

# Fuerzas de filtración y efectos de sumersión en taludes granulares de presas y bordos

X. Li,

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México



2011 Pan-Am CGS  
Geotechnical Conference

## RESUMEN:

Los taludes son componentes estructurales fundamentales de presas y bordos. La inestabilidad de los taludes impacta directamente en la seguridad y funcionamiento de estas estructuras hidráulicas. El objetivo de este trabajo es presentar algunos resultados analíticos que se han obtenido recientemente en los análisis de estabilidad de taludes cuyos materiales constituyentes son esencialmente granulares. En taludes granulares las fuerzas de filtración determinadas por considerar el nivel freático no son adecuadas y se debe llevar a cabo estudios de flujo de agua. El efecto de sumersión tiende a disminuir la estabilidad de los taludes puramente friccionantes y los estados más críticos del talud no se pueden determinar en un estudio de equilibrio límite usual.

## ABSTRACT:

Slopes are basic structural components of dams and levees. Slope instability will affect directly on safety and performance of these hydraulics works. The aim of this paper is to summarize some analytical results which have been recently obtained for granular slopes. It has been found that seepage forces cannot be taken into account properly in heterogeneous slopes when only phreatic level is considered. Submergence effect makes safety factors to be lower than those computed in common design.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los taludes son componentes estructurales fundamentales de presas y bordos. La inestabilidad de los taludes impacta directamente en la seguridad y funcionamiento de estas estructuras hidráulicas. Los análisis de taludes se llevan a cabo comúnmente por medio de los métodos de equilibrio límite de los cuales los mejor conocidos son de dovelas tales como Bishop, Janbu y Spencer. Estos procedimientos de cálculo suponen a priori superficies de falla y analizan el equilibrio de presumibles cuerpos libres y rígidos ante las acciones de fuerzas externas e internas. Como resultado se determinan los factores de seguridad que corresponden a las superficies de falla más críticas. A pesar de su amplio uso en la práctica, estos métodos sufren varias limitaciones. Una de ellas es la hipótesis que se formula en cuanto a superficies de falla. En muchas ocasiones no es fácil encontrar las superficies más críticas y de allí los factores de seguridad determinados no siempre son los valores mínimos. Se han desarrollado varias técnicas, pretendiendo a superar estas dificultades, entre las que se encuentran algunos métodos de búsqueda de las fallas más críticas.

Últimamente se han usado cada vez con mayor frecuencia los métodos de elementos finitos para determinar la estabilidad de los taludes.

Estos métodos son en particular atractivos en el análisis de taludes granulares. Para un material puramente friccionante con ángulo de fricción interna constante, las superficies de falla son someras y tienen poca similitud con círculos, espiral logarítmico o planos, superficies de falla usualmente estudiadas.

En los últimos años se han desarrollado varios trabajos (Li, 2007; Li y Flores-Berrones, 2008, Li et al 2010a y Li et al 2010b) con el enfoque de estudiar problemas de estabilidad de taludes por medio de las técnicas de elementos finitos. El objetivo del presente artículo es presentar un resumen de dos aspectos destacados de los resultados que se han obtenido en los taludes granulares: influencia de fuerzas de filtración y efectos de sumersión. Los detalles sobre estos estudios se pueden encontrar en los trabajos arriba citados y las referencias mencionadas en ellos.

## 2 FUERZAS DE FILTRACIÓN EN TALUDES HOMOGENEOS

En un talud granular, infinito, saturado y que está sujeto a fuerzas de filtración, el factor de seguridad se expresa como:

$$\frac{F}{\tan \phi'} = \frac{\gamma' \cos \beta - i \gamma_w \cos \theta}{\gamma' \sin \beta + i \gamma_w \sin \theta} \quad (1)$$

en que  $F$  es factor de seguridad,  $\gamma'$  es el peso volumétrico sumergido del material saturado del talud y  $\gamma_w$  es el peso volumétrico del agua;  $i$  es la magnitud del gradiente hidráulico,  $\beta$  es el ángulo de inclinación del talud con respecto al plano horizontal y  $\theta$  es el ángulo de inclinación del vector de fuerzas de filtración con respecto al normal del plano de la cara del talud. Para calcular el factor de seguridad en un determinado

