

**CAPÍTULO 2. TALUDES SOMETIDOS A PRESIONES EN SUPERFICIE.
ANÁLISIS MEDIANTE EQUILIBRIO LÍMITE**

2.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este Capítulo es el estudio de taludes sometidos a presiones en su superficie, mediante un análisis basado en equilibrio límite. La razón de ser de este estudio se ha justificado en la Presentación de la Tesis, y se presenta a continuación de una forma resumida.

Los elementos principales que constituyen los sistemas que se analizan en esta Tesis son el talud y el refuerzo. Ambos elementos se encuentran interaccionando el uno con el otro, de forma que el talud transmite al sistema de refuerzo ciertas acciones, del mismo modo que lo hace la malla al talud. El esquema de funcionamiento se presenta en la Figura 2.1.

La función del refuerzo es básicamente transmitir una presión al talud en su superficie con el objetivo de aumentar su coeficiente de seguridad frente a inestabilidades superficiales. En el caso de sistemas activos esta presión existe desde un primer momento ya que durante la ejecución del refuerzo los anclajes se pretensan, lo que hace que la malla transmita una presión a la superficie del talud incluso antes de comenzar a degradarse el terreno. En el caso de sistemas pasivos dicha presión aparece cuando comienzan a desarrollarse inestabilidades superficiales

Se trata, por tanto, de analizar un talud, en el que existe un posible plano de deslizamiento relativamente superficial (a una profundidad del orden de uno o dos

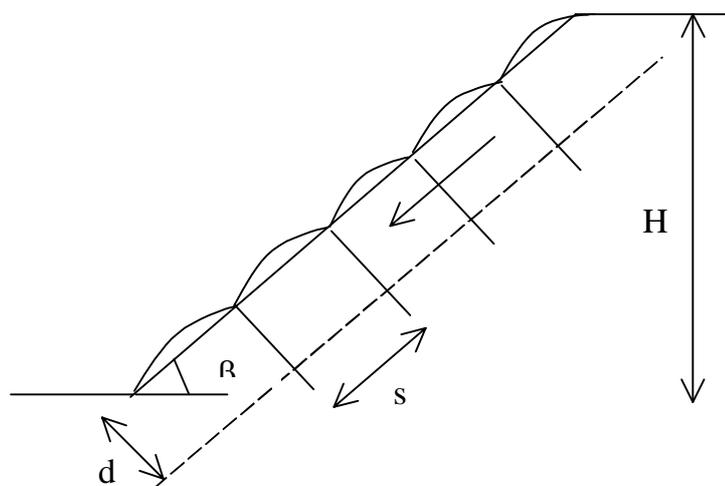


Figura 2.1. Mecanismo de inestabilidad del talud

metros, consecuencia de la degradación del terreno), y que está sometido a una presión en su superficie (la que le transmite la malla). El objetivo es establecer las expresiones que proporcionen el valor de la presión que ha de actuar sobre la superficie del talud, para conseguir un cierto coeficiente de seguridad deseado.

La presión que la malla ejerce al talud se puede dividir en dos componentes, una normal p , y otra tangencial t . Ambas componentes estarán relacionadas a través de un ángulo δ de forma que $t = p \cdot \operatorname{tg} \delta$. Este ángulo se supone conocido en el análisis, de forma que las dos variables p y t se reducen a una sola.

Como se ha descrito en el Capítulo 1 sobre el estado del conocimiento, dentro de la bibliografía de estabilidad de taludes es bien conocido el análisis del caso de taludes indefinidos, análisis que resulta sencillo en una primera aproximación para abordar el problema.

Por ello, en este Capítulo, se plantea en primer lugar, el análisis de estabilidad considerando el talud como indefinido, y a continuación se establecen unas reducciones, resultado de realizar el análisis para el caso de talud de altura finita. En general, si no se conocen de forma suficientemente precisa las características resistentes del terreno (c , ϕ), la aplicación del modelo como talud indefinido (sin aplicar ninguna reducción), proporciona unos resultados que están del lado de la seguridad.

