
2 Metodología

2.1 Método del Equilibrio Límite

Los métodos de equilibrio límite para el cálculo de estabilidad de taludes son los más utilizados en la práctica común, debido a su sencillez, y porque el valor del coeficiente de seguridad obtenido no dista demasiado del valor real.

El método del equilibrio límite establece que la rotura del terreno se produce a través de una línea que representa la superficie de rotura. De esta forma, se interpreta que la masa de terreno por encima de dicha línea se desplaza respecto la masa inferior, produciéndose, así, la rotura del terreno. En el momento de producirse la rotura, la resistencia al corte a lo largo de la superficie de deslizamiento está movilizada, y el terreno se encuentra, en su totalidad, en equilibrio estático.

2.1.1 Factor de Seguridad

Se define el factor de seguridad (FS), como el valor que cuantifica la diferencia entre las condiciones reales que presenta el talud, y las condiciones que llevan a su rotura. El factor de seguridad es el coeficiente mínimo de todos los coeficientes de seguridad asociados a todas las superficies de deslizamiento posibles.

La expresión del factor de seguridad viene dada por la expresión:

$$FS = \frac{\int \tau_R . ds}{\int \tau . ds} \quad (2.1)$$

donde:

τ_R – es la resistencia al corte máxima que se puede movilizar a lo largo de la superficie potencial de deslizamiento,

τ – es la resistencia al corte movilizada a lo largo de la superficie potencial de deslizamiento,

ds – es el diferencial de longitud a lo largo de la superficie de deslizamiento.

Definir el factor de seguridad con respecto a la resistencia al corte es lógico porque la resistencia al corte es la que realmente condiciona el resultado y a su vez tiene el mayor grado de incertidumbre (Melentijavic, 2005).

El FS también se puede definir de otras maneras. En primer lugar es posible definirlo como cociente entre el valor de la cohesión o ángulo de rozamiento del talud actual, y el valor de cohesión o ángulo de fricción del talud requerido para mantener el talud estable. También es posible definirlo como el cociente entre los momentos que actúan en un talud resistentes al deslizamiento, y los que inducen al deslizamiento.

Para valores del factor de seguridad inferiores a 1, indica que el movimiento a lo largo de la superficie de deslizamiento es posible. Si se da el caso que para distintas superficies, el valor del factor de seguridad es menor que 1, el movimiento es posible a lo largo de todas ellas. Partiendo de $FS = 1$, se calcula el ángulo máximo que puede

tener un talud para ser estable, con tal de tener un margen de seguridad, el ángulo de un talud tendría que venir definido por valor del factor de seguridad superiores a la unidad. Como ejemplo de orden de magnitud, los valores del factor de seguridad para el cálculo de taludes son de $FS = 1.3$, para el caso de taludes temporales, i de $FS = 1.5$ para el caso de taludes definitivos (Hoek y Bray, 1981, Hoek, 1991).

Para la aplicación del método del equilibrio limite son requeridas las siguientes fases de cálculo (Alonso, 1989):

- Determinar un mecanismo de rotura cinematicamente admisible. Generalmente se consideran para la superficie de deslizamiento, formas geométricas sencillas, como pueden ser rectas, circunferencias o espirales logarítmicas.
- A partir de la condición de equilibrio, se establecen relaciones entre la fuerzas presentes en el problema. Diferenciando entre las fuerzas que inducen al desequilibrio (peso, cargas externas...), y las fuerzas internas resistentes. Las ecuaciones necesarias que se deben cumplir en el problema son:
 - Equilibrio de fuerzas, tanto verticales como horizontales
 - Equilibrio de momentos, respecto a un punto arbitrario
 - Se analiza la estabilidad del conjunto a partir del concepto de factor de seguridad.
 - Mediante cálculos repetitivos se halla el menor valor del factor de seguridad, que va asociado a la superficie de deslizamiento más desfavorable.

2.1.2 Métodos para el cálculo del Factor de Seguridad

Los métodos para el análisis de estabilidad, frente ala rotura global del macizo, según como se estudie la masa desplazada, se clasifican en tres tipos: Análisis de roturas planas en taludes infinitos, método de la masa total y por último, método de las rebanadas.

A continuación se hace una breve descripción de las tipologías citadas, y las características de cada una de ellas.

Análisis del talud infinito

Método especialmente adecuado para movimientos translacionales en los que la superficie de deslizamiento es paralela a la superficie topográfica, y en los se muestre una anchura considerable en el eje perpendicular al deslizamiento. En estos métodos se considera que el talud presenta una continuidad infinita lateralmente, lo que conlleva la no contemplación de los efectos que puedan ejercer las paredes laterales del movimiento sobre la estabilidad total del talud.

En estos casos se supone que el deslizamiento se produce sobre una superficie paralela a la superficie topográfica con un ángulo constante (Figura 2.1). Tanto las características geomecánicas como geológicas se consideran constantes en toda la vertiente.

