

# Ábacos para el cálculo de estabilidad en escombreras de pizarra y granito

M. Paz Freire, J. Taboada Castro, T. Rivas Brea, E. Giráldez Pérez y M. Araújo Fernández

Dpto. Ingeniería de los Recursos Naturales y Medio Ambiente. E.T.S.I. de Minas de la Universidad de Vigo.  
mpaz.minas@gmail.com, jtaboada@uvigo.es, trivas@uvigo.es, egiraldez@uvigo.es, maraujo@uvigo.es

## RESUMEN

Uno de los principales inconvenientes de la actividad extractiva de pizarra y granito ornamental es la inevitable generación de estériles, los cuales deben ser almacenados en escombrera bajo unas condiciones adecuadas de integración, seguridad y estabilidad. Es en este último punto sobre el que se centra el trabajo que aquí se presenta. Para el estudio del riesgo de inestabilidades dentro de las escombreras se analiza el comportamiento ante rotura circular de un gran número de modelos de escombrera en función del grado de compactación del material vertido, la presión ejercida por el agua, las características del propio material y, por supuesto, la geometría del depósito. El resultado del estudio es la obtención de una base de datos de más de 300 coeficientes de seguridad, los cuales son empleados para la creación de una serie de ábacos que permiten determinar el riesgo de deslizamiento existente en cualquier escombrera de granito o pizarra que se plantee. Por tanto, los ábacos se presentan como una herramienta de manejo rápido y sencillo adecuada para estudios preliminares de nuevas estructuras o bien en análisis periódicos de construcciones ya existentes o sobre las que se vayan a realizar modificaciones significativas.

Palabras clave: ábaco, escombrera, estabilidad, granito, pizarra

## ***Nomograms to calculate stability in slate and granite spoil heaps***

### ABSTRACT

*One of the main problems involved in the mining of slate and ornamental granite is the unavoidable generation of waste rock, which must be stored in spoil heaps under suitably integrated, secure and stable conditions. Our work here focuses on this last point. To study the risk of instability within spoil heaps we have analysed the performance of a wide number of models with regard to circular slope failure, taking into account the different degrees of compactness of the material, the characteristics of the material itself, the effect of water pressure and the geometry of the heap. From this analysis we obtained more than 300 safety criteria, which were then used to draw up a series of nomograms to allow us to determine the risk of sliding in any granite or slate spoil heap. Thus, nomograms prove themselves to be suitable, quick, easy-to-use tools for preliminary studies of new structures, for periodic analyses of existing structures and to investigate structures that are due to be modified.*

*Key words: granite, nomogram, slate, spoil heaps, stability*

## Introducción

En la actualidad, y como viene ocurriendo a lo largo de la historia, la actividad humana está asociada irremediablemente a la generación de residuos que en caso de no poder ser eliminados o reutilizados deben ser almacenados bajo unas condiciones adecuadas. Entre estas actividades se encuentra la industria extractiva minera cuya existencia es indispensable hoy en día y, además, se puede asegurar que lo seguirá siendo por largo tiempo.

La minería lleva ligada inevitablemente la producción de importantes volúmenes de material estéril originados en las diferentes fases de explotación y tratamiento. Además, es un hecho que el ingente

aumento del consumo mundial de minerales y el acelerado agotamiento de los yacimientos de mayor calidad y tamaño está llevando, progresivamente, a una explotación de depósitos de leyes cada vez más bajas. Esto está haciendo que los volúmenes de estériles generados por la actividad extractiva se incrementen cada vez más, lo que aumenta la importancia de gestionar dichos residuos de una forma adecuada y rigurosa. Por ello, es obligatorio que estos estériles se almacenen en las escombreras, depósitos de residuos, balsas o presas de acuerdo con un proyecto que estudie tanto su seguridad temporal como definitiva (Real Decreto 863/1985).

Los colapsos de balsas mineras en ocasiones han originado importantes catástrofes medioambientales

como son los casos de la mina Aznalcóllar en Andalucía, o más recientemente en Ajka (Hungría). En cuanto a las escombreras, los daños de una pérdida de estabilidad no han llegado a ser nunca tan grandes como en los dos casos mencionados. Esto se justifica por la relativamente poca movilidad de los estériles sólidos de las escombreras frente a los residuos líquidos almacenados en las balsas, los cuales se pueden llegar a extender kilómetros. No obstante, no se deben menospreciar las consecuencias de un deslizamiento en una escombrera, ya que podrían ocasionar pérdidas humanas, daños a infraestructuras y/o problemas medioambientales significativos. Así pues, es imprescindible la labor de asegurar la estabilidad continua de dichas estructuras ajustándose a las variaciones de equilibrio que se producen con el tiempo.

En Galicia, prácticamente todas las escombreras son originadas a causa de las explotaciones de pizarra y granito ornamental, ambas industrias de gran prestigio a nivel mundial.

En el caso de la pizarra el rendimiento en la obtención del producto ronda un escaso 5% sobre el material extraído, siendo por tanto el 95% restante material que va directamente a escombrera. Estos considerables volúmenes de estéril tienen como resultado grandes estructuras de almacenamiento. Por otro lado, los rendimientos en el granito son bastante más altos (10-20%) lo que, unido a la gran salida en el mercado del granito como árido, origina depósitos de residuos de dimensiones menores a los de pizarra.

