

EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN PROBLEMAS DE MECÁNICA DE ROCAS MEDIANTE EL MÉTODO $c-\phi$ REDUCTION.

I. Aliguer*, I. Carol*, E.E. Alonso*

*Departamento de Ingeniería del Terreno Cartográfica y Geofísica (DITCG)
e-mail: ignasi.aliguer@upc.edu ignacio.carol@upc.edu eduardo.alonso@upc.edu

Palabras Clave: Elementos Finitos, Mecánica de Rocas, Estabilidad de Taludes

Resumen: *En este documento se detalla de forma sintética el trabajo realizado hasta la fecha en la realización por parte del primer autor de la tesis doctoral que lleva por título: “Métodos Numéricos Avanzados para Evaluar la Estabilidad en Problemas de Mecánica de Rocas”, dirigida y tutelada por I. Carol y co-dirigida por E.E. Alonso. El trabajo se enmarca dentro del amplio campo de la mecánica de rocas tratando aspectos de modelos constitutivos e ingeniería computacional.*

Se presenta a continuación la formulación de un método para la evaluación de la seguridad en macizos rocosos fracturados mediante la reducción de los parámetros resistentes de la ley de comportamiento de las juntas de roca. Este método se codificó y se implementó en el código por el Método de los Elementos Finitos DRAC, desarrollado por el grupo de investigación MECMAT. Finalmente se presentan algunos ejemplos.

1. INTRODUCCIÓN

Tanto en aplicaciones de ingeniería civil como de minería: construcción de vías de transporte rodadas y ferroviarias, tanto en superficie como subterráneas, construcción de presas, excavaciones de minas a cielo abierto o en galería, en fase de diseño el aspecto más importante a comprobar es la estabilidad de la porción de material afectado, debido principalmente a variaciones del estado inicial de tensión o aplicación de cargas exteriores.

En cuanto al material, las propiedades resistentes y el tipo de comportamiento son los aspectos más determinantes a la hora de evaluar la estabilidad. En el caso de roca en general, y de macizos rocosos fracturados en particular, la inestabilidad es inducida por el deslizamiento de bloques de roca a través de los planos de discontinuidad o juntas.

En cuanto a los métodos de análisis usados en problemas de estabilidad, éstos se dividen en dos grandes grupos: los Métodos de Equilibrio Límite y los Métodos Numéricos. Los primeros se basan en definir a priori un mecanismo de rotura y establecer el equilibrio de fuerzas para obtener las fuerzas movilizadas (actúan en contra de la estabilidad). Del modelo constitutivo del material se obtiene la fuerza que resiste el material en el plano de rotura. Finalmente, el Factor de Seguridad (FS) se obtiene comparando las fuerzas resistentes y las movilizadas. Los Métodos Numéricos consisten en discretizar el dominio de roca y calcular los valores de las variables del problema en puntos de este dominio de manera que se satisfagan las condiciones de equilibrio, compatibilidad, ley constitutiva y condiciones de contorno. A lo largo de los años se han desarrollado y aplicado una gran variedad de métodos numéricos en mecánica de rocas, sin embargo, uno de los más extendidos es el MEF. El $c-\phi$ reduction es un método integrado al MEF que permite obtener el factor de seguridad del mecanismo de rotura más desfavorable sin necesidad de haberlo definido a priori.

El trabajo se articula alrededor del estudio de un caso real, el Análisis de Estabilidad del Estribo Izquierdo de la Presa de Canellas, en colaboración con la empresa hidroeléctrica ENDESA, donde se ha aplicado el método desarrollado, pero previamente también se ha

considerado el análisis por Métodos de Equilibrio Límite para evaluar la estabilidad del macizo de cimentación de la presa.

2. ELEMENTOS FINITOS CON ELEMENTOS JUNTA

Los elementos junta son un tipo de elemento finito que se caracterizan por tener un espesor nulo y por depender de los desplazamientos relativos en vez de las deformaciones. Pueden ser bidimensionales (se representan por una línea) o tridimensionales (triangulares o cuadrangulares) y pueden ser de diferente orden (lineal, cuadrático, cúbico...). Las coordenadas de sus nodos coinciden dos a dos pero tienen diferente conectividad. De este modo, en el lado común de los dos elementos de continuo separados por un elemento junta, los nodos tendrán las mismas coordenadas pero serán formulados como nodos diferentes.

3. MODELO CONSTITUTIVO DE JUNTA

El modelo constitutivo a utilizar en la formulación del método *c- ϕ reduction* fue formulado por Gens et al., 1989 [1]. Se trata de una ley de elasto-plástica general formulada en términos de una tensión normal a la junta y dos tangenciales y, un desplazamiento en la dirección normal y dos desplazamientos tangenciales de corte.

