

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Evaluación de efectos de sumersión en la estabilidad de taludes.
<i>Autor / Adscripción</i>	Xiangyue Li Luis Emilio Rendón Díaz Mirón Joselina Espinoza Ayala José Alfredo González Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Tecnología y Ciencias del Agua, 2(4): 149-165
<i>Fecha de publicación</i>	2011
<i>Resumen</i>	Se presenta un estudio numérico sobre efectos de sumersión que afectan la estabilidad de taludes. La sumersión es una condición hidráulica en la que coinciden los niveles de agua dentro y fuera del cuerpo del talud. En los casos estudiados, los factores de seguridad varían con el nivel de sumersión. Este fenómeno se observa aun cuando los taludes están formados por materiales granulares que obedecen a la ley de Mohr-Coulomb lineal. El análisis numérico permite revelar las causas de dicho efecto.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/1285

EVALUACIÓN DE EFECTOS DE SUMERSIÓN EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES

• Xiangyue Li • Luis Emilio Rendón Díaz-Mirón • Joselina Espinoza-Ayala •
• José Alfredo González •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Resumen

Se presenta un estudio numérico sobre efectos de sumersión que afectan la estabilidad de taludes. La sumersión es una condición hidráulica en la que coinciden los niveles de agua dentro y fuera del cuerpo del talud. En los casos estudiados, los factores de seguridad varían con el nivel de sumersión. Este fenómeno se observa aun cuando los taludes están formados por materiales granulares que obedecen a la ley de Mohr-Coulomb lineal. El análisis numérico permite revelar las causas de dicho efecto. Los factores de seguridad alcanzan su valor máximo en los taludes totalmente sumergidos, sean estos cohesivos o granulares. Los factores de seguridad mínimos no se observan en la sumersión nula sino en una elevación intermedia. Dichos factores mínimos pueden llegar a representar valores 25% menores que los calculados para la sumersión nula, presentándose en la mayoría de los casos estudiados entre el 20 y el 50% de la altura del talud. La reducción máxima en factor de seguridad y la elevación de sumersión en que se presenta dicha reducción dependen de una serie de variables, entre las cuales destacan parámetros de resistencia al corte y peso volumétrico del suelo, inclinación del talud y las condiciones de la cimentación del talud. Sin tomar en cuenta los efectos de sumersión, en muchos casos se puede sobreestimar considerablemente la estabilidad de los taludes.

Palabras clave: talud, seguridad, estabilidad, suelo, presa, bordo, terraplén, sumersión, nivel freático.

Introducción

Los taludes térreos son parte esencial de la mayoría de las obras hidráulicas. En presas de almacenamiento, las estructuras de contención se construyen con frecuencia por medio de materiales de tierra y enrocamiento. Los canales de conducción o descarga se forman por suelos. Los bordos, ampliamente usados como obras de protección en ríos, lagos, presas y costas, se edifican con base en materiales arenosos o arcillosos. Los márgenes de cauces naturales están constituidos por rocas y, en muchas ocasiones, también por suelos. De allí, el primordial papel que juega la estabilidad de taludes térreos en la seguridad y el correcto funcionamiento de las obras hidráulicas, pues su falla puede provocar interrupción de

servicios o, en casos extremos, catástrofes, como la ocurrida en el dique de Nueva Orleans, Estados Unidos, en 2004 (Seed *et al.*, 2005). Deslizamientos de tierra hacia cauces obstruyen corrientes, haciendo cambiar regímenes de flujo y modificando el funcionamiento hidráulico de las mismas. Ejemplo de ello es el deslizamiento que tuvo lugar en San Juan de Grijalva, México, en 2007 (Arvizu *et al.*, 2008). La falla de presas por desbordamiento puede poner en peligro zonas aguas abajo, causando cuantiosas pérdidas humanas y de material, así como desastrosos impactos al medio ambiente.

Uno de los aspectos que se debe evaluar en el análisis de estabilidad de taludes es la interacción entre los niveles del agua dentro y fuera de su cuerpo. El nivel del agua en el interior de un talud se describe por lo general por

nivel freático, si el flujo de agua se encuentra en el régimen estacionario, y la elevación del agua exterior representa niveles de vasos o ríos. Cuando el nivel del agua exterior desciende súbitamente con respecto al nivel freático, situación a la que se hace referencia comúnmente como vaciado rápido, se generan fuerzas de filtración que desestabilizan los taludes; en cambio, cuando el nivel del agua exterior asciende, las fuerzas de filtración tienden a incrementar la estabilidad de los taludes. Si se mantiene el nivel del agua exterior, el ascenso del nivel freático disminuye la estabilidad de los taludes, y el descenso hace lo contrario. La influencia de las condiciones de carga hidráulica inducidas por el diferencial entre los niveles del agua dentro y fuera del talud se ha estudiado ampliamente en el pasado, prestando, sin embargo, poca atención a la condición en la que el nivel de agua mantiene la misma elevación dentro y fuera del talud. Este fenómeno se denomina en el presente estudio como sumersión. En la figura 1 se muestran algunos ejemplos típicos donde la sumersión está presente. En los taludes de material granular resulta frecuente encontrar niveles del agua de igual elevación dentro y fuera del talud, como taludes aguas arriba y abajo en presas de enrocamiento con corazón impermeable (figura 1a). En presas de enrocamiento o grava con cara de concreto, el talud aguas abajo está sujeto a la misma condición (figura 1b). En el lado aguas arriba de los taludes cohesivos (figura 1c), la condición del flujo estacionario se puede representar, de manera conservadora, por la sumersión. Los taludes granulares que sirven de refuerzo y protección para muros de retención también se hallan sumergidos (figura 1d). Los escenarios similares se aprecian en márgenes de ríos, que pueden estar formados por materiales granulares o cohesivos. Una de las dificultades adicionales que se encuentran al estudiar los efectos de sumersión en las márgenes de ríos es la frecuente y muchas veces rápida fluctuación de niveles del agua exterior, además de la incertidumbre que se

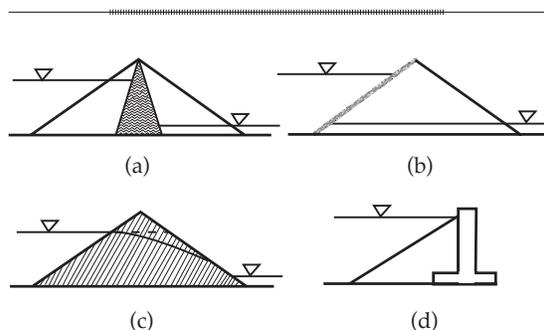


Figura 1. Taludes típicos con efectos de sumersión: a) presa con corazón impermeable; b) presa con cara de concreto; c) terraplén homogéneo; d) pedraplén de contrafuerte en un muro.

presenta al pretender anticipar dichos niveles en la etapa de diseño de nuevos bordos o revisión de los existentes.

El fenómeno de fallas por sumersión se conoce desde hace tiempo. Las fallas que ocurren durante el primer llenado en muchas presas constatan la importancia de este fenómeno. Es por ello que, en el diseño de las presas, se deben analizar los taludes aguas arriba para diferentes niveles de sumersión. Sin embargo, es necesario distinguir dos efectos que se presentan de manera simultánea durante la sumersión. En primera instancia, la sumersión hace disminuir el peso propio del estrato saturado y, en consecuencia, se incrementa la estabilidad global del talud, si el material tiene componente cohesivo en su resistencia al corte. Este efecto se puede demostrar analíticamente en los estudios de estabilidad de talud cuando los parámetros de los materiales se supongan sin cambio durante la saturación. Esta hipótesis no se cumple en muchas ocasiones. En los suelos cohesivos no saturados, la saturación hace disminuir las resistencias al corte de manera tal que el talud estaría formado por los materiales distintos de aquellos que se encuentren antes de la sumersión. La disminución de la resistencia al corte de los materiales reduce la estabilidad global del talud. Estos dos efectos, uno por factores meramente mecánicos y el otro por el

cambio en las propiedades de los materiales, son contrarios en sus contribuciones a la estabilidad del talud. Los dos se combinan y se compensan entre sí, generando resultados netos que se pueden manifestar por el incremento o la disminución del factor de seguridad del talud. Debido a la dificultad de anticipar el nivel de sumersión más crítico, se requieren analizar los taludes aguas arriba, suponiendo varios niveles de sumersión.

