

Uso del software Slide para el análisis del comportamiento sísmico de taludes*

Yasmany Medina Zaldívar

ymzaldivar@minas.ismm.edu.cu

Maday Cartaya Pires

mcartaya@ismm.edu.cu

Especialidad: Ingeniería en minas

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (Cuba).

Resumen: Se determinó el comportamiento sísmico de los taludes con el uso del software Slide. Para la determinación del coeficiente sísmico en sus componentes horizontal y vertical se utilizó la Norma española de Construcción Sismorresistente para el cálculo de los componentes en los terrenos. Entre los métodos de cálculo de taludes para suelos y rocas se utilizó el método simplificado de Janbu diseñado para cualquier superficie de falla. Se concluye que, al tener en cuenta el coeficiente sísmico, el factor de seguridad disminuye drásticamente y aumentan las zonas por las cuales puede fallar el talud.

Palabras clave: coeficiente sísmico; estabilidad de taludes; software Slide; método de Janbu.

* Recibido: 12 enero 2018/ Aceptado: 21 mayo 2018.

Slide software for the analysis of slope seismic behavior

Abstract: The seismic behavior of the slopes was determined with the use of the Slide software. For the determination of the seismic coefficient in its horizontal and vertical components, the Spanish Seismic Resistive Construction Standard was used to calculate the components in the terrains. Among the methods for calculating slopes for soils and rocks, the simplified Janbu method designed for any fault surface was used. It is concluded that, when taking into account the seismic coefficient, the safety factor decreases drastically and the areas for which the slope can fail increase.

Key words: seismic coefficient; slope stability; Slide software; Janbu method.

Introducción

Los sismos son fenómenos naturales causados por movimientos de las fallas geológicas en la corteza terrestre. Al moverse las fallas se producen ondas de diferentes tipos y de gran poder, las cuales viajan a través de las rocas. Los movimientos sísmicos pueden activar deslizamientos de tierra. En el caso de un sismo, existe el triple efecto de aumento del esfuerzo cortante, disminución de la resistencia por incremento de la presión de poros y deformación, asociados con la onda sísmica; pudiéndose llegar a la falla al cortante y hasta la licuación en el caso de los suelos granulares saturados. Históricamente, los deslizamientos han generado, en ocasiones, mayor cantidad de muertos que el colapso de estructuras.

Las situaciones adquieren profundo grado de criticidad cuando se combinan altas susceptibilidades, debido a factores topográficos, geológicos, climáticos y sísmicos. La coincidencia de un sismo con temporadas de lluvias es muy común en las zonas tropicales, donde las épocas de lluvias duran varios meses.

Cuando se produce la fractura de la roca en una zona de falla geológica la energía liberada es radiada en todas las direcciones. La fuente del movimiento o zona de liberación de energía no es generalmente un punto, sino una línea o un área comúnmente alargada en la dirección de la falla. La profundidad del foco o hipocentro determina, en buena parte, la magnitud del sismo y sus efectos. Los sismos que generalmente producen un mayor daño son los sismos relativamente superficiales (Suárez, 2009).

En el estudio de la estabilidad de taludes se abordan fenómenos de estado último o de rotura de masas de suelo. El "agente" externo responsable de la inestabilidad es una fuerza de masa: el peso y eventualmente los efectos de filtración a los que debe añadirse, generalmente como factor secundario, posibles cargas externas. La preponderancia de las acciones gravitatorias condiciona, sobre todo, la definición de seguridad frente a rotura.

Las técnicas de reconocimiento geológico-geomorfológico son, en estos casos, de gran ayuda para identificar zonas movidas y para estimar cuantitativamente los riesgos de deslizamiento. La determinación cuantitativa de índices de riesgo o seguridad exige,

sin embargo, el empleo de técnicas y modelos propios de la mecánica del suelo o de las rocas. El desarrollo de modelos de cálculo es solo una parte del problema y, en general, cuando se trata de laderas naturales, habrán de integrarse los estudios y aportaciones geológicas y geomorfológicas con técnicas de análisis, predicción y corrección (Ganepola, 2013).