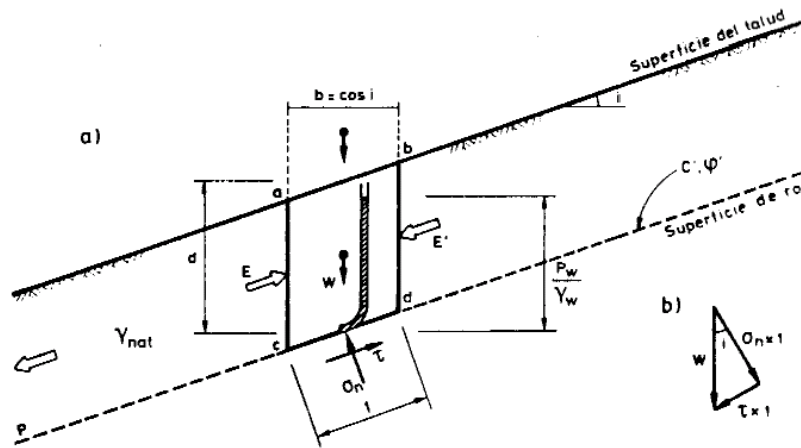


Figura 2.1: a) esquema para el análisis de estabilidad de un talud indefinido; b) diagrama para la obtención de la tensiones normal y tangencia sobre la superficie de rotura(Extraído de Alonso, 1989).

Considerando el criterio de rotura de Mohr-Coulomb (detallado en el apartado 3.2 del capítulo 3), mediante el equilibrio de fuerzas verticales y horizontales en la Figura 2.1 la expresión del FS es la siguiente:

$$FS = \frac{c' + [\gamma \cdot d \cos^2 i - u] \tan \phi'}{\gamma \cdot d \sin i \cos i} \quad (2.2)$$

donde: c' y ϕ' son los valores de cohesión y ángulo de fricción en la superficie de rotura, γ es la densidad del terreno, d es la altura del deslizamiento, i es la pendiente del terreno y u es la presión de poros.

Métodos de la masa total

La utilización de superficies de rotura circulares en dos dimensiones es una hipótesis muy utilizada en el caso de taludes de altura finita en los que no existe ninguna zona que pueda definir la superficie de rotura.

Los métodos de la masa total consideran la masa desplazada como un solo bloque que se mueve uniformemente (Figura 2.2), y en el que se imponen las condiciones de equilibrio. Las fuerzas que actúan sobre la superficie de rotura son: el propio peso de la masa desplazada, W ; la presión intersticial distribuida a lo largo de la superficie de rotura, U ; la tensión tangencial, T ; y la tensión normal, N . En este caso, todas las fuerzas que intervienen en el equilibrio se consideran puntuales, tal y como se aprecia en la Figura 2.2.

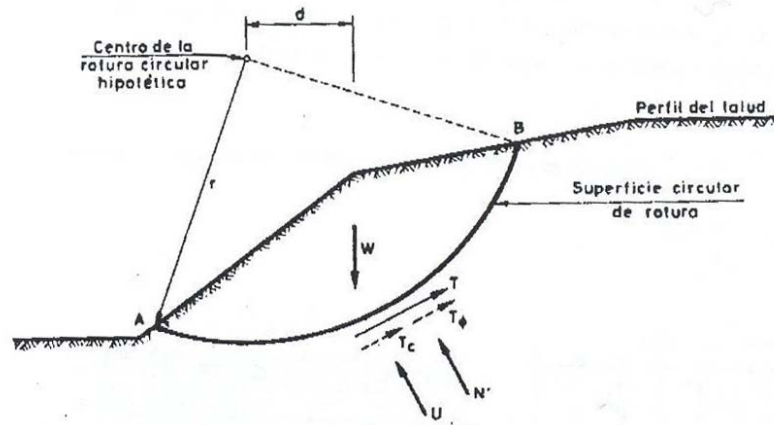


Figura 2.2: Fuerzas que actúan en una superficie de rotura curva (extraído de Alonso, 1989).

Métodos de las rebanadas

Con el objetivo de mejorar los resultados obtenidos con el método de la Masa Total, se presentan los métodos de la rebanadas. En este caso se divide la masa desplazada en distintas rebanadas que pasan a considerarse un sólido rígido. De esta forma, tal y como se observa en la Figura 2.3 la masa desplazada queda subdividida, y en cada subdivisión se imponen las condiciones de equilibrio.

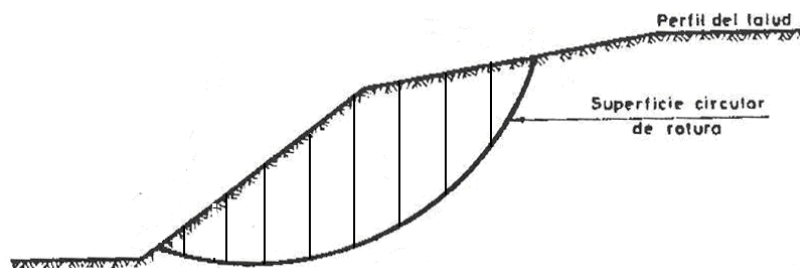


Figura 2.3: Representación de la división en rebanadas de la masa de terreno desplazada (modificado de Alonso, 1989).

Mediante el uso del método de las rebanadas se consigue por un lado, una mejor aproximación a la distribución de tensiones normales a lo largo de la superficie de rotura, dicha distribución se verá afectada por la altura de terreno que haya en cada rebanada. Por otro lado, mediante el uso del método de las rebanadas, se facilita el análisis de terrenos en el que el material no es homogéneo, puesto que solo es necesario definir las rebanadas de manera adecuada al terreno.