En los taludes puramente cohesivos, los parámetros de resistencia al corte se deben determinar en el laboratorio bajo la condición de saturación, mismos que se emplean en el análisis en los estratos sumergidos y no sumergidos. Bajo esta hipótesis, el factor de seguridad del talud siempre se incrementa con el nivel de sumersión. La condición más crítica del talud es la no sumergida. Muchas de las fallas de talud observadas durante el primer llenado no se deben a que los análisis no han considerado las condiciones de carga en el llenado sino a que los parámetros de resistencia al corte empleados en el diseño no se han determinado adecuadamente.

En taludes granulares, si el ángulo de fricción no varía con el nivel de confinamiento y además se determina bajo la condición de saturación, el factor de seguridad durante la sumersión se expresa como:

$$F_s = \frac{\tan\phi}{\tan\beta} \quad (1)$$

donde F_s , ϕ y β son, respectivamente, factor de seguridad, ángulo de fricción interna del material y ángulo de inclinación del talud con respecto al plano horizontal. El cambio en el peso propio del talud granular durante la sumersión no modifica el estado de estabilidad del mismo, ya que la carga gravitacional contribuye por igual a las fuerzas actuante y resistente. Esta expresión, que se refiere más adelante como método convencional, es la que se cuestiona recientemente. Últimamente se han publicado estudios teóricos sobre el

efecto, aunque los resultados obtenidos por diferentes autores no concuerdan plenamente; detalles de estos estudios se comentarán más adelante. Los mecanismos de falla en este tipo de taludes y sus consecuencias siguen siendo tema de discusión. Un trabajo de Michalowski (2009b) sugiere que grandes deslizamientos subacuáticos sean causados probablemente por este efecto.

El objetivo de este artículo es reportar resultados de análisis numéricos de estabilidad de taludes considerando efectos de sumersión. Se examinan los suelos cohesivos como arcillas o suelos finos compactados y los materiales granulares que obedecen a la ley de Mohr-Coulomb lineal como arenas y gravas. Se considera el método simplificado de Janbu como punto de partida. Se emplea el método de elemento finito para determinar factores de seguridad en los taludes, el cual ofrece, entre otras, la ventaja de no suponer a priori superficies de falla. El uso de este método resulta determinante para lograr resultados correctos en el análisis de efectos de sumersión. El estudio comienza en taludes puramente cohesivos, y se extiende posteriormente a los taludes cohesivo friccionantes y granulares, determinando mecanismos de falla desde el punto de vista de la mecánica del medio continuo. Se presentan análisis paramétricos, a fin de apreciar los factores de influencia que inciden en el fenómeno. Se presenta, asimismo, una comparación entre los resultados del presente estudio y aquellos derivados de los métodos de equilibrio límite. Por último se discuten las implicaciones de ingeniería que se pudieran derivar en la mejora de los procedimientos de diseño usuales.

Metodologías de análisis

Varios autores han abordado recientemente el tema de taludes sumergidos usando diferentes metodologías, tales como equilibrio límite (Baker *et al.*, 2005), análisis de límite (Viratjandr y Michalowski, 2006; Michalowski, 2009a y 2009b) y elementos finitos (Griffiths y Lane,

1999; Lane y Griffiths, 2000). Baker *et al.* (2005) encontraron que, en taludes de materiales friccionantes sujetos a sumersión parcial, las superficies de deslizamiento críticas no son círculos o líneas rectas, hecho que dificulta efectuar los análisis por medio de métodos convencionales de equilibrio límite o análisis límite usuales. Viratjandr y Michalowski (2006) reportaron algunas dificultades para encontrar resultados numéricos aceptables en taludes tendidos cuando la cohesión del suelo es baja. Michalowski (2009a) obtuvo resultados para estos taludes suponiendo fallas espirales logarítmicas. Según Lane y Griffiths (2000), los resultados obtenidos del método de elemento finito son favorablemente comparables con los procedimientos de equilibrio límite. Otros estudios (Dawson *et al.*, 1999; Li, 2007a; Li y Flores-Berrones, 2008; Li *et al.*, 2010) también muestran resultados en el mismo sentido.

A partir de estas observaciones se emplea el método del elemento finito para el presente estudio. No se repite aquí el procedimiento de cálculo que está ampliamente documentado. Algunas referencias de consulta se encuentran en los trabajos de Li (2007a), Li y Flores-Berrones (2008), y Li *et al.*, 2010). Entre los aspectos importantes en el análisis destacan los siguientes:

1. Regla de flujo no asociado. El ángulo de dilatación del suelo se toma igual a cero en todos los casos en estudio, ya que esta hipótesis ofrece una condición por la que se logran los factores de seguridad más conservadores, en comparación con los resultados conseguidos bajo suposiciones distintas.
2. Plasticidad perfecta. No se considera ni endurecimiento ni ablandamiento de los materiales ante el desarrollo de deformaciones plásticas. No obstante, estos efectos se pueden incluir en el análisis a través de una juiciosa selección de los parámetros de resistencia al corte. Dependiendo del endurecimiento o ablan-

damiento que se manifiesta en los datos de laboratorio, se pueden ajustar los parámetros a la alza o a la baja.

3. Integración reducida. Los desplazamientos en los elementos finitos se representan por una interpolación cúbica y la integración Gaussiana se lleva a cabo suponiendo un esquema lineal. Tal reducción en el orden de integración incrementa la estabilidad numérica en la solución de problemas no lineales como los que nos ocupan.
4. Frontera lateral. Las fronteras laterales del modelo de elemento finito se colocan a dos veces de la altura del talud desde el pie o la corona hacia afuera del talud. La cimentación se considera profunda, al ubicar su base a tres veces de la altura del talud, medida desde la base del talud.
5. Cálculo de factor de seguridad. Se hace de acuerdo con el criterio de falla total. En lugar de registrar el patrón de desplazamiento en uno o varios puntos, se monitorea el comportamiento numérico global de la solución, y se reconoce la falla del talud cuando la solución de todo el sistema no logre establecer su convergencia, dentro de los criterios previamente fijados en cuanto al límite de tolerancia de convergencia y al número máximo de iteraciones.

Con respecto a las cargas del agua en taludes sumergidos, se han desarrollado dos procedimientos que proporcionan los mismos resultados (figura 2). En el primero de ellos, las cargas del agua se aplican sobre la cara del talud, siendo éste formulado en términos de esfuerzos totales (caso a). En el segundo procedimiento (caso b), el talud se estudia en el contexto de esfuerzos efectivos. Para la parte sumergida, éstos se calculan con el peso volumétrico sumergido y en la parte no sumergida, los esfuerzos efectivos vienen siendo los mismos esfuerzos totales calculados con el peso volumétrico total o saturado. Las cargas de agua ya no se aplican sobre la cara del talud. En el presente estudio se adopta la segunda opción. El programa de cómputo

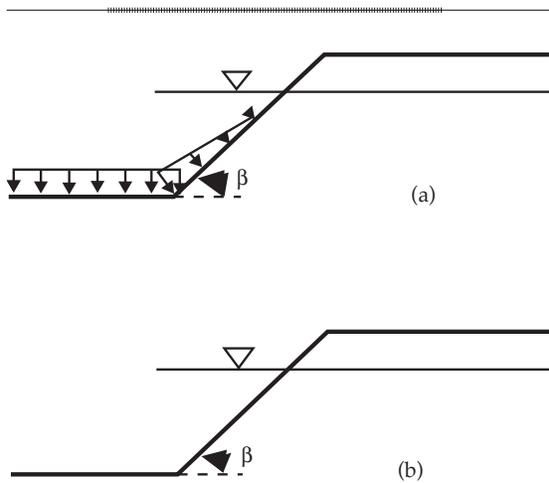


Figura 2. Dos alternativas para analizar efectos de sumersión: a) carga externa, b) zonificación interna.

que implementa el procedimiento descrito es de desarrollo propio.

