
4 Resultados

Desde la aparición del criterio de rotura de Hoek&Brown, este se ha considerado más adecuado que el criterio de rotura de Mohr-Coulomb para el cálculo de la estabilidad de taludes en macizos rocosos (González Vallejo, 2002). Aún y así la sencillez y el gran número de programas que permiten la implementación del criterio de rotura de Mohr-Coulomb hacen que éste sea ampliamente utilizado. En la actualidad existen programas de ordenador que permiten el cálculo de los parámetros resistentes y dibujan la envolvente del criterio de Hoek&Brown a partir de lecturas de campo. Otra de las aplicaciones de dichos programas es la de la obtención de los parámetros resistentes del criterio de rotura de Mohr-Coulomb, a partir de la obtención de su envolvente de rotura mediante el equilibrio de áreas entre las envolventes de rotura de los criterios de Mohr-Coulomb y Hoek&Brown.

La primera parte del presente capítulo se basa en la utilización del programa *RocLab*. El programa permite la obtención de los parámetros resistentes y envolvente del criterio de rotura de Hoek&Brown, y del criterio de Mohr-Coulomb. Partiendo de la envolvente de rotura del criterio de Hoek&Brown, para la obtención de los parámetros resistentes del criterio de Mohr-Coulomb existen varias posibilidades debido a aplicaciones que presenta el programa *RocLab* (apartado 2.2 del capítulo 2). La segunda parte del capítulo se basa en el uso del programa *GeoStudio*, que permite analizar la estabilidad de un talud, mediante distintos criterios de rotura (apartado 2.2 del capítulo 2).

El objetivo de este capítulo es, en primer lugar, realizar una comparación de los criterios de rotura de Hoek&Brown y Mohr-Coulomb y de sus parámetros resistentes mediante la utilización del programa *RocLab*. En segundo lugar, se analizará la estabilidad de un talud, aplicando ambos criterios de rotura mediante el programa *GeoStudio*.

El estudio se va a centrar en un material con un valor de 25 KN/m^3 para el peso específico y 9 para m_i . Para realizar el estudio se van a considerar distintos valores de GSI, de factor de alteración del criterio de rotura de Hoek&Brown D y también se van a considerar distintos valores del valor de la resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta (σ_{ci}).

Para el estudio se considerarán distintos valores de GSI que englobarán todo el posible rango de valores de la clasificación geomecánica. Son considerados distintos valores de GSI porque este es el punto de partida para la realización de los cálculos del presente estudio

Los valores de factor de alteración del criterio de rotura de Hoek&Brown (2002) D van a ser 0 y 0,7. El valor de 0,7 es considerado porque es el factor de alteración que se supone en el caso de tener un talud excavado mecánicamente, que será el caso que se analizará posteriormente en el presente estudio. Por otro lado el valor 0 es considerado para ver que influencia tiene el no suponer alteración por excavación en la obtención de los parámetros resistentes. Este se consideró importante, puesto que hasta la última versión del criterio de rotura de Hoek&Brown (Hoek et al., 2002) no ha sido añadido el factor de alteración, esto implicaba que los valores obtenidos de los parámetros resistentes eran muy elevados en comparación con los reales.

Los valores para la resistencia a compresión uniaxial (σ_{ci}) de la roca intacta considerados han sido 75 y 3 MPa. Mediante la consideración de estos dos valores queda definido un

rango de rocas, que va desde rocas blandas hasta rocas de resistencia media. Aunque quedan excluidas las rocas de alta resistencia, el uso de estos dos valores será suficiente para satisfacer los objetivos de la presente tesina. Hay que decir aunque parezca que valores de GSI altos sean incompatibles con valores de resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta como $\sigma_{ci}=3\text{MPa}$, estos se pueden dar en casos como los de rocas del tipo Lutitas o Margas.

Importante decir que no se han considerado las variaciones ni del peso específico ni de la constante del material, m_i . El peso específico no se ha considerado, ya que su variación queda fuera de los objetivos de la presente tesina. Por otro lado, la constante m_i , no se ha tenido en cuenta puesto que es una constante que se obtiene a partir de unas tablas propuestas por Hoek et al. (2002), y no responde a ninguna lectura de campo concreta. Se ha considerado únicamente variaciones de valores de GSI, factor de alteración D y resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta, debido a su claro significado geotécnico y porque todos ellos son valores que se pueden obtener mediante lecturas de campo.

Para realizar el análisis, en primer lugar se van a comparar las envolventes de rotura y los parámetros resistentes, y finalmente los factores de seguridad obtenidos con cada uno de los criterios.

4.1 Comparación de criterios de rotura y sus parámetros resistentes

4.1.1 Esquema de cálculo

Debido a la existencia de varias correlaciones que permiten pasar de un criterio de rotura a otro, ya sea mediante relaciones entre las clasificaciones geomecánicas (RMR y GSI), o mediante las envolventes de rotura de ambos criterios, se hace necesario definir un esquema a seguir para la realización del estudio (Figura 4.1).

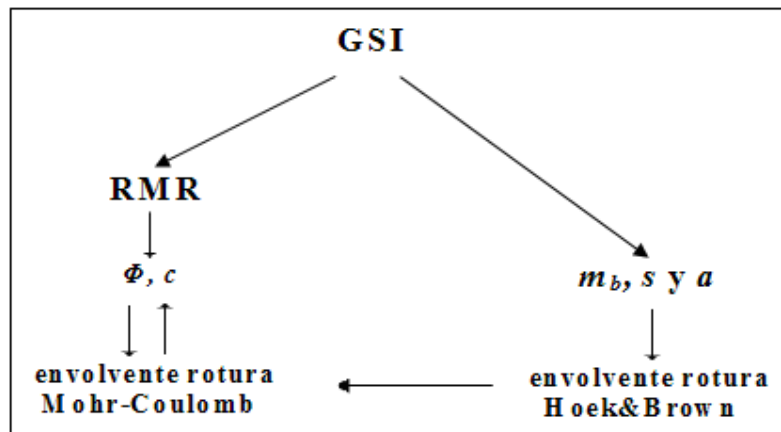


Figura 4.1: Correlaciones entre el criterio de rotura de Hoek&Brown y Mohr-Coulomb utilizadas para la realización del estudio.

Tal y como se indica en la Figura 4.1, el punto de inicio para la obtención de los parámetros de ambos criterios va a ser un valor de GSI. Los esquemas de cálculo utilizados en la tesina van a ser:

1. GSI→H&B: En el caso de aplicar el criterio de rotura de Hoek&Brown, es considerado un solo procedimiento para su implementación. Partiendo de un

valor de GSI, juntamente con otros parámetros de la roca (resistencia a compresión uniaxial del material intacto σ_{ci} , factor de alteración D y una constante del material m_i), mediante la utilización del programa *RocLab* se van a obtener los parámetros resistentes, m_b , s y a , que nos van a permitir la implementación del criterio.

Para la aplicación del criterio Mohr-Coulomb son considerados dos caminos

2. GSI→RMR→MC: En el primero, partiendo de GSI, se obtiene el valor del RMR (ecuación 4.1). Con el valor de RMR son obtenidos los parámetros resistentes del criterio de rotura de Mohr-Coulomb (ecuaciones 4.2 y 4.3), c y Φ , con lo que éste queda definido.

$$RMR_{89} > 23 \rightarrow GSI = RMR_{89} - 5 \quad 4.1$$

$$c = 5RMR(KPa) \quad 4.2$$

$$\phi = 5 + \frac{RMR}{2} (\text{deg}) \quad 4.3$$

donde RMR_{89} es la última definición de clasificación geomecánica, c la cohesión y Φ el ángulo de fricción.

3. GSI→H&B→MC: El segundo camino para la implementación del criterio Mohr-Coulomb, es a partir de la envolvente de rotura del criterio de rotura Hoek&Brown. A partir del valor de GSI se obtiene la envolvente de rotura del criterio de Hoek&Brown. Mediante la utilización del programa *RocLab* se hace una linealización mediante el método de áreas equivalentes a la envolvente de rotura de Hoek&Brown. La recta de regresión es la envolvente del criterio de rotura de Mohr-Coulomb, a partir de la cual se obtienen los parámetros resistentes del criterio, c y Φ .

La elección de un valor de la clasificación geomecánica GSI como punto de partida para los cálculos, es debido a que aunque desde su aparición, el criterio de rotura de Hoek&Brown ha sido ampliamente aceptado y utilizado, lo que implica la obtención de la clasificación geomecánica de GSI, el criterio de rotura de Mohr-Coulomb continua siendo muy utilizado debido a su sencillez i a la existencia de un gran numero de programas que permiten su aplicación. Esto implica que en muchos casos, clasificaciones geomecánicas pensadas para ser utilizadas con el criterio de rotura de Hoek&Brown (léase GSI), sean finalmente utilizadas para la aplicación del criterio de Mohr-Coulomb.

4.1.2 Envolventes de rotura consideradas en el estudio

Uno de los objetivos del presente apartado es el de estudiar los resultados obtenidos con el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, en función de que aplicación del programa *RocLab* es escogida. En función de la aplicación de *RocLab* considerada, se obtendrá n distintas envolventes de rotura de Mohr-Coulomb.

Debido a que el estudio se centra en la estabilidad de taludes, las aplicaciones de *RocLab* escogidas para comparar son: *Slope* y *General* (ver apartado 2.2.2 del capítulo 2

de la presente memoria). Las dos aplicaciones permiten obtener las envolventes de rotura del criterio de Hoek&Brown, y a partir de ella los parámetros resistentes del criterio de Mohr-Coulomb. La diferencia entre ambas es el valor de la tensión máxima que se considera. Esta es muy importante puesto que es esencial para la obtención de la envolvente de rotura de Mohr-Coulomb, que se obtiene a partir de la linealización mediante áreas equivalentes de la envolvente de rotura de Hoek&Brown. De esta forma la tensión máxima normal será lo que definirá las diferencias entre los parámetros resistentes, c y Φ , del criterio de Mohr-Coulomb para un mismo material. Es importante tener en cuenta que los parámetros resistentes del criterio de rotura de Hoek&Brown no dependen de que aplicación del programa *RocLab* sea utilizada.

La aplicación *Slope* es específica para el análisis de estabilidad de taludes. Permite escoger la altura del talud que se está estudiando. Esto implica que el valor de la tensión normal máxima es particular para cada altura de talud.

La aplicación *General* es concebida para un análisis general. No tiene en cuenta donde se esta evaluando la estabilidad, puede usarse tanto en túneles como taludes,... En este caso la tensión máxima es siempre la misma, dados unos parámetros.

A continuación se explican las distintas envolventes de rotura consideradas en el estudio, que vienen determinados por las distintas aplicaciones del programa *RocLab*. Las letras que aparecen entre paréntesis son las que se utilizarán de ahora en adelante para hacer referencia a cada envolvente, y por lo tanto a la manera como se han obtenido los parámetros resistentes del criterio.

1. Empírica (**E1**): Partiendo del valor de GSI y mediante las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3 se obtiene el valor de RMR y los parámetros resistentes del criterio de Mohr-Coulomb, para posteriormente representar su envolvente de rotura. En este caso el factor de alteración D del criterio de rotura de Hoek&Brown no influye en los cálculos. Hace referencia al esquema de cálculo GSI→RMR→MC (Figura 4.2).
2. Hoek&Brown (**E2**): En este caso se parte del valor de GSI y mediante el programa *RocLab* se obtiene la envolvente y los parámetros resistentes del criterio de rotura de Hoek&Brown. Sigue el esquema de cálculo de GSI→H&B (Figura 4.2).
3. General (**E3**): En este caso los valores de GSI se introducen en el programa *RocLab* en *Modo General* obteniendo de esta forma, y para la aplicación *General*, las envolventes de rotura y los parámetros resistentes del criterio de Mohr-Coulomb. Se obtienen mediante la linealización de la envolvente de rotura del criterio de Hoek&Brown (E2). Sigue el esquema de cálculo de GSI→H&B→MC (Figura 4.2).
4. Slope 10m (**E4**), en este caso se utiliza el programa *RocLab*, en *Modo Slope* con una altura de talud de 10m. Se obtienen, para la aplicación *Slope* con 10m de altura, la envolvente de rotura y los parámetros resistentes, c y Φ , del criterio de **Mohr-Coulomb**. Se obtienen mediante la linealización de la envolvente de rotura del criterio de Hoek&Brown (E2). Sigue el esquema de cálculo de GSI→H&B→MC (Figura 4.2).
5. Slope 100m (**E5**), se repite el mismo procedimiento que en el caso E4, pero esta vez con una altura de 100m, de forma que, para la aplicación *Slope* con 100m de

talud se obtiene la envolvente y los parámetros resistentes el criterio de **Mohr-Coulomb**. Se obtienen mediante la linealización de la envolvente de rotura del criterio de Hoek&Brown (E2). Sigue el esquema de cálculo de GSI→H&B→MC (Figura 4.2).

En la Figura 4.2 se muestra el procedimiento seguido para la obtención de las distintas envolventes de rotura así como sus parámetros resistentes.

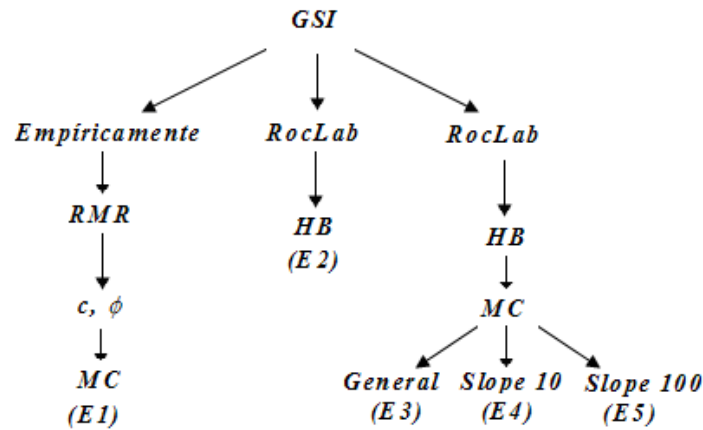


Figura 4.2: Procedimiento seguido en el estudio para la obtención de las distintas envolventes de rotura consideradas. Entre paréntesis la nomenclatura utilizada para cada una de las envolventes.

En la Figura 4.3 se representan gráficamente todas las envolventes consideradas en el estudio.

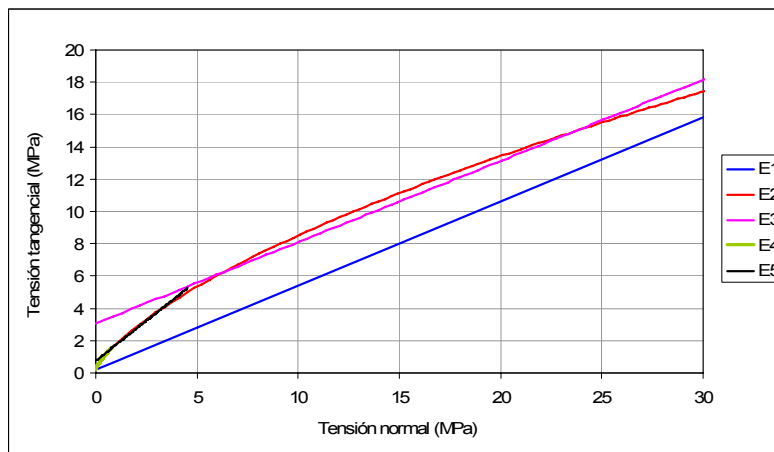


Figura 4.3: Representación de las distintas envolventes de rotura consideradas en el estudio, en el espacio de tensiones normal y tangencial. Valores de GSI=40, D=0 y $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$.