## Objetivos

El objetivo final de los análisis de estabilidad en las escombreras es, en esencia, el cálculo del coeficiente de seguridad de la estructura, que no es más que la probabilidad de que se generen inestabilidades en los taludes de la misma. Actualmente existen numerosos métodos y estudios para determinar la estabilidad de los taludes de formas más o menos precisas, y que se basan en la ejecución de numerosos estudios in situ, de laboratorio o simulaciones que ayudarán a prevenir los posibles fallos por colapso (Fredlund y Krahn, 1976; Ramírez y Alejano, 2007).

El presente trabajo tiene como objeto proporcionar al sector un nuevo método de estimación de coeficientes de seguridad de una forma rápida y sencilla para el caso particular de las escombreras de granito y pizarra. Para ello se crean un total de 12 ábacos de estabilidad (6 para granito y otros 6 para pizarra) que dependen de la posición del nivel freático y la com-

pactación del material almacenado. Por medio de estos ábacos se proporcionará un coeficiente de seguridad preliminar para la escombrera de estudio en función de su altura e inclinación.

## Metodología

Los deslizamientos son los movimientos más comunes que se producen en los taludes. Estas masas de material se desplazan por acción de la gravedad siguiendo una determinada superficie. Los mecanismos de deslizamiento más comunes en los taludes son la rotura plana, en cuña, por vuelco, siguiendo discontinuidades paralelas al talud, por rotura circular o por una rotura compleja formada por varias de las anteriores (Hoek y Bray, 1974; Alejano *et al.*, 2010). Para el caso de las escombreras, donde el material está disgregado y se aproxima más a un suelo o a un macizo rocoso de muy mala calidad que a un talud rocoso sano, entre los cinco mecanismos de rotura anteriormente citados, el fenómeno de inestabilidad que se presenta de una forma más común es la rotura circular. Este tipo de deslizamientos, que ha sido descrito detalladamente por Varnes (1974), se presenta siguiendo una trayectoria circular dentro de la escombrera pudiendo llegar a afectar a toda la estructura o bien ser de menor importancia afectando a una única sección del talud. Además, para este tipo de estructuras es común considerar que no se producirá la rotura circular por la base del talud de la escombrera por ser el terreno donde se ubica la escombrera de mejor comportamiento y mayor estabilidad que el propio estéril.

La estabilidad de la escombrera se puede ver alterada por diferentes factores que pueden actuar separadamente o de forma conjunta (Chen y Shao, 1988). Entre los más importantes y que se han tenido en cuenta para la ejecución del presente trabajo se encuentran: el tipo de material vertido, la geometría de la escombrera, el grado de compactación del material y la posición del nivel freático en el terreno. La combinación de varios de estos factores en condiciones desfavorables puede llevar a la escombrera a la situación de inestabilidad.

## Material vertido

Las propiedades del material vertido en la escombrera tienen gran influencia sobre la estabilidad de la estructura, por lo que debe mantenerse un control adecuado sobre los vertidos, conociendo siempre la procedencia de los mismos y sus principales caracte-

rísticas. Sin embargo, esto no resulta sencillo ya que existe una amplia variedad de escombros de mina, incluso dentro de la misma explotación.

En el escenario de estudio que se plantea en este trabajo se supone un vertido en la escombrera totalmente homogéneo, donde no se han realizado en ningún momento vertidos mixtos.

La existencia de zonas en el interior de la estructura con propiedades diferentes al estéril mayoritario vertido es una importante fuente de incertidumbre para el estudio de la estabilidad por crear zonas de difícil control para el responsable de la tarea. En estos casos es una práctica recomendable obtener coeficientes de seguridad superiores a los valores límites que se tomarían bajo condiciones normales.

Bajo la suposición de homogeneidad del estéril se estudia su comportamiento ante la resistencia al corte para lo que se ha decidido seguir el criterio de rotura Mohr-Coulomb (Coulomb, 1776; Mohr, 1900). Dicha caracterización va a permitir determinar la resistencia interna del material ante las tensiones a las que se verá sometido durante su vida en la escombrera a partir de los factores de fricción, cohesión y peso específico.

Para la determinación del ángulo de fricción se ha optado por emplear el método de Koerner (1970), procedimiento que obliga a asimilar al material de la escombrera como un suelo no cohesivo. La aplicación de este método permite incluir en el proceso de determinación de la inestabilidad parámetros correspondientes a los materiales tales como: el tamaño y forma de las partículas, la variedad granulométrica, su estado de compactación y densidad y el tipo de material.

Por otro lado, los valores para los parámetros de cohesión y peso específico necesarios en las modelizaciones se han obtenido a través de la bibliografía correspondiente (Dan, 2002; Hunt, 1984; ITGE y EPTISA, 1987), así como de la experiencia de los expertos, extrayéndose así valores representativos para cada uno de los casos de estudio.

Dada la falta de exactitud concerniente al material vertido en la escombrera, ya sea por la incertidumbre del material vertido o la heterogeneidad real de las propiedades existente dentro de la estructura, se ha tomado en este caso una postura conservadora para la determinación de los tres valores y así adaptarse a las peores condiciones posibles.

### **Geometría de la escombrera**

El tipo de escombrera puede ser de vaguada, de ladera, divisoria, de corta o bien de relleno de corta. La

elección de la tipología de escombrera dependerá, principalmente, del terreno disponible para la implantación del depósito de estéril, así como su naturaleza. Así mismo, la altura de dicha escombrera puede variar entre cientos de metros a escombreras pequeñas de altura inferior a los 15 metros. En este aspecto son de especial mención las escombreras de pizarra existentes en la zona de Valdeorras donde llegan a alcanzar más de un centenar de metros de altura. Estas grandes estructuras se encuentran en las laderas de las montañas donde tiene lugar la explotación. El material es vertido libremente por la ladera, lo que origina que el ángulo final de talud esté en torno al ángulo de equilibrio para el material. Siendo esta la situación típica de este tipo de escombreras y ante la tarea de abarcar el mayor número de casos reales posibles, en la geometría considerada para el trabajo se fija una altura mínima para la escombrera de pizarra de 10 metros y una altura máxima de 200 metros, y en ningún caso la inclinación será menor de 30° ni superior a 40°.