La resistencia al corte en los suelos se define por lo general en término de la ley de Mohr-Coulomb lineal, a través de dos parámetros: cohesión c y ángulo de fricción interna ϕ . Analizaremos tres tipos de material: 1) suelo puramente cohesivo, $c > 0$ y $\phi = 0$; 2) suelo cohesivo friccionante, $c > 0$ y $\phi > 0$, y 3) suelo granular, $c = 0$ y $\phi > 0$. Estos tres tipos cubren casi todas las posibles formas en que la ley Mohr-Coulomb queda interpretada en los suelos. El primer tipo de suelo es común en arcillas naturales saturadas, donde la cohesión resulta la resistencia no drenada, denominada UU por sus siglas en inglés. Con el segundo tipo se pueden interpretar los resultados de las pruebas: no drenada (UU), consolidada no drenada (CU) o drenada (CD), en suelos compactados saturados o casi saturados. Finalmente, el tercer tipo describe el comportamiento de los suelos granulares, haciendo el uso del ángulo de fricción interna efectivo. La geometría del problema se define en la figura 3. El talud está cimentado sobre un estrato del mismo suelo, siendo d el cociente entre la profundidad de la cimentación y la altura del talud H . El nivel de sumersión se

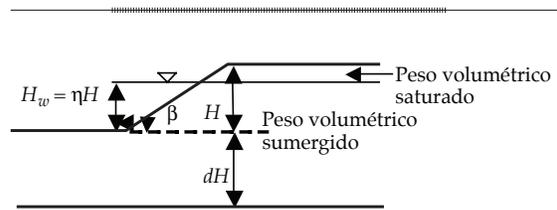


Figura 3. Esquema del talud analizado.

nota por el parámetro normalizado η . Además de los parámetros de resistencia al corte, tienen influencia en los resultados el peso volumétrico saturado γ_{sat} y el peso volumétrico sumergido como $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$, siendo γ_w el peso volumétrico del agua. Se define un parámetro adimensional denominado cociente de peso volumétrico α , donde $\alpha = \gamma_{sat}/\gamma_w$ que varía entre 1.5 y 2.0 para suelos típicos.

Taludes puramente cohesivos ($c > 0$ y $\phi = 0$)

En la figura 4 se ilustran los resultados obtenidos del análisis de elemento finito para los suelos puramente cohesivos. Todos los resultados se presentan en términos del cociente I_w entre el factor de seguridad para un determinado nivel de sumersión F_s y el de sumersión nula F_{s0} . El talud considerado tiene una inclinación $\cot\beta = 4$ o 4(H):1(V) y el cociente de peso volumétrico es igual a $\alpha = 1.5$. En el análisis, la sumersión comienza en la elevación $0.3H$, inferior a la base del talud, de manera que el valor inicial de η sea igual a -0.3 . El factor de sumersión I_w se mantiene igual a uno desde la cimentación hasta la base del talud, a partir de la cual se incrementa con el nivel de sumersión η hasta alcanzar su valor máximo, que es aproximadamente igual a 3. En la figura 4 se muestra también la curva I_w versus η , calculada con la siguiente ecuación (ecuación (2)), derivada del método de Janbu (Janbu, 1968; Duncan y Buchignani, 1975; Duncan y Wright, 2005), siendo μ_w una función proporcionada por los autores citados:

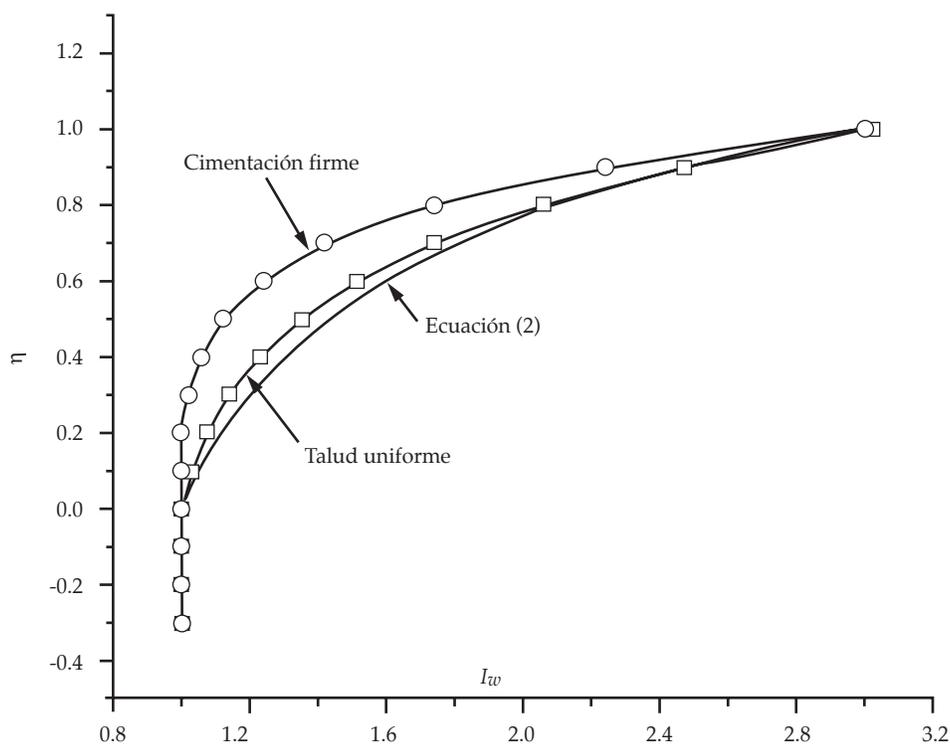


Figura 4. Comparación de factores de sumersión en taludes puramente cohesivos.

$$I_w = \frac{\mu_w}{1 - \eta/\alpha} \quad (2)$$

Se observa una buena concordancia entre los resultados de elemento finito y de Janbu. Incluso el valor máximo de I_w igual a 3 se consigue en ambos métodos. Los cálculos realizados con otros parámetros de $\cot\beta$ y α arrojan congruencias similares, confirmando que el método de Janbu ofrece resultados consistentes con los análisis numéricos para los taludes puramente cohesivos.

Cuando la cimentación es de un material distinto al del talud, el método de Janbu no es aplicable directamente. Sin embargo, se pueden calcular los parámetros de material promedio para tomar en cuenta la diferencia entre las propiedades de la cimentación y el talud. El efecto de sumersión para un medio compuesto

del talud y cimentación se debería evaluar, según Janbu, de la misma manera que en un talud homogéneo usando la ecuación (2). En la figura 4 se ilustran resultados obtenidos de un ejemplo en el que los pesos volumétricos son uniformes y la cohesión de la cimentación es cien veces la del talud. Según el método de Janbu, el factor de sumersión debe ser el mismo que el calculado en la ecuación (3), el cual ya se ha dibujado en la figura 4. Sin embargo, los resultados de elemento finito muestran gran discrepancia con respecto a esta estimación. Para un nivel de sumersión medio, el factor de sumersión en el talud no homogéneo es igual a 1.12 contra 1.35, obtenido en el talud homogéneo analizado por elementos finitos; la diferencia es 20%. Para las sumersiones nula y total, ambos factores coinciden. De este ejemplo resalta la importancia de la forma en que se toma en cuenta el efecto de no homogeneidad

de los materiales para la evaluación de efectos de sumersión.

Cabe mencionar que, empleando parámetros de resistencia no drenada, como lo que se está reportando en esta sección, el análisis arroja resultados conservadores.