2.2. ANÁLISIS COMO TALUD INDEFINIDO

Uno de los métodos de análisis de estabilidad de taludes que se encuentra en prácticamente toda la literatura existente sobre dicho tema, es el método del talud indefinido, descrito de forma detallada en el Capítulo 1 sobre el estado del conocimiento. En el análisis que nos ocupa sobre inestabilidades superficiales de taludes en suelos con presiones actuando en su superficie, dicho método puede ser una forma de análisis sencillo.

En este apartado se presenta una generalización de las soluciones clásicas al caso de existencia de una presión actuando sobre la superficie del talud. Esta presión, que es la que le transmite la malla, se puede descomponer en suma de dos, una normal y otra tangencial a la superficie del talud. El considerar el talud como indefinido no resulta muy lejano de la realidad ya que se trata de deslizamientos paralelos al talud y relativamente superficiales (1 a 2 m. aproximadamente), con lo que en la mayoría de los casos puede suponerse que la altura del talud es infinita respecto al espesor del deslizamiento.

El método del talud indefinido se basa en establecer el equilibrio de fuerzas en una franja de un cierto espesor, limitada por dos planos verticales separados dicho espesor y por la superficie del talud y el supuesto plano de deslizamiento. El hecho de que el talud sea indefinido hace que las fuerzas que actúan sobre los planos verticales deban ser iguales y contrarias, con lo que quedaría establecer el equilibrio entre el peso de la franja considerada, la reacción sobre la misma en el plano de deslizamiento y las presiones intersticiales en caso de presencia de agua. En el caso que se está estudiando, se ha generalizado este equilibrio introduciendo la presión que transmite la malla a la superficie del talud, considerada dicha presión como suma de una componente normal y otra tangencial a la superficie del talud, tal y como ya se ha mencionado.

Realizando dicha generalización, con presiones normal y tangencial en la superficie del talud (Figura 2.2), se obtiene una relación de la forma:

$$p = f(\gamma, d, c, \phi, \beta, F_0, \delta, \gamma_w, \alpha) \quad (2.1)$$

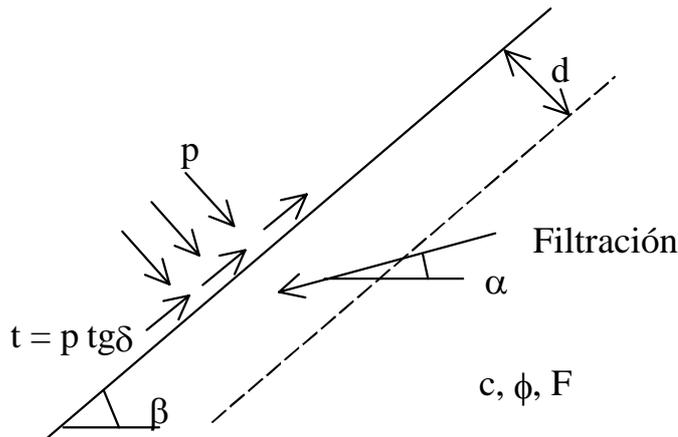


Figura 2.2. Esquema talud indefinido

donde, γ es el peso específico del terreno; d el espesor de la posible capa a deslizar; c la cohesión; ϕ el ángulo de rozamiento interno; β el ángulo de inclinación del talud; F_0 el coeficiente de seguridad al deslizamiento deseado; α el ángulo de la filtración de agua con la horizontal; δ ángulo tal que $t = p \cdot \operatorname{tg} \delta$ y p la presión necesaria para el coeficiente de seguridad deseado.

La ecuación (2.1) tendrá una expresión diferente según se trate de talud seco, sumergido o con filtración, y en este último caso dependerá del ángulo que formen las líneas de corriente con la horizontal (α).