talud, se conocen todos los parámetros mencionados menos la magnitud y dirección de las fuerzas de filtración. En la práctica se adaptan ciertas hipótesis sobre estas incógnitas para facilitar el cálculo. Si se supone que el flujo de agua sea paralelo a la cara del talud cuesta abajo ( $\theta = \pi/2$ ) y la magnitud del gradiente hidráulico se relacione con el cociente  $\frac{\gamma'}{\gamma}$  entre  $\gamma'$  y  $\gamma$ ,  $\text{sen } \theta$  el factor de seguridad se convierte en una expresión conocida:

$$\frac{F}{\tan \phi'} = \frac{\gamma'}{\gamma} \cot \beta \quad (2)$$

indicando que un talud saturado tiene aproximadamente la mitad del factor de seguridad que posee su contraparte seca. El campo de fuerzas de filtración en un talud de cualquiera geometría se debe determinar mediante el análisis de flujo de agua. Las fuerzas así determinadas se aplicarán como fuerzas de cuerpo en el problema de esfuerzo y deformación, usualmente planteado en el contexto de la mecánica del medio continuo y resuelto con el método de elementos finitos, obteniendo en consecuencia desplazamientos y esfuerzos inducidos por las fuerzas de filtración. De este mismo cálculo es igualmente posible determinar factores de seguridad si se adaptan los modelos elasto plásticos al suelo.

A fin de demostrar algunos resultados de estos análisis se grafican en la fig. 1(a) los vectores de desplazamientos incrementales correspondientes a las soluciones antes de la falla de un talud analizado. De acuerdo con el patrón de falla mostrado en 1(a), todos los desplazamientos se concentran en la cara del talud indicando una falla superficial con deslizamientos planos.

La dirección de los desplazamientos queda esencialmente horizontal con una magnitud uniformemente distribuida a lo largo de toda la cara del talud. Esta distribución uniforme se asemeja a la hipótesis de un talud infinito.

El patrón de las fuerzas de filtración determinado en el análisis del flujo de agua, se muestra en la fig. 1(b). El flujo subterráneo tiene su entrada en la corona del talud; sus salidas se sitúan en la mitad inferior de la cara de éste y en la superficie terrestre, más allá del pie del talud. Las fuerzas de filtración actúan, dentro del talud, como fuerzas de cuerpo desestabilizadoras cuya dirección y magnitud varían espacialmente. Las fuerzas en la cercanía de la corona del talud tienen direcciones hacia abajo con el máximo gradiente hidráulico; a la media altura del talud los vectores de filtración giran y vuelven a ser paralelos a la cara de éste; acercándose al pie del talud, las fuerzas de filtración se orientan hacia fuera, acomodándose casi en sentido horizontal.

Cuando las fuerzas de filtración se aplican al modelo elastoplástico, se obtiene el factor de seguridad comparable al valor calculado por medio del modelo del talud infinito. El patrón de desplazamientos incrementales afectado por el efecto de la filtración se muestra en la fig. 1(c). Se nota una considerable

diferencia entre los patrones de falla antes y después de la aplicación del campo de fuerzas de filtración.