No obstante, existe la derivación de una versión simplificada que permite una integración analítica [2]. Los aspectos simplificativos son los siguientes: plasticidad perfecta, relación elástica lineal entre la tensión normal y el desplazamiento relativo normal y sin dilatación. En consecuencia, es posible reducir enormemente el coste computacional, en términos de tiempo de cálculo, en problemas con un elevado número de grados de libertad.

4. CÓDIGO DRAC

En este trabajo, todos los cálculos que requieren el MEF han sido realizados con el código DRAC [3], desarrollado por el grupo de investigación MECMAT y usado en un gran número de aplicaciones, inicialmente en problemas mecánica rocas con elementos junta de espesor nulo hasta problemas de Mecánica de Fractura más recientemente. La estructura interna del programa principal consiste en cuatro bucles anidados:

- *Stage loop*. Cada stage corresponde a una geometría diferente del problema a analizar (excavación/construcción).
- *Step loop*. Diferentes configuraciones de carga pueden ser aplicados a una misma geometría.
- *Increment loop*. El sistema de carga puede ser impuesto a partir de una serie de incrementos parciales.
- *Iteration loop*. En análisis no lineales, este bucle realiza las iteraciones necesarias hasta que se llega a converger.

Otros aspectos de utilidad en este trabajo han sido por un lado la posibilidad de usar solvers tanto directos como iterativos y por otro lado la interacción del código DRAC con las herramientas de pre-proceso (tratamiento de geometrías CAD, mallador, definición de planos de junta) y de post-proceso (visualización de resultados) con el programa GiD.

5. MÉTODO $c-\Phi$ REDUCTION

5.1. Generalidades

La primera referencia que menciona la idea de reducir los parámetros resistentes de un material para evaluar el Factor de Seguridad es atribuida a Zienkiewicz et al., 1975 [4], para un problema de estabilidad de taludes en suelo. Posteriormente, diversos autores han utilizado este método para otros problemas en el campo de Mecánica de Suelos. El Factor de Seguridad se puede definir como el factor reductor de los parámetros resistentes para llegar a la rotura.

En el análisis numérico por el MEF de problemas de ingeniería geotécnica, existen diversas maneras para definir la rotura. La más utilizada (también en este estudio) es la no convergencia del cálculo iterativo.

5.2. Formulación e implementación

El método $c-\Phi$ reduction ha sido formulado como una modificación del modelo constitutivo presentado en el apartado 2, considerando en este caso la evolución de los parámetros c y Φ , los cuales son reducidos progresivamente (softening) en relación a una variable de evolución α .

Análogamente al caso sin reducción de los parámetros resistentes, en este caso también es posible una integración explícita de la ley constitutiva.

El modelo constitutivo que incorpora la reducción de $c-\Phi$ ha sido implementado en el código DRAC en el módulo de leyes constitutivas para elementos junta. Además se ha aprovechado la estructura del código en relación al tiempo para implementar la reducción de los parámetros resistentes.

6. APLICACIÓN AL ESTRIBO IZQUIERDO DE LA PRESA DE CANELLAS

La presa de Canellas es una presa de doble bóveda de 151 m de altura ubicada en el Pirineo de Lleida y fue terminada en el año 1958. Desde entonces se han realizado diferentes análisis para obtener evaluaciones ingenieriles de la seguridad. El más importante, en el que se tuvieron en cuenta mecanismos de rotura que incluían la presa y los dos estribos, tuvo lugar durante la década de los 90 [5].

La presa está cimentada en roca caliza fracturada por dos sistemas de juntas. El sistema principal está formado por juntas verticales paralelas al valle. La otra familia la componen juntas orientadas N-S buzando 55° hacia el oeste (prácticamente hacia aguas abajo). Además, los planos de estratificación buzando 45° hacia aguas arriba.

Debido a la distribución espacial de las tres familias de discontinuidades en los últimos años algunos bloques de roca se han desprendido del macizo rocoso en el estribo izquierdo hacia el valle, lo cual motivó el diseño de un muro de contención. En consecuencia se inició un estudio recientemente, esta vez centrado en el incremento de seguridad que debido a la construcción del muro.

El primer paso en la aplicación del método $c-\Phi$ reduction para la evaluación de la seguridad del estribo izquierdo de la Presa de Canellas, ha sido considerar una sección 2D tal y como se aprecia en la Fig. 1. Dicha sección está orientada a lo largo de la dirección de máximo buzamiento de los planos de la familia N-S.

