

Comparativa entre los métodos de equilibrio límite y los análisis tensodeformacionales

Análisis de estabilidad de taludes

GALERA, José Miguel. GEOCONTROL S.A.
VELASCO, Pedro. ITASCA CONSULTORES S.L.

Palabras clave: DESLIZAMIENTO, EQUILIBRIO LÍMITE, FACTOR DE SEGURIDAD, MODELIZACIÓN, RESISTENCIA AL CORTE, ROTURA, TALUD.

El factor de seguridad de un talud se puede calcular con un modelo numérico, bien de elementos finitos o de diferencias finitas, reduciendo progresivamente la resistencia al corte del suelo hasta que se produce la rotura del mismo, estando el factor de seguridad definido por el ratio entre la resistencia al corte original del suelo y la resistencia al corte para la que se ha producido la rotura. Esta técnica, denominada *reducción de la resistencia al corte*, tiene una serie de ventajas sobre los habituales métodos de cálculo de equilibrio límite en los que se basan la mayoría de los programas existentes. Entre éstas, la más importante es que la superficie crítica de deslizamiento se genera automáticamente durante el proceso de reducción de resistencia, y su forma (recta, poligonal, circular, espiral logarítmica, etc.) se produce espontáneamente sin que sea necesario predeterminarla al iniciar el proceso de cálculo.

La aplicación de esta técnica en el pasado ha estado limitada por el elevado coste computacional, en tiempos de cálculo, dificultad que en la actualidad está bastante superada por el avance en la velocidad de cálculo de los ordenadores personales.

En los siguientes apartados se analizan una serie de ventajas que aporta la modelización numérica, junto con la técnica de reducción de resistencia al corte, en los análisis de estabilidad de taludes.

Reducción de la resistencia al corte para el cálculo del factor de seguridad

El análisis de la estabilidad de taludes mediante modelos numéricos se basa en el cálculo del factor de seguridad mediante la reducción de la resistencia al corte del suelo.

Dawson, E.M. (1998) describe con detalle esta metodología y compara los resultados así obtenidos con los calculados mediante el cociente entre la resistencia al corte a lo largo de la superficie de rotura y la tensión cortante a lo largo de la misma superficie de rotura:

$$FS_{medio} = \frac{\int_s (c + \sigma_n \tan \phi) ds}{\int_s \tau ds} \quad (1)$$

Asimismo, Varona, P. y Ferrer, M. (1998) han comprobado la metodología con un programa de cálculo en diferencias finitas (FLAC) y de elementos finitos (ZSOIL) respectivamente, comprobando los factores de seguridad para los casos de rotura circular y plana.

Las dos referencias anteriores se han seleccionado para poner de manifiesto que la reducción de resistencia al corte es una metodología válida para calcular el factor de seguridad de un desmonte o terraplén.

Además, otro aspecto que no debe olvidarse es la unicidad del factor de seguridad calculado mediante reducción de resistencia al corte: de acuerdo con Dawson E. (1998), para un material elástico-perfectamente plástico con una regla de flujo asociada, ni las constantes elásticas del material, ni el estado tensional inicial, ni el stress-path tienen efecto en las cargas en el momento de colapso; el factor de seguridad en estas condiciones, intrínsecamente asumidas por los métodos de cálculo mediante rebanadas, es único e independiente de dichos factores.

Ventajas del análisis de estabilidad de taludes mediante modelización numérica tensodeformacional

Como ya se ha descrito en apartados anteriores, la principal ventaja del cálculo de factores de seguridad mediante reducción

de la resistencia al corte radica en que la superficie de deslizamiento se deriva automáticamente del proceso de reducción de resistencia y no es necesario introducir previamente la forma de la misma.

El análisis de estabilidad mediante modelización numérica proporciona las siguientes posibilidades de análisis, claramente ventajosas respecto a los análisis clásicos de equilibrio límite:

- Superficies de roturas generales.
- Geometrías complejas.
- Modelos constitutivos complejos.
- Simulación realista del refuerzo.
- Acoplamiento hidromecánico.
- Análisis dinámico.

Superficie de roturas generales

Como ya se ha comentado, las herramientas habituales de cálculo del equilibrio límite exigen introducir, de forma apriorística, la forma de la superficie de rotura (recta, poligonal, circular, espiral logarítmica, etc.), de manera que los programas postulan un elevado número de superficies, para las que calculan el factor de seguridad, dando como factor de seguridad el mínimo de los calculados.