La estabilidad de taludes estudia la estabilidad o posible inestabilidad de un talud a la hora de realizar un proyecto, o llevar a cabo una obra de construcción de ingeniería civil, siendo un aspecto directamente relacionado con la ingeniería geológica-geotécnica, la cual es indispensable en las zonas de riesgos sísmicos donde las pendientes del terreno favorecen el desarrollo de deslizamientos de tierra.

La estabilidad de los taludes depende también de la resistencia del material que lo conforman, los empujes a los que son sometidos o las discontinuidades que presenten. Los taludes pueden ser de roca o de tierras. Ambos tienden a estudiarse de forma distinta.

En la industria minera los taludes son diseñados con el objetivo de que conserven la estabilidad y no se vean afectadas las condiciones de seguridad de la mina en caminos y frentes de arranque, por los cuales transitan continuamente equipos mineros pesados. Su diseño depende de la disposición y profundidad del yacimiento.

Del análisis de la estabilidad de los taludes y la identificación de las zonas de falla de los caminos mineros depende, en gran medida, que se mantengan las condiciones de seguridad.

En Cuba, el desarrollo de la actividad minera se ha intensificado a partir del triunfo revolucionario, tanto en la explotación de minerales metálico como de materias primas para la construcción, debido a la creciente demanda de nuevas obras de construcción desde el punto de vista técnico, infraestructural y social en todo el país.

La industria del níquel históricamente ha desempeñado un importante papel en el desarrollo socioeconómico del país. En correspondencia con los lineamientos aprobados por el Sexto Congreso del PCC, se proyecta un amplio programa de desarrollo para contribuir con la actualización del modelo económico cubano.

La estabilidad de taludes constituye el problema principal en la concepción y diseño de minas a cielo abierto, tanto desde el punto de vista económico como de seguridad. Para el diseño de estos, entre los factores que se tienen en cuenta, se encuentra el coeficiente sísmico, el cual responde al coeficiente que caracteriza un movimiento telúrico teniendo en cuenta la magnitud, la intensidad y la distancia focal en un tipo de material o materiales. El coeficiente sísmico caracteriza al movimiento telúrico o a la magnitud de los efectos sobre un tipo de material.

Este trabajo propone determinar el comportamiento sísmico de los taludes con el uso del software Slide.

Materiales y métodos

Manifestaciones de rotura en los taludes

Por diferentes factores los taludes no siempre mantienen su estabilidad. Estos factores incluyen intensas lluvias, actividades sísmicas, peso del material, parámetros de resistencia del material al corte (cohesión, ángulo de fricción interna), intervención humana.

Suelos

Reptación

Agrietamiento por tracción

Rotura circular

Deslizamiento

Rocas

Descascaramiento

Caída de granos

Caída de bloques

Disolución

Lavado superficial o erosión

Rotura planar

Rotura en cuña

Rotura al volteo.

Aunque en presencia de un sismo puede ocurrir cualquiera de los anteriores el más común son los deslizamientos.

Deslizamiento

Se produce cuando una gran masa de terreno se convierte en una zona inestable y se desliza con respecto a una zona estable, a través de una superficie o franja de terreno de pequeño espesor.

La ocurrencia de un deslizamiento incluye los siguientes factores:

1. Condiciones originales del talud (susceptibilidad a los deslizamientos).
2. La topografía, geología y características de los materiales y perfiles, condiciones ambientales generales, cobertura vegetal, etc. Estas condiciones determinan una susceptibilidad al deterioro, a la acción de los factores detonantes y al fallamiento.
3. Factores de deterioro (modificación lenta de las condiciones originales).
4. El resultado es una disminución en la resistencia al cortante del material.
5. Falla progresiva por expansión o fisuración, deformación al cortante, inclinación, desmoronamiento, entre otros.
6. Descomposición por desecación, reducción de la cohesión, lavado y remoción de los cementantes, disolución y otros.
7. Erosión interna o sifonamiento.