Se aplican dos hipótesis simplificadoras a las rebanadas: por un lado, se considera que las rebanadas son suficientemente estrechas para poder considerar que la base de cada rebanada es rectilínea; y por otro lado, se considera que la base de cada rebanada está afectada únicamente por un tipo de material.

En la figura de a continuación (Figura 2.4) se muestran las fuerzas aplicadas sobre una rebanada.

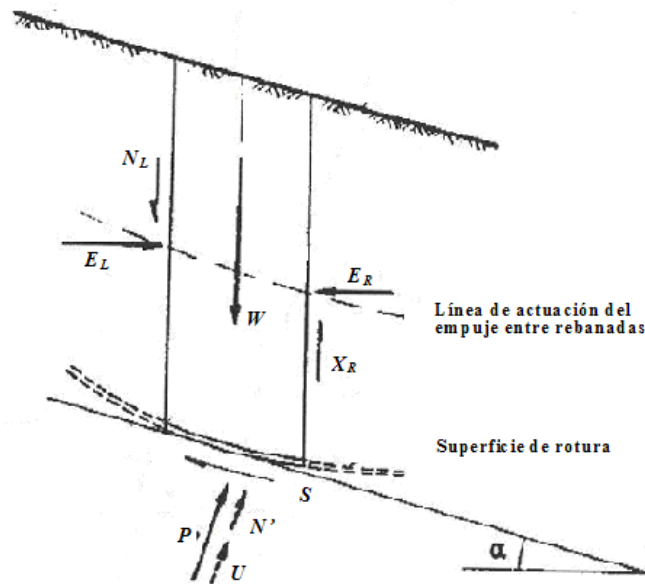


Figura 2.4: Esquema de las fuerzas que actúan sobre una rebanada. E_R y X_R son las fuerzas actuantes en la parte derecha, y E_L X_L son las fuerzas actuantes en la parte izquierda. P , N' , U y S , son las fuerzas actuantes en la base de la rebanada (extraído de Alonso, 1989).

Desde el punto de vista teórico, los métodos de las rebanadas se pueden clasificar dependiendo de las condiciones de equilibrio estático que se consideran, y dependiendo de las hipótesis sobre las fuerzas entre rebanadas. En la Tabla 2.1 se presentan las condiciones de equilibrio que satisfacen algunos de los métodos utilizados con más frecuencia y que se pueden denominar como casos específicos del método general de equilibrio límite (General Limit Equilibrium method - GLE).

Tabla 2.1 Ecuaciones de equilibrio satisfechas por los métodos de equilibrio límite más utilizados. * se cumple el equilibrio de momentos a nivel de rebanada (modificado de Alonso, 1989).

Métodos de Equilibrio Límite	Equilibrio Vertical de Fuerzas	Equilibrio Horizontal de Fuerzas	Equilibrio de Fuerzas	Equilibrio de Momentos
Fellenius (Ordinario) (1927)	Si	No	No	Si
Bishop Modificado (1955)	Si	No	No	Si
Janbu Generalizado (1968)	Si	Si	Si	Si *
Spencer (1967)	Si	Si	Si	Si
Morgenster-Price (1965)	Si	Si	Si	Si
GLE	Si	Si	Si	Si
Corps of Engineers (1970)	Si	Si	Si	No
Lowe-Karafath (1960)	Si	Si	Si	No
Sarma (1973)	Si	Si	Si	Si

El número de ecuaciones de equilibrio disponibles es menor que el número de incógnitas, como consecuencia los métodos que no son rigurosos desde el punto de vista de equilibrio de fuerzas o momentos, emplean hipótesis adicionales para resolver el problema. Se sabe, que en los métodos que satisfacen todas las ecuaciones de equilibrio, las hipótesis que incorporan, en general, no afectan significativamente el valor del factor de seguridad. En el caso de métodos que solo satisfacen el equilibrio de fuerzas y no el de momentos, el valor del factor de seguridad, viene afectado por la hipótesis de inclinación de las fuerzas entre rebanadas. Como consecuencia estos métodos no dan siempre un grado de precisión tan elevado como los métodos que satisfacen todas las ecuaciones de equilibrio.

En la Tabla 2.2 se muestra las hipótesis sobre fuerzas entre rebanadas, y el tipo de deslizamiento que se puede aplicar, para cada uno de los métodos de rebanadas más utilizados.

Tabla 2.2 Hipótesis de fuerzas entre rebanadas de distintos métodos de equilibrio límite (extraído de Alonso, 1989).