Taludes cohesivo friccionantes ($c > 0$ y $\phi > 0$)

Para el análisis de este tipo de talud es necesario introducir el factor adimensional $\lambda_{c\phi 0}$, definiendo la importancia relativa del componente de fricción con respecto a la cohesión:

$$\lambda_{c\phi 0} = \frac{\gamma_{sat} H \tan \phi}{c} \quad (3)$$

En la figura 5 se ilustran los resultados obtenidos del análisis de elemento finito para los suelos cohesivo friccionantes, considerando una inclinación de talud de $\cot \beta = 4$ y un coeficiente de peso volumétrico de $\alpha = 1.5$. Se dibujan en la figura 5a los factores de seguridad relativos a dos valores de $\lambda_{c\phi 0}$: 1 y 100. En el caso de $\lambda_{c\phi 0} = 1$, el factor de seguridad comienza a disminuirse desde la elevación $\eta = -0.3$ hasta llegar a un valor mínimo en la elevación referida a la base del talud $\eta = 0$. A partir de este punto, dicho factor crece paulatinamente, alcanzando su máximo valor en la corona del talud. En este caso, la sumersión, cuando se encuentre en la cimentación, tiene un efecto notable, produciendo una disminución en el factor de seguridad al cambiar el nivel de sumersión de $\eta = -0.3$ a $\eta = 0.0$. Solamente a partir de la base del talud se observan incrementos de dicho factor. Cuando la cifra del parámetro $\lambda_{c\phi 0}$ se incrementa de 1 a 100, el efecto de sumersión se hace más notable. A partir de la elevación $\eta = -0.3$ el factor de seguridad se va reduciendo hasta alcanzar su valor mínimo a la altura $\eta = 0.4$; desde este punto, dicho factor va en aumento para llegar a su valor máximo en la corona. A fin de apreciar el efecto

de sumersión, se grafican en la figura 5b los factores de sumersión I_w . Para el parámetro de $\lambda_{c\phi 0}$ igual a 1, de dicho factor tiene en la base del talud su valor más bajo, que resulta igual a 1. Su valor más alto, de 2.53, se localiza en la corona. En cambio, si el parámetro de $\lambda_{c\phi 0}$ fuera igual a cien, el valor más bajo de I_w llegaría a ser 0.92 en la elevación $\eta = 0.4$ y su valor máximo de 1.33 se observaría en la corona. La reducción del factor de seguridad como consecuencia de la sumersión no había sido reportada en la literatura sino hasta recientemente, en los trabajos de Lane y Griffiths (2000). Dicha reducción, de apenas 8% para este caso es, sin embargo, significativa, en el sentido de que existen condiciones de falla críticas que no se analizan usualmente en el análisis de estabilidad bajo efectos de sumersión. De estos resultados también se observa que dicha reducción se acentúa cuando el parámetro $\lambda_{c\phi 0}$ sea alto, que en este análisis es de cien, implicando una mayor reducción en el momento en que el material tenga mayor componente de fricción que de cohesión en cuanto a su resistencia al corte.

En las mismas figuras 5a y 5b se muestran los resultados conseguidos cuando la cimentación tenga una cohesión cien veces de la del talud. Como es de esperar, los factores se incrementan con respecto al caso en el que la cimentación tiene las mismas propiedades que el talud. Para el caso de $\lambda_{c\phi 0} = 1$, el factor de seguridad comienza con un valor igual a 1.1 en la elevación de $\eta = -0.3$. Dicho factor se va reduciendo hasta tomar su valor mínimo en la elevación $\eta = 0.4$. Esta variación contrasta con la que se reporta para el caso del talud uniforme, en el que el factor de seguridad alcanza su valor mínimo en la base del talud y ya no se observa reducción alguna en dicho factor por efectos de sumersión desde esa elevación hasta la corona d . Cuando el valor de $\lambda_{c\phi 0}$ se modifique de 1 a 100, los factores de seguridad se mantendrán sin variación desde la elevación $\eta = -0.3$ hasta $\eta = 0.0$, que corresponde a la base del talud. A partir de este último punto, dicho factor se

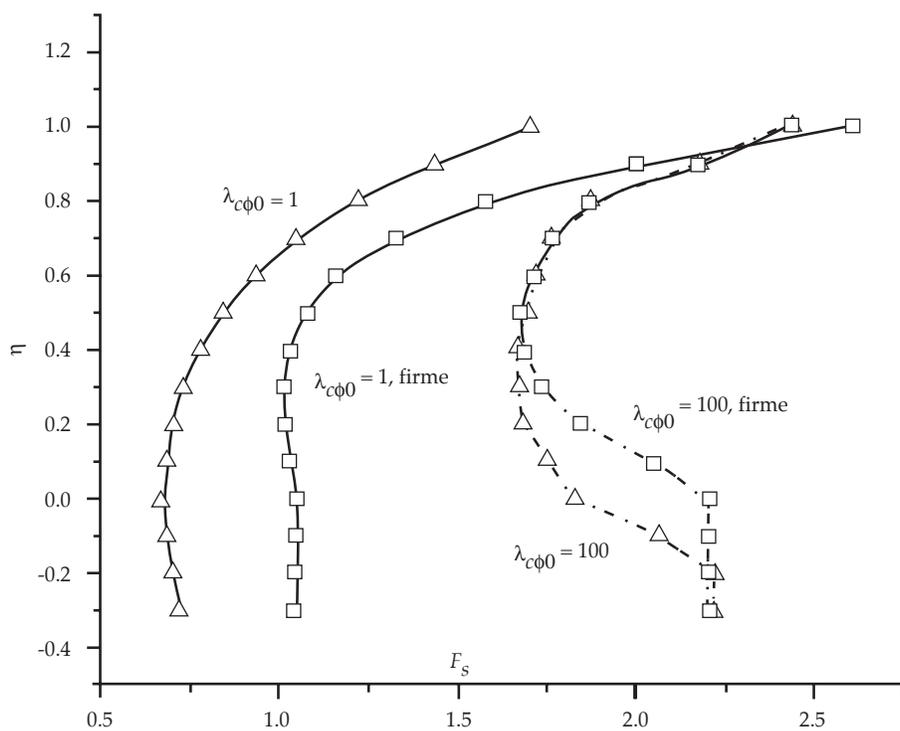


Figura 5a. Comparación de factores de seguridad en suelos cohesivo friccionantes ($\cot(\beta) = 4$).

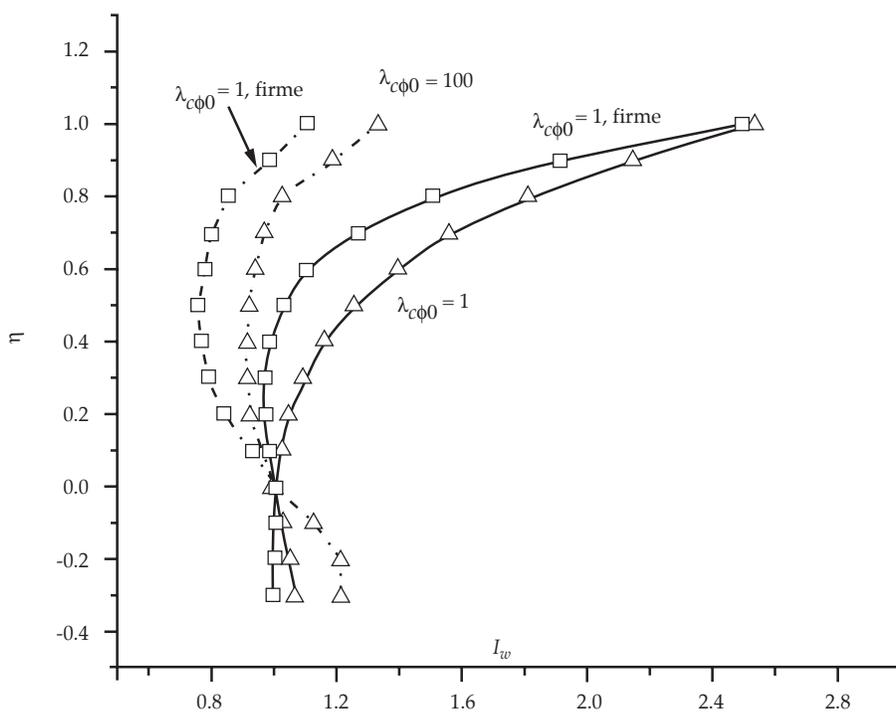


Figura 5b. Comparación de factores de sumersión en suelos cohesivo friccionantes ($\cot(\beta) = 4$).

reduce hasta alcanzar su valor mínimo a la elevación $\eta = 0.4$. Como un aspecto interesante, las dos curvas factor de seguridad *versus* elevación, una para el talud uniforme y la otra relativa al talud con una cimentación más firme, se convergen para el caso de $\lambda_{c\phi 0} = 100$. Esta tendencia no se reporta para un valor de $\lambda_{c\phi 0}$ menor. En cuanto a los factores de sumersión I_w , se observan reducciones en factor de sumersión para los dos valores de $\lambda_{c\phi 0}$ evaluados: los factores de sumersión mínimos llegan a tener valores de 0.97 y 0.76, respectivamente, para $\lambda_{c\phi 0} = 1$ y 100, con reducciones máximas equivalentes de 3 y 24%.