Factor de seguridad en taludes

F.S. = $\frac{\Sigma \text{Resistencias al disponibles al cortante}}{\Sigma \text{Esfuerzos al cortante}}$

F.S. = $\frac{\Sigma \text{de momentos resistentes disponibles}}{\Sigma \text{momentos actuantes}}$

El factor de seguridad se asume que es igual para todos los puntos a lo largo de la superficie de falla, por lo tanto este valor representa un promedio del valor total en toda la superficie de falla. Este factor se debe tener en cuenta y representa, según las características de diseño del talud, cuándo este puede o no fallar (Varnes, 1978).

Métodos de cálculo de taludes para suelos y rocas

Son teorías que estudian la estabilidad o posible inestabilidad de un talud. La única razón por la que se realiza el estudio de la estabilidad de taludes es para garantizar la seguridad a las personas y sus propiedades. Se ha probado que la mayoría de los daños por los movimientos en taludes son evitables (Smith, 2014).

Método de dovelas

Métodos aproximados

Método simplificado de Bishop (1955)

Método de Janbu (1955)

Métodos precisos

Método de Spencer

Método de talud infinito

Método de las cuñas

Método de Taylor (1937)

Método de Hoek y Bray (1981)

Método por estado limite.

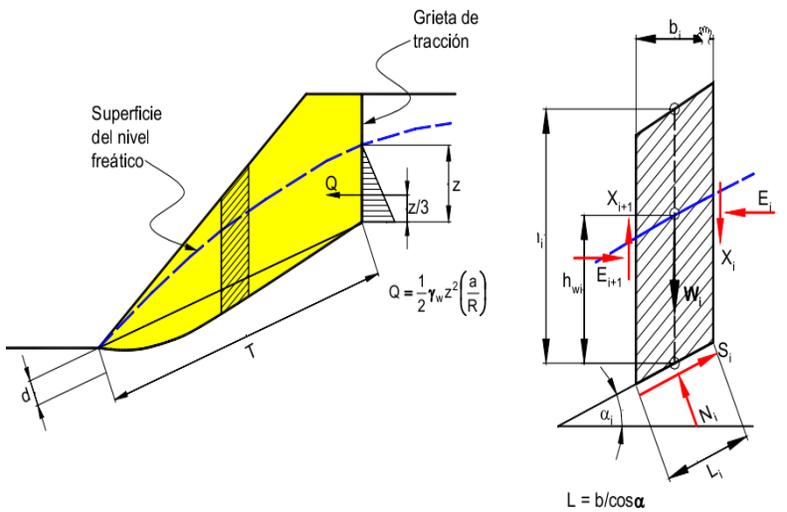
Los factores de seguridad determinados con el método de Bishop difieren por aproximadamente el 5 % con respecto a soluciones más precisas; mientras el método simplificado de Janbu, generalmente, subestima el factor de seguridad hasta valores del 30 %, aunque en algunos casos los sobrestima hasta valores del 5 %.

Los métodos que satisfacen en forma más completa el equilibrio son más complejos y requieren de un mejor nivel de comprensión del sistema de análisis. En los métodos más complejos y precisos se presentan con frecuencia problemas numéricos que conducen a valores no realísticos de factor de seguridad. Por las razones anteriores se prefieren métodos más sencillos pero más fáciles de manejar como es el método simplificado de Bishop o Janbu. Los métodos que satisfacen en forma más completa el equilibrio son más complejos y requieren de un mejor nivel de comprensión del sistema de análisis.

Todos los métodos que satisfacen equilibrio completo dan valores similares de factor de seguridad. No existe un método de equilibrio completo que sea significativamente más preciso que otro. Por estas razones se selecciona el método de Janbu para el cálculo del factor de seguridad.

Método de Janbu (1955)

El método está diseñado para cualquier superficie de falla. Supone que la interacción entre rebanadas es nula, pero a diferencia de Bishop, el método busca el equilibrio de fuerzas y no de momentos.



$$FS = \frac{f_0 \sum_{i=1}^n \frac{[c' + (\gamma h_i - \gamma_w h_{wi}) \tan \phi'] (1 + \tan^2 \alpha_i) b_i}{\left(1 + \frac{\tan \alpha_i \tan \phi'}{FS}\right)}}{\sum_{i=1}^n W_i \tan \alpha_i + \frac{1}{2} \gamma_w z^2}$$

$$f_0 = 1 + k \left(\frac{d}{T} - 1,4 \left(\frac{d}{T} \right)^2 \right) \quad \begin{array}{l} \text{Para } c' = 0; \quad \Rightarrow k = 0,31 \\ \text{Para } c' > 0, \phi' > 0 \Rightarrow k = 0,50 \end{array}$$

