**DUODÉCIMO COLOQUIO DE GEOTECNIA Y CIMENTACIONES**

**Influencia entre la compactación y la succión en presas de tierra con suelos tipo CH**

***Influence between compaction and suction in earth dams with CH type soils***

**Ing. Isaida Flores Berenguer1, Dra. Ing. Jenny García Tristá2, Dr. Ing. Yoermes González Haramboure3**

1-Isaida Flores Berenguer, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba. E-mail: [isaidafb@civil.cujae.edu.cu](mailto:isaidafb@civil.cujae.edu.cu)

2- Jenny García Tristá, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba. E-mail: [jenny@civil.cujae.edu.cu](mailto:jenny@civil.cujae.edu.cu)

3- Yoermes González Haramboure, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba. E-mail: [yoermes@civil.cujae.edu.cu](mailto:yoermes@civil.cujae.edu.cu)

**Resumen:**

Actualmente, la construcción de presas de tierra, ha puesto a la estabilidad de taludes en un plano de importancia ingenieril de primer orden, tanto por el aspecto económico como por las consecuencias indeseables debidas a sus fallos. Los objetivos de la investigación consisten en realizar un análisis para definir la dependencia de la curva característica del grado de compactación del suelo y plantear, además, la variación de la pendiente del talud aguas abajo. El caso de estudio es una presa de tierra de 22 metros de altura con prisma de drenaje, considerando los principios de la Mecánica de Suelos parcialmente saturados para los estados de final de construcción y operación de la misma, con tres suelos en la cortina de tipo CH y tres suelos arenosos en la cimentación. El análisis se realiza para la curva característica experimental y para la curva de conductividad hidráulica estimada. Para la ejecución de los modelos se utilizan las herramientas SIGMA/W, SEEP/W y SLOPE/W del programa GeoStudio 2012. Los principales resultados obtenidos muestran que la variación en la estabilidad se incrementa cuando el grado de compactación y la succión correspondiente oscilan entre 80% y 95% del Proctor Estándar, por lo que se concluye que resulta más efectivo emplear curvas características obtenidas para grados de compactación iguales o superiores al 95%. Al incrementar la pendiente del talud aguas abajo considerando las leyes de la Mecánica de Suelos parcialmente saturados, se mantienen las condiciones de estabilidad y seguridad del mismo para el caso de estudio en cuestión.

***Abstract:***

*Currently, the construction of earth dams has placed the stability of slopes in a plane of first-order engineering importance, both for the economic aspect and for the undesirable consequences due to their failures. The objectives of the research are to carry out an analysis to define the dependence of the characteristic curve of the degree of soil compaction and also to consider the variation of the slope slope downstream. The case study is a 22 meter high earth dam with a drainage prism, considering the principles of partially saturated soils mechanics for the final stages of construction and operation of the same, with three floors in the curtain of type CH and three sandy soils in the foundation. The analysis is performed for the experimental characteristic curve and for the estimated hydraulic conductivity curve. The SIGMA / W, SEEP / W and SLOPE / W tools of the GeoStudio 2012 program are used for the execution of the models. The main results obtained show that the variation in stability increases when the degree of compaction and the corresponding suction range from 80% and 95% of the Standard Proctor, for which it is concluded that it is more effective to use characteristic curves obtained for compaction degrees higher than 95%. By increasing the slope of the slope downstream considering the laws of the mechanics of partially saturated soils, the conditions of stability and safety of the same are maintained for the case study in question.*

**Palabras Clave:** Suelos no saturados; Estabilidad de taludes; Relación de vacíos.

***Keywords:*** *Unsaturated soils; Stability of slopes; Void ratio.*

**1. Introducción**

La Mecánica de Suelos inicialmente se desarrolló para estudiar los suelos saturados, condición que resulta extrema ya que se considera que la masa de suelo sólo se encuentra sometida a dos fases: sólida y líquida, y sus limitaciones son evidentes cuando se necesita explicar las deformaciones en suelos parcialmente saturados o de las estructuras que estos soportan.

Teniendo en cuenta su origen, los suelos parcialmente saturados pueden ser naturales o artificiales, dentro de los suelos artificiales se encuentran los suelos compactados, extensamente utilizados en obras de tierra (presas, terraplenes, etc.), que debido a su naturaleza son suelos parcialmente saturados. (García 2015)

Los suelos parcialmente saturados se encuentran sobre el nivel freático y pueden llegar incluso a estar secos en zonas cercanas a la superficie. (Figura 1)

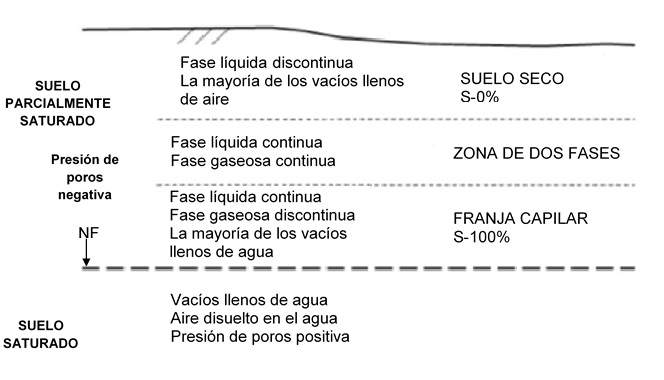
******

Figura 1. Zonas de suelo saturado y parcialmente saturado. (Delwyn G Fredlund 2003)

El suelo en condiciones parcialmente saturadas se encuentra constituido por tres fases: sólida, líquida y gaseosa.

* 1. **Succión en suelos parcialmente saturados**

Un suelo parcialmente saturado tiene la tendencia a recibir agua y aumentar su grado de saturación, si el suelo tiene determinado grado de saturación se requiere cierta fuerza para remover el agua del espacio poroso y disminuir el grado de saturación del suelo, estos efectos se pueden explicar mediante la succión. (García 2015)

La succión en suelos no saturados está compuesta por la succión matricial y la succión osmótica y la suma de ambos componentes se denomina succión total. La curva característica del suelo es una relación entre la cantidad de agua en el suelo y la succión.

La obtención de las succiones puede ser mediante distintos métodos y procedimientos que se dividen en directos e indirectos. El intervalo de medida de las succiones está en relación al tipo de equipo utilizado, así como del contenido de humedad presente, o si son utilizadas muestran inalteradas o remoldeadas durante el ensayo.

El método del papel de filtro es un método indirecto que mide la succión total y matricial a partir de determinar el potencial del agua en el suelo por medio del potencial del agua retenida en un medio poroso llamado papel de filtro. En Cuba, en diversas investigaciones se ha utilizado este método, dado que las características del ensayo permiten su fácil aplicación en laboratorios cubanos.