Métodos de equilibrio límite	Hipótesis
Fellenius (Ordinario) (1927)	Supone que las fuerzas entre rebanadas se anulan entre si. Solo para deslizamiento circular.
Bishop Modificado (1955)	La fuerza resultante entre rebanadas es horizontal (significa que no hay fuerza tangencial entre rebanadas) Solo para deslizamiento circular
Janbu Generalizado (1968)	La posición de la fuerza normal entre rebanadas se define con la línea de empuje y se puede variar, es decir cambiar la posición de la fuerzas resultantes entre rebanadas. Para cualquier superficie de deslizamiento.
Spencer (1967)	Las fuerzas resultantes entre rebanadas son paralelas. Cualquier superficie de deslizamiento.
Morgenstern-Price (1965)	La dirección de las fuerzas resultantes entre rebanadas se define mediante la función predeterminada y se puede variar la orientación, el porcentaje de la función utilizada se resuelva mediante equilibrio de fuerzas y momentos. Cualquier superficie de deslizamiento.
GLE	La dirección de las fuerzas resultantes entre rebanadas se define mediante la función predeterminada, el porcentaje de la función requerido para satisfacer el equilibrio de momentos y fuerzas se define buscando el punto de intersección en el diagrama factor de seguridad vs porcentaje de la función.
Corps of Engineers (1970)	Las direcciones de las fuerzas resultantes entre rebanadas se suponen paralelas al ángulo medio de la superficie del talud o a la línea definida por los puntos de entrada y salida de la línea de deslizamiento en el terreno. Cualquier superficie de deslizamiento.
Lowe-Karafiath (1960)	Las direcciones de las fuerzas resultantes entre rebanadas se suponen iguales al promedio de la superficie del terreno y superficie de deslizamiento en la base de cada rebanada. Cualquier superficie de deslizamiento.
Sarma (1973)	Los valores de las fuerza resultantes entre rebanadas siguen ciertas pautas predeterminadas. Cualquier superficie de deslizamiento.

A continuación se explica con detalle las hipótesis y características de los métodos de las rebanadas más utilizados.

a) *Método de Bishop*

Bishop desarrolló en el 1955 (Bishop y Morgenstern, 1960) un método de rebanadas, el Método de Bishop, con las siguientes hipótesis:

1. Se supone una superficie de ruptura circular.
2. La masa deslizante se divide en n rebanas o bloques verticales.
3. Se establece el equilibrio de momentos de las fuerzas actuantes en cada rebanada respecto el centro del círculo.
4. A partir de la condición de equilibrio de fuerzas verticales de cada rebanada se obtienen las fuerzas N (normales a la superficie de ruptura) y se sustituyen a la ecuación resultante del equilibrio de momentos.
5. El Método de Bishop Simplificado ignora las tensiones tangenciales entre rebanadas. Por otro lado considera las normales (Figura 2.5).

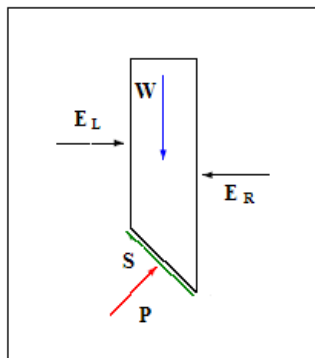


Figura 2.5: Representación de las fuerzas actuantes en una rebanada consideradas en el método de Bishop. W cargas verticales externas, E_L y E_R las fuerzas normales izquierda y derecha entre rebanadas; P y S son la fuerza normal y tangencial a la base de la rebanada.

Es necesario realizar varias iteraciones para obtener el valor de FS, y la convergencia acostumbra a determinarse rápidamente.

Una vez se obtiene el valor del Factor de Seguridad de la superficie considerada, se supone una segunda superficie circular y se determina un nuevo valor de FS; y así sucesivamente hasta obtener un mínimo. Normalmente, las ecuaciones se programan y se analizan círculos con diferentes radios y centros, hasta que se consigue el que proporciona un valor del Factor de Seguridad mínimo.

El método de Bishop puede ser aplicado también a superficies no circulares adoptando un centro de rotación virtual.

Es un método adecuado para los cálculos a mano y obtener la convergencia de forma rápida.

Haciendo equilibrio de momentos al centro del círculo se obtiene la estabilidad global y su Factor de Seguridad F_m . Aunque el problema está sobredeterminado, el equilibrio horizontal no se satisface. Bishop lo analizó y mostró que el Factor de Seguridad no es especialmente sensible al valor de estas fuerzas entre elementos.

b) *Método de Janbu simplificado*

El método de Janbu simplificado es muy similar al método de Bishop simplificado, pero en el caso de Janbu solo se cumple el equilibrio total de fuerzas horizontales, pero no el de momentos. El diagrama de fuerzas actuante en una rebanada es el mismo que el diagrama para el caso de Bishop (Figura 2.5). El método es una de las primeras rutinas para el análisis de superficies de rotura no circulares, suponiendo que las fuerzas entre elementos son nulas; por lo tanto la expresión obtenida por la fuerza normal a las rebanadas es la misma que para el método de Bishop. En este caso, el equilibrio de las fuerzas horizontales proporciona un Factor de Seguridad de equilibrio de fuerzas sin considerar las fuerzas entre elementos (F_0). Para incluir el efecto de las fuerzas entre elementos al cálculo se puede aplicar un factor de corrección (f_0) de tal manera que el Factor de Seguridad del equilibrio de Fuerzas horizontales (F_f) es el siguiente:

$$F_f = f_0 \cdot F_0 \quad (2.3)$$

Para la obtención de este factor (f_0), se calibró el análisis con el método de Janbu Riguroso y comprobaron que este factor sólo dependía de la geometría del problema y de las características del suelo, y se puede encontrar en tablas y figuras.