En el caso de las escombreras de granito, como ya se comentó, es normal que éstas sean de menor tamaño que los depósitos de pizarra, por lo que el rango de alturas estudiado va, en este caso, entre los 5 y los 80 metros. En cuanto al ángulo de inclinación del talud, los estériles de granito pueden aguantar ángulos más acusados que la pizarra, en cuyo caso la estabilidad viene limitada por su forma planar. Por consiguiente, en el estudio se han considerado para la escombrera de granito inclinaciones superiores a 30° e inferiores a 50°.

### **Grado de compactación**

Son el método constructivo y las propiedades del estéril los que van a determinar en gran medida el comportamiento del material ante la consolidación. Hay terrenos que presentan una tendencia más o menos acentuada a la compresión, dependiendo de varios factores. El grado de compactación es un valor que no va a permanecer constante con el tiempo, sino que a medida que aumenta la vida de la escombrera las partículas se reorientan ya sea por el propio asentamiento del material, su fracturación, su contenido en humedad o por el aumento de la presión al ir creciendo la escombrera en altura.

Dado que el nivel de compactación es una variable difícil de precisar con exactitud, se simplifica la interpretación para el usuario considerando únicamente tres estados posibles de compactación para el estéril: material suelto, material compacto y un estado intermedio de compactación.

### Nivel freático

La presencia de agua en el interior de la estructura favorece al deslizamiento del talud de la escombrera de forma muy evidente como se argumenta en el trabajo de Hoek y Bray (1974).

Son muchos los factores que influyen en la posición del nivel freático dentro de la escombrera. Por un lado, el grado de compactación es un parámetro fuertemente relacionado con el drenaje de la escombrera. La compactación del material cierra los canales hidráulicos de recorrido del agua, la circulación se ve dificultada y aumenta, por consiguiente, la altura del nivel freático en la estructura. No obstante, la granulometría del material que compone la escombrera también es un factor fundamental sobre la permeabilidad de la misma. En las escombreras el estéril se caracteriza por una granulometría variable pudiéndose encontrar incluso grandes bloques entre ellos. A razón de esta distribución granulométrica típica de las escombreras y al tratarse así mismo de un material disgregado, la conductividad hidráulica es por norma general bastante alta, lo que impide la saturación completa del terreno.

Si se diera el caso de que el material de escombrera fuera relativamente fino y muy compacto, el drenaje debería verse forzado a la adaptación de un sistema que evite la acumulación de agua en el cuerpo de la escombrera, ya sea con drenajes superficiales o profundos (Suárez, 1998). Si no se procediera de esta forma la probabilidad de deslizamientos sería, por norma general, inaceptable.

Por lo anteriormente expuesto, ya sea en escombreras con drenaje natural o forzado, nunca se llegará a dar en una escombrera con el talud saturado donde la línea de nivel freático coincide con el perfil superficial del terreno. Bajo esta observación para el presente trabajo se han definido únicamente dos posibles estados de la escombrera: completamente seca y con cierta húmeda. A causa de la limitación de los estudios de laboratorio e in situ se hace necesaria la estimación aproximada del perfil del nivel de agua en el terreno y para definir estos dos estados se ha acudido al trabajo de Hoek y Bray (1974) donde, para sus ábacos se definen 5 posiciones de la línea de saturación yendo desde un terreno seco a un terreno saturado. Por lo tanto, nuestro caso seco se corresponde con una ausencia total de agua en la escombrera, lo que equivaldría al caso 1 de los ábacos de Hoek y Bray. Por otro lado, dado el buen drenaje de las escombreras y a partir de la experiencia de los expertos, se concluye que no es normal que se dé la circunstancia de que el nivel freático llegue a estar a una altura similar al caso 3 y por consiguiente tam-

poco al 4 y 5. Por ello para el estado húmedo se ha considerado el caso correspondiente al ábaco 2 de Hoek y Bray, que se aproxima más a la realidad en estas escombreras, donde el nivel freático afloraría en la superficie horizontal de la escombrera a una distancia de 8 veces la altura de la misma medida desde el pie del talud.

En resumen, variaciones en los anteriores factores pueden desencadenar los fenómenos de inestabilidad de la escombrera. Además, se conoce una clara relación entre los diferentes factores, lo cual debe tenerse en cuenta a la hora de estudiar posibles modificaciones en la estructura.

En la tabla 1 se recogen los valores fijados para los parámetros generadores de inestabilidades que se han utilizado para la creación de los ábacos.