**1.2 Resistencia al corte de los suelos parcialmente saturados**

La envolvente de falla extendida para los suelos parcialmente saturadas toma la forma matemática siguiente: (D G Fredlund & Rahardjo 1993; García 2015; Alanís Araiza 2012)

(1)

Donde

: Presión del aire

: Esfuerzo neto

: Succión en el suelo

: Cohesión efectiva

: Ángulo de fricción interna efectivo

: Ángulo de succión

Los parámetros de resistencia para los suelos parcialmente saturados se ven afectados por la influencia de la succión y estos se pueden obtener a partir de los parámetros de resistencia del suelos saturado (D G Fredlund & Rahardjo 1993; García 2015).

Como una alternativa para sustituir el uso de , en el SLOPE/ W se implementa la siguiente ecuación propuesta por Vanapalli (1996):

(2)

Dónde:

: Contenido de agua volumétrico.

: Contenido de agua saturado.

: Contenido de agua residual.

La fuerza cortante no saturada de un suelo se puede estimar en función de la curva característica del suelo y de los parámetros de resistencia al corte saturados del mismo.

**1.4 Presas de tierra y estabilidad de taludes**

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. En Cuba la construcción de presas de tierra también ha evolucionado significativamente. Actualmente es posible contar con 241 embalses a lo largo de toda la Isla.

Para establecer el diseño y construcción de una presa, es necesario considerar factores económicos imprescindibles, así como el alcance social y el objetivo de la misma. (Armas Novoa & Horta Mestas 1987) definieron algunos de los parámetros de diseño, que son las bases de la geometría utilizada en esta investigación.

El drenaje se utiliza para evitar que el agua infiltrada transporte el material de la presa, provocando así su destrucción. El tipo de dispositivo de drenaje puede variarse en diferentes áreas de la presa y su construcción debe seleccionarse sobre la base de la comparación técnico-económica de las diferentes variantes. En la presente investigación se plantea un drenaje de tipo prisma, dado que es el más utilizado en Cuba.

(Molina Morejón, Alvarez Rodríguez, & González Haramboure, 2017) contabilizaron los fallos en presas de tierra en Cuba, luego de realizar visitas a las empresas de aprovechamiento hidráulico de todas las provincias del país durante el año 2016, identificando un total de 52 casos. En base a estos estudios, el orden actual de ocurrencia de las causas más comunes de falla en presas de tierra en Cuba, difiriendo ligeramente con respecto al resto del mundo es: el deslizamiento de los taludes, el rebase de la cortina, el sifonamiento, las pérdidas por filtraciones y el agrietamiento.

Un talud es cualquier superficie de suelo que adopte una cierta inclinación con respecto a la horizontal de manera permanente. Los fallos en los taludes están asociados a los movimientos de la masa de suelo que conforman la estructura, pudiendo dar lugar a la pérdida material y de vidas humanas.

Según (Armas Novoa & Horta Mestas 1987) los deslizamientos ocurridos en presas de tierra pueden agruparse en tres categorías de acuerdo al momento de ocurrencia del mismo: deslizamientos durante la construcción, deslizamiento del talud aguas abajo durante la operación y deslizamiento del talud aguas arriba luego de un desembalse rápido. En esta investigación se consideran los estados de final de la construcción y desembalse rápido, dado que se analizará la modificación de la pendiente sólo en el talud aguas abajo de la presa.

Para definir las características físico-mecánicas de los suelos de la investigación se considera lo planteado por (Armas Novoa & Horta Mestas 1987), dado que la presa analizada tiene una altura de cortina de 22 metros, en este caso los parámetros de resistencia efectivos se obtendrán mediante el ensayo lento de corte directo, pudiendo realizarse el ensayo bajo carga controlada o bajo deformación controlada. Estos valores de cohesión y ángulo de fricción interna efectivos se combinarán con las presiones de poros correspondientes en cada caso. Por lo que no resulta necesario la realización de ensayos triaxiales.

Comúnmente se refiere la estabilidad de los taludes en términos de un factor de seguridad (FS), que se puede obtener partiendo de un determinado análisis matemático. El valor del factor de seguridad se obtiene al realizar la comparación del esfuerzo cortante de falla con la resistencia cortante del suelo y debe cumplir siempre como requisito, el ser mayor o igual al valor del factor que se establece por norma o se fija en proyecto.

Según (Sanhueza & Rodríguez 2012) el factor de seguridad, expresa la reducción de la resistencia a cortante del suelo para que se produzca el deslizamiento a lo largo de la superficie de falla, y que representa la determinación cuantitativa del índice de riesgo de que esta ocurra.

**1.5 Obtención del Factor de Seguridad**

Para el análisis de la estabilidad, se plantea la utilización del Método de Elementos Finitos (MEF), el cual resulta una de las herramientas numéricas más utilizadas en la actualidad para resolver problemas de ingeniería, a partir de suponer un dominio discretizado en subdominios de elementos, donde los elementos son definidos en un número discreto de puntos, llamados nodos, que conectan entre sí a los elementos; y sobre estos nodos se materializan las incógnitas principales del problema que se pretende analizar.

El paquete computacional GeoStudio (2012) presenta la posibilidad de calcular el factor de seguridad en presas de tierra a partir de la implementación del MEF, considerando la ecuación 3:

(3)

Dónde:

: Resistencia cortante total disponible.

: Esfuerzo cortante total movilizado a lo largo de la superficie de falla.

La fuerza de resistencia disponible de cada dovela se calcula multiplicando la resistencia al corte del suelo en el centro de la base de la dovela por la longitud de la base. Por lo tanto, a partir de la forma modificada de la ecuación de Mohr-Coulomb para un suelo parcialmente saturado, la fuerza de resistencia disponible es:

(4)

Dónde:

: Fuerza de corte efectiva del suelo en el centro de la base de una dovela.

: Longitud de la base de una dovela.

: Tensión normal en el centro de la base de una dovela.

De manera similar, el esfuerzo cortante total movilizado a lo largo de la superficie de falla de cada dovela se calcula multiplicando la tensión tangencial movilizada () en el centro de la base de la dovela y la longitud de la base:

(5)

Tanto la tensión normal () como la tensión de tangencial movilizada () son valores obtenidos de un análisis en el SIGMA/W. Por lo tanto, las ecuaciones para calcular los factores de estabilidad son lineales; es decir, no se requiere una iteración para establecer los factores de estabilidad como en los métodos de equilibrio límite.

El SLOPE/W plantea dos ecuaciones fundamentales para obtener el factor de seguridad, una ecuación de momento y una ecuación de fuerzas.