Como en el caso anterior, el problema está sobredeterminado y el momento global de equilibrio no se satisface. Pero al igual que en el método de Bishop, el cálculo también puede realizarse a mano, siendo muy práctico. El Factor de Seguridad que se determina con el equilibrio de fuerzas (F_f) es más sensible a la hipótesis realizada que el Factor de Seguridad determinado con equilibrio de momentos (F_m). Por esto es preferible emplear métodos que utilicen el equilibrio de momentos para calcular Factor de Seguridad

c) *Método de Spencer*

Inicialmente pensado para el análisis de superficies de rotura circulares, el método de Spencer (1967) puede ser aplicado a superficies no circulares siempre que se adopte uno centro de rotación friccional. En este método se suponen todas las fuerzas entre elementos (Figura 2.6).

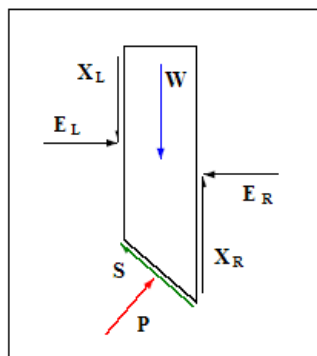


Figura 2.6: Representación de las fuerzas actuantes en una rebanada consideradas en el método de Spencer y Morgenstein-Price. W cargas verticales externas, E_L y E_R las fuerzas normales izquierda y derecha entre rebanadas; X_L y X_R fuerzas verticales entre rebanadas a izquierda y derecha; P y S son la fuerza normal y tangencial a la base de la rebanada.

También se supone que las fuerzas entre rebanadas tienen una inclinación constante (θ) a lo largo de toda la recta, de forma que:

$$X/E = \tan \theta \quad (2.4)$$

dónde X son los fuerzas verticales y E las horizontales. La fuerza normal en la base del elemento será pues:

$$P = \left[W(E_R - E_L) \cdot \tan \theta - \frac{1}{FS} (c'l \sin i - ul \tan \varphi' \sin i) \right] / m_i \quad (2.5)$$

$$\text{dónde } m_i = \cos i \cdot \left(1 + \tan i \cdot \frac{\tan \varphi'}{F} \right) \quad (2.6)$$

dónde FS es el factor de Seguridad definido como la tensión de corte movilizada respecto la disponible; E_R y E_L son los fuerzas horizontales derecha e izquierda respectivamente, entre los elementos de la rebanada; u es la presión de poro en la superficie de rotura; l es la longitud de la base de la rebanada; i la inclinación de la base del elemento; c' y φ' la cohesión y el ángulo de fricción en la superficie de rotura.

Suponiendo que el ángulo θ es constante para todos los elementos de la vertiente, se pueden hacer ambos, el equilibrio global de momentos y el de fuerzas, de manera que se encuentran dos valores del Factor de Seguridad, el del equilibrio de fuerzas (F_f) y el de momentos (F_m). Es puede encontrar un valor de θ tal que ambos factores de seguridad coincidan, que será el Factor de Seguridad de la vertiente. Spencer estudió la relación entre F_f y F_m por un problema tipo. Dedujo que el factor de seguridad resultante del equilibrio de momentos es relativamente insensible a los fuerzas entre elementos. Esta conclusión es coincidente con la de Bishop.

d) Método de Morgenstern-Price

El método de análisis desarrollado por Morgenstern y Price (1965) puede ser aplicado tanto a superficies de rotura circulares como no circulares. Es un método parecido al método de Spencer, pero en el caso de Morgentern-Price permite la especificación de las fuerzas entre rebanadas. El esquema de fuerzas entre rebanadas es el mismo que para el método de Spencer (Figura 2.6). Considera que las tensiones y las fuerzas varían continuamente en la superficie, resuelve las componentes normal y paralela a la base para cada elemento formulando ecuaciones de equilibrio de fuerza generales. Supone que existe la siguiente relación entre esta componente vertical y normal:

$$X/E = \lambda \cdot f(x) \quad (2.7)$$

dónde $f(x)$ es la función que varía de forma continua a lo largo de la línea, y λ es un valor escala. Para una función dada $f(x)$, los valores de λ y F se encuentran de forma que se cumplan los equilibrios globales de Momentos y Fuerzas. De esta forma $F=F_m=F_f$.

Para escoger $f(x)$ se puede hacer considerando la distribución de tensiones normales a los límites de los elementos. En general no tiene que haber tensiones efectivas de tracción y las tensiones de corte deben ser menores a las requeridas por el equilibrio crítico local.

e) *Método de Janbu Generalizado*

Janbu (1968) describió un método de análisis que podía ser aplicado tanto a superficies de deslizamiento circulares como no circulares. La formulación original fue ampliada para cubrir el análisis de la capacidad portante y de los problemas de presión de tierras. Este fue el primer método de rebanadas dónde se satisfacían los equilibrios globales de Momentos y Fuerzas.

Janbu formuló las ecuaciones generales de equilibrio, resolviendo verticalmente y horizontalmente respecto la base de cada rebanada. Considerando el equilibrio global de fuerzas se obtiene una expresión para el Factor de Seguridad F_f . Para que el problema sea estáticamente determinado, se impone la posición de la línea de acción de las fuerzas entre elementos. Haciendo equilibrio de momentos desde el centro de la base de cada elemento, el equilibrio de momentos global se verifica, y las fuerzas entre elementos se pueden calcular. De hecho, se encuentran insertadas dentro la expresión del factor de seguridad dónde se verifican ambos, el equilibrio global de fuerzas y el de momentos.