Donde:

- C- cohesión;
- L- longitud de la base de la dovela;
- W- peso (kN/m);
- ϕ -ángulo de fricción interna;
- u-presión intersticial de los poros;
- γ_w -peso específico de agua (9,8 kN/m3);
- Z-profundidad de la grieta de tracción;
- R-radio de la superficie de rotura;
- α -ángulo de la base de la dovela;

FS-Factor de seguridad;

b- ancho de la tajada;

h- Altura de la tajada.

Softwares usados para el cálculo de la estabilidad en taludes

Los programas de estabilidad de taludes se utilizan para el diseño y cálculo de taludes, para el análisis de todo tipo de pendientes, terraplenes, cortes de tierra, estructuras de retención ancladas, muros de suelo reforzado. La superficie de deslizamiento se puede considerar circular (métodos Bishop, Fellenius/Peterson, Janbu, Morgenstern-Price o Spencer) o poligonal (métodos Sarma, Janbu, Morgenstern-Price o Spencer).

Características principales:

- El análisis de verificación se puede realizar utilizando EN 1997-1 o el método clásico (estados límites, factor de seguridad)
- Entrada simple del terreno y de la geometría de las capas
- Incluyen bases de datos incorporadas con suelos y rocas
- Optimización rápida y fiable de superficies de deslizamiento circulares y poligonales
- Presencia de agua modelada por el nivel freático o empleando isolíneas de presión de poros
- Análisis reducción rápida, grietas de tracción
- Manejo sucesivo de taludes dentro de una fase de análisis
- Modelado simple de cuerpos rígidos
- Efecto sísmico (Mononobe-Okabe, Arrango, estándares chinos)
- Métodos de análisis (Bishop, Fellenius/Petterson, Spencer, Morgenstern-Price, Sarma, Janbu, Shahunyanc, ITFM (estándares chinos)
- Manejo de estratificación de terrenos
- Se admite cualquier cantidad de anclajes, geo-refuerzos
- Análisis en parámetros efectivos y totales de suelos
- Permiten cualquier cantidad de análisis dentro de una etapa de construcción
- Permiten definir las restricciones en la optimización de la superficie de deslizamiento
- Se admiten cualquier cantidad de sobrecargas (franja, trapezoidal, concentrada)

- Rápido análisis de reducción
- Análisis según la teoría de estados límite y factor de seguridad
- DXF importación y exportación.

Dentro de los principales softwares que existen para el análisis de la estabilidad de taludes se encuentran los siguientes:

- 1- Slide
- 2- Geo5
- 3- Slope
- 4- Cingcivil.

Slide es un programa poderoso de análisis de estabilidad de taludes con el uso de métodos de equilibrio del límite 2D, de fácil manejo, para todos los tipos de terreno y roca taludes, embalses, represas terráqueas, y paredes de reteniendo. Slide incluye construcción en análisis finito de infiltración de agua subterránea, análisis probabilístico, modelado multipanorama y soporte de diseño.

Ubicación y características del área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada geográficamente en el extremo nororiental del territorio cubano, específicamente en el municipio de Moa, provincia de Holguín.

El territorio se caracteriza por el predominio del relieve de montañas, las que se manifiestan de forma continua hacia la parte centro sur.

El peso volumétrico de las rocas varía significativamente por tipo de litología, lo cual determina que un mismo tipo de mena pueda tener diferente peso volumétrico en dependencia de la zona. La humedad varía según la profundidad, encontrándose los valores más altos en el material serpentínico.

La red hidrográfica en la zona se encuentra bien desarrollada, representada por numerosos ríos y arroyos.

Entre las litologías del basamento se destacan las peridotitas y serpentinitas; en menor grado aparecen diferentes variedades de gabros y disseminaciones de espinelas cromíferas.