En Figura 4.3 se representan todas las envolventes que se consideran en el estudio. Los casos de las envolventes de E4 y E5 no son muy visibles. Esto es debido a que ambas envolventes corresponden a los casos en que la tensión máxima considerada para realizar la regresión lineal es pequeña comparándola con el caso de E3.

Aunque las envolventes E1, E3, E4 y E5 son envolventes del criterio de rotura de Mohr-Coulomb para un mismo material pero obtenidas de forma distinta, en el estudio se van

a tratar como si fuesen distintos criterios dentro del propio criterio de Mohr-Coulomb. Por su parte, E2 representa el criterio de Hoek&Brown.

La situación E1 se asimila al caso en el que se tienen lecturas geotécnicas para la utilización del criterio de rotura de Hoek&Brown, pero son aplicadas al criterio de Mohr-Coulomb, mediante la obtención del RMR a partir del GSI con el uso de la ecuación 4.1 que hace posible el cálculo de los parámetros resistentes del segundo criterio, c y Φ , mediante las ecuaciones 4.2 y 4.3.

Con E4 y E5 se pretende estudiar el efecto escala en el criterio de rotura de Mohr-Coulomb obtenido de la aplicación de *RocLab*. En ambos casos se obtienen los parámetros resistentes del criterio de Mohr-Coulomb mediante el uso del programa *RocLab*. El objetivo es el de analizar las diferencias entre parámetros que induce un aumento de altura de talud.

Mediante la introducción de la situación E3, se va a estudiar las diferencias existentes entre parámetros resistentes del criterio de Mohr-Coulomb cuando se utiliza una aplicación de *RocLab* no específica (*General*) para el caso de estabilidad estudiado, y cuando se una aplicación específica (*Slope*).

4.2 Influencia de distintos parámetros en las envolventes de rotura consideradas.

4.2.1 Influencia del valor de GSI

Se estudia la influencia de la clasificación geomecánica con la intención de ver en líneas generales que implicaciones tienen variaciones de GSI en los criterios de rotura estudiados.

Para estudiar la influencia que tiene el GSI en los criterios de rotura de Hoek&Brown y de Mohr-Coulomb, se representa gráficamente (Figura 4.4) la envolvente de rotura E1 y E2, para distintos valores de GSI y con un valor de factor de alteración del criterio de Hoek&Brown $D=0$ y una valor de la resistencia a compresión uniaxial $\sigma_{ci}=75$ MPa.

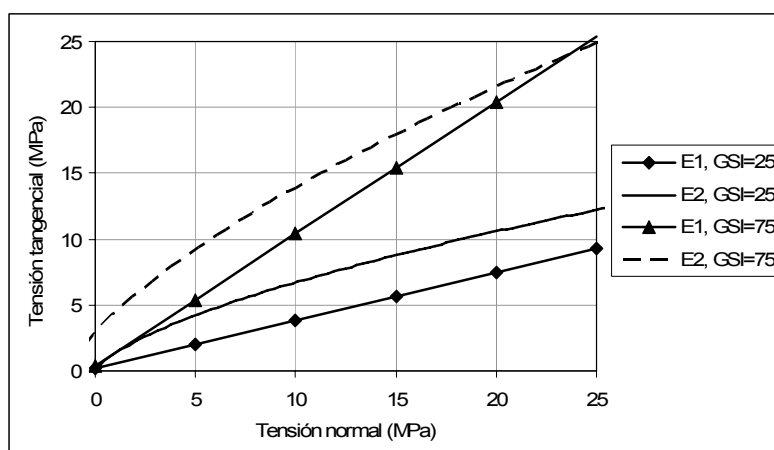


Figura 4.4: Visualización de la influencia de GSI en los criterios de rotura mediante la representación gráfica de E1 (lineal) y E2 (no lineal) en el espacio de tensión normal y tangencial, para distintos valores de GSI (25 y 75), con $D=0$ y $\sigma_{ci}=75$ MPa.

En la Figura 4.4 es representada las envolvente de rotura E1 y E2 para los valores de GSI de 25 y 75, en el espacio de tensiones normal y tangencial, considerando un valor del factor de alteración $D=0$ y un valor de la resistencia a compresión uniaxial de la roca $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$.

Hay que tener en cuenta que las envolventes de rotura representadas siguen los esquemas de cálculo de GSI→H&B en el caso de E2, y el esquema GSI→RMR→MC en el caso de E1, pero no hacen referencia a ningún caso de estabilidad en concreto, sino que son utilizadas para hacer una serie de observaciones.

Se puede apreciar que las envolventes sufren una “traslación” vertical a medida que el valor de GSI aumenta, es decir que para la misma tensión normal, un macizo con un valor alto de GSI, necesita una mayor tensión tangencial para que se produzca la rotura, que un macizo con un GSI menor. A modo de ejemplo numérico y para la gráfica de la Figura 4.4, considerando la envolvente E2 en el caso de tener una tensión normal de 15 MPa en el plano de rotura, un macizo con un GSI=75 necesitaría aproximadamente 17 MPa de tensión tangencial para que se produjese la rotura, mientras que en el caso de tener un GSI=25, tan solo 8 MPa de cizalla serían necesarios.

Lo mismo sucede con la envolvente E1, para un valor de tensión normal en el plano de rotura de 15 MPa, con un valor de GSI=75, son necesarios 15 MPa de tensión tangencial para llegar a la rotura, mientras que para el caso de GSI=25, tan solo se necesitan aproximadamente 5 MPa de cizalla.

Estos resultados eran previsibles por la definición de GSI, puesto que los GSI de valores altos significan materiales poco degradados, con pocas familias de discontinuidades, y con formas cúbicas, es decir materiales en los que es difícil iniciar el movimiento; por el contrario los GSI de menor valor son para clasificar aquellos materiales deteriorados, con gran número de familias de fracturas, de formas irregulares, con lo que la posibilidad de deslizamiento es mucho más fácil. Es decir valores altos de GSI significan macizos de buena calidad, mientras que valores bajos significan macizos de menor calidad.

Cabe destacar, que aunque las envolventes de rotura para valores altos de GSI siempre están por encima de las envolventes de rotura correspondientes a valores bajos, la diferencia de los valores entre ellas no es constante. Por ejemplo, se puede apreciar en la Figura 4.4, en el caso de la E2 que para valores altos de tensión normal la diferencia entre tensiones tangenciales llega a ser de unos 10 MPa, mientras que para tensiones normales cercanas a cero, esta diferencia se reduce hasta unos 5MPa. En el caso de la envolvente E1 sucede exactamente lo mismo.

En el caso de la envolvente E2, esto es debido a que para valores de la tensión principal menor próximos a cero, la clasificación geomecánica GSI pierde importancia, de manera que la pendiente de la envolvente para los distintos valores de GSI es muy parecida, por el contrario, para valores de la tensión principal mayor, el GSI gana importancia, de manera que la pendiente de las envolventes es distinta y mayor a mayor GSI tal y como se observa en la expresión analítica del criterio de Hoek&Brown.

En el caso de la envolvente E1 el GSI, en líneas generales, tiene la misma influencia que en el criterio de Hoek&Brown. Para este caso, aunque la diferencia de valores entre las envolventes de rotura no es constante, debido a la linealidad del criterio la diferencia

mantiene una relación lineal. En el espacio de tensiones normal y tangencial (Figura 4.5).

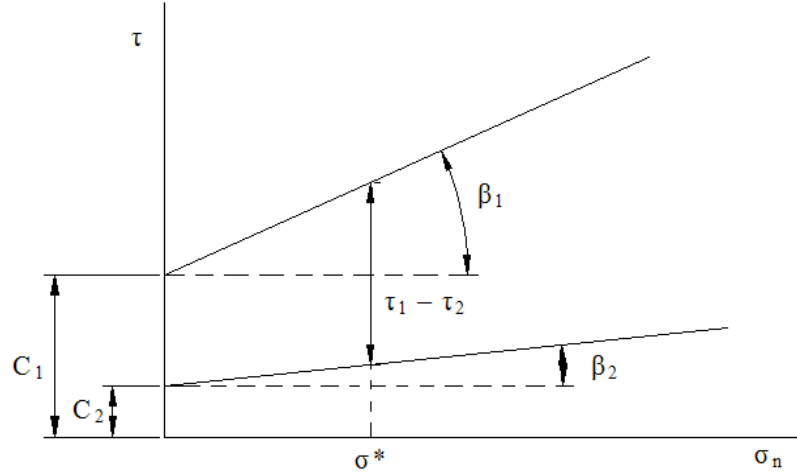


Figura 4.5: Esquema para la obtención de la relación lineal entre las envolventes de rotura de E1, para distintos valores de GSI.

De la Figura 4.5 se deduce que la diferencia entre valores de tensión tangencial para un mismo valor de tensión normal viene dada por

$$\tau_1 - \tau_2 = \Delta\tau = C_1 - C_2 + \sigma^*(\tan \beta_1 - \tan \beta_2) \tag{4.4}$$

en el caso de encontrarnos en el espacio de tensiones principales, y mediante unas relaciones como las realizadas en la Figura 4.5, la expresión viene dada por

$$\sigma_1^A - \sigma_1^B = \left(2c^A \sqrt{N_\phi^A} - 2c^B \sqrt{N_\phi^B} \right) + \sigma_3 \left(N_\phi^A - N_\phi^B \right) \tag{4.5}$$

donde: $N_\phi^i = \tan^2 \left[\frac{\pi}{4} + \frac{\phi^i}{2} \right]$, i puede ser A o B dependiendo de que envolvente se esté estudiando.

A y B son las envolventes de rotura que se están comparando. σ_1^A y σ_1^B son la tensión máxima principal de la envolvente de rotura A y B respectivamente. De manera que la envolvente A presenta mayores valores de tensión principal máxima que B para un mismo valor de la tensión principal menor.

c^A , c^B y ϕ^A y ϕ^B son las cohesiones y los ángulos de fricción de las envolventes A y B.

Aunque se ha representado únicamente las envolventes E1 y E2 para ver la influencia del GSI en los criterios de rotura, las explicaciones echas sobre las influencias de la clasificación geomecánica, son también validas para el resto de envolventes consideradas en el estudio (E3, E4 y E5).

4.2.2 Influencia de la resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta (σ_{ci}).

En este apartado se pretende ver, en líneas generales, la influencia del valor de la resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta, σ_{ci} , sobre el criterio de rotura de Hoek&Brown, de manera que se verá su influencia en las envolventes de rotura E2, E3, E4 y E5.

Para estudiar la influencia que tiene el valor de σ_{ci} se representan gráficamente la envolvente E2 (Figura 4.6). Es representada esta únicamente porque va a ser suficiente para visualizar los efectos de la variación del valor de σ_{ci} sobre las envolventes de rotura consideradas en el estudio. Por otra parte hay que tener en cuenta que la envolvente de rotura E1 no se ve influida por dicho valor, lo que implica que E1 permanecerá inalterada a los cambios de σ_{ci} .

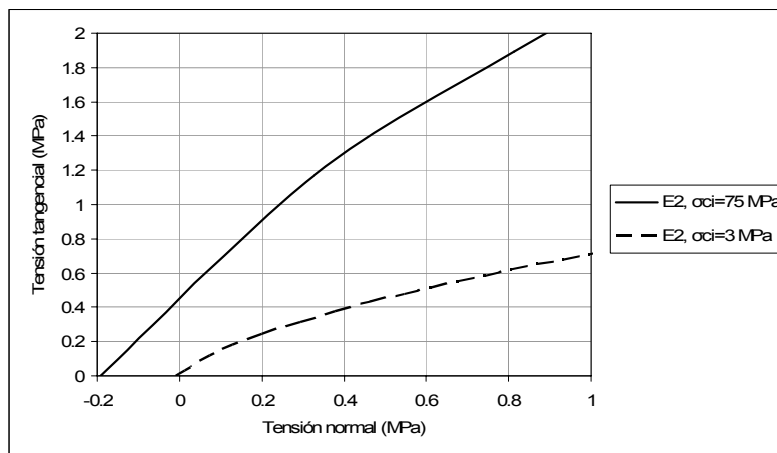


Figura 4.6: Visualización de la influencia de σ_{ci} en las envolventes de rotura, mediante la representación gráfica de E2 en el espacio de tensión normal y tangencial. Se ha considerado: $\sigma_{ci}=75$ y 3 MPa; $D=0$ y $GSI=50$.

En la Figura 4.6 es representada la envolvente de rotura E2 para los valores de σ_{ci} 75 y 3 MPa, en el espacio de tensiones normal y tangencial, considerando un valor del factor de alteración $D=0$ y para el valor de $GSI=50$. En la figura, “ σ_{ci} ” hace referencia a la resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta.

Hay que tener en cuenta que la envolvente de rotura representadas sigue el esquema de cálculo de $GSI \rightarrow H\&B$, pero no hace referencia a ningún caso de estabilidad en concreto, sino que son utilizadas para hacer una serie de observaciones.

Se puede apreciar que las envolventes sufren una “traslación” vertical a medida que el valor de la resistencia a compresión uniaxial aumenta, es decir que para la misma tensión normal, un macizo de roca con un valor alto de resistencia a compresión uniaxial, necesita una mayor tensión tangencial para que se produzca la rotura, que un macizo con un valor menor. De este modo, para una tensión normal de valor 0.4MPa, un material con una $\sigma_{ci}=3$ MPa necesitará aproximadamente 0.4MPa de tensión de cizalla para iniciar el movimiento, por el contrario, un material con $\sigma_{ci}=75$ MPa necesitará más de 1.2MPa.

Debido a la variación del valor de σ_{ci} se produce una variación en el rango de tensiones en el que las envolventes de rotura están representadas, es decir se produce una variación de la tensión normal máxima, y la variación de la resistencia a tracción

máxima que resiste el macizo rocoso. La observación acerca de la máxima tensión normal no puede ser visualizada en la Figura 4.6, porque solo han sido representadas las envolventes para pequeños valores de tensiones, de otro modo la visualización de la envolvente en el caso de $\sigma_{ci} = 3$ MPa se haría difícil. Mediante la comparación de la Figura 4.6, en la que se aprecia que la máxima tensión normal es menor que 1.4 MPa con la Figura 4.3 en la que la máxima tensión es superior a los 30 MPa se ve la gran diferencia entre las tensiones normales máximas y mínimas según que valor de σ_{ci} es considerado.

