# Efecto del espaciado en el cálculo de estabilidad de cuñas en taludes rocosos *Effect of Spacing on the Stability Assessment of Wedges in Rock Slopes*

Ignacio Pérez Rey<sup>1\*</sup>, Javier Moreno Robles<sup>2</sup>, Mauro Muñiz Menéndez<sup>3</sup>

#### Resumen

Este trabajo tiene como objetivo principal evaluar el efecto del espaciado de las discontinuidades en el cálculo del factor de seguridad de taludes rocosos afectados por roturas en cuña. Para ello, se ha recurrido a un código numérico de elementos discretos en 3 dimensiones (3DEC) con el que se realizaron unas 200 simulaciones en las que se estudió, mediante el método de la reducción de la resistencia al corte, el factor de seguridad de dos tipos de taludes afectados por diferentes familias de discontinuidades. Para el desarrollo de los modelos, se consideraron seis valores distintos del espaciado, seis valores de cohesión y dos ángulos de fricción de las juntas, combinados con dos ángulos de la cara del talud objeto de estudio. Como se ha podido observar, el efecto del espaciado en la estimación de la estabilidad de taludes rocosos afectados por roturas en cuña influye de manera relevante en el cálculo del factor de seguridad, el cual puede tener variaciones de hasta un 40 % en comparación con el obtenido a partir de métodos de equilibrio límite para taludes en macizos rocosos con características estructurales similares. Este trabajo abre la puerta a una interpretación más realista de los mecanismos de rotura de bloques en taludes, y en particular del factor de seguridad frente a inestabilidades de tipo cuña.

Palabras clave: rotura en cuña; 3DEC; espaciado; reducción de la resistencia al corte; factor de seguridad.

#### Abstract

The main objective of this work is to evaluate the effect of discontinuity spacing in the estimation of the factor of safety of rock slopes affected by wedge failures. To this effect, a 3D numerical discrete-element code (3DEC) has been selected to carry out about 200 simulations in which the factor of safety of two types of slopes, affected by different discontinuity sets, was studied by using the Shear Strength Reduction (SSR) method. As for the development of the models, six values of spacing, cohesion and two friction angles of the joints have been considered, combined with two angles of the slope face under study. The joint spacing has been found to affect relevantly the values of the factor of safety, which can show variations of up to 40 % in comparison with those obtained from limit equilibrium methods, for rock slopes with similar structural characteristics. Thus, this work aims at opening the door to a more realistic interpretation of rock slope failures.

Keywords: wedge failure; 3DEC; spacing; Shear-Strength Reduction (SSR); factor of safety.

Símbolos empleados en este trabajo:

- $\alpha$  dirección de buzamiento
- c cohesión
- $c_{tc}$  cohesión de la grieta de tracción
- $\phi$  ángulo de fricción
- $\phi_{tr}$  ángulo de fricción de la grieta de tracción
- FS factor de seguridad obtenido con 3DEC (método SSR)
- FSi factor de seguridad obtenido con SWedge
- $\psi_{f}$  ángulo de buzamiento de la cara del talud
- $\psi_i$  ángulo de buzamiento de la línea intersección
- $\rho$  densidad
- S espaciado

### **1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES**

En el ámbito de la ingeniería civil y minera, la excavación del terreno es una práctica común, ya sea para la ejecución de un talud, de una galería o de una cimentación. Esta actividad implica una interacción con el medio natural, el cual presenta unas características que vienen determinadas, fundamentalmente, por su origen e historia geológica, y que son modificadas en el momento de realizar la excavación.

Los macizos rocosos están sujetos, desde su formación, a los efectos generados por diferentes acciones mecánicas, térmicas y químicas, pero también de los diversos eventos geológicos posteriores, de los cuales derivan diferentes estados tensionales que generan discontinuidades en su seno. Así, se puede entender un macizo rocoso como el conjunto de roca «intacta» y discontinuidades.

La ISRM (2007) define la propia discontinuidad como un «término general para cualquier discontinuidad mecánica en un macizo rocoso que presenta baja o nula resistencia a la tracción». Este término general incluiría, por tanto, a las juntas, las fallas y los planos de estratificación.

De manera análoga al caso de una cadena, donde es el eslabón más débil el que determina el comportamiento general de la misma, las discontinuidades condicionarán

<sup>\*</sup> Autor de contacto: ignacio.perez@cedex.es

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Doctor ingeniero de minas. Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Doctor ingeniero de caminos, canales y puertos. Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Doctor en Geología e Ingeniería Geológica. Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

#### Efecto del espaciado..

el comportamiento del macizo rocoso. En palabras de los profesores Hudson y Harrison (1997) «en este contexto de la ingeniería, las discontinuidades pueden ser el factor más importante que gobierna el comportamiento de los macizos rocosos». Es por estas razones por las cuales se debe tener un conocimiento riguroso de las propiedades geométricas, mecánicas e hidrogeológicas de las discontinuidades.

La estabilidad de los taludes estará habitualmente condicionada por las características de la geología estructural del macizo rocoso en el que se excavan (Stead y Wolter, 2015). Será relevante, por tanto, determinar las propiedades mecánicas de las discontinuidades, pero también su orientación con respecto a la cara del talud, con el objetivo de identificar los posibles tipos de rotura que pudiesen ocurrir, las cuales se muestran de manera esquemática en la figura 1.

De acuerdo con Priest (1993), el espaciado de las discontinuidades se puede considerar como uno de los indicadores más relevantes a la hora de determinar la «calidad» de un macizo rocoso. Por tanto, la magnitud de ese parámetro tendrá influencia en la estabilidad general del talud. Este hecho se puede poner de manifiesto en las fotografías mostradas en la figura 2, en las cuales se pueden apreciar dos macizos rocosos afectados por varias familias de discontinuidades, pero con espaciados muy diferentes.