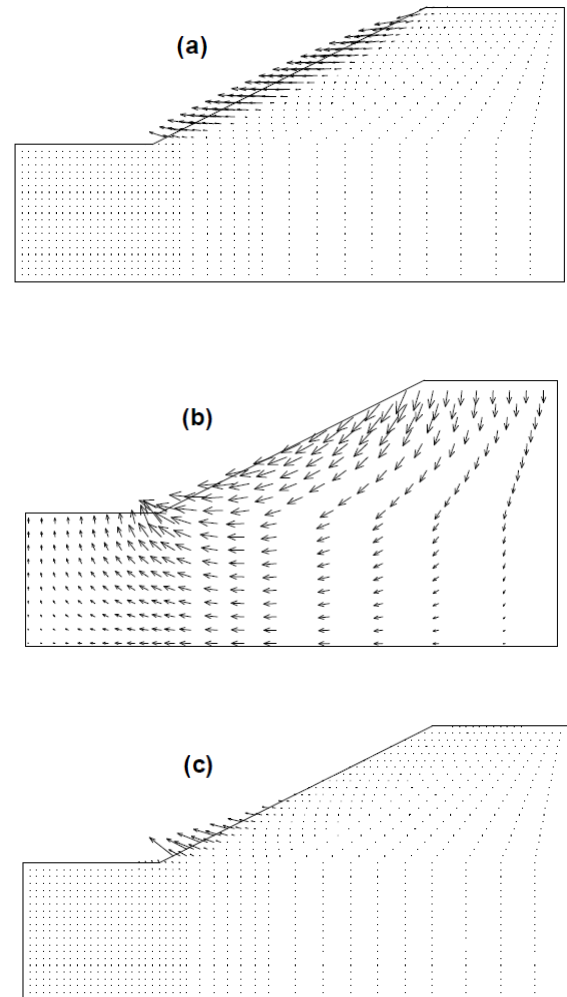


Figura 1. Patrones de flujos de filtración y mecanismos de falla del talud. a) Desplazamientos en un estado seco, b) Vectores de fuerzas de filtración, y c) Desplazamientos en un talud saturado.

Por el efecto de la filtración, los desplazamientos en la falla están concentrados solamente en la mitad inferior de la cara del talud. La magnitud de estos desplazamientos incrementales se aumenta linealmente desde el punto de la media altura hacia el pie del talud, donde se observa el máximo valor. La dirección de los desplazamientos también se modifica considerablemente, dando como resultado una orientación horizontal a la media altura del talud, punto desde donde los vectores de filtración giran hacia arriba. La zona de concentración de los desplazamientos coincide con la región en que las fuerzas de filtración se orientan hacia arriba. Estos resultados muestran que

aún en un talud homogéneo, las fuerzas de filtración no son uniformes en todo el talud, y su falla deja de ser global sino de carácter local.

### 3 FUERZAS DE FILTRACIÓN EN TALUDES HETEROGÉNEOS

Es bien conocido que los coeficientes de permeabilidad de las arenas, aun tienen texturas similares, pueden diferirse en tres o cuatro órdenes de magnitud. En taludes homogéneos, el coeficiente de permeabilidad no afecta el campo de fuerzas de filtración. En cambio, cuando está presente la heterogeneidad hidráulica, el contraste en permeabilidad en diferentes zonas del talud modifica el campo de filtración. Reid e Iverson (1992) evaluaron los efectos de las heterogeneidades hidráulicas en la estabilidad de los taludes. Estos autores estudiaron taludes que tienen insertado un estrato con mayor conductividad hidráulica. Se consideraron tres tipos de interfaz entre capas de arena, paralela a la cara del talud, horizontal y vertical. Después de analizar el contraste en conductividad hidráulica entre el estrato y el material colindante, encontraron que un contraste de cuatro órdenes de magnitud es suficiente para lograr que sea máximo el cambio en las fuerzas de filtración debido a las heterogeneidades hidráulicas. En el trabajo en mención no se realizó, sin embargo, un estudio directo de la estabilidad de taludes. Reid (1997) también estudió los taludes estratificados, aunque considerando solamente variaciones pequeñas en la conductividad hidráulica, menores de un orden de magnitud. Se estimaron los factores de seguridad usando el método de equilibrio límite. Este autor reportó una reducción significativa en los factores de seguridad para los taludes con interfaz vertical entre capas. En vista de estos resultados, se decidió estudiar casos similares a los descritos por este último autor.

