
5 Conclusiones

Debido a la sencillez, a la gran cantidad de software que hace posible su utilización y a la experiencia de muchos años de aplicación, hacen que el criterio de rotura de Mohr-Coulomb siga siendo muy usado en el análisis de estabilidad de macizos rocosos, aún y considerarse que el criterio de rotura de Hoek&Brown es más adecuado para analizar estos casos. Debido a esto, existe la práctica común de obtener la envolvente de rotura de Mohr-Coulomb a partir de la envolvente de rotura de Hoek&Brown, con la consiguiente diferencia de resultados que se producen en el análisis de estabilidad.

Se han estudiado, por un lado las diferencias entre las representaciones gráficas de las envolventes de rotura lineal E1 (obtenida de forma empírica a partir de valores de GSI) y la envolvente de rotura no lineal E2 (envolvente de rotura de Hoek&Brown). Por otro lado, se han estudiado las diferencias entre los parámetros resistentes, c y Φ , y las envolventes lineales de rotura E1, E3 (envolvente lineal asociada a la aplicación *General* de *RocLab*), E4 y E5 (envolventes lineales asociadas a la aplicación *Slope* de *RocLab* con alturas de 10 y 100 metros respectivamente. Para ello se han considerado distintos valores de la clasificación geomecánica GSI (incluyendo todo su rango de valores), distintos valores del factor de alteración del criterio de Hoek&Brown, $D=0$ y $D=0,7$, y distintos valores de la resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta $\sigma_{ci}=3\text{MPa}$ y $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$. De este modo se ha podido estudiar la influencia de GSI, D y σ_{ci} sobre las envolventes de rotura y sobre la obtención de los parámetros resistentes. También se ha estudiado la influencia de la aplicación del programa *RocLab* utilizada, *General* o *Slope*. Esto se ha realizado mediante la comparación de los parámetros resistentes y las envolventes de rotura E3, E4, E5 (obtenidas mediante aplicaciones del programa *RocLab*).

Las conclusiones que se extraen de esta primera parte son:

1. En la obtención de la envolvente de rotura lineal de Mohr-Coulomb a partir de la linealización de la envolvente de rotura de Hoek&Brown (mediante el uso de *RocLab*) se producen grandes diferencias entre ambas envolventes, esto hace que en algunos casos se está sobrevalorando la resistencia del macizo rocoso y en otros casos se está infravalorando, para cualquiera de las aplicaciones presentes en el programa.

En el uso de ecuaciones empíricas, que a partir del valor de GSI permite la obtención de la envolvente de rotura de Mohr-Coulomb, se producen las mismas diferencias entre envolventes que en el caso anterior. Aún y así, las envolventes obtenidas de la linealización con *RocLab*, en general presentan mayor similitud a la envolvente de Hoek&Brown que en el caso de la obtenida empíricamente..

2. Los parámetros resistentes del criterio de Mohr-Coulomb, cohesión y ángulo de fricción, obtenidos son distintos para un mismo material en función de la envolvente lineal que sea considerada. Ello implica que, para un mismo tipo material, aún y considerar siempre el criterio de rotura lineal de Mohr-Coulomb, en función de que envolvente de rotura se considere para la obtención de los parámetros, se sobrevalora o infravalora la capacidad del macizo rocoso.
3. El valor de la tensión normal máxima considerada en el momento de realizarse la linealización de la envolvente de rotura de Hoek&Brown mediante el

programa de *RocLab* tiene gran importancia. La disposición, en el espacio de tensiones, de las envolventes de rotura consideradas una en función de las otras, varía en función del valor de tensión normal máxima considerada. Debido a esto, el uso de una determinada envolvente de rotura es favorable y en otros desfavorable, referente a las otras envolventes y frente a la estabilidad. Ello implica que no se pueden clasificar de forma general las distintas envolventes según sobrevaloren o infravaloren la resistencia del macizo.

4. El uso de la aplicación *Slope* de *RocLab* es el más apropiado debido a que en la linealización considera el rango de valores de tensión normal máxima acorde a la situación considerada.