A la hora de realizar un análisis preliminar de la estabilidad de taludes como los mostrados en la figura 2, una práctica común en el ámbito de la ingeniería de macizos rocosos sería recurrir a la proyección estereográfica —implementada actualmente en programas informáticos como *Dips* (Rocscience, 2020a)— mediante la cual se puede realizar un análisis cinemático de los potenciales tipos de roturas, a partir de medidas de las orientaciones de las discontinuidades.

El paso siguiente sería realizar la estimación del factor de seguridad del talud, para lo cual se suelen emplear métodos de equilibrio límite (MEL), análisis numéricos y la combinación de ambos métodos.

En cuanto a los métodos de equilibrio límite, existen hoy en día soluciones como *SWedge* (Rocscience, 2020b) que permitirían analizar, de manera *determinista* para el caso mostrado en la figura 2, un factor de seguridad a partir



**Figura 1.** Mecanismos básicos de inestabilidad en taludes rocosos: (a) rotura circular; (b) rotura plana; (c) rotura en cuña; y (d), rotura por vuelco (Hudson y Harrison, 1997).

de la introducción de las propiedades de la roca, de las juntas y del talud. La desventaja de este tipo de metodologías radica en que consideran solamente, como características estructurales, el efecto de la orientación de los planos para la determinación de la que podría llamarse «cuña pésima» (Rocscience, 2019b), pero no otros parámetros que pueden afectar de manera relevante a la estabilidad general del talud, como es, por ejemplo, el espaciado de las juntas. Este hecho se esquematiza en la figura 4, en donde se representan dos taludes afectados por dos familias de discontinuidades (J1 y J2). Como se puede apreciar, los *buzamientos y direcciones de buzamiento* de las familias son las mismas en ambos ejemplos, algo que se evidencia a la hora de analizar su representación mediante la proyección estereográfica.

Si estas representaciones estereográficas se toman como base para la estimación del cálculo del factor de seguridad mediante un método de equilibrio límite, como puede ser el que viene implementado en el programa informático *SWedge* (Rocscience, 2020b), se puede incurrir



**Figura 2.** (a) Fotografía de un talud en roca, donde se puede observar una rotura típica en cuña, con dos juntas *más o menos* persistentes (tomada de Wyllie, 2018); (b) fotografía de un talud excavado en un macizo rocoso altamente fracturado (espaciado de las juntas relativamente bajo), en el que se producen diversas roturas en cuña (tomada de Hoek y Bray, 1977).



**Figura 3.** Esquema idealizado de dos taludes en macizos rocosos afectados por dos familias de juntas con la misma orientación (buzamiento y dirección de buzamiento), pero con distintos espaciados: (a) espaciado =  $S_a y$  (b) espaciado =  $S_b y$  representaciones estereográficas correspondientes.

en el error de obviar la presencia de cuñas más pequeñas, formadas a causa de un espaciado de las discontinuidades no contemplado. Este hecho no ha pasado desapercibido en las últimas versiones del programa, en cuyo manual se hace hincapié en la influencia que podría tener la persistencia y el espaciado en el cálculo del factor de seguridad (Rocscience, 2019a), incluyendo para ello la posibilidad de considerar dos tipos de espaciado («grandes espaciados» o «pequeños espaciados-modelo de juntas ubicuas») en el modelo de análisis probabilístico.

Por ello, con el ánimo de evaluar las diferencias que pudiesen existir a la hora de abordar el cálculo de estabilidad de un talud afectado por familias de discontinuidades potencialmente formadoras de cuñas, mediante un análisis *determinista* y un análisis numérico, se presenta este trabajo. Como objetivos principales, se considerarán:

- Estudio de la rotura en cuña en taludes rocosos por medio de métodos analíticos —empleando para ello el cálculo determinista implementado en el programa informático SWedge (Rocscience, 2020b)— y mediante métodos numéricos, en particular utilizando el programa 3DEC (Itasca, 2016a), cuya formulación numérica se basa en el método de elementos discretos (DEM).
- Análisis de los factores de seguridad obtenidos para dos taludes tipo (\u03c6f, 1 = 65° y \u03c6f, 2 = 90°) afectados por una rotura en cuña simple, mediante el código *SWedge* (método analítico) y mediante el código *3DEC* (reducción de la resistencia al corte de las juntas), suponiendo distintos valores de la cohesión de las juntas.
- Estudio del factor de seguridad mediante 3DEC de los dos taludes tipo, afectados por dos familias de discontinuidades potenciales formadoras de cuñas, variando el espaciado de dichas familias, para distintos valores de cohesión en las juntas.
- Estudio del factor de seguridad mediante *3DEC* de un talud tipo en el cual existe, además de las familias de discontinuidades potencialmente formadoras

de cuñas, una familia de grietas de tracción sub-verticales.

- Estudio del factor de seguridad mediante 3DEC de un talud tipo en el cual existen, además de las familias de discontinuidades potencialmente formadoras de cuñas, una familia de juntas basales
- Estudio del factor de seguridad mediante 3DEC de un talud tipo en el cual existen, además de las familias de discontinuidades potencialmente formadoras de cuñas, una familia de grietas de tracción y una familia de juntas basales

La rotura en cuña es uno de los problemas más comunes dentro de las inestabilidades observadas en macizos rocosos (Goodman y Kieffer, 2000), además de poder ocurrir en un rango de condiciones geológicas y geométricas mucho mayor que, por ejemplo, la rotura plana (Wyllie, 2018).