La experiencia de los autores de este artículo coincide con Dawson, E. (1998) en que a pesar del importante desarrollo en estrategias de búsqueda de la superficie de deslizamiento crítica, no se puede probar que la superficie determinada por los pro-

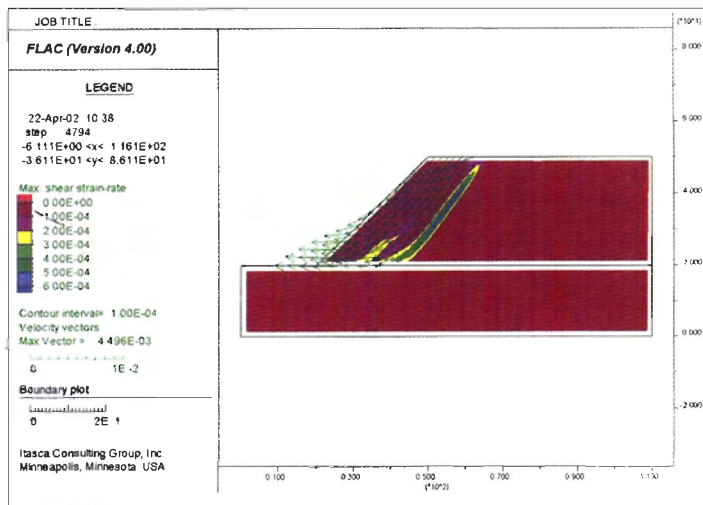


Fig. 1.- Superficie de deslizamiento crítica de un terraplén construido sobre una geomembrana.

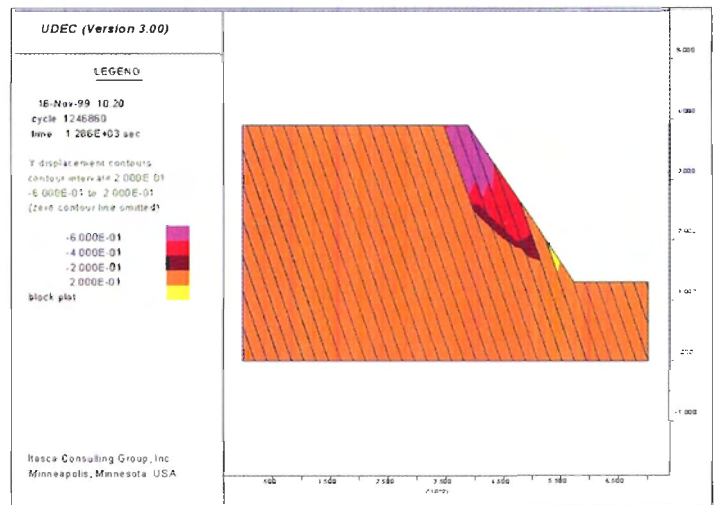


Fig. 2.- Superficie de deslizamiento crítica para una rotura plana no aflorante.

gramas comerciales sea realmente la de menor factor de seguridad. Con la modelización numérica se realiza un cálculo implícito de la rotura de cada elemento, en función de su estado tensional y su resistencia, de manera que durante el proceso de reducción de resistencia la rotura se va a desencadenar por los elementos plastificados, generándose la superficie de rotura crítica.

En la **Fig. 1** se ilustra la superficie de rotura generada en el análisis de estabilidad de un terraplén construido sobre una geomembrana; en este caso, la superficie de deslizamiento es compleja pues depende tanto de la fricción terraplén-membrana como de la resistencia al corte del terreno.

Asimismo es posible la obtención de superficies de deslizamiento en el caso de roturas con control estructural parcial, como son el caso de cuñas o roturas planas no aflorantes, que cinemáticamente no son inestables puesto que la arista o plano de deslizamiento buzan más que la cara del talud, pero que en función de la resistencia del terreno pueden dar lugar a roturas con una superficie de deslizamiento complejas, correspondiente a mecanismos mixtos de deslizamiento a lo largo de las juntas y de la matriz rocosa; esta idea se ilustra en la **Fig. 2**, en la que se ha empleado un modelo de bloques con el programa **UDEC** en el que la reducción de resistencia al corte se aplica tanto al suelo o macizo rocoso, considerado como un continuo, como a las discontinuidades.

En el análisis de la estabilidad de cuñas y bloques, las herramientas de cálculo habituales están limitadas a bloques o cuñas de geometría sencilla (tetraédrica), definida por la intersección de 2 juntas y dos caras libres (en un talud) o 3 juntas y una cara libre (en un túnel). Con la técnica de reducción de

resistencia al corte es posible calcular el factor de seguridad para bloques de geometría compleja, como los que se producen de la intersección de varias familias de discontinuidades.

En la **Fig. 3** se ilustra el ejemplo de una cuña, formada por intersección de las juntas S_0 y J_1 , que no es cinemáticamente inestable pues la arista de intersección S_0-J_1 buza menos que la ladera natural. La existencia de una tercera familia J_2 hace que se independicen bloques que sí tienen posibilidad cinemática de deslizamiento. Un problema como éste no puede ser abordado correctamente con una herramienta tradicional de cálculo del equilibrio límite de las cuñas con posibilidad cinemática de deslizamiento o vuelco, sino por medio de un modelo numérico de bloques (Arias J.M. et al, 2001).