La variación de la tensión normal máxima y mínima del macizo rocoso para distintos valores de resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta, es una consecuencia que era de esperar, puesto que la resistencia del macizo rocoso, sin considerar la rotura del macizo a través de juntas o mediante bloques, está vinculado a la resistencia a compresión de la roca que forma el macizo.

La variación del valor de la resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta, implicará una variación en el rango de las tensiones normales en la envolvente de rotura E2, que implicará a su vez que las envolventes obtenidas de la linealización de E2 sean distintas en función del valor de σ_{ci} .

4.2.3 Influencia del factor de alteración D en el criterio de Hoek&Brown

Con el mismo propósito que el estudio de la influencia de GSI y σ_{ci} en los criterios de rotura, se estudia, en líneas generales, que influencia supone el factor de alteración del criterio de rotura de Hoek&Brown en los criterios de rotura.

La influencia del factor de alteración del criterio de rotura de Hoek&Brown (D) será estudiada a partir de la representación de la envolvente de rotura E2 con distintos valores de D (Figura 4.7). A parte de las envolventes E2, también serán representadas las envolventes de rotura E3, que el programa *RocLab* les asocia. De esta forma se podrá estudiar la influencia que tiene D no solo en E2 sino también en E3.

Tal y como se ha dicho en el estudio de la influencia de GSI y σ_{ci} , hay que tener en cuenta, que las envolventes representadas (Figura 4.7), no hacen referencia a ningún caso de estabilidad en concreto, sino que se utilizan simplemente para hacer unas observaciones.

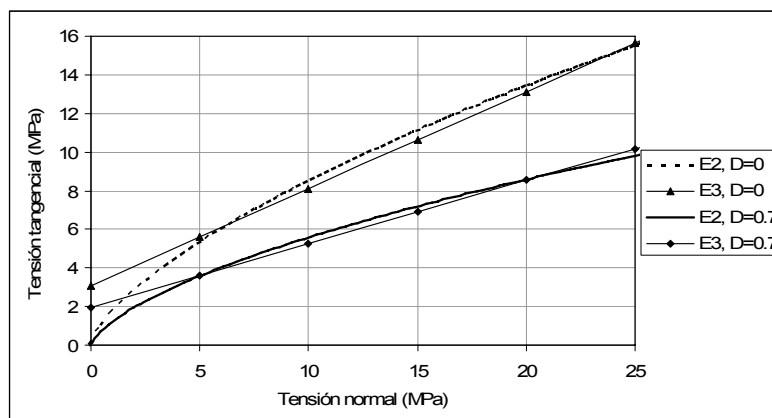


Figura 4.7: Influencia del factor de alteración D . Representación de las envolventes de rotura de E2 y E3, para valores de $D=0$ y $D=0.7$, para un $GSI=40$ y $\sigma_{ci} = 75$ MPa, en el espacio de tensiones normal y tangencial.

En la Figura 4.7 se representan las envolventes de rotura de E2 y E3 en el espacio de tensiones tangencial y normal, para un valor de $GSI=40$ y $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$.

Tal y como se puede apreciar, las envolventes de rotura E2 y E3 correspondientes a un valor de $D=0$ (E2,D=0; E3,D=0) están por encima de las envolventes correspondientes a un valor de $D=0.7$ (E2,D=0.7; E3,D=0.7). Esto implica que a igualdad de condiciones, un macizo que no ha sufrido relajación de tensiones laterales debido a excavaciones (factor de alteración 0), necesita unas tensiones tangenciales superiores para iniciar la rotura, a las que, por el contrario, necesita un macizo que ha sufrido alteraciones debido a excavaciones (factor de alteración 0.7).

Como era de esperar por la propia definición del factor de alteración del criterio de rotura de Hoek&Brown D , un macizo que ha sufrido alteración por excavación será de menor calidad que un macizo que no ha sufrido alteración.

Aunque en todo momento las envolventes correspondientes a un valor $D=0$ están por encima de las envolventes correspondientes a $D=0.7$, cabe destacar que, la diferencia entre los valores de las tensiones tangenciales para una misma tensión normal no es constante, sino que para tensiones normales cercanas a cero, la diferencia es muy pequeña, mientras que para tensiones mayores la diferencia incrementa.

En el caso E2, tal y como sucede con la influencia de GSI (ver apartado 4.2.1), esto es debido a que para valores de la tensión principal menor próximos a cero, el factor de alteración de Hoek&Brown pierde importancia, de manera que la pendiente de la envolvente para los distintos valores de D es muy parecida, por el contrario, para valores de la tensión principal menor mayores, D gana importancia, de manera que la pendiente de las envolventes es distinta y mayor a menor valor del factor de alteración, tal y como se observa en la expresión analítica del criterio (apartada 3.3 del capítulo 3).

En el caso de la envolvente E3, debido a su linealidad, aunque la diferencia entre las envolventes de rotura no es constante para distintos valores del factor de alteración de Hoek&Brown, D , existe una relación lineal que viene dada por:

$$\tau_1 - \tau_2 = \Delta\tau = C_1 - C_2 + \sigma^*(\tan\beta_1 - \tan\beta_2) \quad 4.6$$

la nomenclatura de la expresión de la ecuación ha sido tomada en la Figura 4.5.

En el caso de encontrarnos en el espacio de tensiones principales, y mediante unas relaciones como las realizadas en la Figura 4.5, la expresión viene dada por

$$\sigma_1^A - \sigma_1^B = \left(2c^A \sqrt{N_\phi^A} - 2c^B \sqrt{N_\phi^B}\right) + \sigma_3 \left(N_\phi^A - N_\phi^B\right) \quad 4.7$$

donde: $N_\phi^i = \tan^2\left[\frac{\pi}{4} + \frac{\phi^i}{2}\right]$, i puede ser A o B dependiendo de que envolvente se esté estudiando.

A y B son las envolventes de rotura que se están comparando. σ_1^A y σ_1^B son la tensión máxima principal de la envolvente de rotura A y B respectivamente. De manera que la envolvente A presenta mayores valores de tensión principal máxima que B para un mismo valor de la tensión principal menor.

c^A , c^B y Φ^A y Φ^B son las cohesiones y los ángulos de fricción de las envolventes A y B.

Tal y como se ha dicho en el capítulo 3 “Criterios de rotura y clasificaciones geomecánicas” de la presente memoria, el factor de alteración del criterio de rotura de Hoek&Brown D , fue introducido en la última versión del criterio de Hoek&Brown porque los autores detectaron que de lo contrario el criterio daba propiedades resistentes demasiado optimistas (observación realizada por Hoek et al., 2002). Esto se ve fácilmente en las envolventes de rotura E3, en las que se observa (Figura 4.7) que la cohesión y en ángulo de fricción de la envolvente para factor de alteración $D=0$, son superiores a los valores correspondientes a $D=0,7$. Lo mismo sucede con los parámetros resistentes del criterio de rotura de Hoek&Brown. A modo de ejemplo numérico y valido para la Figura 4.7, se presenta la siguiente (Tabla 4.1).

Tabla 4.1: Ejemplo de valores numéricos de los parámetros resistentes de las envolventes E2 y E3, en función del valor del factor de alteración del criterio de rotura de Hoek&Brown, D . $GSI=40$. Se aprecia la diferencia que existe entre los parámetros de una misma envolvente en función de D .

	$D=0$	$D=0,7$
mb	1.056	0.333
s	0.0012	0.0001
A	0.5114	0.5114
c (MPa)	3.1	2.0
Φ (deg)	27	18

Se ha estudiado la influencia que tiene el factor de alteración de alteración del criterio de rotura de Hoek&Brown, D , en las envolventes de rotura E2 y E3, hay que tener presente que E2 corresponde a la envolvente de rotura del criterio de Hoek&Brown y E3 a la envolvente de rotura de Mohr-Coulomb, con lo que se puede decir que se está estudiando la influencia del factor de alteración del criterio de Hoek&Brown, D , en los criterio de rotura de Hoek&Brown y Mohr-Coulomb. No hay que olvidar que se están siguiendo los esquemas de cálculo de $GSI \rightarrow H\&B \rightarrow MC$, es decir, que los parámetros resistentes de Mohr-Coulomb, c y Φ , se obtienen a partir de la envolvente de rotura del criterio de Hoek&Brown, mediante el programa *RocLab*. Hay que tener esto en cuenta, puesto que si se aplica el criterio de Mohr-Coulomb, sin la utilización de la envolvente de rotura del criterio de Hoek&Brown, por ejemplo siguiendo el esquema de cálculo $GSI \rightarrow RMR \rightarrow MC$, el factor de alteración no tiene ninguna influencia sobre el criterio de Mohr-Coulomb.

Por último decir, que aunque solo han sido representadas las envolventes de rotura para el valor de $GSI=40$, las observaciones no numéricas realizadas sobre la influencia que tiene el factor de alteración del criterio de rotura de Hoek&Brown, D , sobre el resto de envolventes de rotura consideradas en el estudio (E1, E4 y E5), son validas para cualquier valor de GSI . Se ha escogido un valor de $GSI=40$ por ser un valor intermedio, y ser apto para realizar las observaciones. Tal y como se ha visto en el apartado 4.2.1 distintos valores de GSI provocan una “traslación” vertical de la envolvente de rotura. De modo que si la grafica (Figura 4.7) presentada para un valor de $GSI=40$, se representa para cualquier otro valor, la diferencia que se producirá será la “traslación” vertical de las envolventes. Para valores $GSI < 40$, las envolventes de rotura se situarían por debajo de las representadas, mientras que para valores de $GSI > 40$ se situarían por encima.

4.3 Parámetros resistentes y envolventes de rotura

A continuación se van a analizar las diferencias entre las envolventes de rotura y los parámetros resistentes de los criterios de rotura de Mohr-Coulomb y Hoek&Brown. Para ello, en primer lugar se va a estudiar la diferencia entre la envolvente de rotura E1 (lineal) y E2 (no lineal), de esta forma se va a estudiar las diferencias entre las envolventes de rotura de los criterios de Hoek&Brown y Mohr-Coulomb. En segundo lugar se va a estudiar la diferencia entre las envolventes de rotura y los parámetros resistentes de E1, E3, E4 y E5 (todas ellas lineales). De esta forma se van a comparar las diferencias entre las envolventes de rotura de Mohr-Coulomb en función de la aplicación escogida en el *RocLab* para el cálculo, también se va a tener en cuenta la envolvente E2.

4.3.1 Envolventes de rotura E1 y E2

El objetivo de este apartado es el de hacer una primera comparación analítica de las envolventes de rotura de los criterios de rotura de Mohr-Coulomb y Hoek&Brown, mediante las envolventes E1 (lineal) y E2 (no lineal). Esto se hará mediante la comparación de las envolventes de rotura E1 y E2.

Puesto que en este caso, el objetivo es el de realizar unas observaciones generales sobre los dos criterios que nos sean válidas más adelante en el estudio, no se considera ninguna situación de estabilidad en concreto. De esta forma, el valor de la máxima tensión normal, dado un valor de σ_{ci} , ha sido escogido de manera que no entorpezca en las observaciones realizadas.

Para tener en cuenta la influencia tanto del GSI como del factor de alteración del criterio de Hoek&Brown, D , se estudian las envolventes para distintos valores de GSI, primero con un factor de alteración $D=0$, y posteriormente con un valor $D=0,7$. En este primer estudio se considera el valor de $\sigma_{ci}=75$ MPa. La influencia de la variación de dicho valor, tal y como se ha comentado en el apartado 4.2.2 será la de una “traslación” vertical de las envolventes y una variación del rango de valores de la tensión normal, en el caso de las envolventes de rotura en las que σ_{ci} tenga influencia.

Debido a la variación del valor de la clasificación geomecánica, tal y como se ha comentado en el apartado 4.2.1, las envolventes de rotura para valores de GSI altos se sitúan por encima de las envolventes con GSI bajos, independientemente del criterio de rotura considerado, lo mismo sucede con los valores de σ_{ci} considerados (ver apartado 4.2.2), a valores altos las envolventes de rotura se sitúan por encima de las envolventes con valores bajos de σ_{ci} . Hay que tener en cuenta que las observaciones que van a ser realizadas han sido únicamente para el caso de considerar un valor de $\sigma_{ci}=75$ MPa. Esto implica que algunas de las observaciones no se cumplen para valores de $\sigma_{ci}=3$ MPa. Puesto que es poco práctico para la visualización de los resultados, el incluir todos los casos en una gráfica, se ha optado por realizar el estudio de las distintas envolventes únicamente considerando el valor de $\sigma_{ci}=75$ MPa. Posteriormente en el apartado 4.3.2, se incorpora la variación de σ_{ci} , y se hará una valoración conjunta.

En este caso, el objetivo del estudio es el de determinar como influye el valor del GSI en la comparación de ambas envolventes. Para ello, se representan, en la Figura 4.8, la envolvente E1 y la envolvente E2 en el espacio de tensiones normal y tangencial, para distintos valores de GSI, con un valor del factor de alteración $D=0$ y $\sigma_{ci}=75$ MPa.

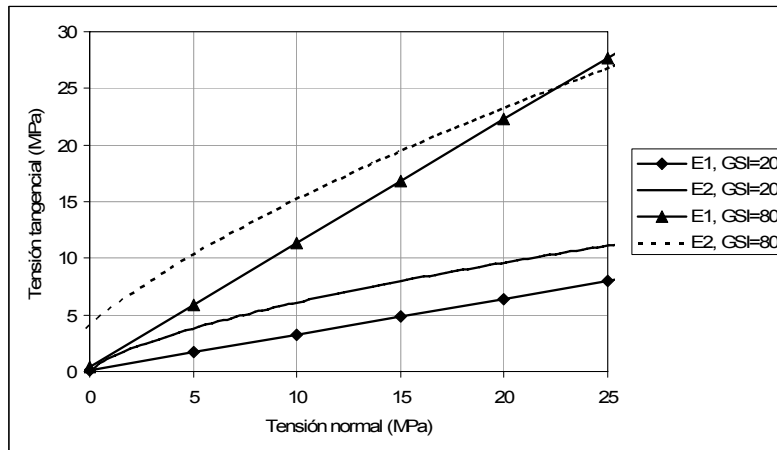


Figura 4.8: Envolventes de rotura E1 y E2, para distintos GSI, con un factor de alteración $D=0$ y $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$, en el espacio de tensiones normal y de cizalla.

En la Figura 4.8 han sido representadas las envolventes de rotura E1 y E2 para GSI de valores de 20 y 80 (E1, GSI=20 y E1, GSI=80; E2, GSI=20 y E2, GSI=80), con un valor del factor de alteración del criterio de Hoek&Brown, $D=0$ y un valor $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$. Se ha escogido representar únicamente las envolventes de rotura para dos valores de GSI, porque de esta manera es suficiente para visualizar la evolución de ambas envolventes en función del GSI, y la representación gráfica es mucho más sencilla y legible.