(6)

(7)

Dónde:

: El peso total de una dovela de ancho b y altura h.

: La fuerza normal total sobre la base de la dovela.

: Un punto externo de carga.

: La carga sísmica horizontal aplicada a través del centroide de cada corte.

: El radio para una superficie de deslizamiento circular o el brazo de momento asociado con la fuerza de corte movilizada para cualquier forma de superficie de deslizamiento.

: La desviación perpendicular de la fuerza normal desde el centro de rotación o desde el centro de los momentos.

: La distancia horizontal desde la línea central de cada corte hasta el centro de rotación o el centro de los momentos.

: La distancia vertical desde el centroide de cada dovela hasta el centro de rotación o el centro de los momentos.

: La distancia perpendicular desde una carga puntual al centro de rotación o al centro de los momentos.

: La distancia perpendicular desde la fuerza de agua externa resultante hasta el centro de rotación o el centro de momentos.

: Las fuerzas de agua externas resultantes.

: El ángulo de la carga puntual desde la horizontal.

: El ángulo entre la tangente al centro de la base de cada dovela y la horizontal.

Se obtiene la fuerza normal total sobre la base de una dovela () como sigue:

(8)

Dónde:

: Factor de seguridad.

: Las fuerzas verticales de corte transversal. Los subíndices L y R definen los lados izquierdo y derecho respectivamente.

La ecuación anterior se puede utilizar para suelos tanto saturados como no saturados. Para la mayoría de los análisis, la presión de aire en los poros () se puede considerar cero.

El objetivo fundamental de esta investigación es analizar el comportamiento del factor de seguridad en el talud aguas abajo inicial y modificado, para una presa de 22 metros de altura, homogénea, conformada por tres suelos con clasificación CH y de los cuales se tienen dos curvas características correspondientes a dos grados de compactación. Se plantean tres posibles cimentaciones, todas de tipo arena arcillosa y se analizarán los estados de final de la construcción y operación de la presa. Se analizará la dependencia del factor de seguridad del talud aguas abajo del grado de compactación y la succión del suelo. Igualmente, se espera que con la modificación de la pendiente del talud aguas abajo, al introducir las leyes de la Mecánica de Suelos Parcialmente Saturados, la presa objeto de estudio mantenga las condiciones de seguridad y estabilidad para todos los estados analizados.

**2. Metodología**

Para la elaboración de los modelos, se deben tener en cuenta las consideraciones de diseño para las presas de tierra en Cuba. A partir de estudios realizados por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), de las secciones transversales típicas proyectadas en todas las presas del país, se presenta el modelo inicial de una presa de tierra de 22 metros de altura, homogénea, sin berma y con prisma de drenaje, con características geométricas correspondientes a lo propuesto por {FormattingCitation}(Armas Novoa & Horta Mestas 1987), como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Características geométricas del modelo. (Fuente: Elaboración propia)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Altura del modelo | Pendiente aguas arriba | Pendiente aguas abajo | Ancho de corona |
| 22m | 1:2.5 | 1:2 | 5m |
| 1:1.5 |

En el caso del prisma de drenaje, éste mantiene las mismas pendientes en los taludes que el modelo geométrico para cada caso y con una altura de tres metros, pues según (Armas Novoa & Horta Mestas 1987) la altura del prisma en la práctica oscila entre un 5% y un 20% de la altura de la cortina de la presa. Los modelos geométricos inicial y final se muestra en la figura 2 y 3.

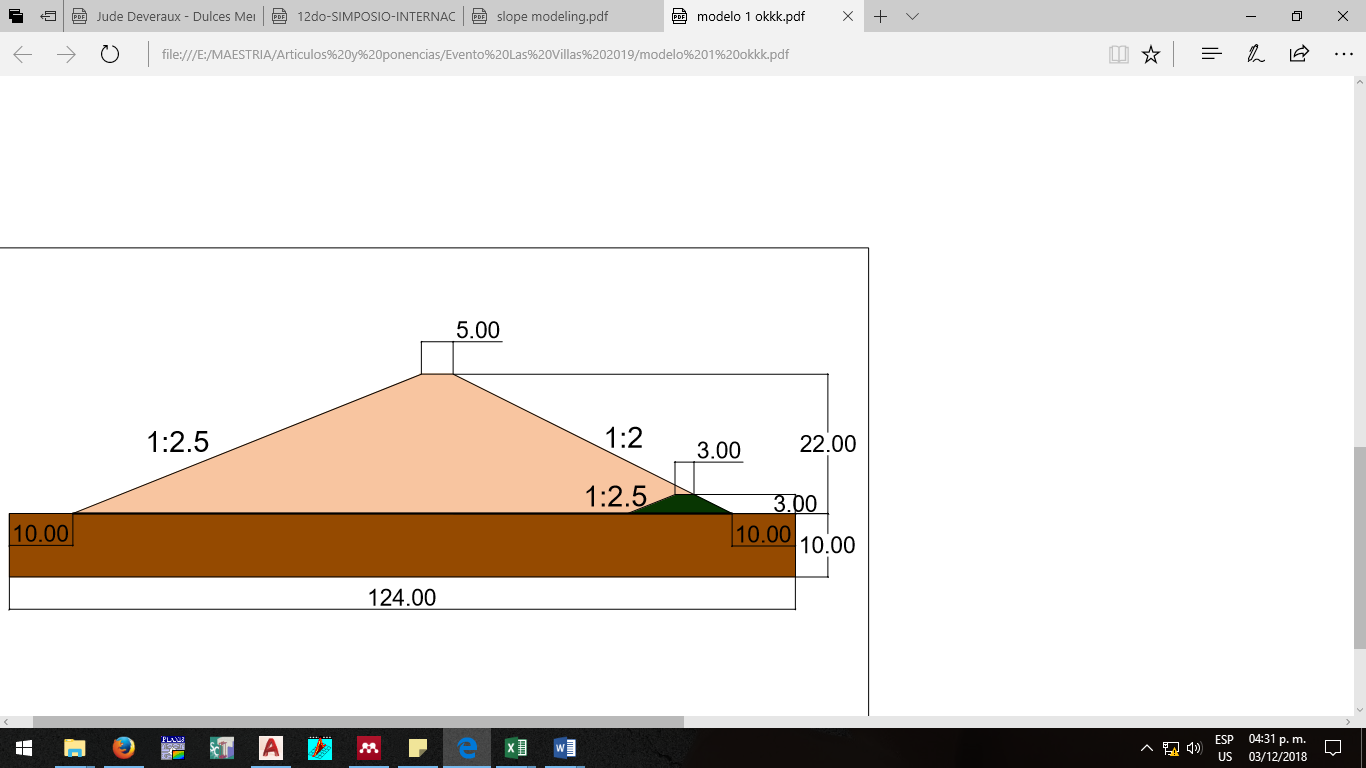


Figura 2. Geometría inicial del modelo*.* (Fuente: Elaboración propia)