Sintetizando este tipo de métodos Lloret et al. (1984) concluyen que los métodos que cumplen todas las ecuaciones de equilibrio (Spencer, Bishop Riguroso, Morgenstern y Price, Fredlund, y Janbu Riguroso) proporcionan valores del coeficiente de seguridad muy parecidos (diferencias siempre menores al 5%). El método de Bishop Simplificado proporciona también los mismos resultados que los que cumplen todas las ecuaciones cuando la superficie de rotura es circular.

2.2 Programas utilizados

Para la obtención de datos así como para la realización de cálculos necesitados en la realización de este trabajo se han utilizados los programas *RocLab 1.031* y *GeoStudio 2004*. Para la realización de los perfiles utilizados para el estudio se ha hecho uso de *Autocad 2004*, el tratamiento de datos se ha realizado mediante *Microsoft Office Excel 2003*. A continuación se hace una introducción y una explicación de las herramientas utilizadas en los programas *RocLab 1.031* y *Geostudio 2004*. El programa *RocLab* es explicado más extensamente debido a la importancia que tiene en la tesina.

2.2.1 Versión 1.031 de RocLab.

RocLab es un programa de ordenador, desarrollado por *Rocsience Inc.*, que permite, a partir de unos datos de entrada, la obtención de la envolvente de rotura y el cálculo de los parámetros de resistencia, mb , s y a , del macizo rocoso según el criterio de rotura de Hoek&Brown. En la Figura 2.7 se muestra la pantalla principal de trabajo del programa, que servirá para explicar y situar las distintas funciones y aplicaciones del programa. En la pantalla de trabajo principal se pueden distinguir dos áreas, la parte de datos, que corresponde al margen izquierdo, y la parte de representaciones gráficas, que corresponde al resto de la pantalla.

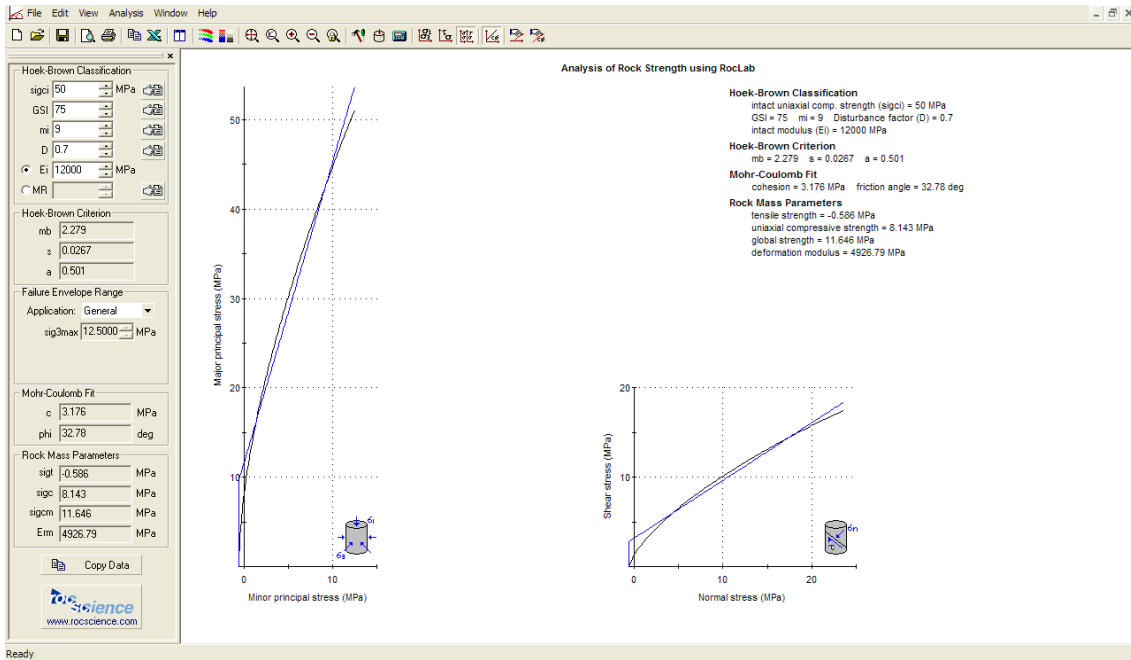


Figura 2.7: Pantalla principal de trabajo del programa RocLab

Los datos de entrada necesarios para el uso del programa son la resistencia a la compresión no confinada de la roca intacta, σ_{ci} , cuya nomenclatura en el programa es “sigci”, el parámetro de la roca intacta “ m_i ”, el valor de clasificación geomecánica, GSI y el factor de alteración del criterio de rotura de Hoek&Brown, D . Los datos son introducidos en una barra lateral, situada en el margen superior izquierdo de la pantalla principal del programa (Figura 2.8). Los datos pueden ser introducidos mediante teclado, mediante tablas y ábacos incluidos en el programa.

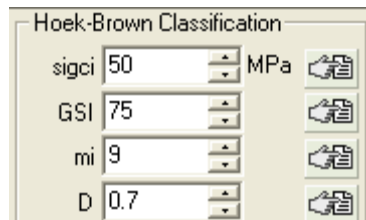


Figura 2.8: Barra de introducción de datos.