Las observaciones cualitativas que se extraen de la figura son:

- En función del valor de la tensión normal máxima en el que se centra el estudio, las envolventes de rotura E1 y E2 se llegan a cortar para un mismo valor de GSI. Hay que destacar que los valores de tensión normal para los que las envolventes de rotura se cortan son muy elevados, y tal vez fuera del rango de valores lógico para el estudio que se realiza.
- Para valores de tensión normal menores al valor en que las envolventes se cortan, la envolvente de rotura E2 está situada por encima de la envolvente de rotura E1. Es decir, para un mismo valor de tensión normal en el plano de rotura, E2, necesita mayor tensión tangencial para que se produzca la rotura que E1.
- En el caso de valores altos de GSI, la tensión normal a la que se cortan las envolventes de rotura E1 y E2 es menor que para el caso de GSI de menor valor.
- A medida que disminuye el valor de GSI, las envolventes de rotura E2 más se asemejan y aproximan a las envolventes de rotura E1, para un mayor rango de tensiones normales. En el caso de valores altos de GSI, el rango de tensiones normales en el que las envolventes se asemejan es menor. Aunque ambas envolventes de rotura para un mismo GSI se asemejen, los valores de tensiones entre envolventes es del orden de MPa. A modo de ejemplo numérico, para el caso de la Figura 4.8, en el caso de GSI=20, para una tensión normal de 5 MPa, las envolventes de rotura presentan una diferencia de unos 3 MPa.

Por su lado, el factor de alteración, tal y como se ha comentado en el apartado 4.2.3, solo influirá en la envolvente de rotura E2, puesto que es la envolvente del criterio de Hoek&Brown, disminuyendo la tensión tangencial necesaria para la misma tensión normal en el plano de rotura. Como consecuencia, un valor del factor de alteración del

criterio de Hoek&Brown, D , mayor ($D=0,7$) implicará que las envolventes de rotura E2 sufrirán un “descenso” mientras que las envolventes de rotura E1 permanecerán inalteradas.

En la Figura 4.9 se representan nuevamente las envolventes de rotura E1 y E2, pero esta vez para un factor de alteración del criterio de Hoek&Brown $D=0,7$.

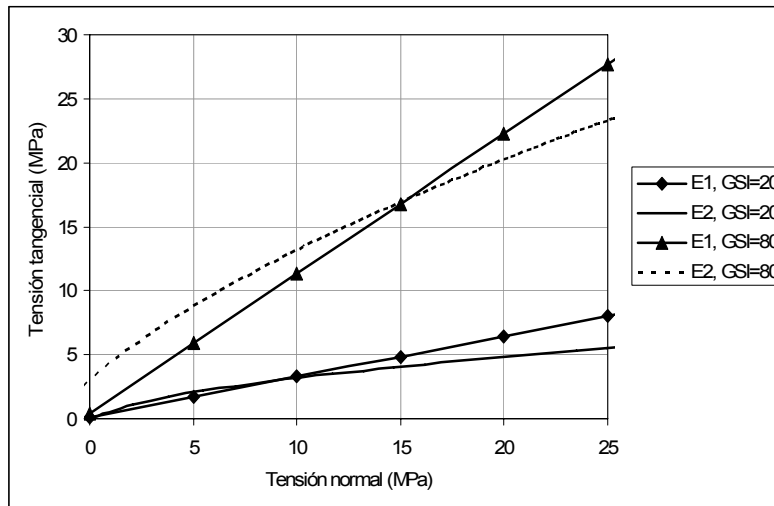


Figura 4.9: representación gráfica, en el espacio de tensiones normal y tangencial, de las envolventes de rotura E1 y E2, para distintos valores de GSI, un factor de alteración $D=0,7$ y $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$.

En la Figura 4.9 se han representado las envolventes de rotura para valores de GSI de 20 y 80, para un valor del factor de alteración $D=0,7$, en el espacio de tensiones normal y tangencial, y en la misma escala que se ha representado la Figura 4.8 para poder comparar las dos situaciones.

Debido a las modificaciones que sufren las envolventes de rotura E2 con el aumento del factor de alteración del criterio de Hoek&Brown:

- El valor de la tensión normal para el que ambas envolventes de rotura se cortan es menor, que para el caso de $D=0$. Aún y así, antes de que se corten, la envolvente de rotura E2 continúa, tal y como en el caso de $D=0$ (Figura 4.8), situada por encima de la envolvente de rotura E1.
- Al contrario que para el caso anterior (Figura 4.8), a menor valor de GSI, las envolventes de rotura se cortan para valores más pequeñas de tensión normal.
- Tal y como sucedía en Figura 4.8, a medida que disminuye el valor de GSI, las envolventes de rotura E2 más se asemejan y aproximan a las envolventes de rotura de E1. En este caso el rango de valores de tensión normal en el que las envolventes se asemejan es menor que en el caso anterior. Esta vez pero, la diferencia entre las envolventes es menor que en el caso anterior. A modo de ejemplo numérico, para el caso de la Figura 4.9, en el caso de $GSI=20$, para una tensión normal de 5 MPa, las envolventes de rotura presentan una diferencia de unos 0.5 MPa, mientras que en el caso de $D=0$, la diferencia era de uno 3MPa.

Aunque por definición, las envolventes de rotura E1 y E2 son distintas (no olvidar que E2 es la envolvente del criterio de Hoek&Brown y E1 la de Mohr-Coulomb), el caso

más favorable, en el que ambas envolventes son más parecidas, es en el que se dan valores bajos de GSI, y factores de alteración altos. Por el contrario, GSI altos, i factores de alteración bajos, implican grandes diferencias entre las envolventes de rotura de los criterios. Es decir, para macizos rocosos de material con una calidad mala, y que han sufrido alteraciones debido a excavaciones, el error que se comete al usar un criterio respecto usar el otro es menor que en el caso de tener un macizo de material bueno y que no haya sufrido relajaciones laterales debido a excavaciones.

4.3.2 Comparación de las envolventes lineales de rotura E1, E3, E4, y E5.

Una vez hecha una primera observación comparativa general de las envolventes de ambos criterios mediante la comparación de las envolventes de rotura E1 (lineal) y E2 (no lineal) únicamente para el caso de $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$ (apartado anterior), a continuación se realiza un estudio comparativo más localizado, esta vez considerando los valores de σ_{ci} de 75 y 3 MPa. En este caso se analizarán los resultados obtenidos con las envolventes lineales de rotura E1, E3, E4 y E5. Es decir se analizarán los resultados obtenidos de aplicar el criterio de Mohr-Coulomb en función de las distintas aplicaciones que presenta el programa *RocLab*.

Las distintas envolventes de rotura consideradse en el estudio, tal y como se han descrito en el inicio del presente capítulo son Empírica (E1), Hoek&Brown (E2) General (E3), Slope 10m (E4) y Slope 100m (E5). Empírica (E1) es la envolvente de rotura del criterio Mohr-Coulomb obtenida de forma empírica a partir de las ecuaciones que relacionan GSI con RMR y posteriormente con cohesión y ángulo de fricción (ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3).

Tanto General como Slope (10 y 100m) se basan en la linealización de la envolvente de rotura del criterio de rotura de Hoek&Brown (E2), mediante el uso del programa *RocLab*. Puesto que los parámetros resistentes de la envolvente de rotura del criterio de Hoek&Brown son siempre los mismos para los mismos valores de entrada, su envolvente es siempre la misma. Esto implica que la obtención de las envolventes de rotura del criterio de Mohr-Coulomb mediante el uso del programa *RocLab* (envolventes lineales de rotura E3, E4 y E5) dependerá del valor de la máxima tensión normal. De esta forma se obtienen distintas envolventes de rotura para el criterio Mohr-Coulomb que implican distintos parámetros resistentes, c y Φ dependiendo del rango de valores de tensión normal. Para nuestro caso el rango de valores de tensión normal, variará en función de la aplicación que sea utilizada de *RocLab*, una vez determinado el valor de σ_{ci} considerado.

En la Figura 4.10 se presentan las distintas envolventes de rotura consideradas en el estudio para poder analizar las diferencias en la obtención de los parámetros resistentes.

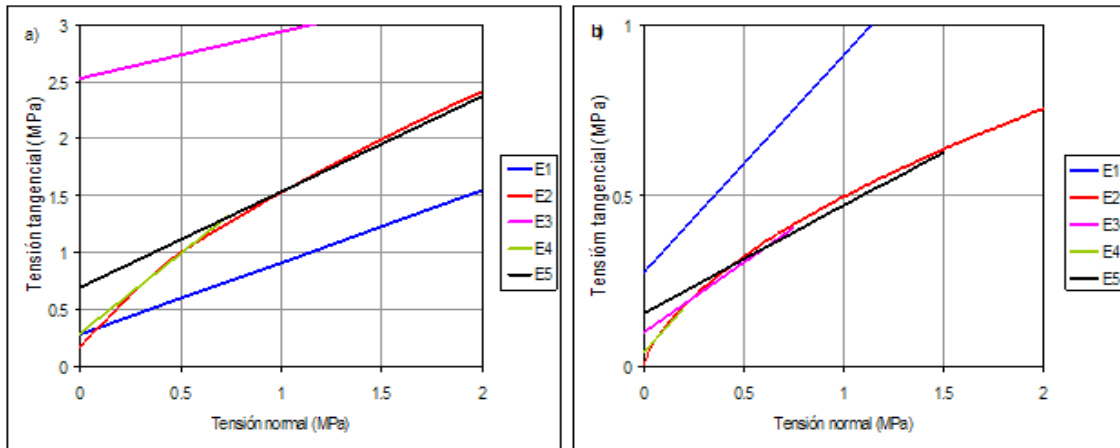


Figura 4.10: Diferencia entre envolventes de rotura E1, E2, E3, E4 y E5, en el espacio de tensiones normal y tangencial. $GSI=50$ y factor de alteración $D=0,7$. a) $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$; b) $\sigma_{ci}=3\text{MPa}$.

En la Figura 4.10 se han representado las envolventes de rotura presentadas para la realización del estudio. Han sido representadas en espacio de tensiones normal y tangencial para un mismo valor de GSI y de factor de alteración ($GSI=50$, y $D=0,7$), y en dos figuras por separado, para poder incluir también los dos valores de σ_{ci} considerados. Se representan únicamente para un valor de D y GSI , porque con la figura se pretende hacerse una idea de la diferencia que existe entre las situaciones de cálculo y no un análisis numérico.

Si nos centramos en una sola figura, tanto en el caso de la Figura 4.10 a) como en el caso de Figura 4.10 b), la diferencia entre las envolventes de rotura E3 y E4 y E5 (todas ellas lineales, y obtenidas mediante *RocLab*) es el valor máximo de tensión normal que se considera a la hora de realizar la linealización de la envolvente de rotura E2 (envolvente de rotura del criterio de Hoek&Brown), mediante áreas equivalentes. Una vez se han definido todos los valores de entrada para la obtención de las envolventes, la tensión normal máxima viene condicionada por la aplicación de *RocLab* que se escoge para la obtención de la envolvente. De esta forma se puede apreciar que en cualquier de las dos figuras según la envolvente de rotura considerada se tiene un valor de la tensión normal máxima u otro. Por otro lado, comparando a) y b) de la Figura 4.10, se observa que dada una envolvente de rotura determinada, en función del valor del valor de σ_{ci} se tiene una tensión normal máxima u otra.

También se observa que la envolvente de rotura E1 es la misma en ambas figuras, y además esta no depende del valor de la tensión normal máxima.

La envolvente de rotura E3, en el caso de $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$, la máxima tensión normal es aproximadamente 30MPa mientras que para E4 es menor que 1MPa y para E5 se acerca a $4,5\text{MPa}$. En el caso de $\sigma_{ci}=3\text{MPa}$, la máxima tensión normal de E3 es un poco menor que $1,2\text{MPa}$, mientras que para E4 es menor que $0,4\text{MPa}$ y para E5 es aproximadamente $2,2\text{MPa}$. El hecho de escoger el valor de la máxima tensión normal como 2MPa , ha sido con la finalidad de poder apreciar las cinco envolventes de rotura, en ambas figuras, puesto que considerando un valor mayor, E4 no se podría visualizar debido al pequeño valor que representa su máxima tensión normal frente a la de E3, en el caso de la Figura 4.10 a), y por otro lado los valores de tensiones normales en el caso de la Figura 4.10 b) no son muy superiores a los representados debido al pequeño valor de σ_{ci} considerado. Por el contrario el escoger un valor de la tensión normal máxima

pequeño no entorpece en las observaciones del resto de las envolventes. Además el hecho de escoger la misma escala para los valores del eje horizontal facilita las observaciones.

A continuación se realizan una serie de observaciones a partir de la Figura 4.10, que son independientes del valor de σ_{ci} considerado (validas para Figura 4.10 a y Figura 4.10 b).

- Las envolventes de rotura E2 (no lineal) y E1 (lineal), dados unos parámetros resistentes, son independientes del valor de la máxima tensión normal.

- las envolventes (lineales) de rotura E3, E4 y E5, tienen unos parámetros resistentes, c y Φ , distintos, aún y provenir todas ellas el criterio de rotura de Mohr-Coulomb para un mismo material. Es decir, aún y proceder de la misma envolvente de rotura del criterio de Hoek&Brown, las envolventes de rotura E3, E4 y E5 tienen distintos parámetros resistentes. Esto es debido a la diferencia entre valores de máxima tensión normal existente entre las envolventes E3, E4 y E5.

- Al aumentar la altura del talud (pasar de E4 a E5) el valor de la cohesión aumenta y el valor de el ángulo de fricción disminuye. Esto es debido a que para taludes mayores la tensión normal máxima es mayor. Debido a que en la envolvente de rotura del criterio de Hoek&Brown (tal y como se observa en la Figura 4.9) la pendiente es mayor para tensiones normales bajas, que para tensiones normales altas, al aumentar la máxima tensión normal la pendiente de la recta de regresión disminuye, y el punto de corte en el eje vertical aumenta.

Una vez realizada una observación comparativa general de las envolventes de rotura que se utilizan en el estudio, ahora se procede a realizar un análisis comparativo de las envolventes dependiendo del valor de la resistencia a compresión uniaxial, σ_{ci} .

Comparando a y b de la Figura 4.10 se observa, para un mismo valor de tensión normal, una gran diferencia de valores de tensión tangencial que toma una misma envolvente de rotura según los valores de σ_{ci} considerados. Esto tiene gran importancia, puesto que no todas las envolventes consideradas en el estudio se ven afectadas por el valor de σ_{ci} (es el caso de la envolvente E1). Por otro lado, también se aprecia la diferencia en el rango de valores de tensión normal, para una misma envolvente, dependiendo del valor de σ_{ci} . Todo ello tendrá una gran importancia puesto que provocará que la situación de las envolventes de rotura respecto las otras sea distinta según el valor de σ_{ci} , que provocará que en algunos casos el uso de una determinada envolvente de rotura sea favorable y en otros desfavorable frente a la estabilidad.