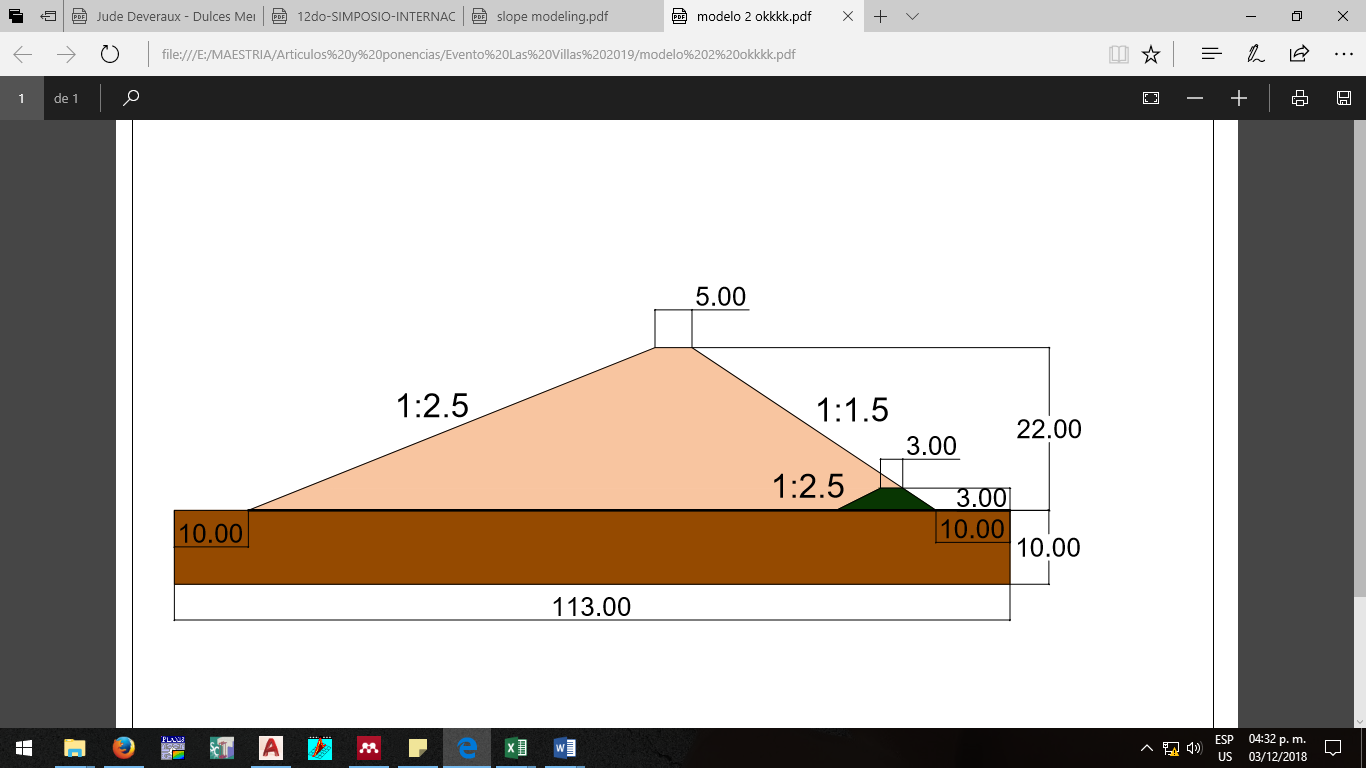


Figura 3. Geometría modificada del modelo*.* (Fuente: Elaboración propia)

Al proponer una variación de la geometría de la cortina de la presa, en función del incremento de la pendiente de ambos taludes de la misma, el drenaje también debe ser modificado en correspondencia, por lo que las dimensiones del mismo variarán, aunque se mantiene el mismo criterio de geométrico que para el modelo inicial.

Para definir los materiales que conformarán la cortina de la presa se consideraron tres suelos con clasificación CH (arcilla de alta compresibilidad), cada uno de los cuales presenta dos curvas características obtenidas para diferentes relaciones de vacíos iniciales, los datos y las curvas características de los suelos fueron extraídas de investigaciones previas (García 2015; Rodríguez Rodríguez 2017). La relación de permeabilidad establecida es de kx=12ky, para respetar el comportamiento de los suelos en la naturaleza. Las características de los suelos de la cortina se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Características de los suelos de la cortina. (Fuente: Elaboración propia)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Características de los suelos de la cortina | Suelo A | Suelo B | Suelo C |
| Peso específico húmedo (γf) (kN/m3) | 19.5 | 17.52 | 16.67 |
| 18.53 | 14.75 | 14.03 |
| Gravedad específica (Gs) | 2.82 | 2.72 | 2.72 |
| Ángulo de fricción interna efectivo (ϕ’) (°) | 14.5 | 33.4 | 22 |
| Cohesión efectiva (c’) (kPa) | 49.6 | 3.4 | 29 |
| Permeabilidad saturada (kx) (m/s) | 4.80E-08 | 1.03E-07 | 8.00E-08 |
| Módulo de elasticidad (E) (kPa) | 23000 | 20000 | 22000 |
| Índice de compresibilidad volumétrica (Mv) | 9.80E-05 | 8.47E-04 | 1.00E-05 |
| Coeficiente de Poisson (μ) | 0.33 | 0.33 | 0.33 |

En la cimentación se utilizarán tres suelos arenosos de clasificación SC (arena arcillosa) como se muestra en la tabla 3, esto posibilitará establecer cinco combinaciones.