A partir de los datos introducidos, el programa RocLab nos facilita, por un lado, los parámetros de resistencia generalizados del criterio de rotura de Hoek&Brown, m_b , s y a (Figura 2.9) así como la proyección de la envolvente de rotura del criterio en los espacios de tensiones principales y/o de tensiones de cizalla y normales, estas son representadas en la zona central de la pantalla principal (Figura 2.7).

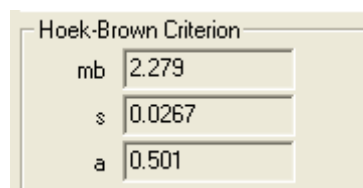


Figura 2.9: Obtención de los parámetros resistentes del criterio de Hoek&Brown.

Por otro lado, el programa proporciona los parámetros de resistencia equivalentes del criterio de rotura de Mohr-Coulomb, cohesión y ángulo de fricción y otros parámetros del macizo rocoso que se obtienen con el programa son el valor de tracción uniaxial, el valor de la compresión uniaxial y el módulo de deformación (Figura 2.10). También proporciona la envolvente de rotura del criterio de Mohr-Coulomb en los espacios de tensiones principales y/o normal y de cizalla, representados en la zona central de la pantalla principal, esta siempre es representada a la vez que la envolvente del criterio de Hoek&Brown (Figura 2.7).

Mohr-Coulomb Fit		
c	3.176	MPa
phi	32.78	deg
Rock Mass Parameters		
sigt	-0.586	MPa
sigc	8.143	MPa
sigcm	11.646	MPa
Erm	4926.79	MPa

Figura 2.10: Obtención de los parámetros resistentes del criterio de Mohr-Coulomb y otros parámetros del macizo rocoso.

Las envolventes de rotura de ambos criterios se pueden exportar al programa *Microsoft Excel*, facilitando de esta forma su estudio y representación.

Para la obtención de los parámetros resistentes y la envolvente de rotura del criterio de Mohr-Coulomb, el programa *RocLab* lo hace ajustando una relación lineal (puesto que el criterio de Mohr-Coulomb es lineal) a la envolvente de rotura del criterio de Hoek&Brown. El proceso de ajuste supone una linealización mediante áreas equivalentes, es decir equilibrar las áreas por encima y por debajo de la curva de Mohr-Coulomb, dando lugar a la cohesión y ángulo de fricción equivalentes.

Para la obtención de la envolvente del criterio de rotura de Mohr-Coulomb, tal y como se ha comentado en el párrafo anterior, el programa realiza un ajuste de las áreas entre las envolventes de rotura de Hoek&Brown y de Mohr-Coulomb para un determinado intervalo de tensión principal menor, $\sigma_1 < \sigma_3 < \sigma_{3\text{máx}}$. Teniendo en cuenta esto el programa *RocLab* presenta distintas aplicaciones de cálculo, donde la principal distinción será el intervalo de valores de la máxima tensión normal considerada en el estudio. Las aplicaciones presentadas por *Roclab* son: *General*, *Slope*, *Tunnels* y *Custom*. Las distintas aplicaciones se presentan en la parte central de la barra lateral izquierda, donde se escogen interactivamente (Figura 2.11).

Failure Envelope Range	
Application:	General
sig3max	<ul style="list-style-type: none"> General Tunnels Slopes Custom

Figura 2.11: Aplicaciones de cálculo del programa.

A continuación son brevemente explicadas las aplicaciones *General* y *Slope*. Las restantes no son explicadas puesto que no intervienen en el presente estudio.

General: Es una aplicación presentada por el programa *RocLab* para la obtención de las envolventes de rotura y parámetros resistentes en situaciones de estabilidad generales, es decir no se considera en que tipo de estudio de estabilidad nos encontramos, ni el peso específico del material a estudio. En este caso el intervalo de valores de tensión principal menor vienen definidos por defecto, y únicamente en función del valor de resistencia a compresión no confinada de la roca intacta “sigci”.

Slope: Es una aplicación presentada por el programa *RocLab*, para la obtención de las envolventes de rotura y parámetros resistentes de los criterios de Mohr-Coulomb y Hoek&Brown para el caso de considerarse estabilidad en taludes. En este caso el intervalo de valores de la tensión principal menor viene determinado por la altura del talud, el peso específico del material y por el valor de resistencia a compresión no confinada de la roca intacta sigci.

2.2.2 GeoStudio 2004

GeoStudio 2004 es un programa de ordenador, desarrollado por *GeoSlope Ltd.*, de modelización para cálculos geotécnicos. Se puede descargar de forma gratuita desde <http://www.roscience.com>. Consta de siete paquetes, que permiten análisis de estabilidad (*SLOPE/W*), tensión deformación (*SIGMA/W*), transporte de contaminantes (*CTRAN/W*), filtraciones (*SEEP/W*), geotérmicos (*TEMP/W*) y dinámico para terremotos (*QUAKE/W*).

Para el presente estudio hemos utilizado el paquete *SLOPE/W 2004*, que permite realizar análisis de estabilidad mediante equilibrio límite, tanto para rocas como para suelos, utilizando los criterios de rotura de Mohr-Coulomb y de Hoek&Brown.