Tal y como ya se ha visto, la disminución del valor de σ_{ci} implica una “traslación” de la envolvente de rotura E2 (envolvente de rotura de Hoek&Brown), de manera que para un mismo valor de tensión normal se necesita menor tensión tangencial para iniciar el movimiento. De esta forma se verán afectadas por la variación de σ_{ci} también las envolventes E3, E4 y E5, todas ellas obtenidas de la linealización de E2, no así la envolvente E1, que se obtiene de una forma independiente al resto de las envolventes. Esto, juntamente con la variación del rango de tensiones normales que implican los distintos valores de σ_{ci} hará que la secuencia de envolventes lineales de rotura, dado un mismo valor de tensión normal, sea distinta. En el caso de Figura 4.10 a) es: E3, E5, E4 y E1. En el caso de Figura 4.1 b) es: E1, E5, E3 y E4. Las distintas secuencias entre envolventes vienen determinadas por el valor de la máxima tensión normal considerada.

Estas distintas situaciones implicarán que el uso de una determinada aplicación de *RocLab* en algunos casos de una valoración de la estabilidad del lado de la seguridad y otros del lado de la inseguridad.

Es evidente que los valores de los parámetros resistentes dada una envolvente de rotura determinada variarán en función del valor de σ_{ci} , aún y así, el comportamiento de dichos parámetros en función del GSI dada una aplicación de *RocLab* considerada será la misma, independientemente del valor de σ_{ci} .

Para cualquier valor de σ_{ci} se aprecia que para valores altos de tensión normal máxima, el ángulo de fricción es menor y la cohesión mayor, que para el caso de tensiones normales máximas pequeñas.

Para generalizar estas últimas observaciones a todo el rango de valores de GSI y factor de alteración del criterio de Hoek&Brown, D, incluidos en el presente estudio, se presentan Figura 4.11 y Figura 4.12. En la primera son representados los valores de la cohesión y en la segunda los valores de los ángulos de fricción. Son representados ambos parámetros para las envolventes lineales de rotura E1, E3 y E4. Los parámetros de la envolvente E5 no son presentados, porque sus parámetros se situarán entre los de E3 y E4 siguiendo el mismo comportamiento y de esta manera la figura es más limpia y fácil de interpretar. Estas figuras son únicamente para el caso de $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$. Para otros valores de σ_{ci} los parámetros tendrán distintos valores, y a su vez la situación de las curvas de cohesión y ángulo de fricción en función del GSI de unas envolventes respecto las otras no será la misma.

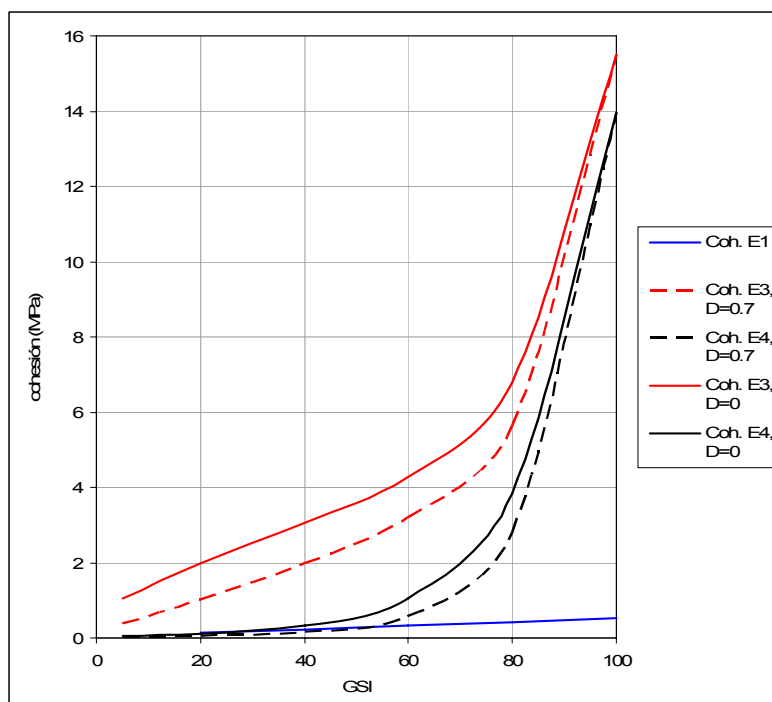


Figura 4.11: Representación de los valores de cohesión, asociados a las envolventes E1, E3 y E4, en función del valor de GSI para valores $D=0$ y $D=0,7$, y $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$.

En la Figura 4.11 han sido representados el valor de la cohesión (eje vertical) en función del valor de GSI (eje horizontal). Se han representado las cohesiones para cada

una de las envolventes de rotura del criterio de Mohr-Coulomb consideradas y para los valores del factor de alteración del criterio de Hoek&Brown considerados en el estudio.

Se pueden apreciar dos comportamientos bien distintos de los valores de la cohesión en función del valor de la clasificación geomecánica, GSI. En primer lugar consideramos el comportamiento de la curva de cohesión de la envolvente de rotura E1, en este caso el valor de la cohesión aumenta linealmente con el valor de GSI debido a la expresión de las ecuaciones para la obtención de los parámetros resistentes (ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3). Solo se ha podido calcular la cohesión para valores de $GSI > 18$, puesto que la ecuación 4.1 presenta la limitación de obtener el valor de RMR a partir del GSI siempre y cuando el RMR sea mayor de 23.

En segundo lugar, se considera las curvas de cohesión de las envolventes de rotura E3 y E4, en este caso la variación del valor de la cohesión en función del valor de GSI no sigue una relación lineal, sino que la pendiente de las curvas sufren un aumento a medida que aumenta el valor de GSI.

Se aprecia que la cohesión de la envolvente de rotura E3 mantiene grandes diferencias de valores con el resto de envolventes para cualquier valor del GSI. Por otra parte las envolventes E1 y E4 para valores de GSI pequeños presentan diferencias entre sus valores de cohesión pequeñas.

Para los casos de las cohesiones de las envolventes E3 y E4, y haciendo referencia a lo que se ha comentado anteriormente en la Figura 4.10 a), también se puede apreciar que en los casos donde la tensión normal máxima es grande la cohesión para un mismo valor de GSI es mayor. De esta forma, la curva de cohesión asociada a la envolvente E3, tiene mayores valores de cohesión que las otras, porque es la que considera el mayor valor para la tensión normal. Por el contrario, la curva de cohesión asociada a la envolvente E4, es la que presenta valores menores de cohesión asociados a un mismo valor de GSI, porque es la que presenta una menor tensión normal máxima.

Debido al aumento de GSI, la envolvente de rotura de E2 sufre un “movimiento” vertical (ver 4.2.1). Esto hace que, tal y como se aprecia en Figura 4.11, para un mismo valor de tensión normal máxima, el valor de la cohesión sea mayor a mayor valor de GSI.

Debido a la presencia del factor de alteración, la envolvente de rotura E2 también sufre “movimientos verticales”, de manera que a un mayor factor de alteración las envolventes de rotura sufren un “descenso vertical”, mientras que para valores pequeñas sufren un “ascenso” (ver 4.2.3). Todo ello implica que para una misma situación de cálculo, i un mismo valor de GSI, un factor de alteración alto tiene una cohesión asociada menor que un factor de alteración bajo.

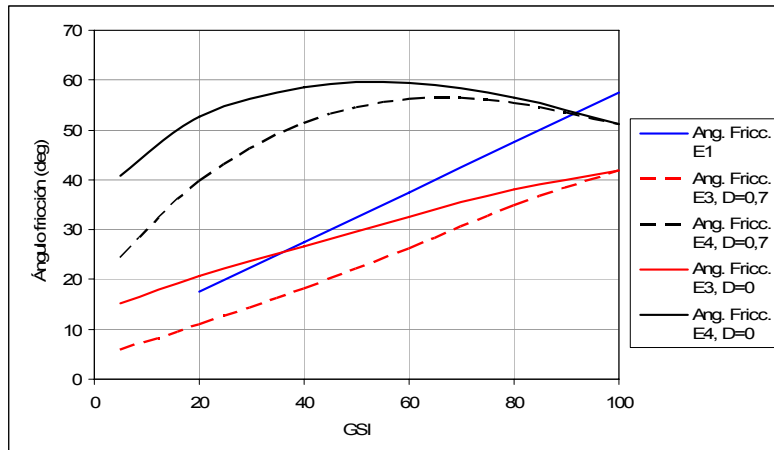


Figura 4.12: Representación de los ángulos de fricción, asociados a las envolventes de rotura E1, E3 y E4, en función del valor de GSI para valores de factor de alteración $D=0$ y $D=0,7$, $\sigma_{ci}=75\text{Mpa}$.

En la Figura 4.12 son representados los ángulos de fricción en función del valor de GSI, para las envolventes de rotura E1, E3 y E4 y para los factores de alteración incluidos en el estudio, considerando $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$.

Para analizar el comportamiento de las curvas del ángulo de fricción, tal y como se ha hecho para analizar la cohesión, se van a distinguir entre la curva asociada a la envolvente de rotura E1, y las curvas asociadas a las envolventes de rotura E3 y E4. En el primer caso el ángulo de fricción sigue un comportamiento lineal con el valor de GSI, a mayor GSI mayor ángulo de fricción (ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3).

En el segundo caso, es posible observar nuevamente la importancia de la tensión normal máxima. A igualdad de condiciones, mayor tensión normal máxima significa menor ángulo de fricción, y viceversa, a menor tensión normal máxima mayor ángulo de fricción.

En el caso de considerar tensiones normales máximas elevadas (envolvente de rotura E3) el ángulo de fricción aumenta a medida que aumenta el valor de GSI. Por el contrario, para tensiones normales menores (envolvente de rotura E4), el ángulo de fricción aumenta hasta un valor intermedio de GSI, para posteriormente disminuir. Aquí se aprecia que la linealización no siempre es coherente, puesto que GSI altos significan macizos de buena calidad que implicaría ángulos de cohesión superiores que en el caso de GSI menores.

En la Figura 4.12 se hace nuevamente patente la influencia del factor de alteración del criterio de rotura de Hoek&Brown, D . Debido a la influencia del factor de alteración en la envolvente de rotura E2 (Hoek&Brown) (ver apartado 4.2.3), un menor factor de alteración supone un ángulo de fricción mayor, y viceversa.

La Figura 4.11 y Figura 4.12 consideran el valor de $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$, en el caso de tomar como valor de la resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta como $\sigma_{ci}=3\text{MPa}$, se obtendrán figuras muy parecidas en la forma pero distintas en los valores. En cuanto a la cohesión (Figura 4.11) los valores asociados a la envolvente E1 son los mismos, pero esta vez serán los valores de cohesión mayores. Siguiendo de mayor a menor valor de cohesión están las envolventes E3 y E4, puesto que es el orden de mayor a menor tensión normal máxima considerada, para el caso de $\sigma_{ci}=3\text{MPa}$. En el caso del ángulo de fricción, el comportamiento será el mismo, aunque con distintos valores que en el caso

de $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$, las envolventes ordenadas de mayor a menor ángulo de fricción son E4, E3, puesto que es el orden de menor a mayor valor de tensión máxima normal considerada, para $\sigma_{ci}=3\text{MPa}$.

Por lo tanto, y a modo de resumen de observaciones realizadas sobre los parámetros resistentes asociados a las envolventes de rotura E3, E4, dado un macizo con unas características determinadas, se presentan

Figura 4.13 y Figura 4.14. La primera es un esquema de las observaciones realizadas, y la segunda es una representación gráfica de la cohesión y el ángulo de fricción en función del valor de la máxima tensión normal considerada, considerando $GSI=50$, $D=0$ y los valores de 3 y 75 MPA para σ_{ci} .

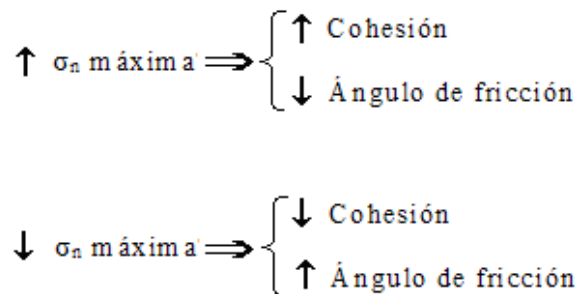


Figura 4.13: Influencia de los valores de la tensión normal máxima considerada en la obtención de los parámetros resistentes para las envolventes de rotura E3, E4 y E5.

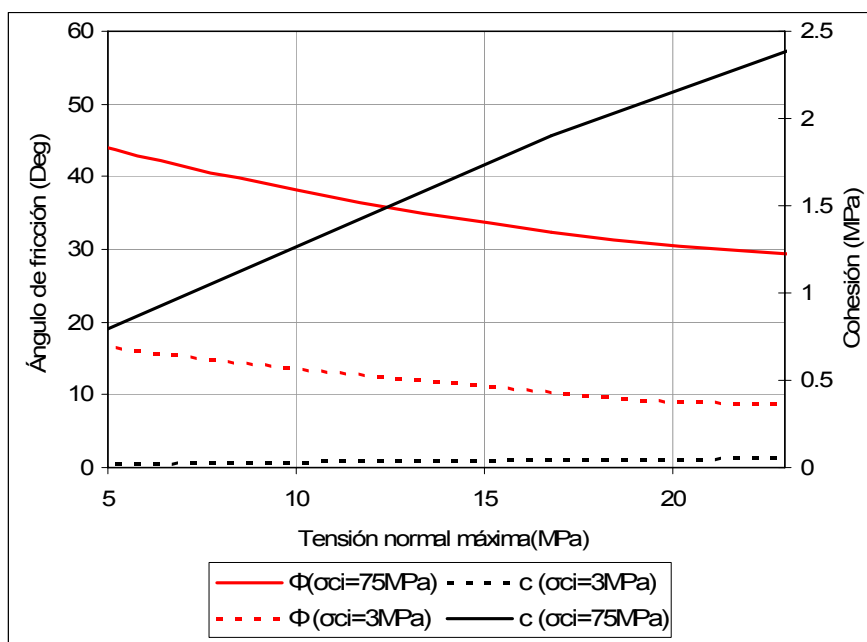


Figura 4.14: Variación del ángulo de fricción y de la cohesión en función de la tensión normal máxima considerada, para un valor de $GSI=50$ y un factor de alteración del criterio de Hoek&Brown $D=0$, para los casos de valores de 75 y 3 MPa de σ_{ci} .

En la Figura 4.14 han sido representados los valores de cohesión y ángulo de fricción en función del máximo valor de tensión normal considerada para los casos de $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$ y $\sigma_{ci}=3\text{MPa}$. El símbolo “ Φ ” hace referencia al ángulo de fricción, “ c ” al valor de la cohesión y “ σ_{ci} ” a la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta.

El hecho de representar los parámetros resistentes en función de la máxima tensión normal considerada para ambos valores de σ_{ci} considerados en el estudio, es porque de esta forma se pueden generalizar las observaciones realizadas en la Figura 4.13, y se hace hincapié en la variación de los valores de los parámetros resistentes en función del valor de σ_{ci} escogido, que hace que la situación de las envolventes de rotura respecto las otras no sea la misma para todos los valores de σ_{ci} . La variación de valores es especialmente importante en el caso de la cohesión.