Geometrías complejas

Las herramientas tradicionales para el cálculo de estabilidad de taludes no son adecuadas para geometrías complejas, como las dadas por una topografía real, un emboquille de túnel, etc.

De acuerdo con Dawson, E. (1999), los métodos de cálculos por rebanadas no son adecuados para problemas de estabilidad tridimensional de taludes, y un diseño intrínsecamente asume que el perfil de cálculo del talud tiene una extensión indefinida. Por otro lado, los programas de análisis cinemático de caída de cuñas consideran geometrías sencillas, normalmente planares, tanto para los taludes de excavación como para la topografía natural del terreno.

Mediante modelización numérica es po-

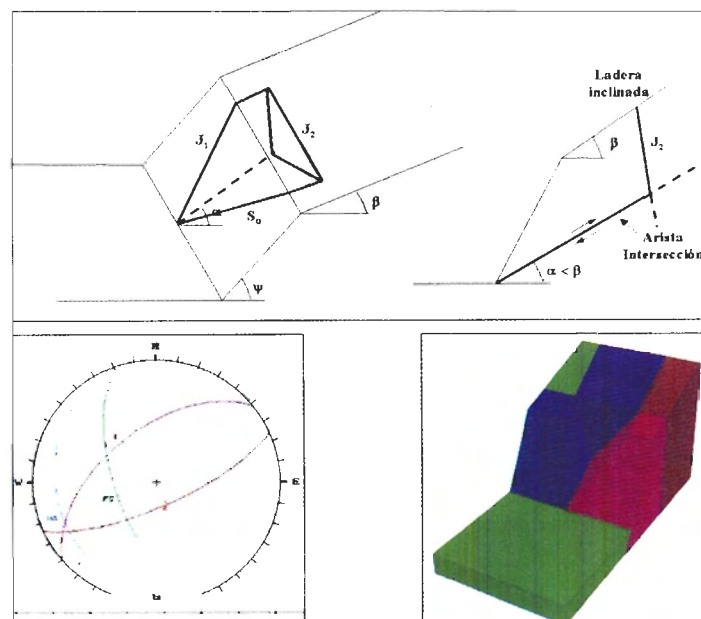


Fig. 3.- Análisis de estabilidad de bloques generados por la intersección de varias familias de discontinuidades.



Fig. 4.- Mecanismo de rotura obtenido simulando una geometría realista y 3 familias de juntas.

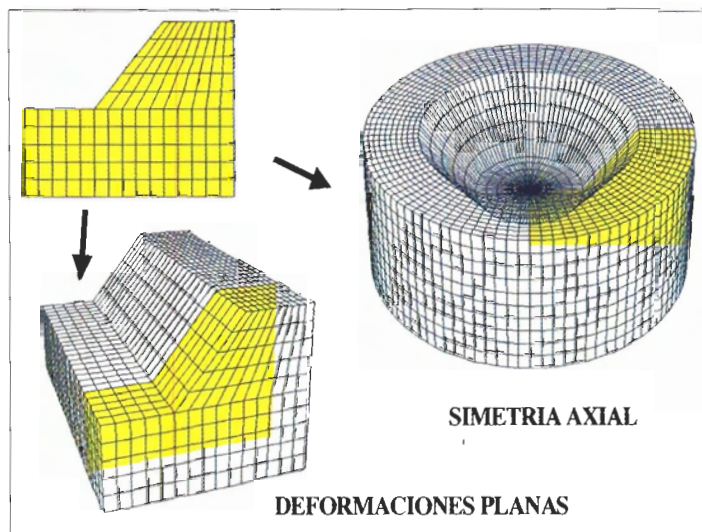


Fig. 5.- Geometrías equivalentes para el cálculo de un mismo perfil en deformaciones planas o con simetría axial.

sible solventar estas dificultades. En la **Fig. 4** se presenta un modelo de cálculo de bloques muy completo, con una topografía que se aproxima en gran medida al terreno natural, y con unos taludes de desmonte más realistas. El mecanismo de rotura y el factor de seguridad que se deriva de este modelo de cálculo son más aproximados a la realidad que los obtenidos con herramientas menos sofisticadas.

Asimismo, el radio de curvatura del talud tiene un efecto que puede no ser despreciable en cuanto a su estabilidad final. Este hecho es de gran interés en minería, donde la estabilidad de los taludes de una corta está amplificada por el confinamiento que suponen la geometría cóncava de la misma. *Lorig, L. y Varona, P. (2000)* han estudiado el efecto de la concavidad de la excavación con la opción de axisimetría del programa de modelización numérica **FLAC**, comparando los factores de seguridad en deformaciones planas y con simetría axial para un talud drenado de 500 m de altura en un material isótropo de $c' = 0.66$ MPa, $\phi' = 35^\circ$ y $\gamma = 2.6$ t/m³. Las geometrías consideradas se presentan en la **Fig. 5**, y la comparativa de resultados en los **Cuadros I y II**, respectivamente.