Considérese un talud con una sola inclinación con los datos de  $\cot \beta = 2$  y  $\gamma' / \gamma = 0.55$ . Una interfaz divide el talud en dos partes, talud arriba y talud abajo. Dicha interfaz se cruza con la cara del talud a la media altura (fig. 2). Se consideran dos tipos de interfaz, horizontal y vertical. Los coeficientes de permeabilidad en cada lado de la interfaz son constantes y denotados por  $k_u$  y  $k_d$ , que representan el valor del lado talud arriba y el del lado talud abajo, respectivamente. Se consideraron valores de 0.1, 1, 2, 5 y 10 para el contraste en permeabilidad  $k_u / k_d$ . A pesar de la heterogeneidad hidráulica, el ángulo de fricción se considera constante para todo el talud. Los factores de seguridad normalizados se grafican en la fig. 2, como una función de los contrastes en permeabilidad para los dos tipos de interfaz. De acuerdo con el análisis del elemento finito efectuado para el talud homogéneo, el factor de seguridad normalizado resulta 0.95. Con respecto al talud homogéneo, los factores de seguridad se incrementan si la permeabilidad talud arriba se vuelve menor que la del talud abajo. En este caso, el gradiente

hidráulico hacia afuera en la mitad inferior de la cara del talud no queda tan alto como el que se registra en el talud homogéneo, y como el gradiente hidráulico en esta parte del talud controla la estabilidad global del talud, el factor de seguridad se incrementa. Sin embargo, los incrementos resultan tan pequeños que alcanzan apenas 4 y 10% para las interfaces horizontal y vertical, respectivamente, tomando en cuenta el contraste de  $k_u / k_d = 0.1$ . Cuando los valores  $k_u / k_d$  decrecen aún más, casi no se observa cambio alguno en los factores de seguridad.

Contrariamente, al ser mayor la permeabilidad del lado talud arriba, el decremento en factores de seguridad es mucho más notable, particularmente para los taludes con interfaz vertical entre capas. En este caso, los contrastes en permeabilidad  $k_u / k_d = 2, 5$  y 10 dan como resultado reducciones en factor de seguridad de 14, 45 y 69%, respectivamente. En cambio, al ser horizontal la interfaz entre capas, las reducciones llegan apenas a 1, 2 y 3%, respectivamente.

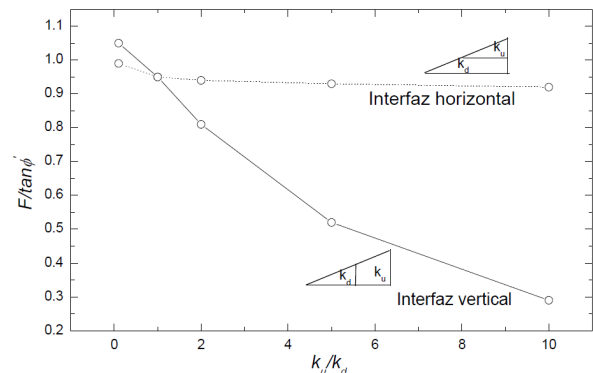


Figura 2. Factores de seguridad normalizados para diferentes taludes no homogéneos.

Los resultados del análisis de los taludes no homogéneos muestran claramente que el campo de fuerzas de filtración debe determinarse lo más preciso posible, porque dicho campo afecta considerablemente el cálculo de los factores de seguridad. En la mayoría de los estudios de estabilidad, usando los métodos de equilibrio límite, análisis límite o, incluso, elemento finito, se hace comúnmente la estimación de la distribución de presiones de poro con base exclusivamente en el perfil del nivel freático, sin resolver la ecuación del flujo estacionario. Si bien tal hipótesis se considera aceptable en los taludes homogéneos, está lejos de ser adecuada para los taludes no homogéneos. Para ilustrar mejor el defecto de esta hipótesis, considérese el siguiente ejemplo: si se usara la hipótesis comúnmente adoptada sobre la distribución de presiones de poro para los taludes no homogéneos analizados en este trabajo, cuyos resultados se muestran en la fig. 2, sólo un factor de seguridad (0.95) se obtendrá para todos los casos considerados, sin poder estimar las significativas variaciones en las condiciones de colapso que se observan.