Ejemplo numérico

A continuación se realiza un ejemplo de cálculo en el que se obtendrán los parámetros resistentes. Se considera un talud de 10 m de altura. Para la obtención de los parámetros resistentes van a ser utilizadas las envolventes lineales de rotura E1, E3 y E4, con distintos valores de GSI y distintos valores del factor de alteración del criterio de Hoek&Brown, D ($D=0$ y $D=0,7$), se considera $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$. De esta forma se van a obtener valores de cohesión y ángulo de fricción, para $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$, para cada una de las envolventes consideradas y para los distintos valores de D y GSI.

El objetivo es el de realizar un análisis comparativo de los parámetros resistentes obtenidos, c y Φ , con cada una de las envolventes de rotura. Para ello va a ser cuantificada la diferencia porcentual existente entre los valores de los parámetros.

Dado que en el ejemplo se estudian los parámetros resistentes de un talud de 10 metros, van a ser considerados como valores de referencia los parámetros obtenidos de la envolvente de rotura E4, que es la envolvente que se obtiene de la aplicación *Slope*, considerando altura 10 m, de *RocLab*. De esta forma se obtendrán las diferencias en porcentaje de los valores de los parámetros de las envolventes E1 y E3 respecto E4. También va a ser posible ver las diferencias porcentuales entre los valores obtenidos de los parámetros de E1 y E3.

La expresión para el cálculo de la diferencia porcentual entre valores es:

$$\Delta j(\%) = \left(\frac{V_{comp}}{V_{ref}} 100 \right) - 100 \quad 4.8$$

donde V_{comp} es el valor que se está comparando del parámetro y V_{ref} es el valor de referencia considerado. j será c o Φ en función de que parámetro de resistencia se esté estudiando.

Se escoge comparar los parámetros resistentes de las envolventes de rotura E1, E3 y E4, porque E4 proporciona los valores resistentes, utilizando el programa *RocLab*, para un talud de 10m. Por su parte, E3, asociado a la aplicación *General* de *RocLab*, proporciona los parámetros resistentes, utilizando *RocLab*, para una situación general, sin considerar que estabilidad se está estudiando. Y por último, E1 proporciona los parámetros resistentes sin la utilización del programa, pero mediante ecuaciones empíricas (ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3).

De esta forma va a ser posible observar las diferencias que se producen entre la obtención de los parámetros mediante una aplicación específica para la situación de estabilidad estudiada (E4) y mediante una aplicación general (E3). Por otro lado, se estudiará las diferencias entre el uso del programa para la obtención de los parámetros

resistentes partiendo del GSI (E3 y E4), y entre la obtención de los parámetros directamente del valor de GSI a partir de las relaciones empíricas (E1).

Para facilitar la lectura de las diferencias entre los valores se representan gráficamente las diferencias porcentuales entre los parámetros según las diferentes envolventes de rotura consideradas (Figura 4.15)

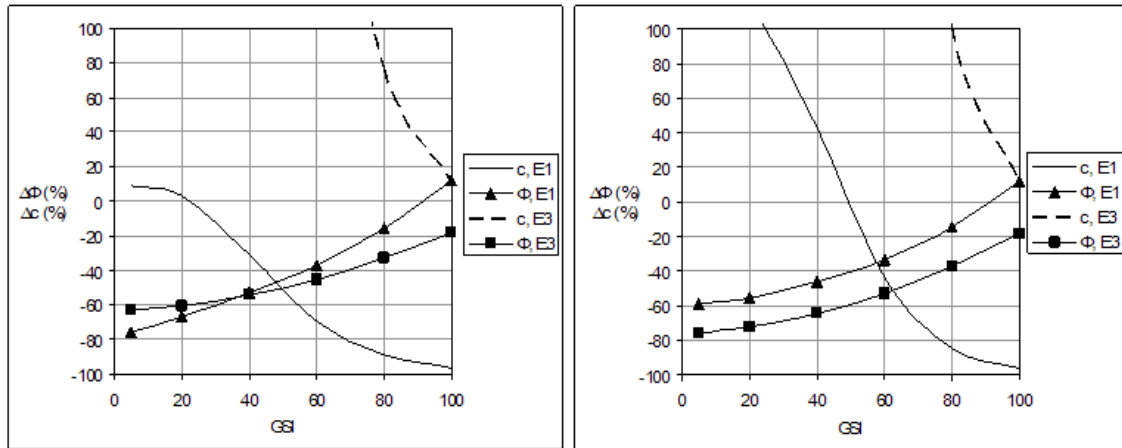


Figura 4.15: Diferencias porcentuales entre las cohesiones y los ángulos de fricción obtenidos con las envolventes E1 y E3, respecto los obtenidos con E4, en función del GSI. En la derecha $D=0,7$ y en la izquierda $D=0$, $\sigma_{ci}=75\text{Mpa}$.

En la Figura 4.15 se representa la diferencia porcentual existente entre las cohesiones “c” y los ángulos de fricción “ Φ ” obtenidos con las envolventes E1 y E3, respecto los obtenidos con la envolvente E4, en función del valor de GSI. En la gráfica de la izquierda se ha considerado factor de alteración del criterio de Hoek&Brown $D=0$, mientras que en la de la derecha se ha considerado $D=0,7$. En ambos casos se toma el valor de la resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$.

Tal y como se pone de manifiesto en Figura 4.11 y Figura 4.12 existen grandes diferencias entre los valores de cohesión y de ángulo de fricción dependiendo de que envolvente se considere para su obtención.

Para un factor de alteración $D=0$, se observa que las diferencias entre las cohesiones obtenidas a partir de las tres envolventes son muy elevadas. Aún y así, en el caso de la cohesión obtenida a partir de la envolvente de rotura de E1, se cumple que, para los primeros valores de GSI el porcentaje de diferencia respecto la cohesión obtenida de la envolvente E4 no es tan elevado. También se cumple que para el caso de la cohesión obtenida de la envolvente E3, los valores son siempre superiores que los obtenidos con E4 para cualquier GSI, tal y como se aprecia en la Figura 4.15, donde el porcentaje es siempre positivo. Por otro lado, la cohesión obtenida con E1, tiene valores superiores a los obtenidos con E4 para valores de GSI menores de 20, a partir de los cuales el valor es menor.

En el caso de los ángulos de fricción aunque las diferencias son muy grandes, son menores que en el caso de las cohesiones. Los ángulos de fricción obtenidos de las envolventes E1 y E3 tienen valores más parecidos entre ellos, que respecto los obtenidos de la envolvente E4. Se aprecia que para valores de GSI menores de 40, los ángulos de fricción de la envolvente E3 son mayores que los ángulos de fricción de la envolvente E1, a partir de $GSI=40$, son los ángulos de E1 que son mayores que los de

E3. Los ángulos obtenidos de E1 son siempre menores que los obtenidos de E4, excepto a partir de $GSI=90$, donde pasan a ser superiores. Por el contrario, los ángulos de E3 tienen siempre valores inferiores a los de E4.

Para un factor de alteración $D=0,7$, las observaciones son exactamente las mismas, excepto para el caso de la cohesión obtenida de E1, puesto que en este caso aumenta la diferencia respecto la de E4. Otra consecuencia de la variación del factor de alteración, es que la diferencia entre los ángulos de fricción de E1 y E4 mantienen prácticamente la misma diferencia a lo largo de todos los valores de GSI, siendo mayores ángulos de fricción los obtenidos con la envolvente E1.

Debido a que la envolvente de rotura del criterio de Hoek&Brown se adapta mucho mejor al comportamiento de los macizos rocosos en rotura, y a que se ha considerado un talud de altura 10m, es lógico considerar que la envolvente de rotura E4 es la que nos proporciona los parámetros resistentes de Mohr-Coulomb más acordes a la realidad. Por ello, aunque hay algún valor de GSI en el que se cumple la igualdad entre el parámetro obtenido de la envolvente E4 y el obtenido de E1 (puntos de la Figura 4.15 donde la Δj corta al eje horizontal), existen grandes diferencias entre los parámetros obtenidos con la envolvente E4 y los obtenidos con las envolventes E3 y E1 para la mayoría de valores de GSI. Por lo tanto la utilización de los parámetros obtenidos de las envolventes E1 o E3 en la estabilidad de taludes implica una infravaloración o sobrevaloración de la estabilidad del talud. Con lo cual, la práctica extendida, en la que con datos de la clasificación geomecánica GSI se obtienen los parámetros resistentes de Mohr-Coulomb mediante la utilización, o bien de ecuaciones (el caso de la envolvente E1 del estudio), o bien mediante el programa *RocLab* con la aplicación *General* (envolvente E3 en el presente estudio) inducen a grandes errores en el análisis de estabilidad.

4.4 Caso práctico: cálculo del factor de seguridad

En el apartado anterior se han estudiado, por un lado las diferencias entre las representaciones gráficas de las envolventes de rotura E1 (lineal) y E2 (no lineal). Por otro lado, se han estudiado las diferencias entre los parámetros resistentes, c y Φ , y las envolventes lineales de rotura E1, E3, E4 y E5. 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*).

Considerando que la envolvente de rotura que mejor se adapta al comportamiento en rotura del macizo rocoso es E2 (coincide con la envolvente de rotura del criterio de Hoek&Brown), o en su defecto, las envolventes E4 y E5, que se obtienen de la linealización de E2 para el caso de análisis de estabilidad de taludes, a grandes rasgos las conclusiones del apartado anterior son: por un lado que, el uso de las distintas aplicaciones presentes en el programa *RocLab* dan distintos valores de los parámetros resistentes para un mismo tipo de material; en segundo lugar, tal y como se detectó [3],

se observa que para el valor del factor de alteración del criterio de Hoek&Brown, $D=0$, los parámetros resistentes son muy elevados.

El objetivo del presente apartado es el de realizar 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 y teniendo en cuenta las observaciones realizadas. Aunque generalmente se estudian las inestabilidades en los macizos rocosos provocadas por familias de discontinuidades, ya sea por formación de bloques, cuñas, deslizamientos o por vuelco de estratos, en este apartado, se va a estudiar la estabilidad del macizo rocoso frente a la rotura global con forma curva. Las roturas de este tipo se suelen estudiar con los mismos criterios e hipótesis que en el caso de estabilidad para suelos, con lo que para este estudio se utilizan los criterios de rotura de Hoek&Brown y de Mohr-Coulomb.

Para la obtención del factor de seguridad será utilizado el programa *GeoStudio* (ver capítulo 2), este permite el cálculo del factor de seguridad considerando los criterios de rotura de Hoek&Brown y Mohr-Coulomb, lo que hará posible el cálculo del factor de seguridad utilizando los parámetros resistentes obtenidos de las envolventes de rotura consideradas en el estudio.

El programa *GeoStudio* permite el cálculo del factor de seguridad mediante distintos métodos, en este estudio se va a considerar el método de Morgenstern-Price. Se escoge la utilización de este método por ser el método de cálculo del factor de seguridad considerado más completo. La superficie de rotura, para el estudio, se ha definido mediante la opción de *Entry and Exit*, es decir se han definido unas zonas para la intersección de la superficie del terreno con la superficie de deslizamiento. El movimiento de la masa deslizante se ha definido con la opción *left to right*, que implica un movimiento de izquierda a derecha.

Para la realización del análisis analítico se han considerado dos taludes de altura 10 metros. La pendiente de ambos es de 1H:2V ha sido considerado este valor por ser usado en muchos de los taludes de carreteras. El valor de las características de la roca que forma el macizo son: 25 KN/m^3 para el peso específico, 9 para m_i , la resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta es distinta, puesto que se han utilizado los dos valores analizados a lo largo del estudio $\sigma_{ci}=3\text{MPa}$ y $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$. y 75 MPa . Van a ser analizados estos dos casos porque de esta forma se pondrá de manifiesto lo comentado anteriormente acerca del valor de σ_{ci} considerado. La misma envolvente de rotura nos puede situar tanto del lado de la seguridad como del de la inseguridad en función de que valor de σ_{ci} consideramos.

Referente a la presencia de agua en el macizo rocoso, se consideran dos situaciones totalmente distintas. En primer lugar se analiza el macizo en seco, sin presencia de agua; y en segundo lugar se analiza el macizo con presencia de agua, se considera un nivel freático que roza el estado más desfavorable, puesto que prácticamente todo el talud esta saturado. Dicha situación podría ser asimilable a la que se produce después de un episodio de intensas lluvias. Mediante la consideración de estas dos situaciones se obtendrá, dado un talud con unas determinadas características, el factor de seguridad más favorable (talud seco) y el más desfavorable (talud saturado).

En la Figura 4.16 se representa la geometría del talud usado en el estudio de estabilidad del presente apartado.

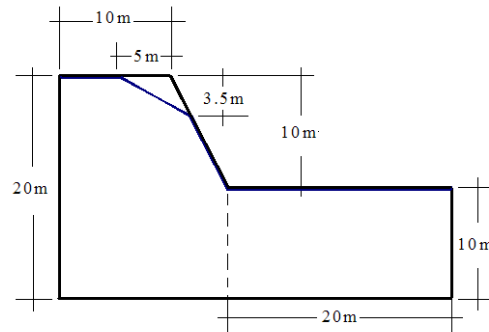


Figura 4.16: Geometría del talud usado en el estudio.

Para la realización de los cálculos del factor de seguridad se consideran los parámetros resistentes que provienen de todas las envolventes de rotura consideradas en el estudio. Dado que el talud que se analiza es de 10 metros de altura se descarta el uso de E5, porque es la envolvente de rotura lineal asociada a la aplicación *Slope* con una altura de talud de 100m.

Anteriormente se ha comentado que la envolvente de rotura E2 (envolvente de rotura de Hoek&Brown) es la envolvente que más se acerca a la realidad, esto implica que las envolventes E4 y E5 serán las envolvente lineales más acertadas, puesto que provienen de la linealización de la E2 mediante *RocLab*. En el presente apartado se considera un talud de 10 metros, lo que implica que la envolvente de rotura lineal que más se acerca a la realidad es E4. Aún y así también se consideran las envolventes de rotura E1 y E3.

Mediante el uso de la envolvente de rotura E3 será posible el estudio de los errores que se producen en el cálculo de estabilidad con el uso de aplicaciones de programas informáticos sin considerar el caso de estabilidad a estudiar.

A partir del uso de la envolvente de rotura E1 será posible ver los errores que se producen en el uso de GSI para la obtención directa de los parámetros resistentes del criterio de Mohr-Coulomb mediante ecuaciones empíricas (ver apartado 4.1.2).

Se considerará distintos valores de la clasificación geomecánica GSI, de modo que quede representado todo su rango de valores. De esta forma, para cada valor de GSI considerado, se analizará el factor de seguridad para cada talud, y para los distintos parámetros resistentes que provienen de las distintas superficies de rotura consideradas. Se estudian las diferencias entre factores de seguridad en función de la envolvente de rotura utilizada para la obtención de los parámetros resistentes, que es la finalidad del apartado.