Las expresiones para cada caso concreto se presentan a continuación. En todas ellas los tres parámetros c, ϕ y F_0 se han reducido a dos, cohesión y ángulo de rozamiento ambos afectados por el coeficiente de seguridad (c^* y ϕ^*) y cuyas expresiones son:

$$c^* = \frac{c}{F_0} \tag{2.2}$$

$$\operatorname{tg} \phi^* = \frac{\operatorname{tg} \phi}{F_0} \tag{2.3}$$

2.2.1. Talud seco

Para obtener la expresión que proporciona el valor de la presión necesaria sobre la superficie del talud en función del coeficiente de seguridad deseado, se ha planteado el equilibrio de fuerzas en un elemento como el que se muestra en la Figura 2.3. Del planteamiento de dicho equilibrio surgen las relaciones:

$$\begin{aligned} N &= W \cdot \cos \beta + p \cdot a / \cos \beta \\ T + t \cdot a / \cos \beta &= W \cdot \operatorname{sen} \beta \end{aligned} \quad (2.4)$$

donde el peso W viene dado por:

$$W = \gamma \cdot a \cdot d / \cos \beta \quad (2.5)$$

Por otro lado, el coeficiente de seguridad viene dado por la expresión:

$$F = \frac{c \cdot a / \cos \beta + N' \cdot \operatorname{tg} \phi}{T} \quad (2.6)$$

Combinando adecuadamente las expresiones anteriores se obtiene la relación entre la presión que actúa sobre la superficie del talud y el valor del coeficiente de seguridad, resultando:

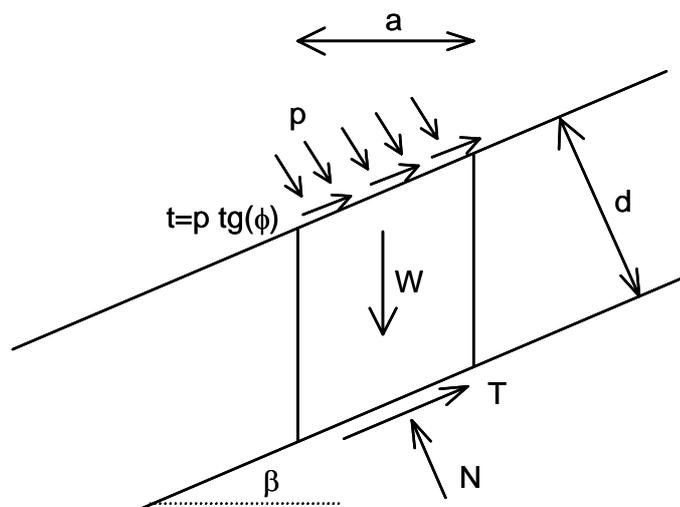


Figura 2.3. Equilibrio de fuerzas. Talud indefinido seco

$$\frac{p}{\gamma \cdot d} = \frac{\operatorname{sen} \beta - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \phi^* - \frac{c^*}{\gamma \cdot d}}{\operatorname{tg} \phi^* + \operatorname{tg} \delta} \quad (2.7)$$

donde el coeficiente de seguridad se encuentra implícito en los valores c^* y ϕ^*

En algún caso puede ocurrir que las características resistentes del terreno (c y ϕ) sean tales que el talud sea estable con un coeficiente de seguridad mayor que F_0 , sin necesidad de ninguna presión actuando sobre su superficie. En esta situación se obtendrá de la ecuación (2.7) un valor negativo de la presión p .

Si dicha presión fuese suficientemente negativa, se puede llegar a una situación en la que las tensiones normales en el plano de deslizamiento sean negativas también, apareciendo tracciones. En la práctica la presión normal p nunca será negativa por lo que no llegarán a aparecer tracciones. Lo que ocurre en estos casos es que el coeficiente de seguridad será mayor que el establecido (F_0), con un valor de la presión p nula. En definitiva, la colocación de la malla de anclajes no es necesaria para el coeficiente de seguridad deseado.