Modelos constitutivos avanzados

Las herramientas de cálculo tradicionales consideran un modelo plástico perfecto para el suelo o macizo rocoso. La utilización de modelos numéricos permite, además, el empleo de modelos constitutivos avanzados, como pueden ser plástico con reblandecimiento en la post-rotura o plástico con juntas ubicuas.

El modelo plástico con reblandecimiento

en la postrotura considera que se produce una pérdida de resistencia al corte cuando la deformación cortante del suelo supera un umbral crítico. Con este modelo constitutivo es posible simular roturas progresivas que se produzcan en el seno de un terraplén durante un proceso de recrecimiento, y calcular el factor de seguridad del terraplén para dichas etapas de crecimiento. Este mecanismo no se pueden analizar con equilibrios límites puesto que a lo largo de una superficie de rotura potencial se encontrarán zonas con resistencias de pico, otras con resistencia residual, y otras intermedias.

En las **Figs. 6-a, 6-b y 6-c** se ilustra la evolución del reblandecimiento durante el proceso de recrecido de un terraplén, la pérdida de resistencia que experimenta el terreno y la superficie potencial de deslizamiento obtenida para cada una de las alturas del terraplén. En la **Fig. 7** se ilustra la evolución

del factor para el mismo terraplén para los dos modelos constitutivos: elástico perfectamente plástico y con reblandecimiento en la postrotura, y para las propiedades presentadas en el **Cuadro III**.

Es interesante observar en dicha figura cómo únicamente en las primeras fases, en las que prácticamente no hay reblandecimiento, la superficie potencial de rotura es aproximadamente circular, por lo que los factores de seguridad son iguales; conforme aumenta la altura del terraplén aparece el reblandecimiento en algunas partes del terreno, cambiando el mecanismo de rotura y reduciéndose el factor de seguridad respecto a un comportamiento elástico perfectamente plástico.

El programa **FLAC** dispone además de un modelo elásto-plástico con juntas ubicuas que incorpora, además de los parámetros elásto-plásticos del terreno, unos parámetros

	R= 100 m	R= 250 m	R= 500 m	R= ∞
$\alpha = 45^\circ$	FS = 1,75	FS = 1,65	FS = 1,55	FS= 1,35

CUADRO I.- Variación del FS con el radio de curvatura para una inclinación de talud.

	R= 100 m	R= 250 m	R= 500 m	R= ∞
FS = 1.3	$\alpha = 75^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 55^\circ$	$\alpha = 45^\circ$

CUADRO II.- Variación de la inclinación de talud con el radio de curvatura para un FS.

Litotipo	Resistencia de pico		Resistencia residual		Deformación Crítica (mm/m)
	c' (MPa)	ϕ (°)	c' (MPa)	ϕ (°)	
Terraplén	0,03	10	-	-	-
Cimiento	0,03	10	0,00	8	1

CUADRO III.- Resistencias para el cálculo del Factor de Seguridad con strain-softening.

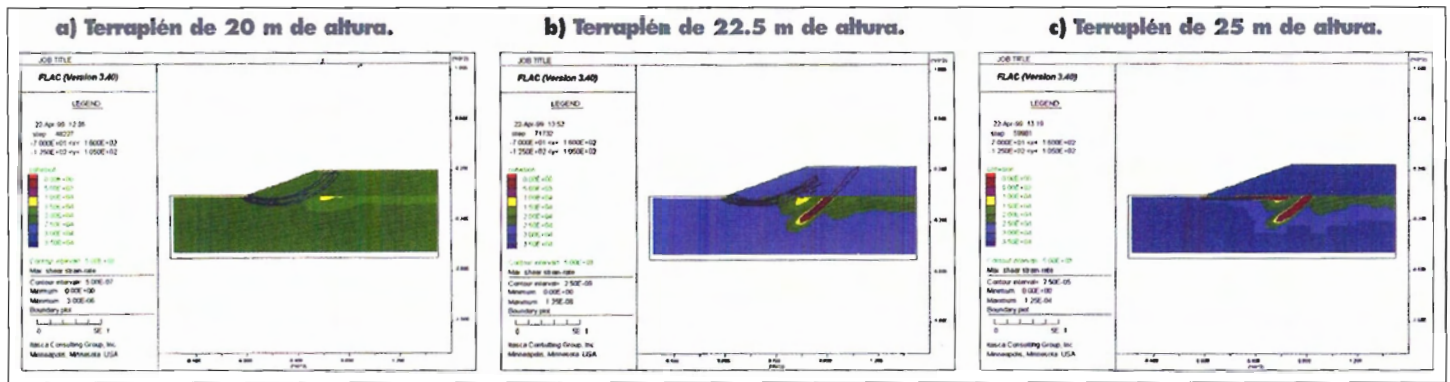


Fig. 6.- Simulaciones de rotura progresiva de un terraplén de diferentes alturas.

resistentes para las juntas y su buzamiento aparente. Por lo tanto, es posible aplicar la reducción de resistencia simultáneamente a la matriz rocosa y a las juntas ubicuas, de manera que la superficie de rotura responde a un mecanismo conjunto entre la matriz rocosa y las juntas ubicuas.