En resumen, cuando los suelos sean friccionantes cohesivos, se presentan reducciones de factor de seguridad por efectos de sumersión, fenómeno que no se ha reportado hasta recientemente (Lane y Griffiths, 2000). Dichas reducciones se hacen más notables cuando es menor la cohesión del suelo en relación con su componente de fricción y cuando la cimentación es más firme que el material del talud.

Taludes granulares ($c = 0$ y $\phi > 0$)

Como se había mencionado, el efecto de sumersión usualmente no se toma en cuenta en el análisis de taludes puramente friccionantes o bien se considera que el nivel de sumersión es irrelevante en el cálculo de factores de seguridad. El cociente I_w toma el valor de 1 para estos casos. Este resultado se referirá como método convencional. En la figura 6a se presentan resultados de elemento finito, mostrando conclusiones contrarias a las postuladas por el método convencional. El talud analizado tiene una inclinación de $\cot\beta = 2$. Los factores de seguridad calculados para dos valores de $\alpha = 1.5$ y 2.0 se normalizan con respecto a $\tan\phi$. Según el método convencional, el valor de $F_s/\tan\phi$ es igual a 2, derivado del valor asignado de $\cot\beta$. Los factores $F_s/\tan\phi$, calculados por elemento finito, son menores que 2.0. La variación de dicho factor con el nivel de sumersión η muestra que cuando el nivel de sumersión se

encuentre debajo de la base de la cimentación ($\eta \leq 0.0$), el factor $F_s/\tan\phi$ se mantiene constante con un valor de 1.97. Esta cifra es ligeramente menor que 2.0 y resulta independiente del parámetro α . Adicionalmente, dicho factor tiene el mismo valor para las sumersiones total y nula. Hasta aquí el método convencional y el presente estudio arrojan resultados similares. Sin embargo, en los niveles intermedios de sumersión, el factor en mención es menor que 1.97. En la cercanía de la base del talud, el factor sigue una variación suave con una disminución gradual al subir el nivel de sumersión. En el nivel intermedio ($0.2 \leq \eta \leq 0.9$), el factor $F_s/\tan\phi$ se mantiene prácticamente constante con un valor mínimo de 1.50 y 1.70 para $\alpha = 1.5$ y 2.0, respectivamente. Al aproximarse a la sumersión total, se aprecia un cambio brusco de dicho factor desde su valor mínimo al máximo. La misma tendencia se observa en ambos valores de α . En el talud cohesivo friccionante, la variación del factor de seguridad contra el nivel de sumersión es gradual, permitiendo definir un valor mínimo de factor de seguridad para un determinado nivel de sumersión (ver figura 5). En el talud granular, el valor mínimo de factor de seguridad no se ve en una elevación bien definida sino que se encuentra en un rango de elevación un tanto amplio hasta que se puede confirmar que dicho valor mínimo se presenta en todo el talud, con las únicas excepciones de las sumersiones total y nula.

A fin de visualizar mejor el efecto de sumersión, en la figura 6b se dibujan las curvas $F_s \tan\beta/\tan\phi$ *versus* η . El factor $F_s \tan\beta/\tan\phi$ es equivalente del factor de sumersión definido en las ecuaciones (12) y (14). Los valores mínimos de $F_s \tan\beta/\tan\phi$ son 0.75 y 0.85, para $\alpha = 1.5$ y 2.0, respectivamente. Son reducciones en factor de seguridad que no se prevén en el método convencional ni en la mayoría de los libros de texto y manuales de la mecánica de suelos.

Para los diferentes valores de α y $\cot\beta$ se pueden calcular los valores mínimos de los dos factores $F_{s,\min}/\tan\phi$ y $F_{s,\min} \tan\beta/\tan\phi$ como los

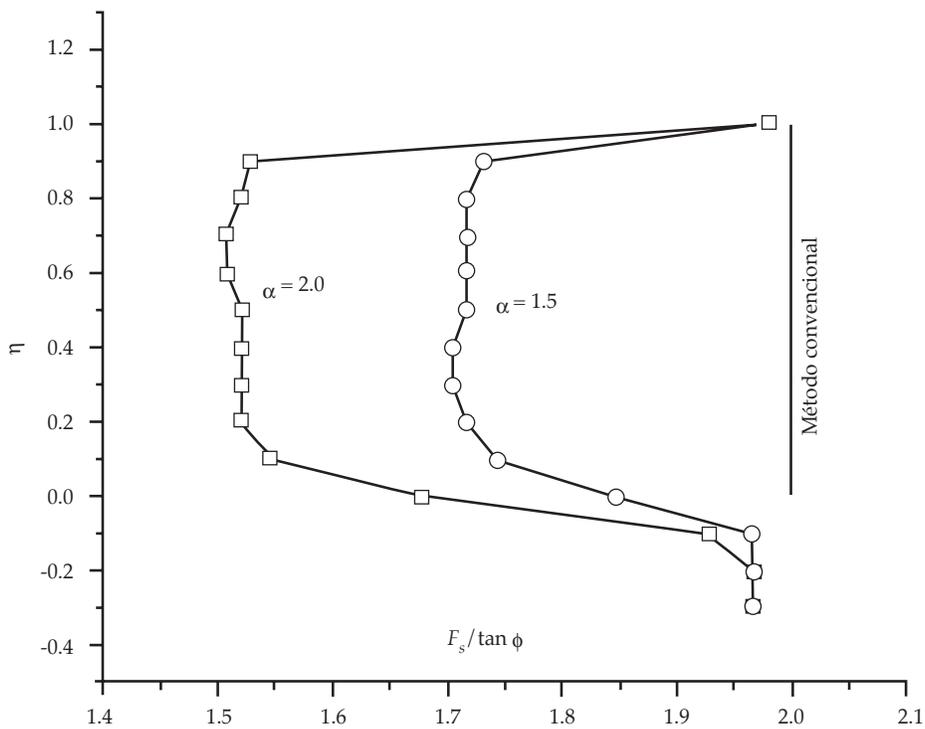


Figura 6a. Comparación de factores $F_s / \tan(\phi)$ en taludes granulares.