2.2.2. Talud sumergido

La única diferencia con el caso anterior se debe a que en el equilibrio de fuerzas el peso a considerar del elemento ha de ser el sumergido. Esto es así ya que el efecto del agua en reposo es equivalente a una fuerza de empuje actuando en dirección contraria al peso. Sobre las fuerzas debidas al agua sobre los laterales del elemento en el que se plantea el equilibrio, resultan iguales y contrarias por lo que no es necesario considerarlas. Por tanto, al estar todo el suelo bajo el nivel freático, se ha de considerar el peso específico sumergido, resultando:

$$\frac{p}{\gamma \cdot d} = \frac{\gamma_{sum}}{\gamma} \cdot \frac{\operatorname{sen} \beta - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \phi^* - \frac{c^*}{\gamma_{sum} \cdot d}}{\operatorname{tg} \phi^* + \operatorname{tg} \delta} \quad (2.8)$$

2.2.3. Talud con filtración cuyas líneas de corriente forman un ángulo α con la horizontal

En el caso de filtración en el talud, hay que tener en cuenta en el equilibrio el empuje del agua debido a dicha filtración. Al igual que en los casos anteriores las fuerzas debidas al agua en los laterales del elemento considerado resultan iguales y contrarias por lo que no es necesario tenerlas en cuenta a la hora de plantear el equilibrio. En la Figura 2.4 se muestran todas las fuerzas que intervienen para obtener la expresión que relaciona la presión necesaria sobre la superficie del talud en función del coeficiente de seguridad deseado.

Del planteamiento del equilibrio surgen las relaciones:

$$\begin{aligned} N' + U &= W \cdot \cos \beta + p \cdot a / \cos \beta \\ T + t \cdot a / \cos \beta &= W \cdot \operatorname{sen} \beta \end{aligned} \quad (2.9)$$

donde el peso W y la fuerza del agua U vienen dadas por:

$$W = \gamma \cdot a \cdot d / \cos \beta \quad (2.10)$$

$$U = \gamma_w \cdot \frac{d \cdot a \cdot \cos \alpha}{\cos(\beta - \alpha) \cdot \cos \beta} \quad (2.11)$$

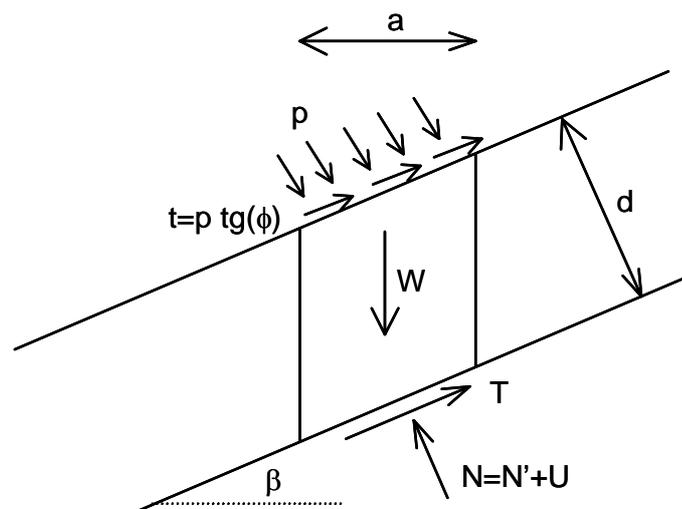


Figura 2.4. Equilibrio de fuerzas. Talud indefinido con filtración

siendo α la inclinación de las líneas de corriente con respecto a la horizontal, tal y como se ha definido en la Figura 2.2.

Por otro lado, el coeficiente de seguridad viene dado por la expresión:

$$F = \frac{c \cdot a / \cos \beta + N' \cdot \operatorname{tg} \phi}{T} \quad (2.12)$$

Combinando adecuadamente las expresiones anteriores se obtiene la relación entre la presión que actúa sobre la superficie del talud y el valor del coeficiente de seguridad.

En el caso de talud con filtración, la presencia de agua hace que la condición de presión normal p positiva no implique que la tensión normal efectiva en el plano de deslizamiento (N'), lo sea también.