Dado que el valor del factor de alteración del criterio de rotura de Hoek&Brown, $D=0$, da valores muy optimistas de los parámetros resistentes, y que solo se considera el valor $D=0$, en los casos en los que al realizar la excavación no se producen relajaciones ni alteración en el macizo circundante, se puede considerar que este valor va a ser utilizado en muy pocos o en ningún caso. De este modo, aunque inicialmente en el presente estudio se han considerado los valores del factor de alteración $D=0$ y $D=0.7$, en el análisis que se va a realizar a continuación será considerado únicamente el valor de $D=0.7$. Este valor es el que se asume cuando se realizan taludes en ingeniería civil mediante voladura o mecánicamente, produciendo pequeñas alteraciones en el macizo.

A continuación se exponen los casos prácticos analizados. En primer lugar se analizará el talud con $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$ y en segundo lugar el talud con $\sigma_{ci}=3\text{MPa}$. Posteriormente se realizará un análisis comparativo relacionando ambos casos.

Los valores de los parámetros usados en el cálculo son:

Tabla 4.2: Parámetros y valores usados en los cálculos de estabilidad

Parámetro	Valor
Pendiente	1H:2V
Peso específico	25 KN/m ³
Factor de alteración, D	0.7
m_i	9
Resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta, σ_{ci}	75 MPa y 3MPa
GSI	0-100

En cada uno de los casos, tal y como se ha expuesto anteriormente, se calculan los factores de seguridad en distintas situaciones. Para facilitar la visualización de los factores de seguridad obtenidos de las distintas envolventes de rotura, se ha optado por la representación gráfica de resultados.

4.4.1 macizo rocoso con $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$

Se considera que la envolvente de rotura E2 (envolvente de rotura del criterio de Hoek&Brown) es la envolvente que más se acerca a la realidad. Dado que el objetivo de este apartado es el de realizar una comparación entre los factores de seguridad que se obtienen en función de la envolvente de rotura que se considera para implementar el método del equilibrio límite, se ha optado por representar gráficamente ΔFS frente a GSI (Figura 4.17). ΔFS es la diferencia entre el factor de seguridad obtenido con la envolvente de rotura no lineal E2 y cualquier de las envolventes lineales de rotura consideradas en la tesina, es decir, $\Delta\text{FS}=\text{FS}_{Ei}-\text{FS}_{E2}$, donde Ei puede ser E1, E3 o E4

Han sido representados los casos en los que se ha considerado presencia de agua (Figura 4.17 a), y en los que no ha sido considerada agua en el macizo (Figura 4.17 b).

Mediante esta representación gráfica se observa la evolución de la diferencia del FS de la envolvente analizada respecto el FS de la envolvente considerada correcta en función del valor de la clasificación geomecánica.

Los valores máximo y mínimo del factor de seguridad obtenidos con la envolvente E2, para el caso del talud con agua, son: cercano a 0, para el caso de GSI bajos, hasta un valor de 400, para valores de GSI altos. De este modo tenemos un orden de magnitud para los factores de seguridad de todas las envolventes.

Aunque con el método de Morgenstern-Price se obtienen dos factores de seguridad, uno asociado al equilibrio de fuerzas y otro asociado al equilibrio de momentos, en la Figura 4.17 únicamente se representa el factor asociado al equilibrio de momentos. Con esto, se

facilita la visualización gráfica de los resultados, y no se limitan las observaciones, pues los valores son muy parecidos.

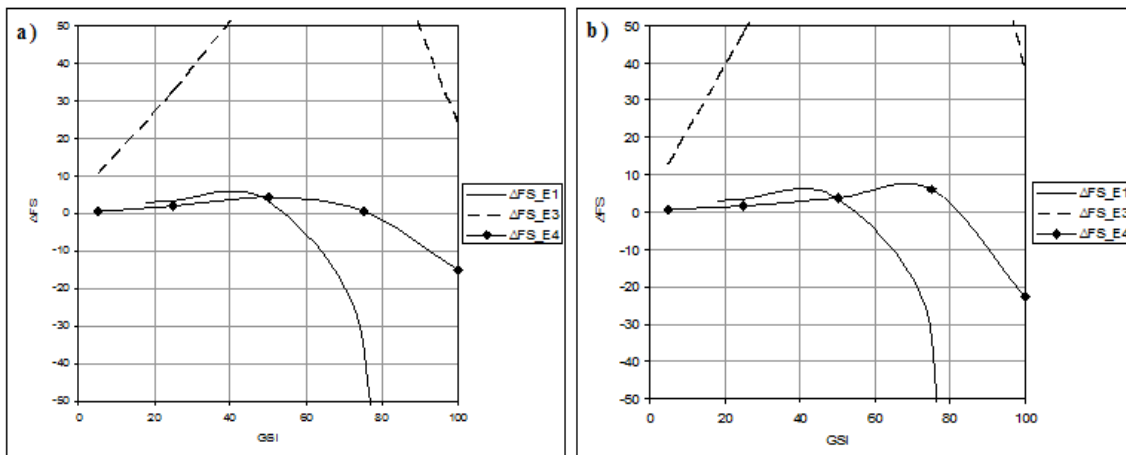


Figura 4.17: Representación de la diferencia de valor de factor de seguridad (ΔFS) obtenida de las envolventes de rotura E1, E3 y E4, respecto al obtenido de la envolvente E2 (considerada la envolvente de rotura más correcta). Se representa ΔFS frente al valor de GSI, para el caso de $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$. a) Se considera presencia de agua en el macizo; b) No se considera presencia de agua

En la Figura 4.17 se observa el comportamiento de los valores del factor de seguridad obtenido de las envolventes de rotura E1, E3 y E4 frente al obtenido de la envolvente E2, para el caso de presencia y no presencia de agua en el macizo.

A priori lo que más llama la atención (Figura 4.17 a y b) son las grandes diferencias que existen entre los valores de factor de seguridad según que envolvente sea considerada. En el caso de los factores de seguridad asociados a E3 las diferencias respecto a los obtenidos de E2 están entre 10 y 100. En el caso de los obtenidos mediante E1, las diferencias van desde 5 hasta más de 100. Los factores obtenidos con E4 son los de valor más parecido a los obtenidos con E2, aún y así, las diferencias van desde cercanas al 0 hasta 15.

Esto implica que los valores de factor de seguridad obtenidos mediante las envolventes de rotura consideradas son muy elevados, puesto que el rango de valores en el que se sitúa el factor de seguridad de E2, tal y como ya se ha comentado, es elevado. Los valores son muy elevados debido al elevado valor que se obtiene para los parámetros resistentes, principalmente de la cohesión (Figura 4.11).

Hay que tener en cuenta que se está considerando la estabilidad global, y no a través de una junta o grieta, de un talud en un macizo rocoso con unas propiedades de la roca buenas ($\sigma_{ci}=75\text{MPa}$), lo que implica la obtención de grandes valores para el valor de factor de seguridad. Por el mismo razonamiento, el factor de seguridad obtenido a partir de cualquier envolvente de rotura aumenta con el aumento del valor de GSI, pues implica una mejor calidad del macizo.

Dado que los valores de los factores de seguridad obtenidos son muy elevados, la presencia o no de agua en el macizo no tiene una gran influencia en su valor. Tampoco implica grandes diferencias entre factores obtenidos de las distintas envolventes, pues el agua afecta en todos los casos.

Teniendo en cuenta que son diferencias de valores entre factores de seguridad las diferencias mostradas en la Figura 4.17 son muy elevadas en cualquier caso. Aún y así, entre las envolventes de rotura E1 y E2, las diferencias entre factores de seguridad son menores para valores de GSI inferiores a 65. A partir de este valor las diferencias aumentan hasta llegar a diferencias muy elevadas. Para valores de GSI inferiores a 60, E1 nos sitúa del lado de la seguridad, y a partir de éste de la inseguridad.

En el caso de la envolvente E4, los valores del factor de seguridad son muy parecidos a los de E2, pues la primera se obtiene de la linealización de la segunda en un rango de tensiones normales acorde a la situación que se está analizando. Con E4 estamos del lado de la seguridad para valores de GSI inferiores a 85.

Las curvas ΔFS_{E1} y ΔFS_{E4} de la Figura 4.17 son bastante cercanas para valores de GSI inferiores a 55, a partir de dicho valor las diferencias aumentan. Esto concuerda con la situación representada en las Figuras 4.11 y Figura 4.12, donde la cohesión de la envolvente E1 es mayor a la de E4 para valores inferiores a $GSI=55$, pero donde el ángulo de fricción es mucho mayor para la envolvente E4. En este punto se pone de manifiesto que el ángulo de fricción aún y variar no influye tanto como la cohesión, puesto que este último parámetro presenta grandes valores.

Por su lado, la envolvente de rotura E3 nos facilita unos factores de seguridad muy elevados respecto a los obtenidos con E2, que hace que estemos en todo momento del lado de la seguridad. Esto es debido a que los valores de cohesión para la envolvente E3 son mucho más elevados que los obtenidos con cualquier de las otras envolventes (Figura 4.11). Las mayores diferencias entre factores de seguridad se registran para pequeños y grandes valores de GSI, donde las cohesiones de las envolventes E3 y E4 son más próximas. En este caso aunque los ángulos de fricción de E3 son menores que los de las otras envolventes lineales, estos no tienen influencia alguna por los elevados valores de cohesión.

Una vez analizado las diferencias que se obtiene en la obtención del factor de seguridad según las distintas envolventes de rotura consideradas, ahora se pretenden analizar las superficies de rotura que se producen para las distintas envolventes. Para ello se presenta la Figura 4.18, donde son representadas las cinco superficies de rotura más críticas para cada una de las envolventes de rotura consideradas. Se ha considerado un valor de $GSI=75$ por ser el valor de GSI en el que se registran mayores diferencias entre los factores de seguridad. También ha sido considerado el caso con presencia de agua, por ser el más desfavorable.

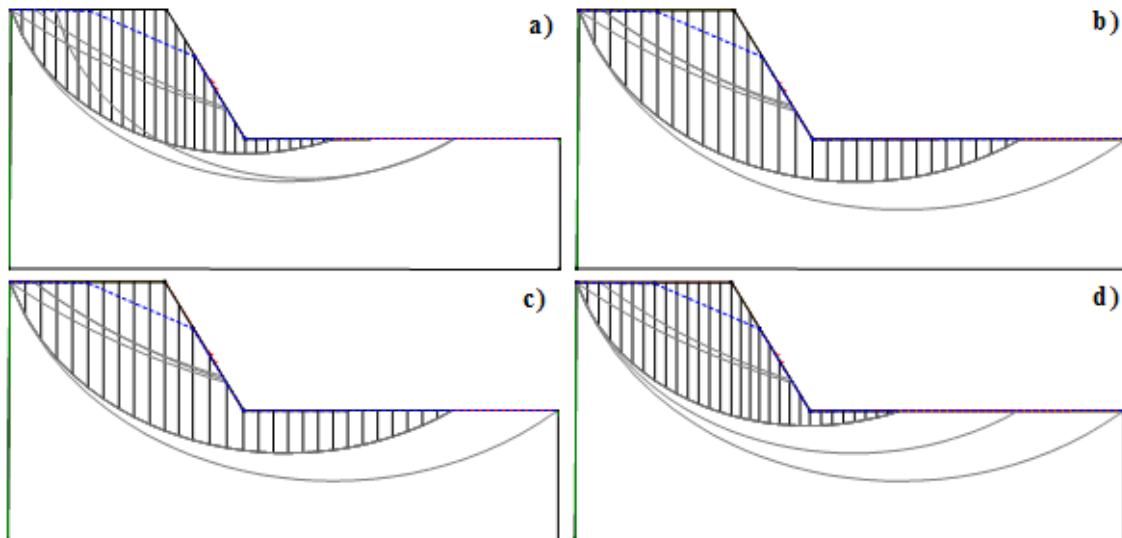


Figura 4.18: Representación de las cinco superficies de rotura más críticas, para un valor $GSI=75$ y $\sigma_{ci}=75MPa$, asociadas a las envolventes de rotura consideradas. Se considera presencia de agua. La superficie en la que aparecen las rebanadas es la superficie más crítica. a) Superficies de rotura asociadas a la envolvente E1; b) Superficies de rotura asociadas a la envolvente E2; c) Superficies de rotura asociadas a la envolvente E3; d) Superficies de rotura asociadas a la envolvente E4.

En la Figura 4.18 se observa que la superficie de rotura más crítica asociada a E1 y E4 presentan grandes similitudes, también se cumple la misma similitud entre las superficies asociadas a las envolvente E2 y E3.

Se observa que las cinco superficies de rotura más críticas asociadas a una envolvente de rotura determinada, son, en general, parecidas a las superficies de las otras envolventes. Esto es importante, puesto que para una envolvente de rotura determinada, los valores de factor de seguridad de las distintas superficies de rotura son muy parecidos, cosa que hará posible que aparezca una superficie u otra fácilmente

Las grandes similitudes entre todas las superficies de rotura asociadas a las envolventes de rotura E2 y E4, es debido a que E4 se obtiene de la linealización de E2 en el rango de valores óptimo para el caso de estabilidad estudiado

Se puede decir que aunque existen grandes diferencias entre los factores de seguridad asociados a cada envolvente, estas grandes diferencias no se mantienen en el caso de las superficies de rotura. De modo que, aunque la envolvente de rotura E2 es la que más se acerca a la realidad, que implica que las superficies de rotura asociadas a ella son las más reales, el uso de cualquier de las otras envolventes de rotura consideradas en este estudio no implicaría grandes diferencias en cuanto a la forma y volumen del deslizamiento, lo contrario de lo que ocurre con los factores de seguridad.

4.4.2 macizo rocoso con $\sigma_{ci}=3MPa$

Del mismo modo que se ha realizado en el apartado anterior, en este también se considera que la envolvente de rotura E2 (envolvente de rotura del criterio de Hoek&Brown) es la envolvente que más se acerca a la realidad. De este modo se representa gráficamente ΔFS frente a GSI (Figura 4.19). Donde la nomenclatura es exactamente la misma que en el caso de la Figura 4.17.

Nuevamente, mediante esta representación gráfica se observa la evolución de la diferencia del FS de la envolvente analizada respecto el FS de la envolvente considerada correcta en función del valor de la clasificación geomecánica.

En la Figura 4.19 han sido representadas, por un lado los resultados de considerar presencia de agua en el macizo (Figura 4.19 a), y por otro los resultados de no considerar presencia de agua (Figura 4.19 b).

Al igual que en el apartado anterior, aunque con el método de Morgenstern-Price se obtienen dos factores de seguridad, uno asociado al equilibrio de fuerzas y otro asociado al equilibrio de momentos, en la Figura 4.19 únicamente se representa el factor asociado al equilibrio de momentos, con el objetivo de facilitar la visualización de los resultados.