Tabla 3. Características de los suelos de la cimentación. (Fuente: Elaboración propia)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Características de los suelos de la cimentación | C1 | C2 | C3 |
| Peso específico húmedo (γf) (kN/m3) | 17.5 | 18.5 | 19.5 |
| Ángulo de fricción interna (ϕ) (°) | 35 | 37 | 39 |
| Cohesión (c) (kPa) | 10 | 15 | 20 |
| Permeabilidad saturada (kx) (m/s) | 1.00E-06 | | |
| Módulo de elasticidad (E) (kPa) | 65000 | 75000 | 85000 |
| Índice de compresibilidad volumétrica (Mv) | 1.00E-05 | | |
| Coeficiente de Poisson (μ) | 0.4 | | |

En el drenaje se considera una grava de alta permeabilidad, según lo planteado por (Coduto 2001; Das 2001) como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Características del drenaje. (Fuente: Elaboración propia)

|  |  |
| --- | --- |
| Peso específico húmedo (γf) (kN/m3) | 21 |
| Ángulo de fricción interna (ϕ) (°) | 40 |
| Cohesión (c) (kPa) | 0 |
| Permeabilidad saturada (k) (m/s) | 0.001 |
| Módulo de elasticidad (E) (kPa) | 18000 |
| Índice de compresibilidad volumétrica (Mv) | 1.00E-05 |
| Coeficiente de Poisson (μ) | 0.27 |

En las figuras 4 (a) y (b) se muestran las curvas características correspondientes al suelo A, obtenidas por el método del papel de filtro para un grado de compactación de 95% y 100% del peso específico seco máximo obtenido en el Proctor Estándar. (Rodríguez Rodríguez 2017)

1. (b)

Figura 4. (a) Curva característica del suelo A con e=0.803. (b) Curva característica del suelo A con e=0.843. Fuente: (Rodríguez Rodríguez 2017)

En las figuras 5 (a) y (b) se muestran las curvas características correspondientes al suelo B, obtenidas por el método del papel de filtro para un grado de compactación de 80% y 95% del peso específico seco máximo obtenido en el Proctor Estándar. (García 2015)

1. (b)

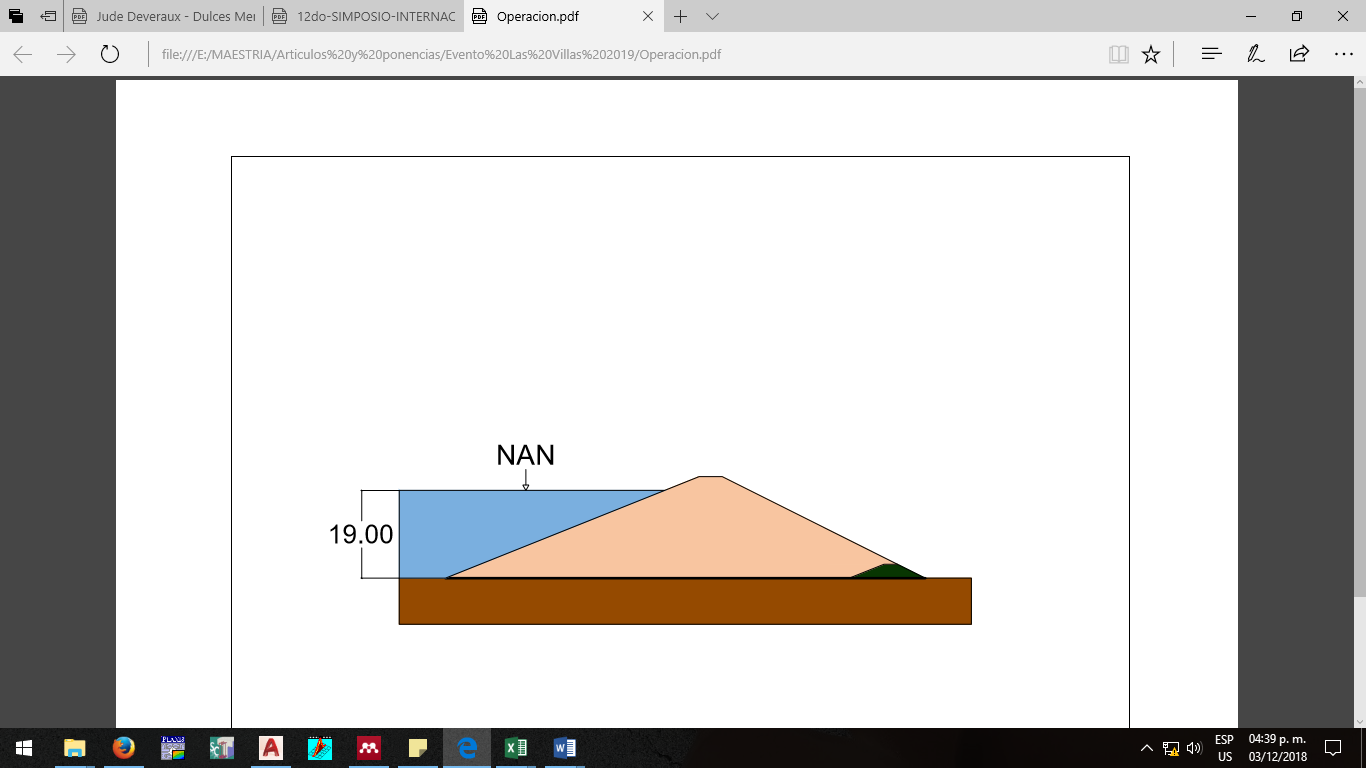
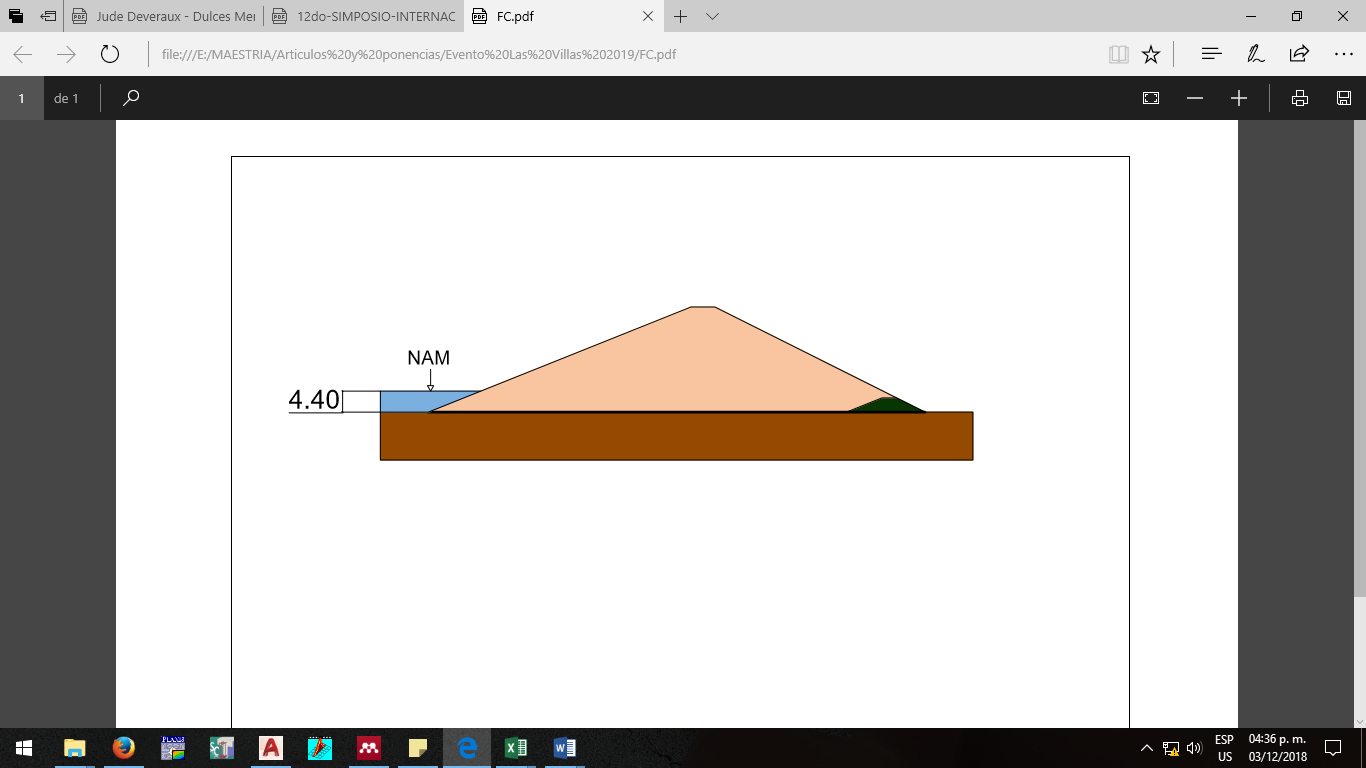
Figura 5. (a) Curva característica del suelo B con e=1.346. (b) Curva característica del suelo B con e=0.842. Fuente: (García 2015)