Una vez definidos los parámetros iniciales básicos

SITUACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO	Nº DE ÁBACO
Talud seco	1
Afloramiento del NF a 8-H en la horizontal desde el pie del talud	2
Afloramiento del NF a 4-H en la horizontal desde el pie del talud	3
Afloramiento del NF a 2-H en la horizontal desde el pie del talud	4
Talud saturado	5

Figura 1. Posiciones del nivel freático para la selección de los ábacos correspondientes de Hoek y Bray (1974), donde H es la altura del talud. Cortesía IMM

Figure 1. Water table positions for the selection of the corresponding Hoek-Bray nomograms (1974), where H is the height of slope. Courtesy of IMM

PARÁMETRO	ESCOBRERA DE PIZARRA	ESCOBRERAS DE GRANITO
ALTURA (metros)	10, 25, 50, 100, 150 y 200	5, 10, 20, 35, 50, 65 y 80
INCLINACIÓN DE TALUD (°)	30, 33, 36 y 40	30, 35, 40 y 50
COMPACTACIÓN	Suelto Compactación media Compacto	Suelto Compactación media Compacto
CONTENIDO DE AGUA	Seco Húmedo	Seco Húmedo

Tabla 1. Modelos de estudio  
Table 1. Study models

para los procesos de modelización se pasa a la siguiente fase de trabajo consistente en la determinación de los coeficientes de seguridad para los diferentes modelos planteados. En este aspecto, existe una gran variedad de métodos aplicables para el análisis de inestabilidades de taludes. Una de estas alternativas son los métodos de equilibrio límite y, entre los utilizados con mayor asiduidad, se ha optado por emplear el método no exacto de Bishop simplificado (Bishop, 1955), el cual se basa en el estudio de las condiciones estáticas de equilibrio para las fajas que constituyen el modelo de análisis. En el caso de que las fuerzas resistentes al deslizamiento sean superadas por las fuerzas que favorecen el movimiento la masa de material pasa a ser inestable, situación que equivaldría a un coeficiente de seguridad inferior a 1. Si bien el método de Bishop es aproximado no difiere más del 5% del valor exacto, lo que lo convierte en un buen método de análisis (Duncan y Wright, 1980).

Dada la existencia de programas informáticos especializados en la resolución de problemas de métodos de fajas, se ha seguido esta vía para la obtención de los factores de seguridad. Entre los software existentes en el mercado se ha optado por trabajar con SLIDE, el cual está especializado en el estudio de rotura circular de taludes (Rocscience, 2009). Gracias al uso de este programa se analizan un gran número de modelos de escombreras donde se tienen en cuenta tanto las propiedades de los materiales como la presión ejercida por el agua sobre el talud y su geometría.

A continuación, ya creada la base de datos de factores de seguridad para las escombreras de pizarra y granito se realizan los ábacos de análisis de estabilidad mediante procesos de interpolación con el programa SURFER (Golden Software, 2010). De esta

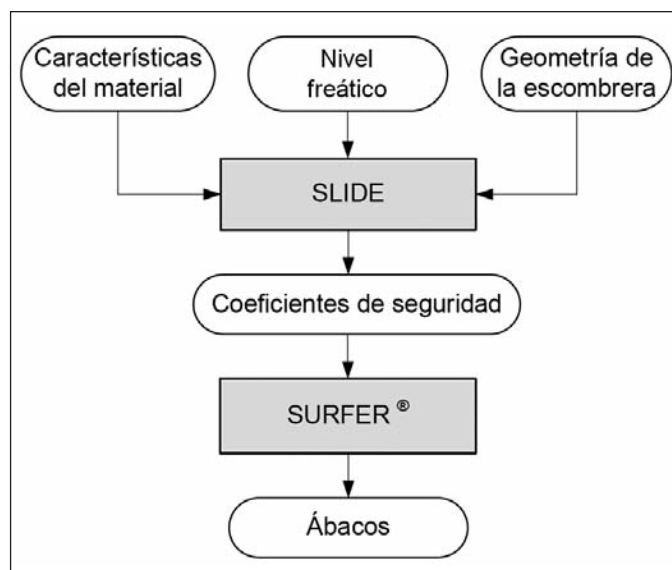


Figura 2. Esquema de la metodología de trabajo  
Figure 2. Scheme of working methods

forma se conseguirá una herramienta de análisis del riesgo ante deslizamientos para cualquier escombrera que se plantee.

A modo de resumen se presenta en la figura 2 un esquema de la metodología desarrollada para alcanzar el objetivo de este trabajo.

## Resultados

En primer lugar, la aplicación de la fórmula de Koerner (1970), así como la investigación bibliográfica (Dan, 2002; Hunt, 1984; ITGE y EPTISA, 1987), han llevado a la obtención de los resultados que se recogen en las tablas 2 y 3 referentes a los valores de caracterización de los materiales de escombrera para el caso de la pizarra y el granito separadamente y en función de los estados de compactación definidos para el estéril.

Analizando brevemente los datos de las tablas la principal diferencia entre las escombreras de material de pizarra y las de granito se encuentra en el ángulo de fricción, lo cual se debe a la naturaleza lajosa de la pizarra. En cuanto al peso específico y la cohesión se han tomado valores genéricos para los dos materiales por tener ambos una densidad parecida y tratarse de acumulaciones de bloques de estéril sin apenas finos y con cohesiones bajas.

