, siendo una de sus principales aplicaciones el análisis de estabilidad de taludes en presas de tierra.

Para la geometría analizada, la mecánica de suelos parciamente saturados puede ser incorporada al análisis de estabilidad de taludes en presas de tierra durante la etapa de final de construcción, obteniéndose incrementos en el factor de seguridad que dependen en gran medida del método empleado para la caracterización de la resistencia no saturada del suelo, y que son más significativos al efectuar la modelación con los parámetros de resistencia ajustados.

**5. Referencias bibliográficas**

ARMAS NOVOA, R. & HORTA MESTAS, E. 1987. *Presas de tierra*.

ASTM-D5298 2010. Determinación de la Succión en los suelos.

FREDLUND, D. G. 2005. Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. *Journal of Geotehcnical and Geoenvironmental Engineering,* 321**,** 36.

LÓPEZ PINEDA, G. 2012. Introducción al uso del programa SLOPE/W versión 2012-Student.

NC-19 1999. Determinación del peso específico de los suelos. . *Geotecnia. .* Cuba: Oficina Nacional de Normalización.

NC-20 1999. Determinación de la granulometría de los suelos. *Geotecnia.* Cuba: Oficina Nacional de Normalización.

NC-54-141 1978. Proctor Estándar y Proctor Modificado. *Geotecnia.* Cuba: Oficina Nacional de Normalización.

NC-58 2000. Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. *Geotecnia.* Cuba: Oficina Nacional de Normalización.

NC-59 2000. Clasificación Geotécnica de los suelos. . *Geotecnia.* Cuba: Oficina Nacional de Normalización.

NC-325 2004. Determinación de la resistencia al esfuerzo cortante directo (aparato de caja de corte pequeño). Cuba: Oficina Nacional de Normalización.

TRISTÁ, J. G. 2015. *Estudio del comportamiento tenso-deformacional de suelos parcialmente saturados en Cuba.* Doctor, Marta Abreu de las Villas.