En las figuras 6 (a) y (b) se muestran las curvas características correspondientes al suelo C, obtenidas por el método del papel de filtro para un grado de compactación de 80% y 95% del peso específico seco máximo obtenido en el Proctor Estándar. (García 2015)

1. (b)

Figura 6. (a) Curva característica del suelo C con e=0.982. (b) Curva característica del suelo C con e=1.391. Fuente: (García 2015)

Los deslizamientos en una presa de tierra están vinculados directamente al nivel de agua que tenga la misma en función del momento en el que estos se produzcan. En esta investigación se analizan los estados de: final de la construcción y durante la operación bajo diferentes condiciones de saturación de los suelos de la cortina. Los niveles de agua para ambos modelos se muestran en las figuras 7(a) y (b), dado que el nivel del agua en el embalse es independiente de la modificación del talud aguas abajo.



1. (b)

Figura 7. (a) Final de la construcción con el nivel de aguas muertas. (b) Operación con el nivel de aguas normales. (Fuente: Elaboración propia)

**3. Resultados y discusión**

Se parte de obtener en el SIGMA/W la malla más adecuada para cada modelo sin considerar la presencia de agua dentro del embalse ni la succión, por lo que el grado de compactación del material de la cortina será patente sólo por la modificación del peso específico húmedo del suelo de la cortina para cada caso. A partir de esta calibración se obtuvieron los resultados para los tres suelos con las tres cimentaciones, para un total de 9 combinaciones. De forma general, según los valores de asentamientos y esfuerzos máximos en la corona se plantea una distribución de malla de elementos finitos conformada por cuadrado y triángulos con 0.6m de longitud.

En cuanto a los asentamientos totales que se producen en la cortina de la presa, para la densidad de malla de 0.6 metros con cada grado de compactación (Gc) analizados, son los que se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Asentamientos e incrementos para los suelos A y B entre los grados de compactación establecidos. (Fuente: Elaboración propia)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Gc=80% (m) | Gc=95% (m) | Gc=100% (m) | % Incremento |
| A-C1 |  | 0.16615 | 0.16310 | 1.87% |
| A-C2 |  | 0.16145 | 0.16960 | 5.05% |
| A-C3 |  | 0.15784 | 0.16259 | 3.01% |
| B-C1 | 0.14883 | 0.17561 |  | 17.99% |
| B-C2 | 0.14497 | 0.17112 |  | 18.04% |
| B-C3 | 0.14201 | 0.16758 |  | 18.01% |
| C-C1 | 0.13172 | 0.15534 |  | 15.21% |
| C-C2 | 0.12804 | 0.15105 |  | 15.23% |
| C-C3 | 0.12521 | 0.14777 |  | 15.27% |

Se observa que el incremento en los asentamientos es de 5% para el suelo A, donde se han utilizado pesos específicos correspondientes al 95% y 100% del grado de compactación, mientras que para el suelo B existen incrementos de hasta 18% y para el suelo C de 15%, donde las energías de compactación varían entre el 80% y el 95%.

En el proceso de compactación de suelos influye la humedad de compactación, tipo de suelo, método de compactación que depende de la granulometría, volumen de suelo compactado, energía de compactación. (Llique Mondragón 2015)

En la tabla 6 se muestra el incremento que existe entre los asentamientos de las combinaciones del suelo A y el suelo B respecto al suelo C para el 95% del grado de compactación alcanzado en el laboratorio.

Tabla 6. Incrementos entre los suelos A y B respecto al suelo C para un 95% de grado de compactación. (Fuente: Elaboración propia)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Suelo A (m) | Suelo B (m) | Suelo C (m) | % Incremento (A-C) | % Incremento (B-C) |
| C1 | 0.16615 | 0.17561 | 0.15534 | 7.0% | 13.0% |
| C2 | 0.16145 | 0.17112 | 0.15105 | 6.9% | 13.3% |
| C3 | 0.15784 | 0.16758 | 0.14777 | 6.8% | 13.4% |

En la tabla anterior se muestra que para los tres suelos tipo CH con un 95% de grado de compactación, establecido a partir de la modificación del peso específico, los incrementos de asentamientos oscilan entre 7% y 13%, por lo que, desde el punto de vista ingenieril, resultan significativos.

Según (Llique Mondragón 2015) el contenido de humedad es importante en la compactación, ya que depende de la cantidad de agua en la masa del suelo para que las partículas y grupo de partículas minerales puedan reordenarse bajo una determinada energía de compactación, además, condiciona las propiedades del suelo.

Cada suelo puede tener varias curvas características, en correspondencia con el grado de compactación con el que se ensaye el mismo. En esta investigación se analiza la independencia de la curva característica del grado de compactación alcanzado en la cortina de la presa. Los resultados alcanzados se muestran en las tablas 7 y 8.