Una vez determinados los valores que caracterizan el material y a partir de la geometría de la escombrera, el grado de compactación y la humedad del terre-

NIVEL DE COMPACTACIÓN	PESO ESPECÍFICO	COHESIÓN	ÁNGULO DE FRICCIÓN
Compacto	22 kN/m <sup>3</sup>	20 kN/m <sup>2</sup>	40°
Medio	21 kN/m <sup>3</sup>	10 kN/m <sup>2</sup>	38°
Suelto	20 kN/m <sup>3</sup>	5 kN/m <sup>2</sup>	36°

NIVEL DE COMPACTACIÓN	PESO ESPECÍFICO	COHESIÓN	ÁNGULO DE FRICCIÓN
Compacto	22 kN/m <sup>3</sup>	20 kN/m <sup>2</sup>	38°
Medio	21 kN/m <sup>3</sup>	10 kN/m <sup>2</sup>	36°
Suelto	20 kN/m <sup>3</sup>	5 kN/m <sup>2</sup>	33°

Tabla 2. Valores de peso específico, cohesión y ángulo de fricción para el granito (Dan, 2002; Hunt, 1984; ITGE y EPTISA, 1987)

Table 2. Values of specific weight, cohesion and friction angle for granite (Dan, 2002; Hunt, 1984; ITGE and EPTISA, 1987)

Tabla 3. Valores de peso específico, cohesión y ángulo de fricción para la pizarra (Dan, 2002; Hunt, 1984; ITGE y EPTISA, 1987)

Table 3. Values of specific weight, cohesion and angle of friction for slate (Dan, 2002; Hunt, 1984; ITGE and EPTISA, 1987)

no, según los valores resumidos en la tabla 1, se realizan las modelizaciones en ordenador. Se obtienen de este modo un total de 144 factores de seguridad para la escombrera de pizarra y otros 168 para el caso de la estructura de granito.

En la figura 3 se recogen un par de ejemplos a modo ilustrativo de los resultados alcanzados en la fase de determinación de los coeficientes de seguridad de los taludes.

Finalmente, en las figuras 4 y 5 se exponen los ábacos resultantes de la interpolación de los más de 300 valores calculados para tal fin.

## Discusión

De los cálculos realizados y de los mismos ábacos se puede extraer, como era de esperar, la importancia de

la geometría para asegurar la estabilidad de las estructuras de almacenamiento de residuos sólidos mineros. Así pues, los casos más desfavorables se dan, dentro de los dos depósitos estudiados, para las máximas alturas e inclinaciones de talud de la escombrera. Esto viene a demostrar que cuanto mayor sea la altura del depósito más tendido debe ser el talud general para mantener las condiciones de estabilidad y evitar los riesgos de deslizamiento del material.

De modo similar, los resultados de los coeficientes de seguridad corroboran la clara influencia desfavorable de la presencia de agua en la estructura y de la falta de compactación del material que la forma.

Interpretaciones más detalladas sobre los nomogramas nos permiten estimar los valores límites de estabilidad para diseños particulares. A continuación se presentan un par de ejemplos.

En el caso de una escombrera de granito con una

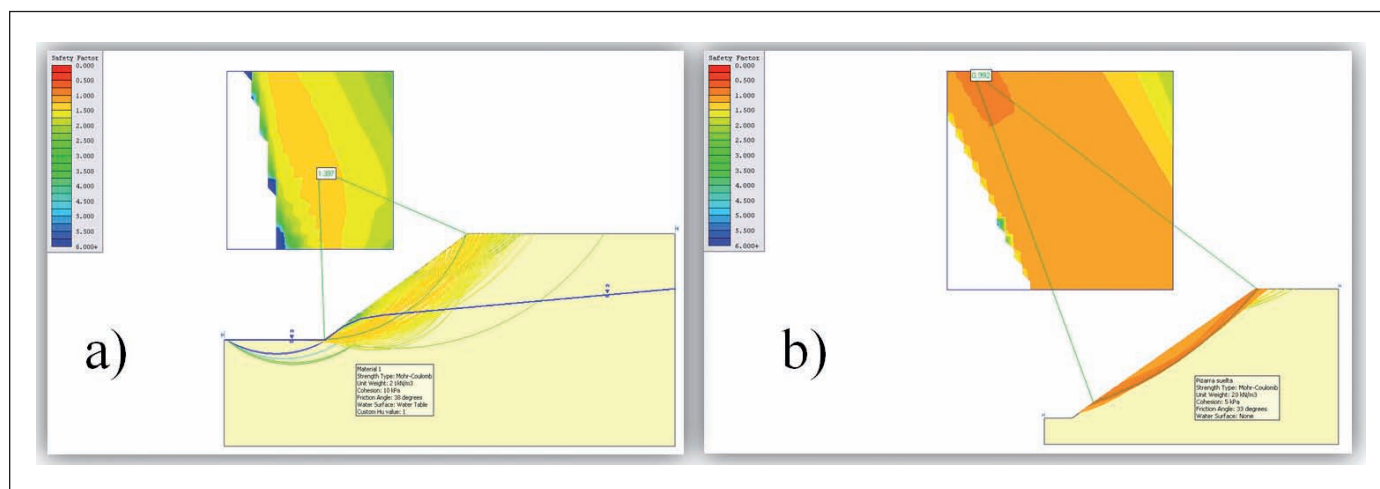


Figura 3. Ejemplos de resultados con SLIDE ante rotura circular. a) Escombrera de granito medianamente compacto y húmedo, con una altura de 20 m y 35° de inclinación general de talud, el coeficiente de seguridad es de 1.397. b) Escombrera de pizarra con el material suelto y seco y una geometría de 100 metros de altura y 36° de ángulo de talud, el coeficiente de seguridad es de 0.992

Figure 3. Examples of SLIDE results against circular slope failure: a) 20-metre-high, moderately compact, granite spoil heap with a general slope inclination of 35°; the safety coefficient is one of 1.397; b) 100-meter-high, loose, dry slate spoil heap with a slope inclination of 36°; the safety coefficient is one of 0.992