Este concepto se ilustra en las Fig. 8-a y 8-b, tomadas de Rodríguez-Ortiz, J.M. et al (2001), en la que se observa la diferencia de mecanismos entre un modelo constitutivo plástico puro (fig. 8-a), con una rotura aproximadamente circular, y un modelo con juntas ubicuas verticales, para el que la superficie de rotura cambia significativamente a una geometría en forma de artesa (fig. 8-b).

Simulación realista de los elementos estructurales de refuerzo

Los programas de modelización numérica incorporan elementos estructurales que simulan de forma bastante realista la interacción con el terreno de los elementos de refuerzo habituales en geotecnia (anclajes, bulones, gunita, etc.). Por lo tanto, introdu-

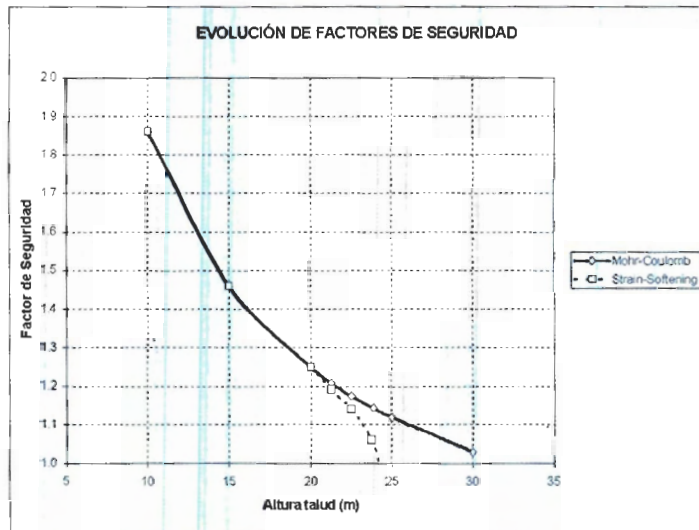


Fig. 7.- Evolución del factor de seguridad con la altura de un talud para un modelo constitutivo elástico perfectamente plástico y con reblandecimiento en la post-rotura.

ciendo los elementos de refuerzo al modelo es posible calcular de forma realista el factor de seguridad el talud reforzado, y así compararlo con el talud sin reforzar, siendo esta comparación muy reveladora puesto que las condiciones de cálculo son las mismas.

En la Fig. 9 se ilustra el esquema de bulones colocados como refuerzo en el emboquille de un túnel en roca, mientras que en la Fig. 10 se ilustra la posibilidad de diseñar la longitud de los cables de anclaje a partir de la superficie crítica de deslizamiento.