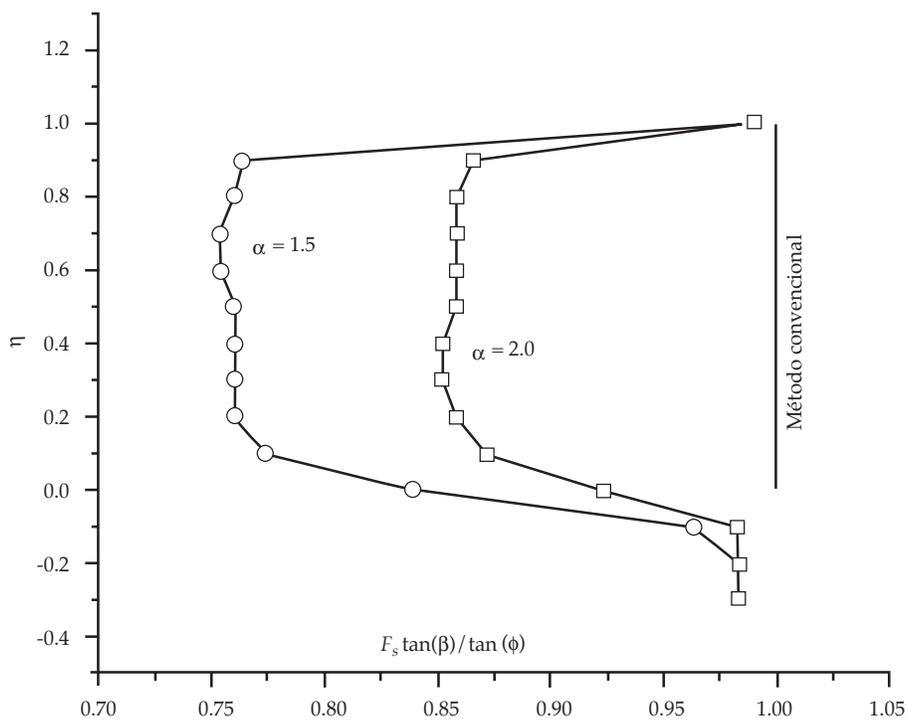


Figura 6b. Comparación de factores $F_s \tan(\beta) / \tan(\phi)$ en taludes granulares.

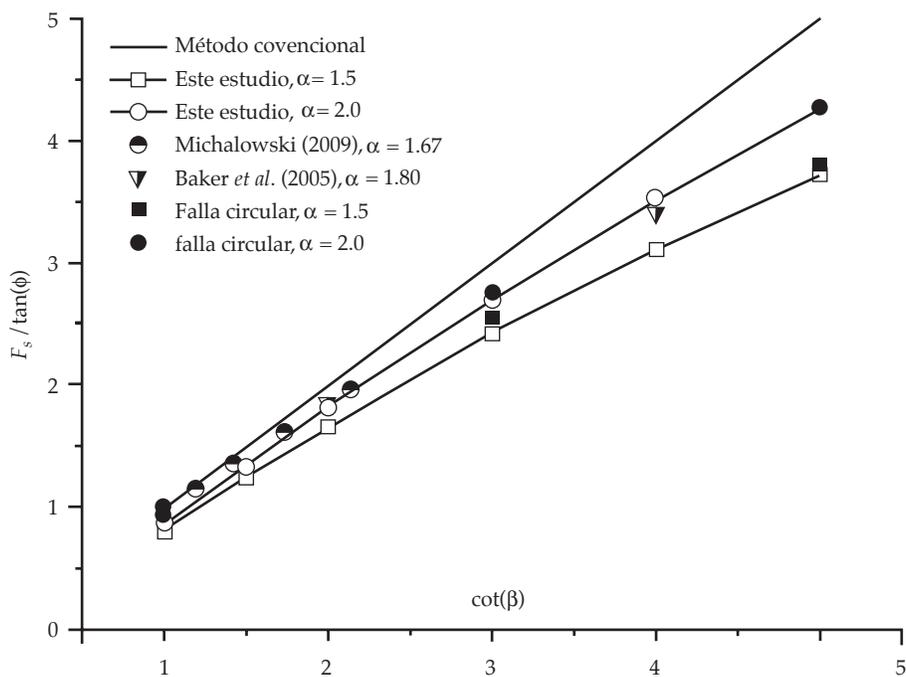


Figura 7a. Variaciones de $F_s / \tan(\phi)$ para diferentes inclinaciones de taludes granulares.

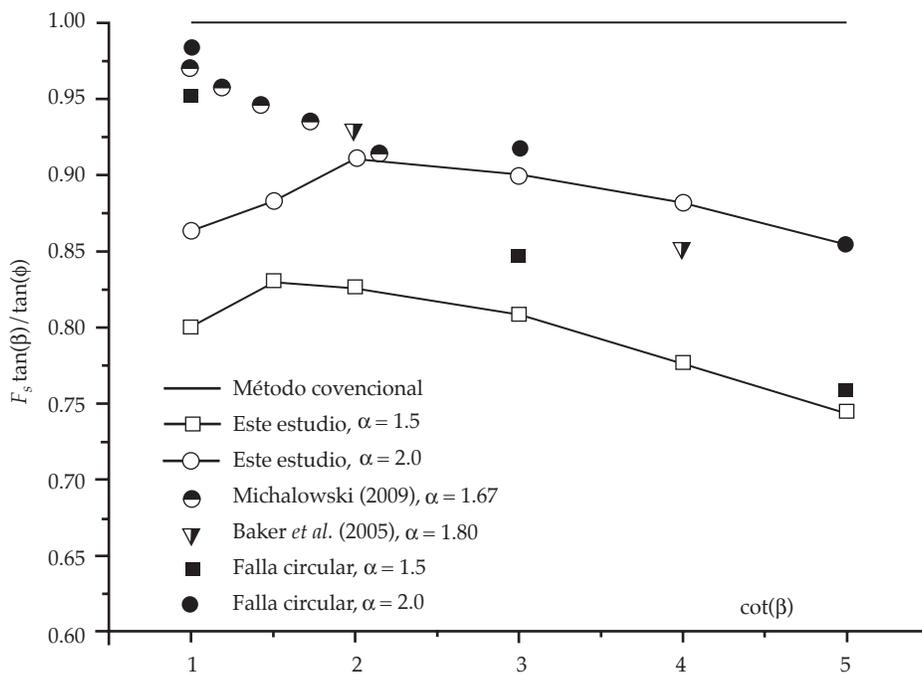


Figura 7b. Variaciones de $F_s \tan(\beta) / \tan(\phi)$ para diferentes inclinaciones de taludes granulares.

ilustrados en las figuras 7a y 7b. En las mismas, se agregan algunos puntos correspondientes a los resultados obtenidos de Baker *et al.* (2005), y Michalowski (2009a). Se muestran también algunos resultados obtenidos por el método de Spencer suponiendo fallas circulares. En general, los resultados por estos métodos son menos conservadores que el presente estudio. En forma particular, Michalowski (2009a) muestra, en el rango de β entre 25 y 45 grados y un parámetro de α igual a 1.67, valores cercanos a 0.91 y 0.97 de $F_{s,\min} \tan\beta / \tan\phi$, que son equivalentes a reducciones en el factor de seguridad del orden de 9 a 3%. El mismo autor concluye que el efecto de sumersión no es importante. Sin embargo, los resultados del presente estudio muestran que las reducciones son del orden de 9 a 12% en el mismo rango de inclinación del talud. Baker *et al.* (2005) analizaron dos taludes con diferentes inclinaciones y un parámetro de α igual a 1.80. Sus resultados son más cercanos a los nuestros, aunque con un ligero grado no conservador. Los métodos de equilibrio límite con fallas circulares arrojan consistentemente resultados menos conservadores que el presente estudio.

La diferencia entre los resultados de otros autores y los del presente estudio proviene de las hipótesis con las que se suponen las superficies de falla. Es obvio que las fallas analizadas por estos autores son las más críticas dentro de las superficies supuestas. Pero el hecho de que el análisis de elemento finito haya reportado factores de seguridad menores implica que todavía existen fallas más peligrosas que las ya analizadas, y que las fallas más críticas estudiadas no lo son como tal. De allí la bondad del procedimiento de elemento finito en la captación de las condiciones menos conservadoras de estabilidad. En la siguiente sección se da una explicación del porqué pierden su eficacia los análisis de estabilidad usuales en el estudio de efectos de sumersión.