#### 4 CONSIDERACIONES GENERALES DE LOS EFECTOS DE SUMERSIÓN

La sumersión parcial de los taludes tiene influencia en su estabilidad. Las fallas que ocurren durante el primer llenado en muchas presas constatan la importancia de este fenómeno. Es por ello, 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 no saturados cohesivos, 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 ante 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 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 puesto que sería difícil

En los taludes puramente cohesivos, si se emplean los mismos parámetros de resistencia al corte en los estratos sumergidos y no sumergidos, pero estos parámetros se determinan en el laboratorio bajo la condición de saturación, 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:

$$F_s = \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \quad (3)$$

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. El ángulo de fricción interna se denota como  $\phi$ , haciéndolo deliberadamente diferente que el ángulo de fricción interna efectivo, mencionado en párrafos anteriores, ya que los taludes analizados ahora no son totalmente saturados por la sumersión parcial.

#### 5 EFECTOS DE SUMERSIÓN EN TALUDES GRANULARES

En la figura 3, se presentan algunos resultados, mostrando conclusiones contrarias a los postulados 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  $\tan \phi$ .  $\alpha = \gamma_{sat} / \gamma_w$  es el cociente de peso volumétrico. Según el método convencional, el valor de  $F_s \tan \beta / \tan \phi$  es igual a 1.

Los factores  $F_s \tan \beta / \tan \phi$ , calculados por el presente estudio son menores que la unidad. La variación de dicho factor con el nivel de sumersión  $\eta$  (La sumersión total corresponde a que  $\eta=1$ ), muestra que cuando el nivel de sumersión se encuentre debajo de la base de la cimentación ( $\eta \leq 0.0$ ), el factor  $F_s \tan \beta / \tan \phi$  se mantiene constante con un valor de 0.97. Esta cifra es ligeramente menor que 1.0 y resulta independiente del parámetro  $\alpha$ .

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 la unidad.

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  $F_s \tan \beta / \tan \phi$  se mantiene prácticamente constante con un valor mínimo de 0.75 y 0.85 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  $\alpha$ . En el talud granular, el valor mínimo de factor de seguridad no se ve en una elevación bien definida sino 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.

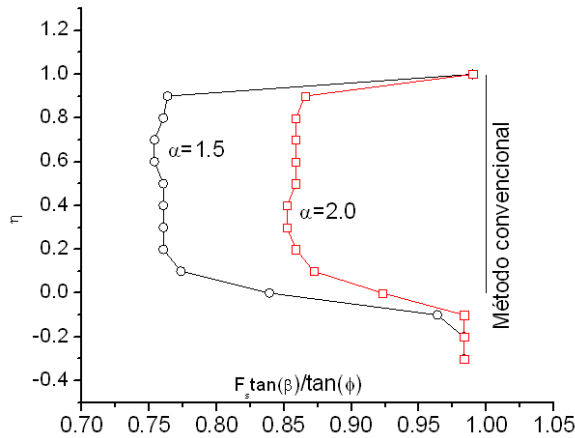


Figura 3. Factores de  $F_s \tan \beta / \tan \phi$  en taludes granulares

Para los diferentes valores de  $\alpha$  y  $\cot \beta$  se pueden calcular los valores mínimos del factor  $F_{s,min} \tan \beta / \tan \phi$  como los ilustrados en la fig. 4. En la misma, se agregan algunos puntos correspondientes a los resultados obtenidos de Baker y otros (2005) y Michalowski (2009). En general, los resultados por estos autores son menos conservadores que el presente estudio. En forma particular, Michalowski (2009) muestra, en el rango de  $\beta$  entre 25 y 45 grados y un parámetro de  $\alpha$  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 y otros (2005) analizaron dos taludes con diferentes inclinaciones y un parámetro de  $\alpha$  igual a 1.80. Sus resultados son más cercanos a los nuestros aunque con un ligero grado no conservador.

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 desfavorables 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.