Tabla 7. Incrementos entre los grados de compactación al final de la construcción para los suelos estudiados. (Fuente: Elaboración propia)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Combinación | Grado de compactación | Incremento entre grados de compactación (Final de la construcción) (%) | | | | |
| Curva de conductividad hidráulica | | Curva característica | | Saturado |
| Humedecimiento | Secado | Humedecimiento | Secado |
| A-C1 | 95 | 1.5% | 2.8% | 1.2% | 1.2% | 2.9% |
| 100 |
| A-C2 | 95 | 1.6% | 3.2% | 1.2% | 2.8% | 2.8% |
| 100 |
| A-C3 | 95 | 1.6% | 3.2% | 1.2% | 2.8% | 2.8% |
| 100 |
| B-C1 | 95 | 3.0% | 4.3% | 5.7% | 4.3% | 1.8% |
| 80 |
| B-C2 | 95 | 0.3% | 4.4% | 0.5% | 4.4% | 1.8% |
| 80 |
| B-C3 | 95 | 0.3% | 2.5% | 0.5% | 2.4% | 1.8% |
| 80 |
| C-C1 | 80 | 8.5% | 21.0% | 8.5% | 20.9% | 8.1% |
| 95 |
| C-C2 | 80 | 8.5% | 24.9% | 8.3% | 25% | 7.5% |
| 95 |
| C-C3 | 80 | 8.3% | 26.4% | 8.3% | 26.2% | 7.5% |
| 95 |

Como se observa en la tabla anterior, para los suelos A y B no existe un incremento significativo (mayor que el 5%) al analizar la succión con curvas características obtenidas para distintos grados de compactación. Para el suelo C, por el contrario, existen incrementos de hasta 26%, por lo tanto, los valores de cohesión y ángulo de fricción interno efectivos, vinculados al grado de compactación, afectan directamente el factor de seguridad. De forma general, las mayores dispersiones se observan para los suelos cuyos grados de compactación se encuentran entre 80% y 95%.

Tabla 8. Incrementos entre los grados de compactación en operación para los suelos A y B. (Fuente: Elaboración propia)

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Combinación | Grado de compactación | Incremento entre grados de compactación (Operación) (%) | | | | | |
| Curva de conductividad hidráulica | | | Curva característica | | Saturado |
| Humedecimiento | | Secado | Humedecimiento | Secado |
| A-C1 | 95 | 2.2% | | 2.2% | 2.2% | 2.2% | 2.2% |
| 100 |
| A-C2 | 95 | 2.7% | | 2.7% | 2.6% | 2.6% | 2.6% |
| 100 |
| A-C3 | 95 | 2.7% | | 2.8% | 2.7% | 2.7% | 2.6% |
| 100 |
| B-C1 | 95 | 0.8% | | 1.4% | 0.2% | 0.2% | 0.2% |
| 80 |
| B-C2 | 95 | 0.2% | | 0.4% | 1.2% | 0.1% | 0.2% |
| 80 |
| B-C3 | 95 | 0.2% | | 0.4% | 1.2% | 0.1% | 0.2% |
| 80 |
| C-C1 | 80 | 5.8% | 5.7% | | 5.7% | 5.7% | 5.7% |
| 95 |
| C-C2 | 80 | 6.1% | 6.1% | | 6.2% | 6.1% | 6.1% |
| 95 |
| C-C3 | 80 | 6.1% | 6.1% | | 6.2% | 6.0% | 6.1% |
| 95 |

Se observa en la tabla anterior, al igual que para el caso al final de la construcción, que para los suelos A y B no existe, de manera general, un incremento significativo (mayor que el 5%) al analizar la succión con curvas características obtenidas para distintos grados de compactación. Sin embargo, para el suelo C existen incrementos superiores al 5%.

Luego de analizados todos los resultados y viendo la variación entre ellos, el resto de la investigación se expone a partir de los resultados correspondientes al 95% de grado de compactación, dado que para las presas de tierra siempre se proyecta una compactación superior al 90% del Proctor Estándar.

Después de modificar la pendiente del talud aguas abajo para todos los casos, se analiza si se mantienen las condiciones de seguridad y estabilidad. Los resultados para el suelo A se muestran en las figuras 8(a) y 8(b), donde 1 es el factor de seguridad en estado saturado, 2 es el factor de seguridad en la rama en humedecimiento y 3 es el factor de seguridad en la rama en secado de la curva característica, dado que los valores de factor de seguridad obtenidos con la curva de conductividad hidráulica estimada, no difieren más del 5% de los valores con la curva característica experimental.

1. (b)

Figura 8. (a) Comportamiento del factor de seguridad en el suelo A con e=0.803 al final de la construcción. (b) Comportamiento del factor de seguridad en el suelo A con e=0.803 en operación. (Fuente: Elaboración propia)

Como se observa en las figuras anteriores, entre las combinaciones A-C1 y A-C2 existe un incremento de 1.7% entre los estados saturados al final de la construcción y de 5% entre los estados saturados en operación. Entre las tramas en humedecimiento y en secado, este incremento es de 4.6% al final de la construcción y de 5.1% en operación. Se observa que la influencia del tipo de cimentación, cuando sus características físico-mecánicas se encuentran dentro del rango estudiado, no es significativa desde el punto de vista ingenieril. Para las combinaciones A-C2 y A-C3 no existe una diferencia apreciable entre los valores de factor de seguridad para ninguna de las ramas de la curva característica.

Los resultados para el suelo B se muestran en las figuras 9(a) y 9(b), donde 1 es el factor de seguridad en estado saturado, 2 es el factor de seguridad en la rama en humedecimiento y 3 es el factor de seguridad en la rama en secado de la curva característica, dado que los valores de factor de seguridad obtenidos con la curva de conductividad hidráulica estimada, no difieren más del 5% de los valores con la curva característica experimental.

1. (b)

Figura 9. (a) Comportamiento del factor de seguridad en el suelo B con e=0.842 al final de la construcción. (b) Comportamiento del factor de seguridad en el suelo B con e=0.842 en operación. (Fuente: Elaboración propia)

Al igual que en el caso anterior, para el suelo B la influencia del tipo de cimentación, para el rango analizado, no es significativa desde el punto de vista ingenieril. Para todas las combinaciones las diferencias entre los valores de factor de seguridad se producen para la rama en secado de la curva característica.

Los resultados para el suelo C se muestran en las figuras 10(a) y 10(b), donde 1 es el factor de seguridad en estado saturado, 2 es el factor de seguridad en la rama en humedecimiento y 3 es el factor de seguridad en la rama en secado de la curva característica, dado que los valores de factor de seguridad obtenidos con la curva de conductividad hidráulica estimada, no difieren más del 5% de los valores con la curva característica experimental.