Los primeros estudios en los que se considera el problema de la estabilidad de un bloque de roca frente a un movimiento de traslación (deslizamiento) y que inspiran el análisis de la rotura en cuña fueron desarrollados por varios autores hacia finales de la década de 1960(Goodman, 1964; Londe, 1965; Londe *et al.*, 1969; Wittke, 1965), época en la que se empezaba a comprender la naturaleza discontinua de los macizos rocosos y la gran influencia de las discontinuidades en su comportamiento mecánico. La mayoría de estos análisis referidos se basan en el método de equilibrio límite, donde se considera solamente el mecanismo de deslizamiento del bloque de roca.

Las primeras aproximaciones a la resolución del problema particular de estabilidad de una cuña fueron desarrolladas por Hoek, Bray y Boyd (1973), recurriendo a métodos gráficos y a la proyección estereográfica, técnicas ya asentadas (Goodman, 1964; Hendron *et al.*, 1971). Años más tarde, los profesores Hoek y Bray (1981) publicaban el libro *Rock Slope Engineering* en el cual se incluye la metodología para el análisis del factor de seguridad de una cuña mediante el empleo del cálculo vectorial. Este método fue después implementado en sucesivas versiones del programa informático *SWedge* (Rocscience, 2020b) para la resolución del problema de estabilidad de una cuña, si bien dicha aplicación se basa también en el desarrollo hecho por Goodman y Shi (1985) en cuanto a la «Teoría de Bloques», a la hora de determinar el tamaño de la cuña para realizar los cálculos.

Las limitaciones encontradas en el método de equilibrio límite para el análisis de estabilidad de cuñas en macizos rocosos (como, por ejemplo, la necesidad de suposición del deslizamiento del bloque en una dirección paralela a la de la línea intersección) empezaron a ponerse de manifiesto a partir de la década de 1980 por varios autores (Chan y Einstein, 1981; Chen *et al.*, 1999) lo que llevó al desarrollo de métodos de análisis complementarios, pero también a introducir en los análisis diversos parámetros que afectaban a las juntas, como es el caso de la dilatancia (Wang y Yin, 2002) o los efectos dinámicos (Kumsar *et al.*, 2000) y que permitieron actualizaciones del clásico método de equilibrio límite.

A finales de la década de 1980 se empezó a considerar el efecto de la incertidumbre, inherente a la naturaleza de los macizos rocosos, en el análisis de su estabilidad, mediante la aplicación de técnicas estadísticas en el campo de la ingeniería de taludes (Frangopol y Hong, 1987; Tamimi *et al.*, 1989), aplicadas de manera reciente al estudio de cuñas de roca (Jiang *et al.*, 2013; Jiménez-Rodríguez y Sitar, 2007; Li *et al.*, 2009; Ma *et al.*, 2019).

A partir de 1990, con el desarrollo de la computación y la mejora de la velocidad de los procesadores, comenzó a aplicarse, de manera cada vez más habitual, el análisis numérico a la resolución de problemas en la ingeniería de macizos rocosos y, en particular, al estudio de roturas en cuña (Wang *et al.*, 2004), lo que permitió evaluar en los últimos años, mediante la implementación de modelos numéricos en 3D, por ejemplo, el efecto de los puentes de roca intacta en la estabilidad de este tipo de bloques (Paronuzzi *et al.*, 2014, 2016).

### 2. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo los análisis dentro de este trabajo, se han escogido dos programas informáticos, cuyos resultados servirán para realizar las comparaciones y, de manera potencial, alcanzar las conclusiones que se persiguen.

Por un lado, se seleccionó el código *SWedge* (Rocscience, 2020b), basado en el método de equilibrio límite y que está enfocado al análisis sencillo de roturas en cuña en macizos rocosos. Este programa permite realizar análisis de estabilidad *deterministas* y probabilísticos, a través de distintos modelos para representar la resistencia al corte de las discontinuidades, como son el modelo de Mohr-Coulomb (Labuz y Zang, 2012), el de Barton-Bandis (Barton y Bandis, 1982) o una curva potencial. Con este programa, se han obtenido los factores de seguridad de manera *determinista*.

Por otro lado, se seleccionó el código *3DEC* (Itasca, 2016a), un programa basado en el *método de los elementos discretos (DEM)* en 3 dimensiones, mediante el cual se

llevaron a cabo todas las simulaciones de los casos estudiados, según se describe en la presente sección. La metodología general para el desarrollo de los modelos numéricos con *3DEC* viene descrita en el manual del programa (Itasca, 2016c) y podría resumirse mediante el esquema mostrado en la figura 4.



Figura 4. Procedimiento de solución general para análisis estático en geomecánica mediante el programa 3DEC (Itasca, 2016c).

El código *SWedge* se utilizó como base para realizar la calibración de los modelos numéricos de *3DEC*, de la manera esquematizada en la figura 5. Se comparó, para todos los modelos estudiados en el presente trabajo, el factor de seguridad obtenido mediante *SWedge* (FSi), con el factor de seguridad obtenido mediante el método de la reducción de la resistencia al corte (*SSR*), implementado en *3DEC*. La comparación se hizo teniendo en cuenta, para las simulaciones con *3DEC*, el máximo espaciado (S ≥ 80 m) considerado para las familias de discontinuidades, de manera que se produjese solamente una rotura en cuña simple.

Para las simulaciones con *3DEC* realizadas en el seno de este trabajo, los modelos se han obtenido mediante la generación de un bloque inicial de dimensiones 220 × 160 × 60 m<sup>3</sup>, a partir del cual se crearon las geometrías adecuadas para la llevar a cabo los cálculos. Se han considerado dos modelos de talud tipo, definidos fundamentalmente por el ángulo de inclinación de sus caras ( $\psi f$ ) y su altura (H). Así, se estudiaron dos taludes, ambos con una altura H = 50 m, con ángulos  $\psi f$ ,  $I = 65^{\circ}$  (modelo 1) y  $\psi f$ ,  $2 = 90^{\circ}$  (modelo 2). En la figura 6 se muestran dichos modelos empleados en la simulación numérica con *3DEC*. Para la modelización de la roca intacta se consideraron bloques rígidos (indeformables), definidos por las intersecciones de las familias de discontinuidades involucradas, y por su densidad.