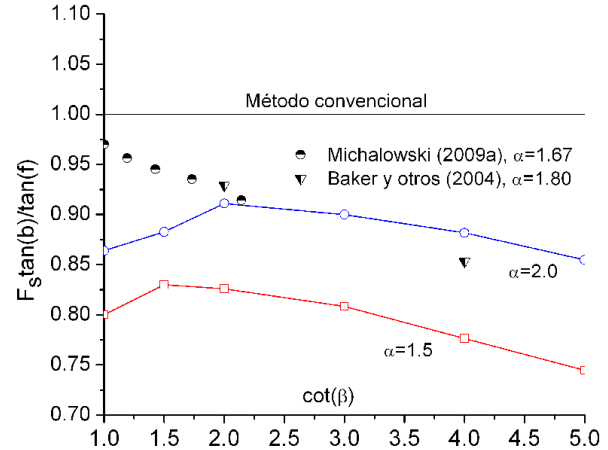


Figura 4. Factores de  $F_s \tan \beta / \tan \phi$  en taludes granulares para diferentes inclinaciones del talud

De acuerdo con la figura 4, 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 de. Los valores promedio para los rangos de inclinación que se investigan, son 0.8 y 0.88 para  $\alpha = 1.5$  y 2.0, respectivamente. Se puede por lo tanto 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  $\alpha$  entre 1.5 y 2.0.

## 6 MECANISMOS DE FALLA EN SUELOS GRANULARES

Baker y otros (2005) reportaron quizá el primer estudio descubriendo que los taludes de materiales granulares pudieran fallar con un factor de seguridad menor que  $\tan \phi / \tan \beta$ . Ellos 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 a 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. Michaloski (2009) expone que el punto de intersección formado por el nivel de sumersión y la cara del talud una línea en la cual se constituyen una serie de curvas espirales logarítmicas de las cuales la falla superficial resulta la más crítica. Existe un mecanismo de colapso local de pequeño tamaño alrededor de ese punto de intersección. La región que se localiza la falla local se mueve con el nivel de sumersión sin estar conectada con el comportamiento de 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 desde el punto de vista de la mecánica del medio continuo. En la figs. 5a y 5b 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 más 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 un factor de seguridad similar para cada nivel de sumersión intermedio. La falla es pequeña y somera pero más profunda que la facial.

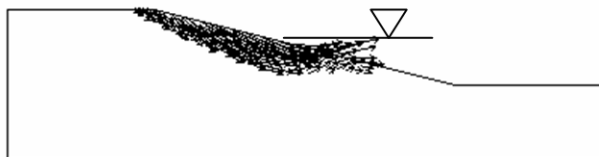


Figura 5a Vectores de desplazamiento en el caso de sumersión parcial a la media altura del talud.

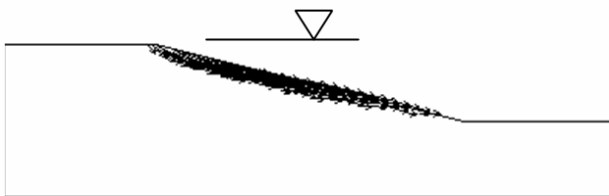


Figura 5b Vectores de desplazamiento en el caso de sumersión total.

Los materiales puramente cohesivos y puramente friccionante son dos extremos; los materiales intermedios son cohesivo friccionantes. En estos también se catalogan los materiales granulares con un ángulo de

fricción interna variable. Con una perspectiva más amplia hacia todos los tipos de material, se deduce que, por los efectos de sumersión, existan 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 puramente friccionante es completamente dominado por el mecanismo local.

Supongamos un material granular con un ángulo de fricción interna igual a 40 grados y peso volumétrico saturado de 20 kN/m<sup>3</sup>. 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 del valor admisible, 1.5. Con efectos de sumersión, empleando la ecuación (4), 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 este 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 (2009), motivo por el cual, cualquier indicio de falla o movimiento de partículas en los taludes se deben 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 sin suponer siempre la condición de sumersión nula, a fin de incluir los efectos benéficos de la sumersión.