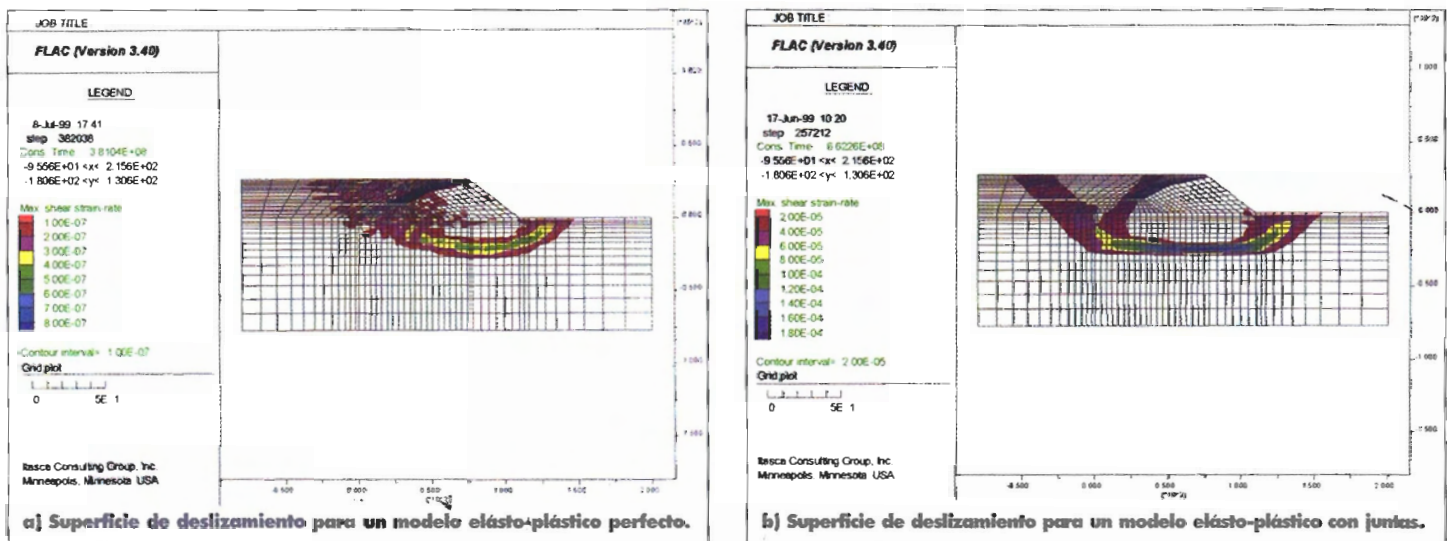


Fig 8 (a y b).- Simulación de la rotura progresiva de un terraplén.

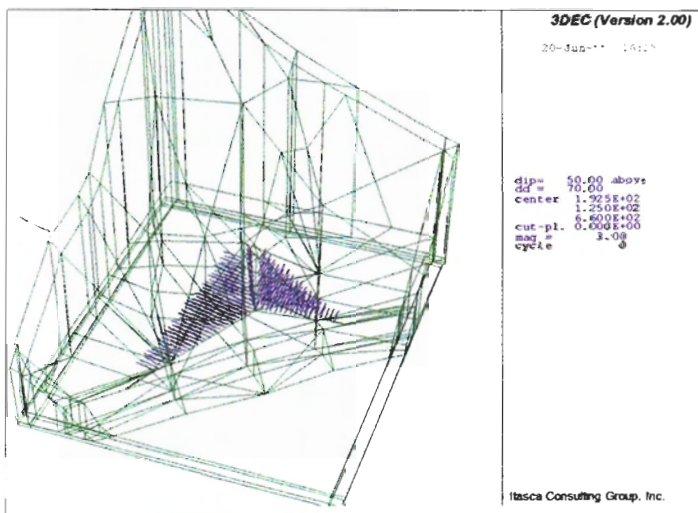


Fig. 9. Modelización específica de los bulones de refuerzo en un talud de desmonte.

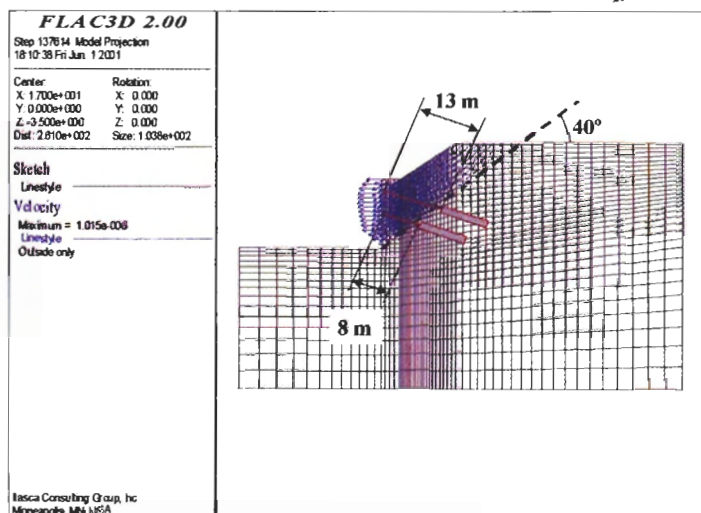


Fig. 10.- Diseño de la longitud de anclajes a partir de la superficie de deslizamiento obtenida.

Acoplamiento hidromecánico

Las herramientas tradicionales de cálculo del *Factor de Seguridad* por equilibrios límites tienen muy limitadas las posibilidades para incorporar la distribución real de presiones de poros. Por el contrario, con los modelos numéricos es posible realizar tanto cálculos de la red de flujo como cálculo hidromecánicos completamente acoplados, que permiten establecer una distribución de poros más realistas para a continuación someter el modelo al cálculo del factor de seguridad mediante reducción de la resistencia al corte.

En la **Fig. 11** se presenta la distribución de presiones de poro calculada bajo un terraplén. Esta distribución de presiones de poro depende de la velocidad de recrecimiento del terraplén y de la capacidad del suelo para disipar el exceso de presión de poros creado. El cálculo del factor de seguridad en estas condiciones es más realista pues incorpora las tensiones efectivas obtenidas de una distribución de presiones de poro más real.