Figura 5. Esquema del procedimiento llevado a cabo para evaluar el cálculo del FS mediante el código SWedge y el código 3DEC de elementos *discretos* en 3D.



**Figura 6.** (a) Modelo utilizado en 3DEC para el talud con  $\psi_{f,1}$  = 65° (modelo 1); (b) modelo para el talud con  $\psi_{f,2}$  = 90° (modelo 2).

Cada modelo de talud se ha considerado afectado por dos familias de discontinuidades con orientaciones potencialmente formadoras de cuñas, además de una familia de discontinuidades con buzamiento sub-vertical (representativa de posibles grietas de tracción), otra familia de discontinuidades basales con buzamiento,  $\beta$  = 25°, y la combinación de ambas; en este último caso solamente para «modelo 1». Estas características se resumen en la tabla 1.

 Tabla 1. Características de los modelos analizados en el presente trabajo

Características estructurales del MR	Modelos de talud afectados			
2 familias de juntas potencialmente formadoras de cuñas (J1 y J2)	«modelo 1» «modelo 2»	«modelo 1»	«modelo 1»	
1 familia de juntas sub- verticales (grietas de tracción)	—			
1 familia de juntas basales	_	_		

Como se ha adelantado en la sección 1 (Introducción y antecedentes), el parámetro de mayor interés en el presente estudio se corresponde con el espaciado. Por ello, se consideraron diferentes valores de este parámetro que se combinan con diferentes valores de los parámetros representativos del modelo constitutivo de las juntas (cohesión y ángulo de fricción). La gama de parámetros considerados para la realización de todas las simulaciones se presenta en la tabla 2. En la fase de calibración del modelo numérico, se realizaron algunas simulaciones de modelos con cuñas simples, para distintos niveles de cohesión de las juntas, de los factores de seguridad obtenidos mediante *SWedge y 3DEC* (FSi y FS, respectivamente). Estos resultados se presentan en la figura 7, en la que se puede apreciar cómo los valores del factor de seguridad obtenidos mediante los dos métodos varían de manera muy leve.



**Figura 7.** Comparativa entre los FS obtenidos mediante SWedge y 3DEC para los modelos con ocurrencia de una rotura en cuña simple (S = 80 m). Se muestra en rojo la línea 1:1.

Tabla 2. Características	geométricas y	propiedades	mecánicas	de la	roca	intacta y	discontin	uidades
empleadas en las simula	ciones con 3DE	C						

Material	Dirección de buzamiento, α (º)	Buzamiento, β (º)	Espaciado, S (m)*	Cohesión, c (MPa)	Ángulo de fricción, φ (º)	Otras	
Roca intacta	—	—	—	—	—	ρ = 2700 (kg·m <sup>-3</sup> ) (modelizada como bloques rígidos en <i>3DEC</i> )	
Cara del talud	180	65; 90			—	—	
Cara superior	180	0			—	—	
J1	125	62	90/80; 40; 20; 10; 5; 2,5	0; 0,01; 0,05; 0,1; 0,15; 0,20	30; 40		
J2	230	55	90/80; 40; 20; 10; 5; 2,5	0; 0,01; 0,05; 0,1; 0,15; 0,20	30; 40	jkn = 1·10 <sup>10</sup> (N·m <sup>-2</sup> )	
Grieta de tracción	180	85	90/80; 40; 20; 10; 5; 2,5	<b>c</b> <sub>tc</sub> = c/100**	$\Phi_{tc} = 10^{**}$	$jks = 1.10^9 (N \cdot m^{-2})$	
Familia juntas basales	180	25	90/80; 40; 20; 10; 5; 2,5	0; 0,01; 0,05; 0,1; 0,15; 0,20	40		

\*en algunos de los modelos con espaciado mayor (S = 80 m), de cara a realizar una comparación en condiciones geométricas similares a los modelos de SWedge, se ha tenido que considerar un espaciado de 90 m.

\*\*el valor de cohesión para la familia de juntas de tracción corresponde a 1/100 del valor de cohesión utilizado en el resto de juntas del modelo (según el caso que corresponda) y a un valor del ángulo de fricción de  $\phi tc = 10^{\circ}$ .

En cuanto a la estimación del factor de seguridad (FS) con *3DEC*, esta se ha realizado siguiendo el método de la reducción de la resistencia al corte (Dawson *et al.*, 1999; Hammah *et al.*, 2005; Shen y Karakus, 2013; You *et al.*, 2018; Zienkiewicz *et al.*, 1975). Para ello, partiendo de un *fprueba* = 1, se han ido reduciendo las propiedades resistentes de las juntas (parámetros *c* y  $\phi$ ) del modelo mediante una subrutina en el lenguaje *FISH* (Itasca, 2016b) propio de *3DEC*.

Se consideró que un modelo era inestable cuando, a la hora de monitorizar los desplazamientos de los bloques, se observaba un valor del orden de los 10<sup>-2</sup> m, y una estabilización del valor del *fprueba* (si bien, para algunos modelos se ha considerado oportuno permitir un mayor desplazamiento de los bloques de cara a una evaluación lo más objetiva posible del inicio de la rotura y, consecuentemente, del *fprueba*).

En este trabajo, se han realizado alrededor de 200 modelos numéricos con *3DEC* además de las correspondientes pruebas de calibración de modelos con el método implementado en el programa *SWedge*.