## 7 CONCLUSIONES

Los resultados presentados muestran la relevancia de dos aspectos en el análisis de estabilidad de taludes granulares: fuerzas de filtración y sumersión. En los taludes no homogéneos, si las resistencias al corte cambian de una zona a otra dentro del talud, las superficies de falla potenciales resultan irregulares y de tamaños sumamente distintos, las cuales dificultan la búsqueda de la superficie más crítica. De igual manera, al prevalecer variaciones de permeabilidades entre capas o zonas de suelo, aunque en pequeñas proporciones, el patrón de flujo de agua se modifica, en algunos casos, significativamente, lo que impacta en la disminución de factores de seguridad. Por lo anterior, resulta necesario efectuar análisis de flujo de agua y potencial de falla en taludes no homogéneos, usando técnicas de análisis refinadas como la de elementos finitos. Con el afán de incluir fuerzas de filtración en los análisis de estabilidad de taludes es usual tomar en cuenta únicamente el nivel freático. Esta práctica no es recomendable ya que para el mismo nivel freático, los campos de flujo de agua y por lo tanto fuerzas de filtración se pueden diferir notablemente.

La sumersión es una de las condiciones de carga que se debe considerar explícitamente en el análisis de estabilidad de taludes. Se deben determinar los parámetros de resistencia al corte para condiciones de saturación en los estratos sumergibles y no sumergibles del talud. Aún con estos parámetros, el diseño actual no contempla escenarios críticos. Los resultados del presente estudio, junto con otras investigaciones recientes, muestran las condiciones críticas por el efecto de sumersión, que no están previstas en prácticas comunes.

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 negativa 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 deficiencias de los métodos de diseño que se emplean actualmente en la práctica sin tomar en cuenta los efectos del presente estudio pueden ser una de las

causas por las cuales ocurren con frecuencia fallas de bordos y laderas de material granular.

Los efectos de fuerzas de filtración en taludes no homogéneos se pueden determinar por un riguroso estudio de flujo de agua, en combinación con el análisis de esfuerzo y deformación o con el análisis de equilibrio límite. Los efectos de sumersión no serán fáciles de definirse en un estudio de equilibrio límite usual siendo éste formulado para determinar fallas globales y no locales; estas últimas determinantes en el estudio de la sumersión.

## 8 REFERENCIAS

- Baker, R., Shukha, R. y Leshchinsky, D. Stability of cohesionless partially submerged slopes. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* Vol. 29, 2005, pp. 1157-1170.
- Li, X. (2007) Finite element analysis of slope stability using a nonlinear failure criterion. *Computers and Geotechnics*, vol. 34, 127-136
- Li, X. y Flores-Berrones, R. (2008) Análisis elastoplástico de estabildades estática y pseudoestática de cortinas de enrocamiento. *Ingeniería hidráulica en México*, vol. XXIII, núm. 1, 157-170
- Li, X, Rendón, L. E, y Espinoza, M. J. (2010) Consideraciones de fuerzas de filtración en el análisis de estabilidad de taludes granulares, *Tecnología y Ciencias del Agua*, antes *Ingeniería hidráulica en México*, vol. 1, núm. 3, 89-107
- Li, X., Rendón, L. E., Espinoza, M. J. y González, J. A. (2010) Evaluación de efectos de sumersión en la estabilidad de taludes. *Tecnología y Ciencias del Agua*, antes *Ingeniería hidráulica en México*. (Aceptado con cambios)
- Michalowski, R. L. Critical pool level and stability of slopes in granular soils." *Journal of Geotech. Geoenv. Engineering*, 2009a, Vol. 135, No. 3, 444-448
- Reid, M. E., 1997. Slope instability caused by small variations in hydraulic conductivity, *J. Geotechnical Eng.*, ASCE, 123, 8, 717-725.
- Reid, M., e Iverson, R. M., 1992. Gravity-driven groundwater flow and slope failure potential 2. Effects of slope morphology, material properties, and hydraulic heterogeneity, *Water Resources Research*, 28, 3, 939-950.