El horizonte acuífero fundamental se encuentra en las zonas fracturadas de las peridotitas serpentinizadas.

Los taludes se pueden encontrar en los yacimientos lateríticos de Moa; han sido diseñados en los proyectos de los caminos de acceso a los distintos frentes de arranque sin tener en cuenta, muchas veces, el coeficiente sísmico ante el cual estos taludes podrían fallar.



Figura 1. Talud en yacimiento lateríticos de Moa.

Determinación del coeficiente sísmico

En la región del noreste de Holguín, se pudo corroborar que la zona de mayor actividad sísmica y geodinámica en general se encuentra al Oeste de Moa, donde, tanto los valores de las mediciones de GPS por sus siglas en inglés (global positioning station) como los registros de sismos son más intensos (Millán, 1997). Al este de Moa se ponen de manifiesto efectos de distensión, con valores positivos de desplazamiento entre los puntos del polígono. Se verificó de igual manera que en toda el área de Moa donde se encuentran las industrias del níquel existen fallas activas de diferente jerarquía, que aunque no son sismogeneradoras, si pueden causar asentamientos y deformaciones significativas a objetos de obras de estas instalaciones.

La Zona 3 está considerada de riesgo sísmico moderado por lo que se deben tomar medidas sismorresistentes en todas las estructuras en función de la categoría ocupacional de las mismas y el nivel de protección definido según la probabilidad de exceder un sismo de diseño. Los valores de la aceleración espectral horizontal máxima del terreno para el cálculo S_a están entre 0,40–0,50 g para periodos cortos (S_s) y entre 0,15–0,20 g para periodos largos (S_l).

Tabla 1. Peligro sísmico en la zona 3 (NC 46-2012 CENAIIS)

No.	Provincia	Municipio	c-mun	$S_0(g)$	$S_c(g)$	$S_l(g)$	TL(s)
136	Holguín	Moa	1114	0,227	0,404	0,156	9,0

Factores a tener en cuenta en el coeficiente sísmico

Subsistencia sísmica: es una de las más importantes propiedades dinámicas del "loess". Esto se debe principalmente al gran volumen de poros y a la poca cementación de la estructura de estos materiales depositados por el viento y a la presencia de macroporos (Kavazanjian, Marsh & Banks, 2011).

Dilatancia: asociada con un esfuerzo sísmico es muy importante en los suelos granulares y en los enrocados de grandes presas. Se observa en presas de enrocado que la aceleración en la parte superior del terraplén es varias veces mayor que la aceleración en su base y, en ocasiones, excede el coeficiente sísmico de diseño.

Licuación: es la facilidad con que un suelo puede perder toda su resistencia al cortante y comportarse como un líquido. La licuación de los suelos ocurre por aumento repentino de la presión de poros, debido a los esfuerzos generados por la intensidad del sismo.

Factores que afectan la respuesta de los taludes durante los sismos

La duración del sismo

La formación geológica

La distancia al área epicentral

La magnitud de la aceleración sísmica

La dirección principal del sismo

Deslizamientos activados por lluvias después de los sismos

El deterioro que los sismos causan a la estructura de las rocas y suelos facilita la activación de los deslizamientos posteriores por las lluvias. El agrietamiento causado por el sismo posibilita la infiltración del agua y la formación de presiones de poros altas en las grietas profundas. Es común que los deslizamientos en la temporada de lluvias, después del sismo, sean de mayor magnitud.

Resultados

Se modelaron en el software Slide dos tipos de escenario, uno que no tuvo en cuenta el coeficiente sísmico del talud y otro en que sí se tuvo en cuenta.

Se modeló un escenario sin tener en cuenta el factor sísmico. El software Slide permite, conociendo las características del terreno y la litología, definir qué materiales se ven afectados ante la inestabilidad de taludes. Se definieron cuatro litologías diferentes y se les insertaron sus valores correspondientes de propiedades físico-mecánicas y geotécnicas, entre ellas la cohesión y el ángulo de fricción interna.