#### 3. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos después de la realización de alrededor de 200 modelos numéricos con el programa *3DEC*, combinando distintos valores de los parámetros resistentes de las discontinuidades con los valores de los espaciados considerados. Se dividen los resultados en varias secciones, cada una de ellas correspondiente a un modelo de talud (en la manera descrita en la tabla 2) y, en particular, para los ángulos de fricción considerados ( $\phi = 40^\circ$  o  $\phi = 30^\circ$  según proceda).

Se ha optado por representar los resultados del FS normalizados en función del FS obtenido para la cuña simple (FSi), considerada la cuña «pésima» según se genera de acuerdo a la metodología del programa *SWedge* (Rocscience, 2019b).

## 3.1. Talud con ángulo de buzamiento de la cara, $\psi f = 90^{\circ}$ y ángulo de fricción, $\varphi = 40^{\circ}$

En la figura 8 se representan los valores del FS normalizado con respecto al FS obtenido para el modelo con el espaciado mayor (S  $\ge$  80 m), en función del espaciado de las familias de discontinuidades, referido a la altura del talud, H, con  $\psi f = 90^{\circ}$ .

Como se puede observar, para los valores del espaciado de órdenes mayores a los de la altura del talud (S  $\ge$  80 m, en el presente estudio), apenas existe variación en el FS con respecto al FSi. Sin embargo, para valores donde el espaciado empieza a ser de órdenes menores a la altura del talud (valores de FS/FSi < 0,8), se observa una caída pronunciada del FS, con respecto al obtenido en el modelo de cuña simple. Esta caída es más relevante a medida que aumenta la cohesión de las juntas en el modelo, llegando a disminuir el FS en torno al 20 % de su valor inicial, para espaciados 10 veces menores que la altura del talud y valores de cohesión de 0,20 MPa.



**Figura 8.** Valores del FS normalizado según FSi en función del espaciado normalizado (S/H), para los distintos valores de cohesión considerados en un talud con  $\psi f = 90^{\circ}$ .

# 3.2. Talud con ángulo de buzamiento de la cara, $\psi f = 65^{\circ}$ y ángulo de fricción, $\varphi = 40^{\circ}$

En el caso del talud con un ángulo de buzamiento de la cara  $\psi f = 65^{\circ}$  (figura 9), la tendencia observada es similar al caso presentado para un ángulo de talud  $\psi f = 90^{\circ}$ . Para valores del espaciado normalizado mayores a 0,8 (es decir, para espaciados del orden de la altura del talud o mayores), se observa una variación mínima del FS con respecto al de la inestabilidad producida para una cuña simple (S  $\geq$  80 m). Sin embargo, las caídas observadas en el FS/FSi son más pronunciadas que en el caso del talud con  $\psi f = 90^{\circ}$ ,

llegando a una reducción del FS de entorno al 25 % de su valor inicial a medida que el espaciado de las discontinuidades empieza a ser de orden menor a la altura del talud.

# 3.3. Talud con ángulo de buzamiento de la cara, $\psi f = 65^{\circ}$ y ángulo de fricción, $\varphi = 30^{\circ}$

Para evaluar el efecto de un ángulo de fricción de las juntas distinto al estudiado hasta el momento, se decidió realizar un conjunto de simulaciones con el talud con ángulo de buzamiento de la cara  $\psi f = 65^{\circ}$  pero considerando  $\Phi = 30^{\circ}$ . Como se puede apreciar en las curvas representativas



**Figura 9.** Valores del FS normalizado según FSi en función del espaciado normalizado (S/H), para los distintos valores de cohesión considerados en un talud con  $\psi_f = 65^\circ$  y dos familias de discontinuidades J1 y J2, potenciales formadoras de cuñas.



**Figura 10.** Valores del FS normalizado según FSi en función del espaciado normalizado (S/H), para los distintos valores de cohesión considerados en un talud con  $\psi_f = 65^\circ$  y dos familias J1 y J2, potenciales formadoras de cuñas. Se representan también las mismas curvas para  $\phi = 40^\circ$  (líneas discontinuas).

del factor de seguridad normalizado frente al espaciado referido a la altura del talud (figura 10) la tendencia a la disminución del FS con respecto a no considerar el espaciado de las familias de discontinuidades formadoras de cuñas es relevante.

Aunque las tendencias son similares al caso presentado en la figura 9, en el presente escenario se puede apreciar que la caída del FS es algo mayor cuando se considera un ángulo de fricción menor, especialmente para los valores de cohesión menores. Hay que destacar que no se han considerado, para este caso, los valores de cohesión menores a 0,05 MPa, por generar modelos con cuñas inestables (FSi < 1).

# 3.4. Talud con ángulo de buzamiento de la cara, $\psi f = 65^{\circ}$ y ángulo de fricción, $\phi = 40^{\circ}$ , con familia de grietas de tracción

El mismo talud con  $\psi f = 65^{\circ}$  y las dos familias de discontinuidades potencialmente formadoras de roturas en cuña se volvió a estudiar, pero ahora añadiendo en cada modelo una familia de juntas sub-verticales (representativas de grietas de tracción) con los mismos espaciados que los asignados al resto de juntas según corresponda en cada modelo. Como se puede observar en las curvas presentadas en la figura 11, la disminución del factor de seguridad vuelve a ser relevante, en particular para aquellos espaciados de orden menor a la altura del talud. El efecto es más acuciado cuanto mayor es el valor de la cohesión de las juntas. Se debe destacar también que, en comparación con los resultados observados para un modelo con el mismo ángulo de cara de talud y las mismas propiedades resistentes de las juntas, la caída del factor de seguridad es mucho mayor al considerar el efecto de las grietas de tracción, detectándose caídas, para el talud más fracturado, de hasta un 40 % del valor del factor de seguridad sin considerar el efecto del espaciado (FSi).