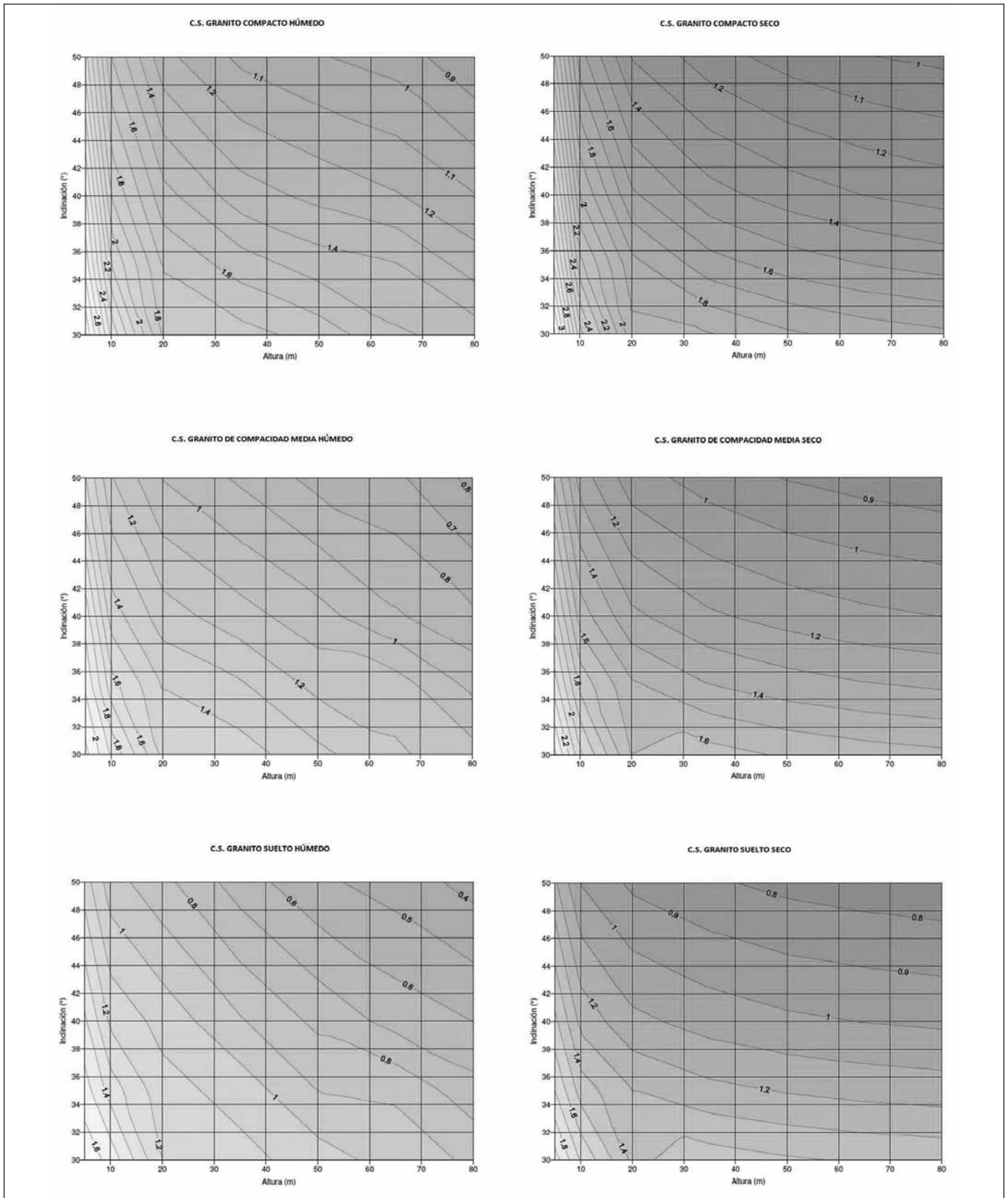


Figura 4. Ábacos para la obtención de coeficientes de seguridad en escombreras de granito  
 Figure 4. Nomograms to obtain safety coefficients in granite spoil heaps