Análisis dinámico completo

El análisis de estabilidad de taludes en caso de sismo, habitualmente se resuelve introduciendo en el análisis una componente horizontal de la gravedad, metodología igualmente válida tanto para análisis por equilibrios límite como por reducción de la resistencia al corte.

No obstante, los modelos numéricos permiten realizar un análisis dinámico completo del talud durante el sismo. Para ello se introduce un acelerograma en la base del

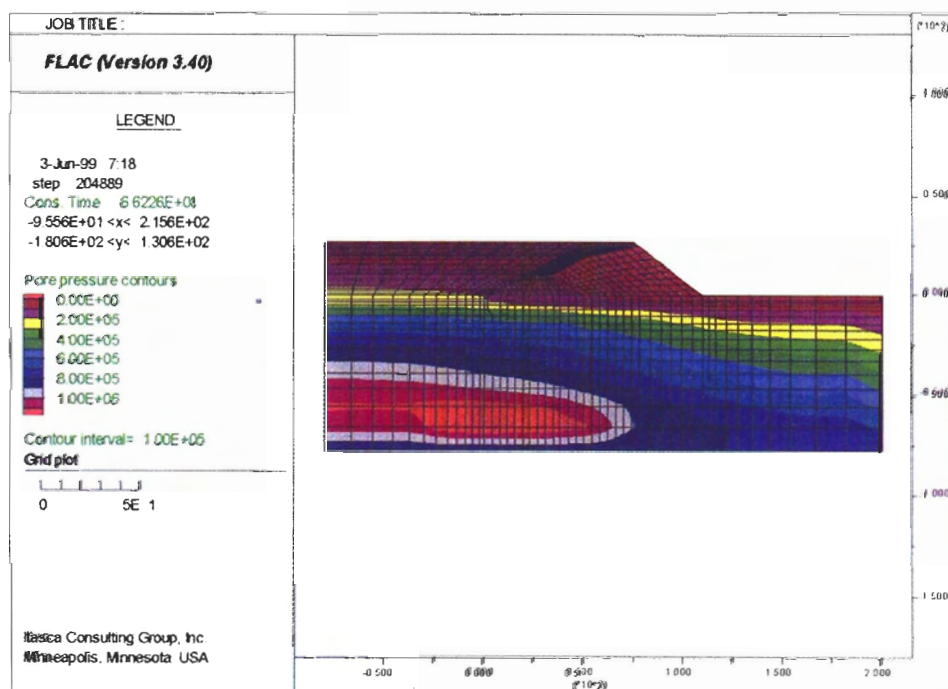


Fig. 11.- Exceso de presión intersticial por sobrecarga bajo una balsa de estériles.

modelo como condición de contorno, y se simula el comportamiento del talud, considerando para el terreno un modelo constitutivo con post-rotura.

Tras la duración del sismo puede resultar que el talud sea inestable, con lo que su factor de seguridad en condiciones dinámicas será inferior a 1, o bien que se haya estabilizado. Como ya se ha visto, es posible acoplar el cálculo del factor de seguridad mediante reducción de resistencia a un suelo reblandecido, de manera que se obtendría el factor de seguridad del talud después del sismo.

En la **Fig. 12-a** se presenta un acelerograma real que se ha introducido como condición de contorno de un modelo; en la **Fig. 12-b** se ilustra el desplazamiento vertical del punto situado en la coronación del talud durante el sismo, mientras que en la **Fig. 12-c** se presenta el estado de reblandecimiento y rotura del terreno tras el evento.

Esta metodología ha sido recientemente aplicada en el análisis de estabilidad de varios taludes de la carretera Panamericana CA-1 tras las pasados terremotos de enero y febrero de 2001 en el Salvador (Galera, J.M. y Varona, P. 2002).