El objetivo de este análisis preliminar es doble: (1) verificar el comportamiento del método en un caso real y (2) estimar el incremento de seguridad aportado por el nuevo muro.

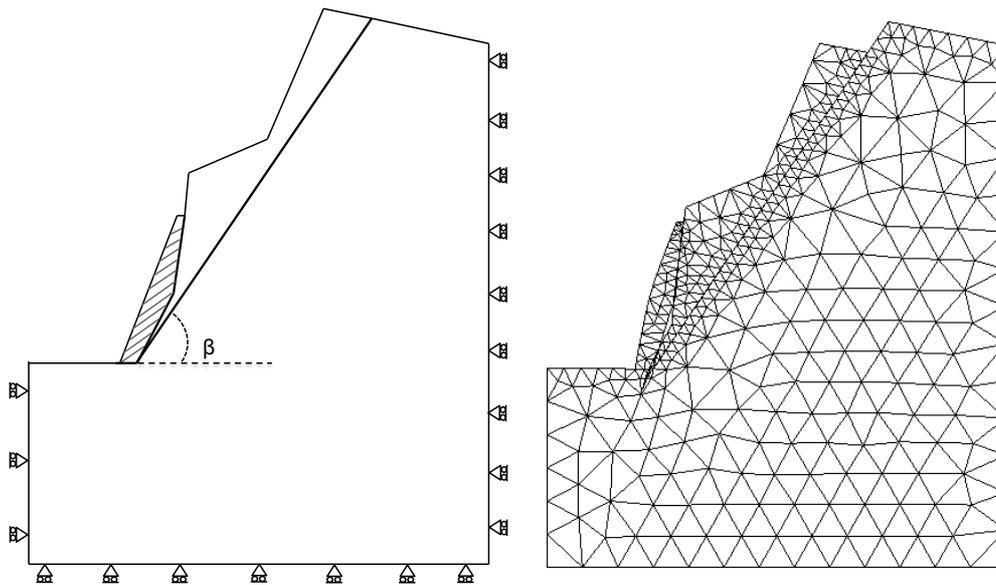


Figura 1. Definición geométrica y malla de EF deformada en rotura.

Para este ejemplo, se consideraron los siguientes parámetros resistentes: $c=475$ kPa y $\tan\phi_{\text{res}}=0.7$ para la junta roca-roca, y $c=10$ kPa y $\tan\phi_{\text{res}}=1.0$ para las juntas de contacto roca-hormigón en la base y trasdós del muro. Durante el proceso de reducción de los parámetros resistentes, únicamente se han reducido los parámetros de la junta roca-roca, mientras que los de la junta de contacto hormigón-roca se han mantenido constantes. La rotura ocurrió cuando el ángulo de fricción llegó a un valor de 25.85° . En consecuencia el Factor de Seguridad que se obtiene es de 1.44.

7. NUEVOS DESARROLLOS Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la aplicación del método *c- ϕ reduction* para la sección 2D analizada demuestran que se trata de un método que da resultados razonables en problemas de estabilidad en macizos rocosos fracturados.

Recientemente se está trabajando en la aplicación del método a geometrías tridimensionales y a la mejora en cuanto a eficiencia y robusteza de la implementación del método *c- ϕ reduction*.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido parcialmente financiada por los proyectos BIA2009-10491 del MICINN, 2009SGR-180 del AGAUR y por la empresa ENDESA. El primer autor agradece su actual beca doctoral FPU del MICINN.

REFERENCIAS

- [1] A. Gens, I. Carol, and E.E. Alonso. An interface element formulation for the analysis of soil-reinforcement interaction. *Computers and Geotechnics*, 7:133-151, 1989.
- [2] A. Gens, I. Carol, and E.E. Alonso. Rock joints: Finite element method, implementation and applications. In A.P.S. Selvadurai and M.J. Boulon, editors, *Mech. of Geomaterial Interfaces*, p. 395-420. Elsevier, 1995.
- [3] P.C. Prat, A. Gens, I. Carol, A. Ledesma, and J.A. Gili. Drac: A computer software for the analysis of rock mechanics problems. In *App. of Comp. Methos in Rock Mechanics*, pages 1361-1369, Xian, China, 1993.
- [4] O.C. Zienkiewicz, C. Humpheson, and R.W. Lewis. Associated and non-associated visco plasticity and plasticity in soil mechanics. *Geotechnique*, 25:671-689, 1975.
- [5] E.E. Alonso, I. Carol, C. Delahaye, A. Gens, and P. Prat. Evaluation of safety factors in discontinuous rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech.*, 33:513-537, 1996.