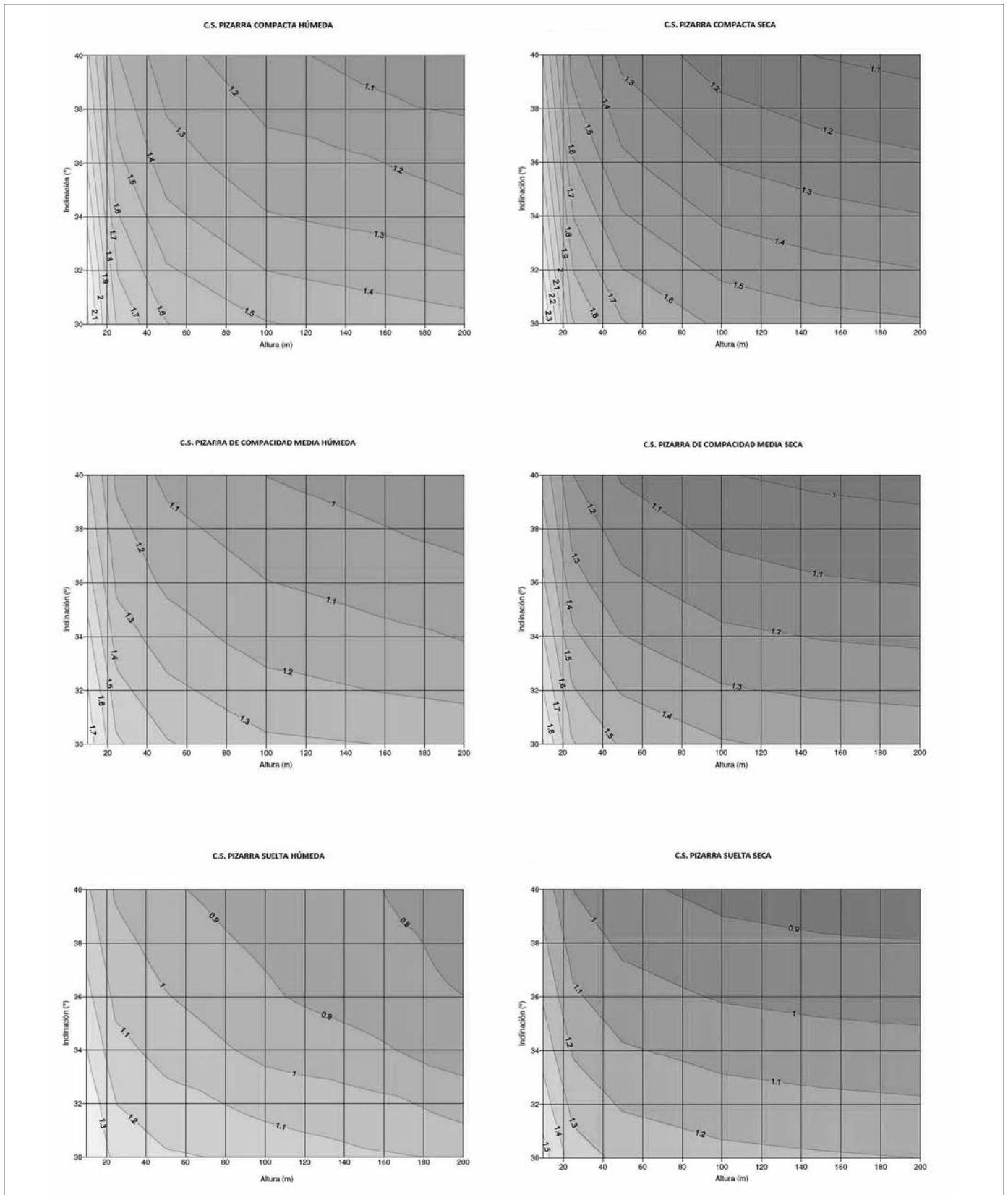


Figura 5. Ábacos para la obtención de coeficientes de seguridad en escombreras de pizarra  
 Figure 5. Nomograms to obtain safety coefficients in slate spoil heaps



altura de 40 metros y 40° de inclinación general de talud, para las condiciones más desfavorables posibles (humedad en el terreno y material suelto) el coeficiente de seguridad aproximado, obtenido con el ábaco correspondiente, es de 0.7. Bajo estas condiciones la escombrera sería claramente inestable. En el caso de que el terreno esté seco la estabilidad todavía sería algo precaria, si bien el CS asciende a 1.05. Si variamos la compactación del material de escombrera, ya se puede considerar la estructura estable, siendo los coeficientes 1.32 para el caso de material compacto húmedo y 1.42 para material compacto seco.

Para el caso de una escombrera de pizarra con un ángulo de talud de 35° y una altura de 100 metros el ábaco más desfavorable (pizarra húmeda suelta) proyecta un coeficiente de seguridad igual a 0.95. Si se elimina el agua de la ecuación la estabilidad aumentaría hasta el valor 1.03. Para el caso de pizarra compacta húmeda el valor es 1.27, mientras que para la pizarra compacta seca se da el caso más favorable siendo el CS de 1.35.

En cuanto al valor límite del coeficiente de seguridad de la escombrera, cuando este dato es inferior a 1 es probable que se den fenómenos de inestabilidad, o formulado de otro modo, el riesgo de deslizamiento es intolerable. No obstante, el valor límite de dicho factor dependerá según el caso concreto de estudio. La confianza que se tengan en los datos y su interpretación, la exactitud de los análisis, el método de construcción o los riesgos inherentes a un colapso de la escombrera serán los principales parámetros que el usuario debe tener en cuenta para fijar el factor de seguridad mínimo del depósito en cuestión (Ayala y Rodríguez, 1986; Jiménez *et al.*, 1981). En este caso en particular, los resultados de los coeficientes de seguridad empleados para la creación de los ábacos se han realizado según unas condiciones desfavorables para suplir las incertidumbres y la generalidad de los trabajos en los escenarios planteados, por lo que los resultados obtenidos del uso de los ábacos son conservadores manteniéndose siempre del lado de la seguridad.

## Conclusiones

A pesar de ser un tema bastante estudiado no cesan los trabajos cuyo objetivo persigue asegurar la estabilidad de cualquier tipo de talud (e.g. Alejano *et al.*, 2001; Bjerrum, 1967; Sarma, 1979) al que se suma el presente trabajo.

El enfoque dado en esta investigación se centra en el desarrollo de una serie de ábacos de estabilidad

cuya finalidad es la de diseñar una escombrera que alcance los coeficientes de seguridad mínimos para asegurar la estabilidad para cada caso en particular. Su aplicación como primer paso en la fase de diseño permite acotar las geometrías adecuadas según el grado de compactación, de humedad y el tipo de material (pizarra o granito). Por otro lado, no hay que olvidar que con el paso del tiempo los materiales depositados en la escombrera sufren alteraciones (ya sea por compactación, fracturación, meteorización o variación de la cantidad de agua) por lo que es necesaria una revisión periódica para cuantificar el riesgo de colapso de las estructuras ya existentes. Otro campo de aplicación lo encontramos en la fase de modificación de escombreras en uso, cuya estabilidad puede romperse al realizar modificaciones sobre la misma, ya sea aumentando su altura, inclinación u otros factores que puedan propiciar el deslizamiento.