# 3.5. Talud con ángulo de buzamiento de la cara, $\psi f = 65^{\circ}$ y ángulo de fricción, $\phi = 40^{\circ}$ , con familia de juntas basales ( $\beta = 25^{\circ}$ )

De la misma forma que se modificó la configuración original del talud con  $\psi f = 65^\circ$ , en este caso se introdujo en el modelo una familia de juntas basales con un ángulo de buzamiento,  $\beta = 25^{\circ}$ . Como se puede apreciar en las curvas representadas en la figura 12, la tendencia es similar a la observada en el resto de los casos analizados en este trabajo. Sin embargo, se debe notar que la disminución del factor de seguridad en función del espaciado, para las mismas familias de juntas, no desciende de una manera correlativa para los diferentes valores de cohesión estudiados. Este hecho es particularmente relevante para el caso de los valores c = 0,15 MPa y c = 0,2 MPa. Una vez se observan los modelos en las simulaciones, se puede constatar que la conjunción de las distintas familias da lugar a bloques cuyas formas generan modos de rotura distintos a la rotura en cuña clásica, pudiendo quedar enmascarada la rotura en cuña esperable en algunos modelos.



**Figura 11.** Valores del FS normalizado según FSi en función del espaciado normalizado (S/H), para los distintos valores de cohesión considerados en un talud con  $\psi_f = 65^\circ$  y conteniendo una familia de grietas de tracción con espaciados iguales a los de las familias formadoras de cuñas.



**Figura 12.** Valores del FS normalizado según FSi en función del espaciado normalizado (S/H), para los distintos valores de cohesión considerados en un talud con  $\psi_f = 65^\circ$  y conteniendo una familia de juntas basales ( $\beta = 25^\circ$ ) con espaciados iguales a los de las familias formadoras de cuñas.

# 3.6. Talud con ángulo de buzamiento de la cara, $\psi f = 65^{\circ}$ y ángulo de fricción, $\phi = 40^{\circ}$ , con familia de grietas de tracción y familia de juntas basales

El último escenario estudiado consiste en un talud con  $\psi f = 65^{\circ}$ , la combinación de las dos familias potencialmente formadoras de cuñas, con una familia de grietas de tracción y una familia de juntas basales con  $\beta = 25^{\circ}$ . La disminución del FS observada en los demás escenarios estudiados en este trabajo vuelve a repetirse para este caso. Sin embargo, ha de destacarse que dicha disminución no se mantiene de manera consecutiva a medida que aumentan los valores de la cohesión y disminuyen los espaciados de las familias. Esto es debido a que, una vez observados los modelos en su fase de estabilización del factor de seguridad de prueba (rotura), se han detectado inestabilidades que no responden claramente a roturas en cuña.

Es por ello que en la figura 13 se han omitido los resultados correspondientes a los valores de cohesión c = 0,15 MPa y c = 0,2 MPa, aunque sí se han llevaron a cabo las simulaciones.

Asimismo, se debe destacar que no se pudieron llevar a cabo las simulaciones con estos modelos con cuatro familias



**Figura 13.** Valores del FS normalizado según FSi en función del espaciado normalizado (S/H), para los distintos valores de cohesión considerad os en un talud con  $\psi_f = 65^\circ$  y conteniendo una familia de grietas de tracción y una familia de juntas basales ( $\beta = 25^\circ$ ) con espaciados iguales a los de las familias formadoras de cuñas.

de juntas cuyo espaciado era S = 2,5 m, debido al gran número de bloques que se generaban, quedando el ordenador sin suficiente memoria para la realización de los cálculos.

## 4. DISCUSIÓN

A pesar de que los objetivos perseguidos con el desarrollo de este trabajo se han alcanzado, se considera necesario realizar un breve análisis crítico de los resultados obtenidos.

Para la realización de los modelos numéricos, se han llevado a cabo ciertas consideraciones que, aunque pueden suponer enfoques simplificados, ayudan a la comprensión de los fenómenos a estudiar y, en todo caso, ofrecen una visión conservadora del problema. Se debe destacar que se ha considerado una persistencia infinita de las discontinuidades, no teniendo en cuenta un escenario más realista incluyendo, por ejemplo, la existencia de puentes de roca. Esta suposición tendría el inconveniente de complicar la implementación de los modelos, además de unos tiempos de cálculo excesivos para el enfoque original del presente trabajo.

Otro aspecto relevante corresponde al modelo constitutivo empleado en la modelización de las discontinuidades: el modelo de Mohr-Coulomb con una regla de flujo no asociada (dilatancia nula), con juntas planas y sin rugosidad. Se considera que este modelo, aunque útil, no es el más adecuado para el análisis del comportamiento de macizos rocosos y discontinuidades, existiendo otros criterios no lineales y potencialmente más apropiados como el de Hoek-Brown, Barton-Bandis o Barton-Choubey. La selección del criterio de Mohr-Coulomb para modelizar el comportamiento resistente de las juntas ha sido con el fin de realizar una aproximación simplificada pero representativa del problema, además de para facilitar la implementación del método de la reducción de la resistencia al corte en el modelo numérico.

En cuanto a las propiedades mecánicas de las discontinuidades, se ha elegido una serie de valores de cohesión y ángulo de fricción en una gama realista, pero con los mismos valores para todas las discontinuidades involucradas en cada modelo numérico, lo cual representa una situación que se aleja de la realidad.

Esto abre la puerta a la realización de nuevas simulaciones introduciendo estos parámetros como funciones de densidad (Priest, 1993), situación que permitiría generar escenarios más realistas, teniendo en cuenta la naturaleza de los macizos rocosos pero que, por otro lado, implicaría un coste computacional mucho mayor, así como la necesidad de crear subrutinas específicas.