El uso de las envolventes de rotura E3 (asociada a la aplicación *General* de *RocLab*) como el uso de la envolvente E1 (obtenido de la forma empírica), implica tanto infravaloración como sobrevaloración del macizo, dependiendo del valor de la tensión normal máxima considerada

5. Valores altos de tensión normal máxima implican ángulos de fricción bajos y cohesiones altas, para el caso de valores bajos de tensión normal máxima sucede lo contrario.
6. Las distintas envolventes de rotura, aunque como ya se ha comentado en los párrafos anteriores presentan diferencias, dichas diferencias dado un determinado material no son constantes y varían en función del valor de GSI considerado, es decir en función de la situación en la que se encuentre el macizo rocoso. Para el caso de los valores de cohesión, GSI bajos, implican cohesiones similares entre las distintas envolventes; por el contrario, GSI altos implican ángulos de fricción similares. De este modo, para un mismo material, dependiendo del grado de fracturación y degradación que presente el macizo, existirá mayor o menor diferencia entre las distintas envolventes.
7. La consideración del factor de alteración del criterio de Hoek&Brown con un valor $D=0$, no es muy aconsejable (a esto ya hizo referencia Hoek et al., 2002) puesto que implica variaciones significativas en los parámetros resistentes, y es difícil asegurar que no se han producido relajaciones en el macizo debido a excavaciones.
8. El valor considerado para la resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta, σ_{ci} , tiene gran importancia en la linealización de la envolvente de rotura de Hoek&Brown, puesto que tiene gran influencia en el rango de valores considerados para la tensión normal máxima. Valores altos de σ_{ci} se traducen en valores altos de tensión normal máxima, mientras que valores bajos de σ_{ci} se traducen en valores bajos de tensión normal máxima, que a su vez implica mayor similitud en valor absoluto entre envolventes de rotura.

Una vez analizadas las diferencias entre las envolventes y parámetros resistentes, se realiza una comparación de los valores de los factores de seguridad obtenidos mediante las distintas envolventes de rotura consideradas en el estudio, para un caso en particular, teniendo en cuenta las observaciones realizadas y para la rotura global del macizo. Para la obtención del factor de seguridad es utilizado el programa *GeoStudio* que permite el cálculo del factor de seguridad considerando los criterios de rotura de Hoek&Brown y

Mohr-Coulomb. Se considera un talud de 10 m, con una pendiente de 1H:2V, con y sin presencia de agua y con las características geológicas usadas en el anterior apartado.

Las conclusiones que se extraen de la segunda parte del capítulo de resultados son:

1. Existen diferencias entre los factores de seguridad obtenidos mediante las distintas superficies de rotura consideradas, para un talud con las mismas características geométricas y formado por el mismo material. Ello implica, que según la envolvente de rotura (tanto lineal como no lineal) considerada para la obtención de los parámetros resistentes se puede sobrevalorar o infravalorar el factor de seguridad asociado al talud que se esté analizando.

Para valores pequeños de la compresión uniaxial de la roca intacta como $\sigma_{ci}=3\text{MPa}$, las diferencias entre factores de seguridad son menores que para valores altos de $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$.

2. Aunque existan grandes diferencias entre los factores de seguridad, las superficies de rotura vinculadas no presentan grandes diferencias, al contrario, presentan ciertas similitudes. Ello implica que, en el caso de tener que realizarse alguna obra de contención, las dimensiones de esta no variarían en exceso en función de la envolvente de rotura considerada.
3. Se obtienen valores para el factor de seguridad elevados. Este hecho se acentúa en el caso de la consideración de valores para GSI elevados, y también para valores altos de resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta. Ello plantea la necesidad del análisis de estabilidad frente a rotura global de un macizo rocoso únicamente para casos de GSI y resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta bajos. En contrario, para macizos resistentes habrá principalmente roturas de bloques individuales a lo largo de juntas.
4. Los elevados valores que se obtienen para los factores de seguridad, hace que la influencia de presencia o no presencia de nivel freático en el análisis de estabilidad, aunque obviamente implica variaciones en el valor del factor de seguridad, tenga repercusión únicamente en los casos de GSI y resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta bajos.
5. Los factores de seguridad obtenidos según las distintas envolventes de rotura, aunque como ya se ha comentado en los párrafos anteriores presentan diferencias, dichas diferencias dado un determinado material no son constantes y varían en función del valor de GSI considerado. De este modo, para un mismo material, dependiendo del grado de fracturación y degradación que presente el macizo, existirá mayor o menor diferencia entre los factores de seguridad. Ello implica que factores de seguridad obtenidos de una determinada envolvente tanto nos pueden situar del lado de la seguridad como del lado de la inseguridad, lo que hace que no sea posible clasificar las envolventes de rotura consideradas en el estudio como, envolvente “segura” y envolvente “no segura”, pues depende de la situación en la que se encuentre el macizo.
6. Al igual que sucede con las envolventes de rotura, el valor de la resistencia a compresión uniaxial modifica la posición relativa de los factores de seguridad para todo el rango de GSI. Ello implica una imposibilidad total de clasificar las