1. (b)

Figura 10. (a) Comportamiento del factor de seguridad en el suelo B con e=0.842 al final de la construcción. (b) Comportamiento del factor de seguridad en el suelo B con e=0.842 en operación. (Fuente: Elaboración propia)

Como en los casos anteriores, para el suelo C no existe influencia del tipo de cimentación en el rango analizado desde el punto de vista ingenieril. Para las combinaciones C-C2 y C-C3 no existe una diferencia apreciable entre los valores de factor de seguridad para ninguna de las ramas de la curva característica.

El incremento porcentual para cada caso analizado se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Incremento entre los factores de seguridad con las curvas de conductividad hidráulica y característica experimental respecto al estado saturado. (Fuente: Elaboración propia)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | Curva de conductividad hidráulica | | Curva característica | |
|  |  | Humedecimiento | Secado | Humedecimiento | Secado |
| Final de construcción | A-C1 | 12.9% | 12.8% | 12.9% | 12.8% |
| A-C2 | 18.1% | 18.1% | 18.1% | 18.1% |
| A-C3 | 18.1% | 18.1% | 18.1% | 18.1% |
| B-C1 | 33.0% | 52.5% | 33.0% | 52.1% |
| B-C2 | 33.0% | 61.5% | 33.0% | 61.1% |
| B-C3 | 33.0% | 62.4% | 32.9% | 61.9% |
| C-C1 | 19.2% | 9.3% | 18.6% | 9.1% |
| C-C2 | 24.5% | 11.7% | 23.8% | 11.6% |
| C-C3 | 24.5% | 11.7% | 23.8% | 11.6% |
| Operación | A-C1 | 0.3% | 0.3% | 0.3% | 0.3% |
| A-C2 | 5.4% | 5.4% | 5.4% | 5.4% |
| A-C3 | 5.4% | 5.4% | 5.4% | 5.4% |
| B-C1 | 9.3% | 10.4% | 7.1% | 9.5% |
| B-C2 | 9.3% | 10.4% | 7.1% | 9.4% |
| B-C3 | 9.2% | 10.3% | 7.1% | 9.4% |
| C-C1 | 0.6% | 0.7% | 0.5% | 0.7% |
| C-C2 | 4.1% | 4.2% | 3.8% | 4.1% |
| C-C3 | 4.1% | 4.2% | 3.8% | 4.1% |

En la tabla anterior se exponen incrementos entre un 12% y un 60% para el análisis al final de la construcción, estos datos muestran una amplia dispersión pues, aunque los tres suelos presentan clasificación CH, los valores de cohesión y ángulo de fricción interno son muy variables entre un suelo y otro. Para el análisis en operación, los incrementos se reducen significativamente, quedando entre un 0.3% y un 10%, dado que aumenta el volumen de suelo saturado en todos los casos. En ambos estados de carga, el suelo que presenta los mayores incrementos es el suelo B, que es el caso donde la cohesión es menor y al ángulo de fricción interna es mayor.

Para las combinaciones establecidas, con la modificación de la pendiente del talud aguas abajo, al considerar las leyes de la Mecánica de Suelos parcialmente saturados, se mantiene las condiciones de seguridad y estabilidad en la presa de tierra analizada. Con esta modificación de pendiente, es posible reducir el volumen de movimiento de tierra en 121 m3 por cada metro de longitud de la presa.

**4. Conclusiones**

Los asentamientos generales que se producen en la cortina de la presa oscilan entre 12cm y 17cm, lo que es subsanado durante el proceso de construcción de la obra. Cuando el suelo es compactado con pesos específicos entre 95% y 100% del grado de compactación del Proctor Estándar no existen incrementos significativos. Sin embargo, cuando las energías de compactación varían entre el 80% y el 95%, estos incrementos aumentan significativamente.

Para los estados de final de la construcción y operación existen variaciones superiores al 5% para algunas de las combinaciones analizadas al considerar la influencia de la compactación, a partir de la relación de vacíos, con los valores de succión en cada caso. A partir de estos resultados puede establecerse que, aunque un mismo suelo tiene tantas curvas características como grados de compactación deseen analizarse, en el caso de las presas de tierra con suelos parcialmente saturados, se recomienda utilizar aquellas curvas características experimentales o sus modificaciones, que hayan sido obtenidas para valores de compactación superiores al 95% del Proctor Estándar.

Al considerar las leyes de la Mecánica de Suelos parcialmente saturados es posible incrementar la pendiente del talud aguas abajo en una presa de tierra de 22m de altura con cortina conformada por suelos tipo CH, prisma de drenaje y cimentaciones arenosas dentro del rango analizado, manteniendo las condiciones de seguridad y estabilidad del talud.

Con la modificación de pendiente correspondiente a los valores de 1:2 a 1:1.5, es posible reducir el volumen de movimiento de tierra en 121 m3 por cada metro de longitud de la presa.

**5. Referencias bibliográficas**

Alanís Araiza, A.O., 2012. *Deformación volumétrica en suelos no saturados*. Universidad Autonoma de Querétaro.

Armas Novoa, R. & Horta Mestas, E., 1987. *Presas de Tierra* P. Fonte, ed., La Habana: Editorial ISPJAE.

Coduto, D., 2001. *Foundation design* 2nd. ed. M. Horton, ed., New Jersey: Prentice-Hall.

Das, B.M., 2001. *Fundamentos de Ingenieria Geotecnica* M. A. Toledo Castellanos, ed., California: Thomson Learning.

Fredlund, D G & Rahardjo, H., 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, New York: John Wiley & Sons.

Fredlund, Delwyn G, 2003. *Implementación de la mecánica del suelo parcialmente saturado en la práctica de la ingeniería geotécnica* F. Hoyos Patiño & J. M. Gómez Duque, eds., Medellín: Editorial Litoimpresos.

García, J., 2015. *Estudio del comportamiento tenso-deformacional de suelos parcialmente saturados en Cuba*. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas; Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría.”

Llique Mondragón, R.H., 2015. *Influencia de la humedad de compactación en el comportamiento volumétrico de los suelos arcillosos*. Universidad Nacional de Trujillo.

Molina Morejón, S., Alvarez Rodríguez, O. & González Haramboure, Y., 2016. Análisis y solución de la patología en presa de Cuba: Estado del arte. , p.8.

Rodríguez Rodríguez, C.M., 2017. *Evaluación del comportamiento tenso-deformacional en suelos parcialmente saturados con problemas de inestabilidad volumétrica*. Universidad Central “ Marta Abreu ” de Las Villas.

Sanhueza, C. & Rodríguez, L., 2012. Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. *Revista de la Construcción*, 12, pp.17–29.