Los tipos de rotura observados en las simulaciones se corresponden, en general, con roturas en cuña, si bien en algunos casos, la configuración de las características estructurales del modelo provoca inestabilidades que difieren del tipo de rotura objeto de este estudio (bloques con formas alejadas de tetraedros y superficies de deslizamiento asociadas a roturas planas). Este hecho provoca que, en algunas de las curvas obtenidas (en particular, para los casos con juntas basales y con la combinación de estas con las familias de grietas de tracción) no se observe una tendencia tan clara como en el resto de los casos, aunque sí en línea con la tendencia general en cuanto a la disminución del factor de seguridad.

Se debe destacar el hecho de que la obtención del factor de seguridad mediante el método de la reducción de la resistencia al corte puede responder a criterios muy distintos (como puede ser la elección de un criterio de convergencia adecuado o las condiciones de contorno del modelo), algo que no ocurre con los métodos de equilibrio límite.

### 5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha llevado a cabo un análisis del efecto del espaciado y los parámetros resistentes de las discontinuidades en la estimación del factor de seguridad de taludes excavados en macizos rocosos. Para ello, se han realizado alrededor de 200 simulaciones mediante un código de elementos *discretos* en 3D (3DEC) resultantes de la combinación de distintos valores de cohesión, ángulo de fricción, espaciado y orientación de las familias de discontinuidades involucradas y ángulo de la cara del talud.

Para todos los casos estudiados, se ha observado una tendencia general a la disminución del factor de seguridad a medida que disminuye el espaciado de las familias potencialmente formadoras de cuñas, efecto que se torna más relevante a medida que se introducen parámetros resistentes más elevados.

Estos factores de seguridad pueden llegar a alcanzar valores que suponen una disminución del 40 % con respecto al factor de seguridad obtenido mediante modelos basados en métodos de equilibrio límite o en metodologías que no consideran el efecto del espaciado de las familias de discontinuidades y tan sólo basan el análisis en las orientaciones de las discontinuidades y la geometría del talud.

En este trabajo se pone de manifiesto que la extrapolación del análisis de estabilidad de una cuña simple al conjunto de un talud rocoso no es totalmente realista, pudiendo arrojar resultados que queden del lado de la inseguridad, dependiendo de las características de la red de fracturación del macizo.

Las conclusiones obtenidas en este trabajo pueden ser de utilidad en el campo de la ingeniería geotécnica a la hora de analizar la estabilidad de taludes excavados en roca, pero también a la hora de obtener conclusiones más realistas al hacer análisis retrospectivos de roturas en este tipo de medios.

### 6. REFERENCIAS

Barton, N., y Bandis, S. (1982). Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock. *Proceedings of the 23*<sup>rd</sup> Symposium on Rock Mechanics, University of California, Berkeley, August 25-27.

Chan, H.C., y Einstein, H.H. (1981). Approach to complete limit equilibrium analysis for rock wedges—the method of "artificial supports." *Rock Mechanics*, 14(2): pp. 59–86. https://doi. org/10.1007/BF01239856

Chen, Z.Y., Wang, Y.J., Wang, X.G., y Wang, J. (1999). An upper bound wedge failure analysis method. En N. Yagi, T. Yamagami, y J.-C. Jian (eds.). *Proceedings of the International Symposium on Slope Stability Engineering, IS-Shikoku'99, Matsuyama, Shikoku, Japan, November 8-11, 1999*, Vol. II (pp. 325–328). Rotterdam: A.A. Balkema.

Dawson, E.M., Roth, W.H., y Drescher, A. (1999). Slope stability analysis by strength reduction. *Géotechnique*, 49(6): pp. 835– 840. https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.6.835

Frangopol, D.M., y Hong, K. (1987). Probabilistic analysis of rock slopes including correlation effects. 5<sup>th</sup> International Conference on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering, pp. 733–740.

Goodman, R.E. (1964). The resolution of stresses in rock using stereographic projection. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1(1): pp. 93–103. https://doi.org/10.1016/0148-9062(64)90072-5

Goodman, R.E., y Kieffer, D.S. (2000). Behavior of Rock in Slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(8): pp. 675–684. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:8(675)

Goodman, R.E., y Shi, G. (1985). *Block Theory and Its Application to Rock Engineering* (W.J. Hall [ed.]). Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

Hammah, R.E., Yacoub, T.E., Corkum, B.C., y Curran, J.H. (2005). The Shear Strength Reduction Method for the Generalized Hoek-Brown Criterion. *Proceedings of the 40<sup>th</sup> U.S. Rock Mechanics Symposium (Alaska Rocks 2005): Rock Mechanics for Energy, Mineral and Infrastructure Development in the Northern Regions, Alaska, June 25-29, 2005 (pp. 234–239).* 

Hendron, A.J., Cording, E.J., y Aiyer, A. K. (1971). *Analytical and graphical methods for the analysis of slopes in rock masses*. Technical Report no. 36. Urbana-Champaign: Department of Civil Engineering, University of Illinois.

Hoek, E., y Bray, J. (1977). *Rock Slope Engineering* (2<sup>nd</sup> ed.). London: Institution of Mining and Metallurgy.

Hoek, E., y Bray, J.W. (1981). *Rock Slope Engineering* (3<sup>rd</sup> ed.). London: Institution of Mining and Metallurgy.

Hoek, E., Bray, J.W., y Boyd, J.M. (1973). The stability of a rock slope containing a wedge resting on two intersecting discontinuities. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 6(1): pp. 1-55. https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1973.006.01.01

Hudson, J.A., y Harrison, J.P. (1997). *Engineering Rock Mechanics*. *An Introduction to the Principles* (1st ed.). Tarrytown, NY: Pergamon.