Es necesario mencionar que los trabajos indispensables para la obtención de los coeficientes de seguridad de forma precisa requieren siempre arduos estudios, que se extienden tanto en labores in situ como en laboratorio y/o simulaciones. Pero a pesar de todo, normalmente hay que ser cauteloso con los resultados y tener en consideración las posibles diferencias con la realidad.

Con el método de ábacos que aquí se presenta no se pretende suplir la utilización de métodos de cálculo específicos y más potentes para rotura circular (Abramson *et al.*, 2002). La utilización de estos nomogramas se reduce a fases preliminares y estimaciones rápidas. La generalidad en los datos de entrada así como algunas simplificaciones que se llevaron a cabo en el proceso y la suposición teórica de algunos datos, a pesar de ser unas medidas necesarias para dotar a los ábacos de un mayor rango de aplicación, le resta por el otro lado precisión al método. Por ello el método de los ábacos de análisis de estabilidad se trata de un procedimiento aproximado y el usuario de los mismos debe tener este aspecto en consideración.

En cuanto a líneas de trabajo futuras cabría pensar en ampliar el área de estudio para que los ábacos se puedan adaptar con mayor precisión a escombreras de materiales diversos y no únicamente a granito y pizarra. Así mismo, se debería intentar que los nomogramas se adaptaran a otros tipos de morfologías diferentes a las empleadas en este trabajo.

Se puede concluir que, gracias a los resultados obtenidos, el método de ábacos para el cálculo de inestabilidades en escombreras de granito y pizarra es una herramienta fiable. Lo que, junto con su sencillez de uso, hace de estos nomogramas un material de trabajo de gran utilidad para los trabajadores del sector.

## Referencias

- Abramson, L.W., Lee, T.S., Sharma, S. and Boyce, G.M. 2002. *Slope stability and stabilization methods*. John Wiley & Sons, New York, 711 pp.
- Alejano, L.R., García, F., Alonso, E. and Gómez, I. 2001. Stability analysis and design of two quarry slopes with the help of numerical modelling. EUROROCK 2001. *ISRM Symposium. Rock Mechanics a challenge for society*. Espoo, Finlandia. Ed. Balkema.
- Alejano, L.R., Gómez, I. and Martínez, R. 2010. Analysis of a complex toppling-circular slope failure. *Engineering Geology*, 114, 93-104.
- Ayala, F.J. and Rodríguez, J.M. 1986. *Manual para el diseño y construcción de escombreras y presas de residuos mineros*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 182 pp.
- Bishop, A.W. 1955. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 5 (1), 7-17.
- Bjerrum, L. 1967. Progressive failure in slope in overconsolidated plastic clays and clay shales. Terzaghi Lecture. *J. of Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, 93, 3-49.
- Chen, Z.Y. and Shao, C.M. 1988. Evaluation of minimum factors of safety in slope stability analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 25, 735-48.
- Coulomb, C.A. 1776. Essai sur une application des règles de maximis et minimis a quelques problèmes de statique, relatifs a l'architecture. *Mémoires de Mathématique de l'Académie Royale des Sciences*, Paris, 7, 343 – 382.
- Dan, B.M. 2002. *Principles of geotechnical engineering*. Ed. Brooks/Cole. Pacific Grove, California, 592 pp.
- Duncan J.M. and Wright S.G. 1980. The accuracy of equilibrium methods of slope stability analysis. *Engineering Geology*, 16, 5-17.
- Fredlund D.G. and Krahn, J. 1976. Comparison of slope stability methods of analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 14, 429-439.
- Golden Software. 2009. *Surfer® Getting Started Guide*. Golden Software, Inc. Colorado, EEUU.
- Hoek, E. and Bray, J.W. 1974. *Rock Slope Engineering*. Institution of Mining and Metallurgy, Londres.
- Hunt, R.E. 1984. *Geotechnical Engineering Investigation Manual*. McGraw-Hill Book Company. New York, 983 pp.
- ITGE y EPTISA. 1987. *Manual de ingeniería de taludes*. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, 456 pp.
- Jiménez, J.A., de Justo, J.L. y Serrano, A.A. 1981. *Geotecnia y cimentación II*. Editorial Rueda, Madrid, 1188 pp.
- Koerner, R.M. 1970. Effect of particle characteristics on soil strength. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96 (4), 1221-1234.
- Mohr, O. 1900. Welch Umstände bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materials? *Zeitschrift Verein Deutsch Ingenieur*, 44 1524–1530.
- Ramírez, P. y Alejano, L. 2007. *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. Máster internacional "Aprovechamiento sostenible de los recursos minerales". Madrid, 728 pp.
- Real Decreto 863/1985*, de 2 de abril, por el que se aprueba el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera. Boletín Oficial del Estado, 12 de junio de 1985.
- Rocscience. 2009. *User's guide*. Rocscience Inc. Toronto, Canada.
- Sarma, S.K. 1979. Satiability analysis of embankments and slopes. *ASCE Journal of geotechnical engineering division*, 105, 1511-1524.
- Suárez J. 1998. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Varnes D.J. 1978. Slope movement types and processes. En Landslides analysis and control. Transportation Research Board. *National Academy of Sciences*, 176, 11-33.

Recibido: noviembre 2010

Revisado: diciembre 2010

Aceptado: enero 2011

Publicado: abril 2011