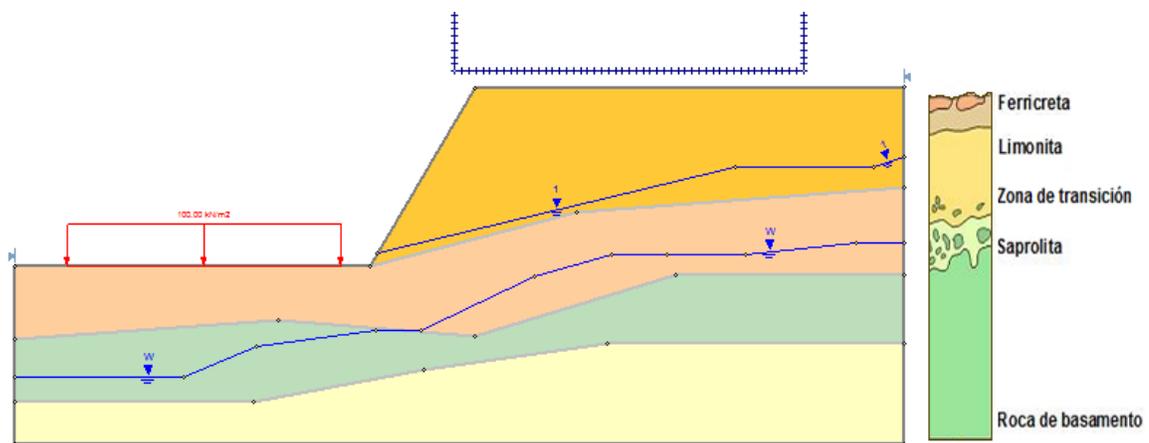


Figura 2. Modelo del talud sin tener en cuenta el coeficiente sísmico.

Además, se tuvieron en cuenta el nivel freático de las aguas, el nivel piezométrico máximo que estas pueden llegar a alcanzar y se colocó una carga externa que simula el peso que recibe el talud ante el paso de equipamiento minero pesado.

Ante estas condiciones se obtuvieron los siguientes resultados:

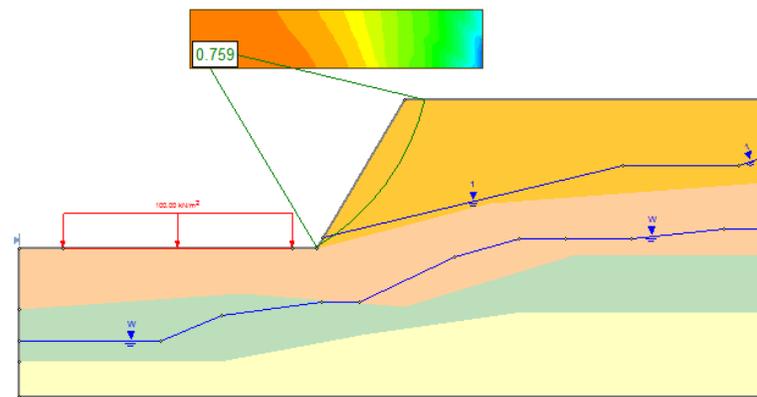


Figura 3. Obtención del factor de seguridad sin tener en cuenta el coeficiente sísmico.

Se puede apreciar que el factor de seguridad es de 0,76, así como las zonas en las que es más probable exista una superficie de falla por donde el talud pueda deslizar. Este es un coeficiente de seguridad bastante alto para este tipo de talud por lo que es poco probable que falle el talud.

Como se puede apreciar dentro de las características que se tuvieron en cuenta no se usó el coeficiente sísmico. Si al mismo talud con las mismas características se le aplica un coeficiente sísmico se obtiene el resultado mostrado en la Figura 4.