De acuerdo con la figura 7b, si bien el factor $F_{s,\min} \tan\beta / \tan\phi$ se modifica de acuerdo con la inclinación del talud, su variación se observa en un rango estrecho, de manera que

puede aproximarse por un valor promedio, uniforme para todas las inclinaciones del talud. Los valores promedio para los rangos de inclinación que se investigan, $1 \leq \cot\beta \leq 5$, son 0.8 y 0.88 para $\alpha = 1.5$ y 2.0, respectivamente. Por lo tanto se puede presentar una variación lineal tal que:

$$\frac{F_{s,\min} \tan\beta}{\tan\phi} = 0.8 + 0.16(\alpha - 1.5) \quad (4)$$

con el intervalo válido de α entre 1.5 y 2.0.

En cuanto a la influencia de la cimentación, los resultados obtenidos muestran que no son tan importantes como cuando el material es cohesivo friccionante.

Mecanismos de falla en suelos granulares

Baker *et al.* (2005), quienes reportaron quizá el primer estudio descubriendo que los taludes de materiales granulares pudieran fallar con un factor de seguridad menor que $\tan\phi / \tan\beta$, interpretaron el fenómeno de la siguiente forma. Cualquier masa de suelo en deslizamiento puede dividirse en tres bloques. El bloque superior, que es la fuerza actuante al deslizamiento; el bloque central; y el bloque inferior, que proporciona la fuerza resistente al movimiento. Se puede suponer que el bloque central es neutral, sin que tenga efecto alguno en la estabilidad de los taludes granulares. El nivel del agua o de sumersión divide al talud en dos zonas: la zona ubicada arriba del nivel de sumersión llamada material firme y la zona localizada por debajo de dicho nivel referida como estrato débil. Estas capas de material se responsabilizan por los modos de falla local, los cuales se mueven con la variación del nivel del agua. Dependiendo de cómo la capa débil afecta el bloque estabilizador, se dan diferentes factores de seguridad.

Michalowski (2009a) expone que el punto de intersección formado por el nivel de sumersión y la cara del talud sirve como un

polo del cual se pueden suponer una serie de superficies de falla en forma de curvas espirales logarítmicas. La falla del talud ocurre siguiendo la superficie más crítica. Existe, por lo tanto, un mecanismo de colapso local, de tamaño pequeño, alrededor del polo en mención. Dicho mecanismo se mueve a lo largo de la cara del talud con el cambio del nivel de sumersión. Este mecanismo de falla local no está en conexión con la falla global. La falla local domina la estabilidad del talud, aportando un factor de seguridad menor que el global. Los factores de seguridad así obtenidos se mantienen prácticamente constantes para diferentes niveles de sumersión.

El análisis de elemento finito nos permite analizar los mecanismos de falla y desde el punto de vista de la mecánica del medio continuo. En la figura 8 se muestran los patrones de desplazamientos cuando los niveles de sumersión se encuentren en la corona y en la media altura del talud. En la sumersión total, la falla es global desde la corona hasta la base; además de ser superficial y plana. En cambio, en la sumersión parcial, la falla es local, desde la corona hasta el nivel de sumersión. La falla es profunda y está acotada. Estas observaciones son similares a las discusiones de otros autores. En resumen, la sumersión introduce una falla local en el talud granular, generando una condición de falla más crítica que la global. Este mecanismo de falla local aparece en la elevación referida a la sumersión con factores de seguridad similares para diferentes niveles de sumersión intermedios. La falla es pequeña

y somera, pero más profunda que la facial. Con una perspectiva más amplia hacia los tres tipos de material se deduce que, por los efectos de sumersión, existen dos mecanismos de falla potenciales: uno local y otro global. El colapso del talud depende de la ponderación de ambos mecanismos. En los suelos puramente cohesivos, el talud falla por el mecanismo global; en los suelos cohesivo friccionantes, la fricción hace crecer la importancia de la falla local, y finalmente un talud granular es dominado completamente por el mecanismo local.

Implicaciones para el diseño

El diseño de terraplenes y bordos debe evaluar muchos factores, incluyendo la estabilidad interna de los materiales bajo efectos del agua (Flores-Berrones y Gaytán, 2005). En cuanto a la estabilidad global de los taludes, se distinguen cuatro escenarios para la verificación de seguridad. En el cuadro 1 (Li, 2007b) se presentan, para los cuatro mencionados, análisis asociados, pruebas de laboratorio y parámetros de resistencia al corte requeridos, así como factores de seguridad admisibles. La sumersión se debe revisar como flujo estacionario con llenado parcial en el lado aguas arriba y flujo estacionario en el lado aguas abajo. El análisis se debe llevar a cabo en términos de esfuerzo efectivo usando los parámetros CD. Los factores de seguridad admisibles para ambos lados son de 1.5.

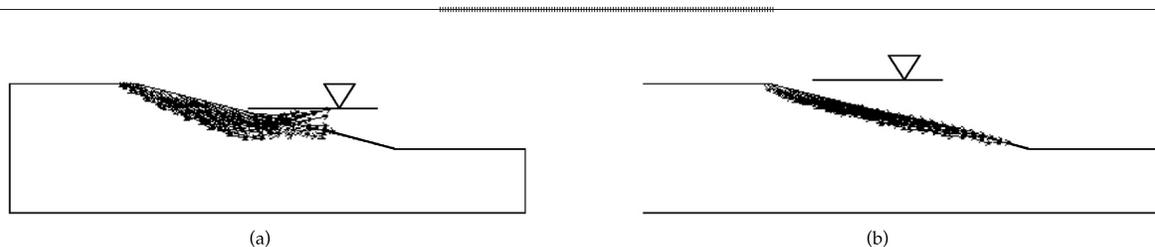


Figura 8. Patrones de desplazamiento en dos taludes granulares 4:1: a) parcialmente sumergido ($\eta = 0.5$) y b) sumersión total.

Cuadro 1. Factores de seguridad para análisis de taludes (Li, 2007b).

Condición	Análisis	Prueba	Factor de seguridad
Final de construcción, aguas arriba y aguas abajo	Esfuerzo total	UU	1.25
Flujo estacionario con llenado parcial, aguas arriba	Esfuerzo efectivo	CD	1.5
Flujo estacionario, aguas abajo	Esfuerzo efectivo	CD	1.5
Vaciado rápido, aguas arriba	Esfuerzo efectivo o esfuerzo total	CD o CU	1.25

Supongamos un material granular con un ángulo de fricción interna igual a 40 grados y peso volumétrico saturado de 20 kN/m^3 . El talud es 2:1 o $\cot\beta = 2.0$. El factor de seguridad sin efectos de sumersión es igual a 1.68, que es mayor que el valor admisible, 1.5. Con efectos de sumersión, empleando la ecuación (15), el factor de seguridad se reduce a 1.48, que es menor de 1.5. El talud en consecuencia no cumple con el requerimiento de seguridad. De este ejemplo, en el que se emplean parámetros comúnmente encontrados, se deduce que muchos taludes existentes, si bien no están en la condición de falla incipiente, tampoco cumplen con los requisitos de seguridad.

La presencia de la cohesión disminuye notablemente el efecto de sumersión. En un talud granular, la cohesión aparente puede estar presente por causas de la capilaridad y contaminación de finos. En las condiciones normales de operación, el talud sumergido puede estar estable sin una notable disminución de factores de seguridad por los efectos de sumersión. Pero bajo las lluvias, la percolación de aguas superficiales al interior del talud acerca a éste a las condiciones de sumersión sin cohesión, con una importante disminución en el factor de seguridad. Esta combinación de los efectos de sumersión y pérdida de cohesión que propicia un cambio en las condiciones de seguridad puede explicar el origen de muchas fallas de taludes granulares.