ISRM (2007). *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006* (R. Ulusay y J.A. Hudson [eds.]). Ankara: Commission on Testing Methods, ISRM & ISRM Turkish National Group.

Itasca (2016a). 3 Dimensional Distinct Element Code. 3DEC (5.2.282). Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc.

Itasca (2016b). 3DEC. 3 Dimensional Distinct Element Code. FISH in 3DEC (5.2). Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc.

Itasca (2016c). 3DEC (3 Dimensional Distinct Element Code). User's Guide. (Version 5.2). Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc.

Jiang, Q., Liu, X., Wei, W., y Zhou, C. (2013). A new method for analyzing the stability of rock wedges. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 60, pp. 413–422. https://doi. org/https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.01.008

Jiménez-Rodríguez, R., y Sitar, N. (2007). Rock Wedge Stability Analysis Using System Reliability Methods. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 40(4): pp. 419–427. https://doi. org/10.1007/s00603-005-0088-x

Kumsar, H., Aydan, Ö., y Ulusay, R. (2000). Dynamic and Static Stability Assessment of Rock Slopes Against Wedge Failures. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 33(1): pp. 31–51. https:// doi.org/10.1007/s006030050003

Labuz, J.F., y Zang, A. (2012). Mohr–Coulomb Failure Criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(6): pp. 975–979. https://doi.org/10.1007/s00603

Li, D., Zhou, C., Lu, W., y Jiang, Q. (2009). A system reliability approach for evaluating stability of rock wedges with correlated failure modes. *Computers and Geotechnics*, 36(8): pp. 1298–1307. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2009.05.013

Londe, P. (1965). Une méthode d'analyse à trois dimensions de la stabilité d'une rive rocheuse. *Annales de Ponts e Chaussées*, 1, pp. 37–60. Londe, P., Vigier, G., y Vormeringer, R. (1969). Stability of Rock Slopes–Graphical Methods. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96(4): pp. 1411–1434.

Ma, Z., Qin, S., Chen, J., Lv, J., Chen, J., y Zhao, X. (2019). A probabilistic method for evaluating wedge stability based on blind data theory. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78: pp. 1927-1936. https://doi.org/10.1007/s10064-017-1204-3

Paronuzzi, P., Bolla, A., y Rigo, E. (2016). 3D Stress–Strain Analysis of a Failed Limestone Wedge Influenced by an Intact Rock Bridge. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(8): pp. 3223–3242. https://doi.org/10.1007/s00603-016-0963-7

Paronuzzi, P., Rigo, E., y Bolla, A. (2014). Back-Analysis of a Failed Rock Wedge Using a 3D Numerical Model. En G. Lollino, D. Giordan, G.B. Crosta, J. Corominas, R. Azzam, J. Wasowski, y N. Sciarra (eds.), *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Congress of the International Association for Engineering Geology. Engineering Geology for Society and Territory, Vol. II: Landslide Processes* (pp. 1225–1229). Springer International Publishing Switzerland.

Priest, S.D. (1993). *Discontinuity Analysis for Rock Engineering* (1<sup>st</sup> ed.). London: Chapman and Hall.

Rocscience. (2019a). SWedge. Surface Wedge Analysis for Slopes. Theory Manual. Persistence and Bench Design (p. 11). Toronto: Rocscience Inc.

Rocscience. (2019b). SWedge Theory Manual. Safety Factor Calculations-Tetrahedral Wedges (p. 17). Toronto: Rocscience Inc.

Rocscience. (2020a). *Dips. Graphical and Statistical Analysis of Orientation Data*. Toronto: Rocscience Inc.

Rocscience. (2020b). Swedge. Surface Wedge Analysis for Slopes (7.008 64-bit). Toronto: Rocscience Inc.

Shen, J., y Karakus, M. (2013). Three-dimensional numerical analysis for rock slope stability using shear strength reduction method. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(2): pp. 164–172. https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0191

Stead, D., y Wolter, A. (2015). A critical review of rock slope failure mechanisms: The importance of structural geology. *Journal of Structural Geology*, 74, pp. 1–23. https://doi.org/https://doi. org/10.1016/j.jsg.2015.02.002

Tamimi, S., Amadei, B., y Frangopol, D.M. (1989). Monte Carlo simulation of rock slope reliability. *Computers & Structures*, 33(6): pp. 1495–1505. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0045-7949(89)90489-6

Wang, Y.J., y Yin, J.H. (2002). Wedge Stability Analysis Considering Dilatancy of Discontinuities. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 35(2): pp. 127–137. https://doi.org/10.1007/s006030200016

Wang, Y.J., Yin, J.H., Chen, Z. et al (2004). Analysis of Wedge Stability Using Different Methods. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 37(2): pp. 127–150. https://doi.org/10.1007/s00603-003-0023-y

Wittke, W.W. (1965). Method to analyze the stability of rock slopes with and without additional loading (en Alemán). *Felsmechanick und Ingenieurgeologie*, Supp. 11, 30, pp: 52–79.

Wyllie, D.C. (2018). *Rock Slope Engineering. Civil Applications* (5<sup>th</sup> ed.). London/New York: CRC Press (Taylor & Francis Group).

You, G., Mandalawi, M., Soliman, A., Dowling, K., y Dahlhaus, P. (2018). Finite Element Analysis of Rock Slope Stability Using Shear Strength Reduction Method BT-Soil Testing, Soil Stability and Ground Improvement. En W. Frikha, S. Varaksin, y Viana da Fonseca, A. (eds.), *Proceedings of the First GeoMEast International Congress and Exhibition, Egypt 2017 on Sustainable Civil Infrastructures* (pp. 227–235). Cham: Springer International Publishing.

Zienkiewicz, O.C., Humpheson, C., y Lewis, R.W. (1975). Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics. *Géotechnique*, 25(4): pp. 671–689.