envolventes de rotura según faciliten factores de seguridad del lado de la seguridad o del lado de la inseguridad.

7. Dado que la envolvente E2 (envolvente de rotura del criterio de Hoek&Brown) es la que se considera que más se acerca a la realidad, en caso de necesidad de obtener la envolvente según el criterio de Mohr-Coulomb, la envolvente que presenta mejores características es la asociada a la aplicación *Slope* de *RocLab*, (llamado E4 en el presente trabajo). Puesto que los factores de seguridad obtenidos, aún y ser distintos de los obtenidos con E2, son los más parecidos para todo el rango de valores de GSI. Puede ser recomendable aplicar un coeficiente al factor de seguridad obtenido con E4 para de este modo aumentar su valor, puesto que para determinados valores de GSI nos sitúa del lado de la inseguridad.

Con el uso de la envolvente E1 en función del valor de compresión uniaxial de la roca intacta y GSI considerados, obtiene factores de seguridad altos o bajos respecto los obtenidos con E2, que hace poco recomendable su uso pues no es posible definir un comportamiento determinado. Lo mismo sucede con el factor de seguridad asociado a la envolvente E3.

Debido a los elevados valores de factor de seguridad obtenidos en el análisis de roturas globales, especialmente para GSI y resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta elevados, posiblemente, la influencia del uso de una envolvente de rotura u otra en estos casos no tiene gran repercusión, puesto que de cualquier forma el macizo se encuentra en estabilidad con valores de factor de seguridad muy superiores a la unidad.

También decir que debido a la imposibilidad de definir un comportamiento de las distintas envolventes de rotura en cuanto a estabilidad se refiere, se hace desaconsejable el uso de cualquier envolvente que no sea la envolvente de rotura del criterio de Hoek&Brown (envolvente E2 en este estudio) o en el caso de necesitar el criterio de Mohr-Coulomb, el uso de la envolvente asociada a la aplicación de *RocLab* destinada para la situación de cálculo determinada (en este estudio E4, obtenida de la linealización mediante la aplicación *Slope*). En el caso de usar la envolvente E4, es recomendable aplicar un coeficiente de manera que el valor del factor de seguridad aumente, puesto que en determinados casos, el factor de seguridad obtenido con E4, nos sitúa del lado de la inseguridad.

Por último, las líneas de trabajo que se creen interesantes para futuros estudios sobre la influencia de la envolvente de rotura escogida para el análisis de estabilidad del macizo rocoso frente a rotura global son: en primer lugar centrar los estudios en el caso de macizos en los que sea factible que se produzca la rotura global, es decir macizos con bajo GSI i material de mala calidad, que serán los casos donde mayor importancia tendrá la envolvente de rotura escogida; y en segundo lugar, realizar las comparaciones entre las envolventes de rotura con una mayor variación de los parámetros que intervienen (peso específico, resistencia uniaxial de la roca intacta, m_i , factor de alteración D y geometría del talud) de este modo será posible la realización de ábacos y tablas en las que se muestre las diferencias entre resultados en función de la envolvente de rotura considerada. Otra posibilidad de futuros trabajos es la realización de un estudio similar, pero partiendo del valor de la clasificación geomecánica RMR en vez de la GSI.