En los suelos granulares, la falla deja de ser superficial facial por los efectos de

sumersión, aspecto también indicado por Michalowski (2009a), motivo por el cual cualquier indicio de falla o movimiento de partículas en los taludes se debe revisar con cuidado y no se deben confundir problemas de mantenimiento con fallas incipientes. En vista de que el cambio del comportamiento de los taludes por la sumersión ocurre en mayor medida en suelos granulares, resulta relevante la interpretación de las envolventes Mohr-Coulomb obtenidas de pruebas de laboratorio. Por lo general, estas líneas envolventes se trazan entre los puntos dispersos, a veces en el sentido de mínimos cuadrados y en otras a juicio del ingeniero. La dispersión de los puntos resulta mayor en suelos compactados. Muchas veces existen márgenes de flexibilidad para asignar una mayor ponderación a la cohesión o a la fricción. Estos pequeños cambios en los valores de cohesión y ángulo de fricción interna quizá no son importantes en la evaluación de estabilidad de taludes bajo otras condiciones de verificación, pero pueden afectar los resultados por los efectos de sumersión. Al obtener una envolvente con una menor ponderación a la cohesión, el talud se evaluará de manera más conservadora. En los suelos puramente cohesivos, cuando prevalece la incertidumbre de los niveles de agua, habrá que buscar el nivel mínimo del vaso o río, a fin de incluir los efectos benéficos de la sumersión. En los materiales gruesos como enrocamientos y gravas, el ángulo de fricción depende del nivel de confinamiento

o esfuerzo octaédrico. El comportamiento de estos taludes tiene similitud con el del talud cohesivo friccionante (Li y Flores-Berrones, 2008). Se deben evaluar los efectos de sumersión.

Las condiciones de la cimentación tienen importancia en los resultados de análisis por efectos de sumersión. Cuando la cimentación sea más firme que el material del talud, la sumersión afectará en mayor grado a éste. En general, la sumersión en el subsuelo de la cimentación influirá negativamente al talud. Se debe, en consecuencia, incluir explícitamente en el análisis el peso volumétrico sumergido hasta la profundidad de la cimentación donde se anticipa el cambio del nivel freático.

Conclusiones

La sumersión es una de las condiciones de carga que se debe considerar explícitamente en el análisis de estabilidad de taludes. Los resultados del presente estudio, junto con otras investigaciones recientes, muestran que el diseño de taludes podría resultar inseguro al ignorar la presencia de los efectos de sumersión. Los taludes granulares son los más vulnerables a dichos efectos, ya que los factores de seguridad sufren reducciones importantes con respecto a los usualmente estimados; los taludes puramente cohesivos son inertes a la afectación por la sumersión. Los taludes formados por materiales cohesivo friccionantes se encuentran en una situación intermedia, en la que la sumersión tendrá mayor influencia cuando el componente cohesivo del material sea menor. Las condiciones de la cimentación influyen en la variación de los factores de seguridad de los taludes en función de la sumersión. Las deficiencias de los métodos de diseño que se emplean actualmente en la práctica sin tomar en cuenta los efectos objeto del presente estudio pueden ser una de las causas por las cuales ocurren con frecuencia fallas de bordos y laderas de material granular.

Recibido: 04/08/10
Aprobado: 14/11/10

Referencias

- ARVIZU, G., DÁVILA, M., and ALEMÁN, J. *Landslide in Grijalva River, México. Abstract Paper No. 177-2. Joint Meeting of The Geological Society of America, Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Gulf Coast Association of Geological Societies with the Gulf Coast, Section of SEPM, Houston Texas, 2008.*
- BAKER, R., SHUKHA, R. and LESHCHINSKY, D. Stability of cohesionless partially submerged slopes. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* Vol. 29, 2005, pp. 1157-1170.
- DAWSON, E.M., ROTH, W.H., and DRESCHER, A. Slope stability analysis by strength reduction. *Geotechnique.* Vol. 49, No. 6, 1999, pp. 835-840.
- DUNCAN, J.M. and BUCHIGNANI, A.L. *An Engineering Manual for Slope Stability Studies.* Berkeley, USA: Department of Civil Engineering, University of California, March, 1975.
- DUNCAN, J.M. and WRIGHT, S.G. *Soil Strength and Slope Stability.* Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- FLORES-BERRONES, R. y GAYTÁN, I. Avances recientes en el diseño de filtros para presas de tierra y enrocamiento. *Ingeniería Hidráulica en México.* Vol. XX, núm. 2, abril-junio de 2005, pp. 79-94.
- GRIFFITHS, D.V. and LANE, P.A. Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique.* Vol. 49, No. 3, 1999, pp. 387-403.
- JANBU, N. *Slope Stability Computations.* Soil Mechanics and Foundation Engineering Report. Trondheim, Norway: The Technical University of Norway, 1968.
- LANE, P.A. and GRIFFITHS, D.V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions. *J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE.* Vol. 126, No. 5, 2000, pp. 351-355.
- LI, X. Finite element analysis of slope stability using a nonlinear failure criterion. *Computers & Geotechnics.* Vol. 34, No. 3, 2007a, pp. 127-136.
- LI, X. Análisis geomecánico. Capítulo 9. *Manual geotécnico para el diseño de presas pequeñas.* Bonola, I. y Jaime, P. (editores). Jutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2007b.
- LI, X. y FLORES-BERRONES, R. Análisis elastoplástico de estabildades estática y pseudoestática de cortinas de enrocamiento, *Ingeniería Hidráulica en México.* Vol. XXIII, núm. 1, enero-marzo de 2008, pp. 157-170.
- LI, X., RENDÓN, L. y ESPINOSA, J. Consideración de fuerzas de filtración en el análisis de estabilidad de taludes granulares. *Tecnología y Ciencias del Agua.* Vol. 1, núm. 3, julio-septiembre de 2010, pp. 89-107.

- MICHALOWSKI, R.L. Critical pool level and stability of slopes in granular soils. *Journal of Geotech. Geoenv. Engineering*. Vol. 135, No. 3, 2009a, pp. 444-448.
- MICHALOWSKI, R.L. Expanding collapse in partially submerged granular soil slopes. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 46, No. 12, 2009b, pp. 1371-1378.
- SEED, R.B. et al. *Investigation of the Performance of the New Orleans Flood Protection Systems in Hurricane Katrina on August 29, 2005. Final Report*. Independent Levee Investigation Team, 2005.
- VIRATJANDR, C. and MICHALOWSKI, R.L. Limit analysis of submerged slopes subjected to water drawdown. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 43, 2006, pp. 802-814.

Abstract

LI, X., RENDÓN-DÍAZ-MIRÓN, L.E., ESPINOZA-AYALA, J. & GONZÁLEZ, J.A. Evaluation of submergence effects on the stability of slopes. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. II, No. 4, October-December, 2011, pp. 149-165.

This work presents a numeric study of the effects of submergence on the stability of slopes. Submergence is a hydraulic condition under which water levels are the same outside and inside the slopes. Cases that have been studied show that safety factors change according to submergence levels. This phenomenon is observed even when the slopes are composed of granular materials that obey the linear Mohr-Coulomb law. The numerical analysis enables identifying the causes of said effect. The safety factors reach their maximum values for totally submerged slopes, both cohesive and granular. Minimum safety factors are not observed at zero submergence but rather at the intermediate submergence level. These minimum factors can be as low as 25% less than those computed at zero submergence, and in most of the cases studied they are between 20% and 50% of slope height. The maximum reduction in the safety factor and the submergence level at which it is presented depend on several variables, such as shearing resistance, the volumetric weight of soils, slope inclination and conditions of the slope's foundation. Without the consideration of submergence effects, safety factors can be considerably overestimated in many cases.

Keywords: slope, safety, stability, soil, dam, levee, embankment, submergence, phreatic level.

Dirección institucional de los autores

Dr. Xiangyue Li

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México
Teléfono: +52 (777) 3293 600, extensión 899
xli@tlaloc.imta.mx

Dr. Luis Emilio Rendón Díaz Mirón

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México
Teléfono: +52 (777) 3293 600, extensión 166
lerendon@tlaloc.imta.mx

Dra. Joselina Espinoza Ayala

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México
Teléfono: +52 (777) 3293 600, extensión 895
jespinoz@tlaloc.imta.mx

M.I. José Alfredo González

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México
Teléfono: +52 (777) 3293 600, extensión 896
jagonzal@tlaloc.imta.mx