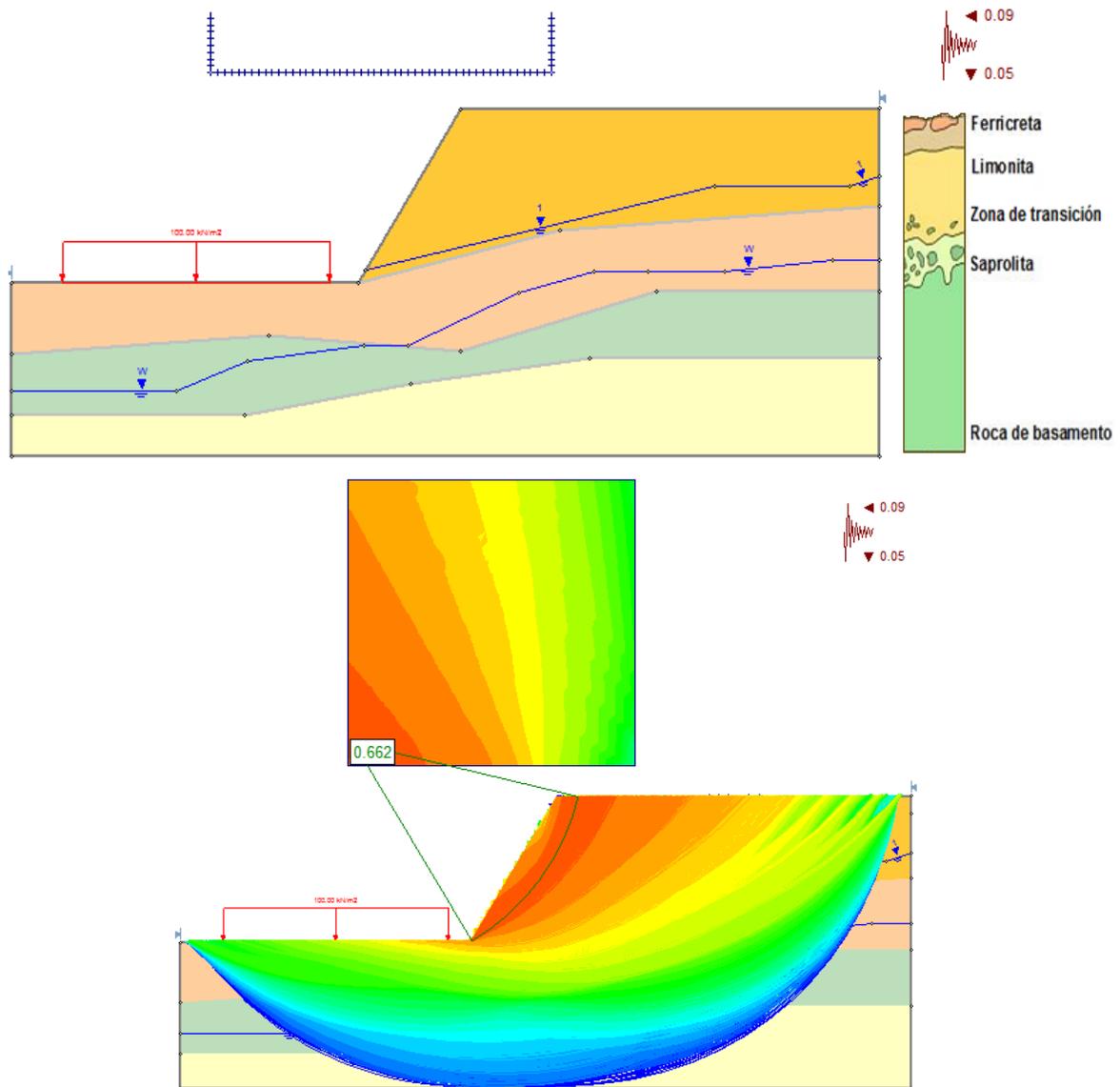


Figura 4. Obtención del factor de seguridad teniendo en cuenta el coeficiente sísmico.

Al tener en cuenta el coeficiente sísmico el factor de seguridad disminuye drásticamente y aumentan las zonas de falla por la cual puede fallar el talud.