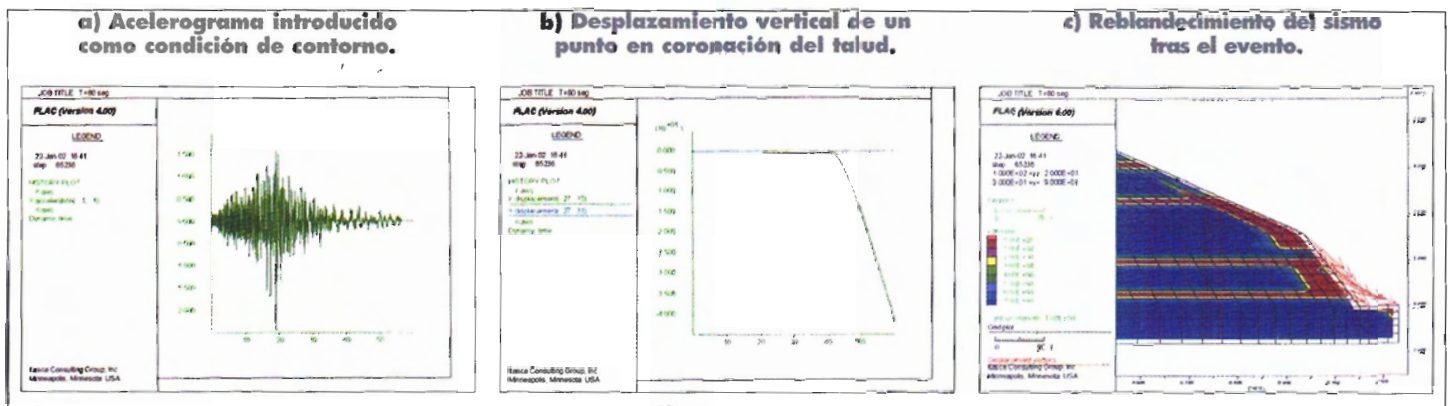


Figura 12.- Análisis dinámico completo de la estabilidad de un talud en caso de sismo.

Otras consideraciones

Existen otras ventajas generales resultantes de considerar en el análisis de estabilidad no sólo la resistencia al corte del terreno, sino también, su deformabilidad no sólo en aquellos casos como en el modelo constitutivo *strain-softening* en los que el desplazamiento inducido en el terreno marca el cambio entre las propiedades de pico y residuales.

Por último, en la modelización numérica pueden tenerse en cuenta de forma fácil, condiciones de contorno complejas tales como procesos erosivos, tensiones naturales, cargas externas etc.

Conclusiones

La técnica de reducción de resistencia al corte permite calcular el factor de seguridad mediante modelos numéricos, y por lo tanto es posible incorporar todas las ventajas de la modelización numérica, en cuanto a geometría, tridimensionalidad, modelos constitutivos, fases de cálculo, acoplamientos con otros fenómenos físicos, etc., en los análisis de estabilidad de taludes.

En la medida en que aumenta la complejidad del problema de estabilidad, las herramientas tradicionales de cálculo del equilibrio límite se quedan limitadas, en gran medida porque la forma de la geometría de rotura hay que introducirla previamente al cálculo, y por otro lado porque los algoritmos de búsqueda automática no parecen garantizar que la superficie de rotura proporcionada, sea realmente la crítica.

Con un material elástico perfectamente plástico y una regla de flujo asociada, la técnica de reducción de resistencia al corte produce exactamente el mismo factor de seguridad que los cálculos de equilibrio

límite y el factor de seguridad así calculado es único e independiente de los parámetros elásticos del material, del estado tensional inicial y del *stress-path*.

En modelización numérica se emplean normalmente modelos constitutivos plásticos con una regla de flujo no asociada, y para ésta no se dispone de una demostración sólida de la unicidad e independencia de los parámetros elásticos y estado tensional del factor de seguridad calculado mediante reducción de resistencia al corte.

No obstante lo anterior, y al amparo de los análisis de estabilidad de taludes realizados por los autores de este artículo con modelos numéricos y con equilibrios límites, puede concluirse que la modelización numérica es una herramienta claramente ventajosa frente a los programas de equilibrio límite en el análisis de estabilidad de taludes complejos, siendo aquellos una aproximación suficientemente precisa en la mayor parte de los casos.

Referencias bibliográficas

- ARIAS, J.M., RIERA, M. Y VELASCO, P., (2001). Metodología de dimensionamiento de taludes en macizos rocosos competentes. Aplicación a los desmontes de los PK 2+400 y PK 2+550 de la CG-3. Andorra, zona de Pont-Plá, V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Volumen I, pp. 177 a 188, CEDEX, Madrid, 2001.
- DAWSON, E. (1998). Slope Stability Analysis with Finite Element and Finite Difference Methods. Dames & Moore (Nota sin publicar).
- Dawson, E. (1999). Finite Element Slope Stability Analysis. Proceedings of the 47th Annual Geotechnical Conference,

University of Minnesota, Department of Civil Engineering, February 19th 1999.

- GALERA, J.M. Y VARONA, P. (2002). Proyecto Constructivo de los túneles de los Chorros. Carretera CA-1. Tramo: Santa Tecla-Cuchilla. El Salvador.
- LORIG, L. Y VARONA, P. (2000). Practical Slope-Stability Analysis Using Finite-Difference Codes. Slope Stability in Surface Mining, Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME), Hustrulid, W.A., McCarter, M.K. & van Zyl, D.J.A. (eds.).
- RODRÍGUEZ-ORTIZ, J.M. Y VARONA, P., (2001). Sobre el determinismo en geotecnia. V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Volumen III, pp. 1409 a 1420, CEDEX, Madrid, 2001.
- VARONA, P. Y FERRER, M. (1998). Cálculo de factores de seguridad con FLAC. INGEOPRES Num: 58, Marzo 98, pp.38 a 41. Entorno Gráfico S.L.