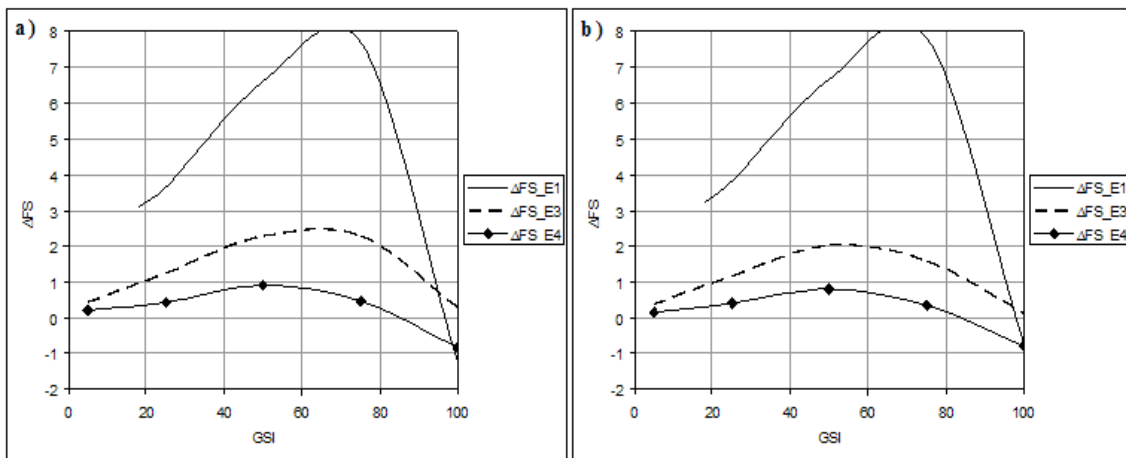


Figura 4.19: Representación de la diferencia de valor de factor de seguridad (ΔFS) obtenido de las envolventes de rotura E1, E3 y E4, respecto al obtenido de la envolvente E2 (considerada la envolvente de rotura correcta). Se representa ΔFS frente al valor de GSI, para el caso de $\sigma_{ci}=3\text{MPa}$. a) Se considera presencia de agua en el macizo; b) No se considera presencia de agua

En la Figura 4.19 se observa el comportamiento de los valores del factor de seguridad obtenido de las envolventes de rotura E1, E3 y E4 frente al obtenido de la envolvente E2, para el caso de presencia y no presencia de agua en el macizo. En este caso ΔFS_{Ei} ($i=1, 3$ y 4) hace referencia al incremento de factor de seguridad obtenido de la envolvente Ei respecto al obtenido de la envolvente E2.

Aunque nos estamos centrando en la diferencia existente entre factores de seguridad dependiendo de la envolvente considerada, hay que mencionar que en este caso los valores de factor de seguridad obtenidos de las distintas envolventes son muy menores que en el caso anterior. Para tener un orden de magnitud, decir que el mínimo factor de seguridad de la envolvente E2 es 0 para GSI bajos, y el máximo factor de seguridad es 15 para GSI elevados.

Este hecho hace que en este caso la consideración o no de agua en el macizo tenga una gran repercusión, pero solo en el factor de seguridad de una determinada envolvente, y no en la comparación entre factores de seguridad obtenidos de las distintas envolventes, pues en el estudio de el equilibrio límite, el agua afecta siempre, independientemente de la envolvente de rotura considerada.

En líneas generales se observa que mediante las envolventes E3 y E4 se obtienen unos factores de seguridad más parecidos al obtenido de la envolvente E2, que en el caso de considerar la envolvente de rotura E1.

Para el caso de la envolvente E4, los factores de seguridad obtenidos son muy similares a los obtenidos con E2. Era de esperar porque E4 se obtiene de la linealización de E2 en un rango de tensiones normales acorde con la situación estudiada. Las diferencias entre los factores de seguridad obtenidos mediante E4 y E2 son siempre inferiores a la unidad

Dado que E4 se obtiene de la linealización de E2, y que es necesario hacer referencia a los parámetros resistentes de las envolventes para explicar los factores de seguridad, se puede hacer una simplificación, y al hablar de los parámetros resistentes, c i Φ , se pueden tomar los de E4 como si fuesen los de E2, para entender las relaciones entre E2, E3 y E1.

Las diferencias entre los factores de seguridad obtenidos mediante E1 y E2 son los más grandes. En el caso de valores de GSI cercanos a 100, la diferencia entre factores de seguridad se reduce. Las diferencias, mayoritariamente se sitúan por encima de los 3 puntos. Prácticamente para todo el rango de valores de GSI, el uso de la envolvente E1 nos sitúa del lado de la seguridad. Este comportamiento se observa entre las cohesiones obtenidas de las envolventes E1 y E4, donde la cohesión de E1 es siempre superior a la de E4, excepto en valores de GSI cercanos a 100.

Los factores de seguridad obtenidos de E3 presentan valores mayores pero similares a los de E4. Las diferencias entre factores de seguridad están en todo momento por debajo de los 3 puntos, llegando a estar por debajo de la unidad. En el caso de la obtención de los factores de seguridad a partir de la envolvente de E3, estaríamos en todo momento del lado de la seguridad. Nuevamente este comportamiento es el reflejo de los valores de cohesión obtenidos según las distintas envolventes, donde se pone de manifiesto la influencia de la cohesión por sus elevadas diferencias, frente a la variación de los ángulos de fricción.

Del mismo modo que en el apartado anterior, una vez analizadas las diferencias entre los factores de seguridad asociados a las distintas envolventes de rotura, ahora se pretende analizar las superficies de rotura en función de la envolvente considerada. Para ello se presenta la Figura 4.20, donde se representan las cinco superficies más críticas asociadas a las 4 envolventes de rotura consideradas en los cálculos. Se ha realizado para un $GSI=75$, puesto que es el valor de GSI en el que se registran más diferencias entre factores de seguridad. También ha sido considerado el caso con presencia de agua, por ser el más desfavorable.

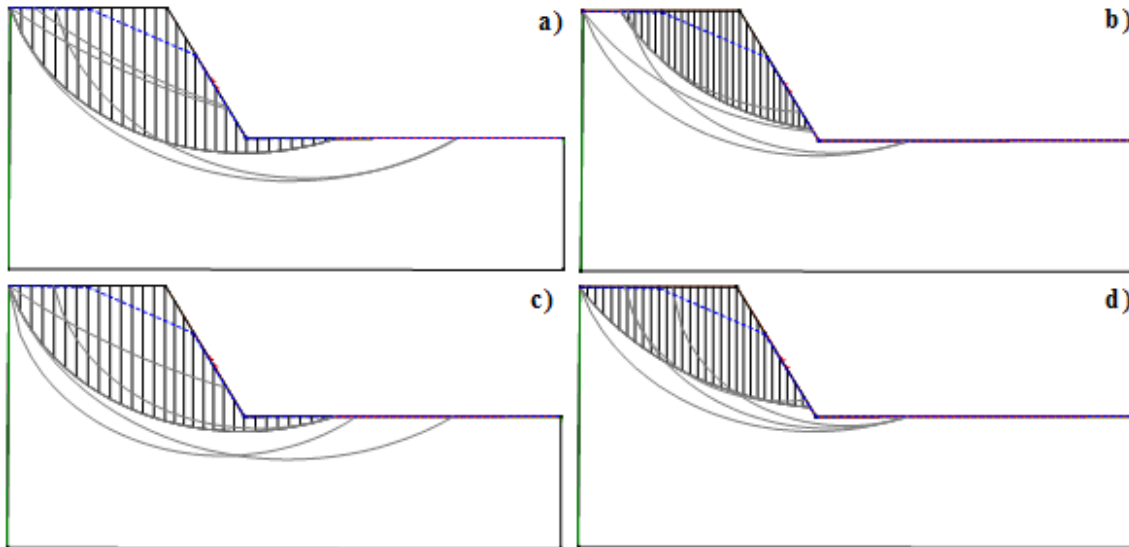


Figura 4.20: Representación de las cinco superficies de rotura más críticas, para un valor $GSI=75$ y $\sigma_{ci}=3MPa$, asociadas a las envolventes de rotura consideradas. Se considera presencia de agua. La superficie en la que aparecen las rebanadas es la superficie más crítica a) Superficies de rotura asociadas a la envolvente E1; b) Superficies de rotura asociadas a la envolvente E2; c) Superficies de rotura asociadas a la envolvente E3; d) Superficies de rotura asociadas a la envolvente E4.

En la Figura 4.20 se observa que la superficie de rotura más crítica asociada a E1 y E3 presentan grandes similitudes, también se cumple la misma similitud entre las superficies asociadas a las envolventes E2 y E4.

Se observa que las cinco superficies de rotura más críticas asociadas a una envolvente de rotura determinada, son, en general, parecidas a las superficies de las otras envolventes. Esto es importante, puesto que para una envolvente de rotura determinada, los valores de factor de seguridad de las distintas superficies de rotura son muy parecidos, cosa que hará posible que aparezca una superficie u otra fácilmente.

Las grandes similitudes entre todas las superficies de rotura asociadas a las envolventes de rotura E2 y E4, es debido a que E4 se obtiene de la linealización de E2 en el rango de valores óptimo para el caso de estabilidad estudiado.

Las grandes diferencias que se observan entre los factores de seguridad asociados a las distintas envolventes de rotura no se manifiestan de igual modo en las superficies de rotura más críticas, puesto que las diferencias son pequeñas. Esto implica que aunque la envolvente E2 es la que se considera que más se acerca a la realidad, el uso de las otras envolventes no supondría una gran variación en la consideración de volumen de talud a estabilizar.

Resumiendo esta última parte del capítulo, han sido estudiadas, dado un talud rocoso con unas determinadas propiedades, las diferencias entre factores de seguridad que se obtienen en función de las distintas envolventes de rotura consideradas. Ahora se pretende hacer una comparación de resultados, teniendo en cuenta el valor de la resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta, que en el presente estudio ha sido considerados dos valores $\sigma_{ci}=3MPa$ y $\sigma_{ci}=75MPa$.

Tal y como se ha visto en el apartado 4.2.2 del presente capítulo, la variación del valor de la resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta, σ_{ci} , afecta fuertemente a la envolvente de rotura no lineal E2 (envolvente de rotura del criterio de Hoek&Brown). La variación de σ_{ci} implica una traslación de la envolvente de rotura E2, de modo que a valores elevados de σ_{ci} es necesaria, para un valor dado de tensión normal, más tensión tangencial para iniciar el movimiento que a valores menores de σ_{ci} . Dicha “traslación” de la envolvente de rotura implica, por un lado, una variación del valor máximo de la tensión tangencial que resistirá el macizo, y por otro lado, una variación del rango de valores de la tensión normal considerados por el programa *RocLab* en las distintas aplicaciones que éste presenta.

En el apartado 3.4 del capítulo 3 se muestra como el programa *RocLab*, mediante la equivalencia de áreas, obtiene las envolventes de rotura según las distintas aplicaciones. La variación en la envolvente de rotura propiciada por la variación de σ_{ci} , implica una disminución o aumento del valor de la cohesión, según el sentido de la “traslación”. Por su parte, el ángulo de fricción se verá afectado de la misma forma que el valor de la cohesión. Es decir, dada una determinada aplicación de *RocLab* para el cálculo de un talud, si el valor de σ_{ci} es grande implicará un ángulo de fricción mayor que en el caso de considerar un valor de σ_{ci} menor.

Debido a que el valor de σ_{ci} afecta a la envolvente de rotura E2 (envolvente de rotura de Hoek&Brown), todas las envolventes lineales que se obtienen de ésta (E3, E4 y E5) también quedan afectadas. Por su parte, la envolvente E1 es invariante frente al valor de σ_{ci} , puesto que E1 se obtiene de forma empírica e independiente a E2.

Teniendo en cuenta estas últimas observaciones se pone de manifiesto que los factores de seguridad obtenidos con las envolventes de rotura suponiendo un valor de $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$ son superiores a los obtenidos suponiendo $\sigma_{ci}=3\text{MPa}$, puesto que en el primer caso se obtienen parámetros resistentes de valor superior que en el segundo caso.

Considerando, como se ha dicho, que en función del valor de σ_{ci} el programa *RocLab* asigna un determinado rango de valores a la tensión normal para la envolvente E2, y que esto supone una variación en el valor de los parámetros resistentes, era de esperar que la curva factor de seguridad asociado a una envolvente determinada no siguiese la misma disposición respecto las curvas factor de seguridad de las otras envolventes para los valores de σ_{ci} considerados en el estudio.

Tanto para el caso de $\sigma_{ci}=75\text{MPa}$ como $\sigma_{ci}=3\text{MPa}$, el programa *RocLab* asigna el mayor valor de la tensión máxima normal a E3, seguido de E4. En el primer la diferencia de valores entre las tensiones normales máximas asignadas a cada envolvente realizada por *RocLab* es muy elevada, cosa que implica gran diferencia entre los parámetros, que a su vez significa una gran diferencia entre los factores de seguridad, comportamiento que se refleja en la Figura 4.17. En el segundo caso, la diferencia entre las tensiones normales máximas para las envolventes de rotura E3 y E4 son muy menores cosa que hace que los factores de seguridad asociados a ambas sean más parecidos (Figura 4.19).

La envolvente E1, tal y como se ha dicho anteriormente, es independiente del valor de σ_{ci} , cosa que hace que para ambos valores de σ_{ci} considerado se obtengan los mismos valores del factor de seguridad. El comportamiento que presenta el factor de seguridad de la envolvente E1 frente a los factores de seguridad del resto de envolventes, al igual que para el caso de los factores asociados a E3 y E4, es resultado de la diferencias entre

parámetros resistentes que presentan las envolventes, y que ha sido detallado en el apartado 4.3.2.

En cuanto al volumen de material deslizado a través de las distintas superficies de rotura, dependiendo del valor de σ_{ci} , existen algunas diferencias,. Para valores altos de σ_{ci} el volumen es generalmente mayor que en el caso de usar valores bajos. Aún y así, una vez determinado el valor de σ_{ci} que va a ser usado, el volumen de desplazado es similar para todas las envolventes de rotura consideradas.

Como conclusión, en el caso necesario de utilizar una envolvente de rotura lineal, siempre es mejor usar la aplicación de *RocLab* que sea específica del cálculo de estabilidad que se esté analizando (en el caso del presente estudio es la envolvente E4, que corresponde a la aplicación *Slope* con una altura de 10m). Con estas aplicaciones se obtiene un factor de seguridad que mantiene una diferencia con el factor de seguridad obtenido mediante Hoek&Brown, que se mantiene casi constante a lo largo de todo el rango de valores de GSI, cosa que no sucede con el resto de las aplicaciones del programa, o con las formas empíricas de obtención de las envolventes lineales (envolvente E1). Aún y así, el uso de la aplicación específica para el análisis, tiene que ir aplicada teniendo en cuenta un margen, puesto que para algunos valores de GSI, dicha envolvente nos sitúa del lado de la inseguridad respecto al factor de seguridad obtenido con el criterio de Hoek&Brown.