Propuesta de medidas de corrección y estabilización

El software Slide permite que, luego obtener el factor de seguridad y las posibles zonas de falla, se aplique al talud algunos de los métodos y medidas de estabilización; entre ellas se encuentran:

- Disminuir la pendiente
- Construir bermas
- Cortar en la cabeza del talud
- Colocar materiales en el pie del talud
- Instalar elementos de refuerzo

Para el caso de estudio se coloca una cubierta geotextil TEXCEL en el talud sobre la cual se procederá a revegetar el talud. La Figura 6 muestra lo que sucede con el factor de seguridad:

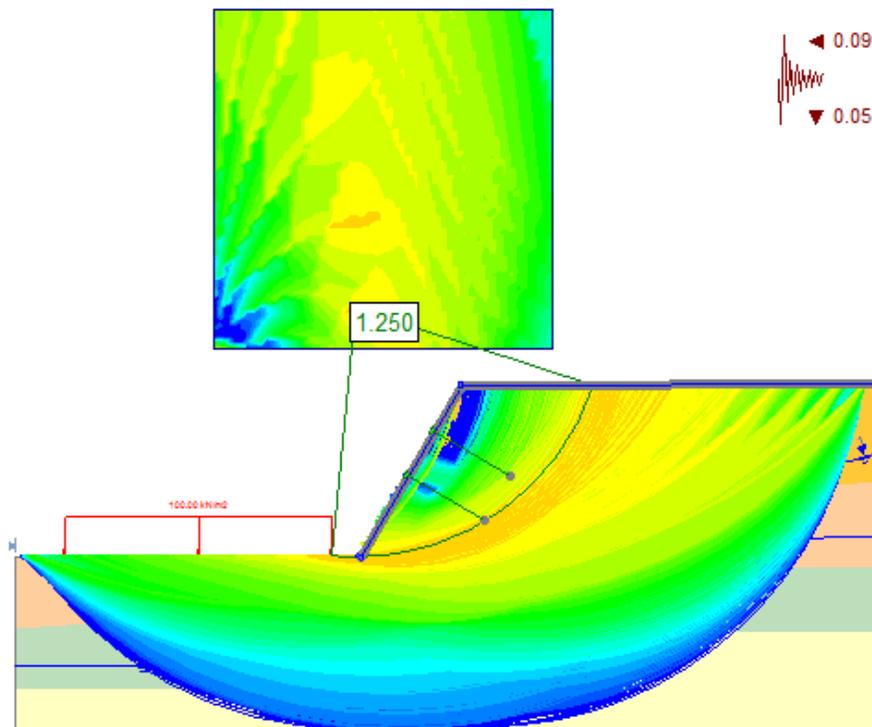


Figura 6. Obtención del factor de seguridad con el uso de estructuras protectoras.

El factor de seguridad aumenta considerablemente y disminuye la zona y las posibilidades de que el talud falle al usar una malla geotextil para revegetar el área del paramento y cresta del talud; posibilitando, además, que disminuya la erosión que afecta el talud, principalmente por los efectos de las intensas lluvias.

En la industria minera los taludes son diseñados con el objetivo de que conserven la estabilidad y no se vean afectadas las condiciones de seguridad de la mina en caminos y frentes de arranque.

Conclusiones

El coeficiente sísmico es necesario tenerlo en cuenta a la hora de diseñar y construir taludes mineros.

El software Slide es una herramienta eficaz para el análisis y obtención del factor de seguridad en taludes y diseñar métodos de corrección de la estabilidad.

Referencias bibliográficas

GANEPOLA, G. C. 2013. Cálculo de taludes de explotación para préstamos de materiales de construcción en el municipio Pinar del Río, Cuba. *Ciencia & Futuro* 3(4): 18-31.

KAVAZANJIAN, E.; MARSH, L. & BANKS, G. 2011. *LRFD Seismic Analysis and Design of Transportation Geotechnical Features and Structural Foundations: Comprehensive Design Examples*. US Department of Transportation, Federal Highway Administration. Washington.

MILLÁN, R. 1997. Tectónica de Cuba Oriental. Informe IGP.

NORMA CUBANA DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES (NC46-2012). 2012: CENAI

SMITH, I. 2014. *Smith's Elements of Soil Mechanics*. John Wiley & Sons.

SUÁREZ, J. 2009. *Deslizamientos*. Vol. 1: Análisis geotécnico. U.I.S. Escuela de filosofía, Madrid.

VARNES, D. J. 1978. Slope movement types and processes. *Special report* 176: 11-33, Washington.