En la Figura 2.12 se muestra la pantalla principal de trabajo del programa, donde se puede observar un ejemplo realizado.

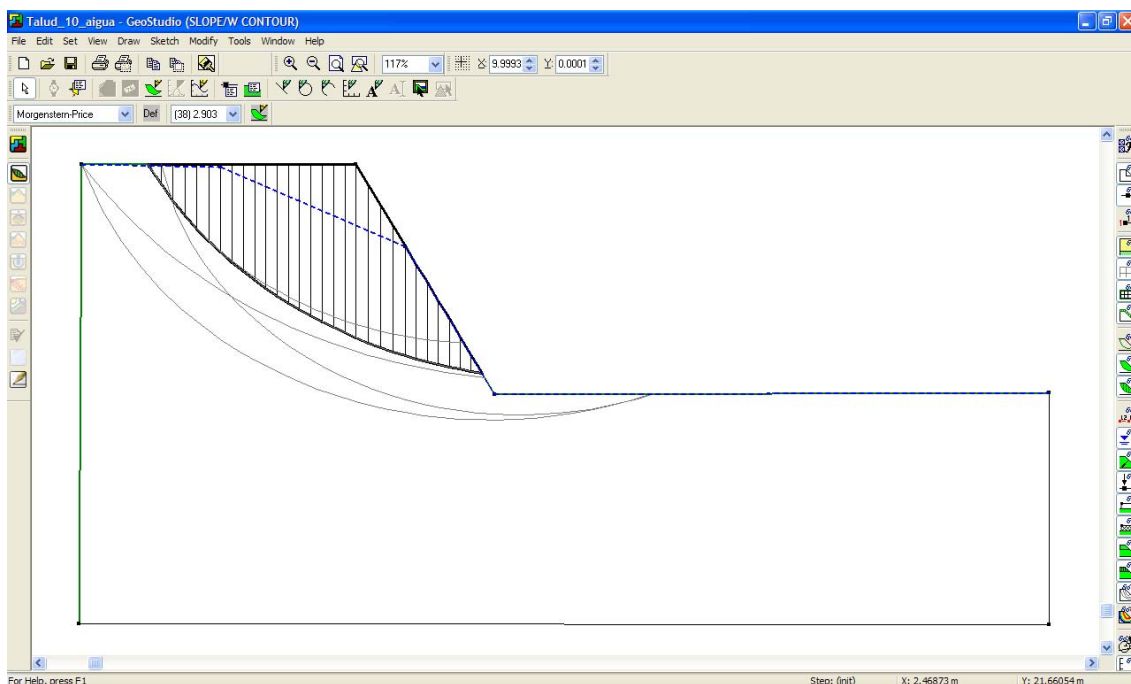


Figura 2.12: pagina de trabajo de SLOPE/W.

Para el caso del criterio de rotura de Mohr-Coulomb, los parámetros necesarios para el cálculo son el peso específico, el ángulo de fricción y el valor de la cohesión, todos ellos introducidos a través de cuadros de texto en una pantalla secundaria. En el caso del criterio de rotura de Hoek&Brown, son necesarios los valores de la resistencia a la compresión no confinada de la roca intacta σ_{ci} , el parámetro de la roca intacta m_i , el valor de clasificación geomecánica GSI, el factor de alteración del criterio de rotura de Hoek&Brown, D y el valor de la máxima tensión principal menor. Los datos son introducidos a través de una pantalla secundaria.

La geometría del perfil analizado en el estudio, donde se pueden representar estratos con distintos materiales, así como líneas piezométricas y cargas externas, se puede definir de dos maneras distintas. Directamente en la pantalla de trabajo de *SLOPE/W 2004*, esto se realiza a partir de unos ejes y una cuadrícula definidos anteriormente, estos se definen en función de la escala y las necesidades del trabajo. También se puede definir el perfil mediante un programa externo de dibujo e importarlo a *SLOPE/W 2004* en formato dxf, en este caso, se tendrá que realizar un ajuste de escala una vez el perfil se encuentre en *SLOPE/W 2004*.

SLOPE/W 2004 permite la obtención de Factores de Seguridad según los métodos de Morgenstern Price (1965), Spencer (1967), GLE (General Limit Equilibrium method), Janbu generalized (1968), Corps of Engineers (1970), Lowe-Karafiath (1960), Sarma (1973), Bishop, Ordinary y Janbu.

El programa es capaz de generar superficies de rotura curvas que se pueden definir de distintas formas, en la presente tesina se ha utilizado el ENTRY AND EXIT , que define la superficie de rotura mediante intervalos en el perfil en los que la superficie de rotura puede entrar y salir.

Una vez solucionado el problema de estabilidad, el programa proporciona el factor de seguridad asociado a la superficie de rotura determinada, o a la mas desfavorable en el caso de no tener predeterminada la superficie, y la representación grafica de ésta. En el caso de no tener definida completamente la superficie de rotura, el programa nos puede facilitar las superficies de rotura más desfavorables así como sus factores de seguridad asociados. Otras de las opciones proporcionadas por el programa son las de facilitar la masa y volumen total de material desplazada, y la posibilidad de la representación gráfica y numérica de las fuerzas que actúan en cada una de las rebanadas en las que se divide la superficie de rotura.