La expresión $\tau = c' + \sigma' \cdot \operatorname{tg}(\phi)$ que proporciona el valor de la resistencia al deslizamiento sobre un plano, sólo es válida si σ' es mayor o igual a cero. En los casos en que σ' es negativa, la ecuación a emplear es $\tau = c$. Por tanto, cuando se obtiene un valor de la componente normal en el plano de deslizamiento de valor negativo, se ha de plantear de nuevo el equilibrio de fuerzas haciendo dicha fuerza normal igual a cero. Con esta nueva condición el coeficiente de seguridad a deslizamiento tomará el valor que le corresponda, pero que siempre resultará superior al considerado inicialmente (F_0). En definitiva se trata de sustituir la ecuación correspondiente imponer un cierto coeficiente de seguridad deseado, es decir $F = F_0$, por $N' = 0$ y dejar el valor de F libre. Todo ello conduce a la necesidad de diferenciar entre $N' > 0$ y $N' < 0$, ya que la solución que se obtiene en cada caso es distinta.

La condición de tensión normal efectiva N' positiva o negativa, viene dada por el signo de la expresión:

$$M = \operatorname{tg} \beta - \frac{c^*}{\gamma \cdot d \cdot \cos \beta} + \left(1 - \frac{\frac{\gamma_w}{\gamma} \cdot \cos \alpha}{\cos \beta \cdot \cos(\beta - \alpha)} \right) \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (2.13)$$

siendo, para cada caso, el valor de la presión necesaria para obtener un cierto coeficiente de seguridad, el indicado en las siguientes ecuaciones (2.14) y (2.15).

- No aparecen tracciones: valor de M (ecuación 2.13) es positivo

$$\frac{p}{\gamma \cdot d} = \frac{\frac{\gamma_w}{\gamma} \cdot \cos \alpha}{\cos(\beta - \alpha)} \cdot \frac{\frac{\gamma_w}{\gamma} \cdot \cos \alpha}{\cos(\beta - \alpha)} + \frac{\frac{\gamma_w}{\gamma} \cdot \cos \alpha}{\cos(\beta - \alpha)} \cdot \frac{\gamma_w \cdot \cos \alpha}{\gamma \cdot d} - \frac{c^*}{\gamma \cdot d} - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \phi^* + \frac{\gamma_w}{\gamma} \cdot \cos \alpha}{\operatorname{tg} \phi^* + \operatorname{tg} \delta} \quad (2.14)$$

- Aparecen tracciones: valor de M (ecuación 2.13) es negativo

$$p = \frac{\gamma_w \cdot d \cdot \cos \alpha}{\cos(\beta - \alpha)} - \gamma \cdot d \cdot \cos \beta \quad (2.15)$$

En la expresión (2.15) se observa que la presión no depende de las características resistentes del terreno (c y ϕ). Esto se debe a que en este caso la presión queda determinada por la condición de equilibrar el empuje del agua. Esta condición resulta, para el coeficiente de seguridad deseado, más restrictiva que la de deslizamiento del talud.

Por tanto, el coeficiente de seguridad al deslizamiento queda libre y toma un valor superior al deseado inicialmente, valor que viene dado por la expresión:

$$F = \frac{c}{\gamma \cdot d \cdot \operatorname{sen} \beta - p \cdot \operatorname{tg} \delta} \quad (2.16)$$

A partir de las expresiones anteriores se puede obtener, para cada caso, el valor de la presión normal que es necesario transmitir al talud.

Estas expresiones (2.7), (2.8), (2.14) y (2.15) se pueden representar gráficamente para distintos valores de los parámetros que forman parte del problema. En la Figura 2.5 se presenta un ejemplo correspondiente al caso de un talud seco, con un valor concreto de cohesión y sin tensión tangencial sobre la superficie del talud ($\delta = 0$).

En el primer apartado del Apéndice A, se presentan otros casos estudiados bajo diferentes condiciones de filtración y de valores de cohesión. Todos ellos se

corresponden a unos valores de los parámetros ($\beta = 30^\circ$ a 60° ; $\phi^* = 10^\circ$ a 25° ; $c^*/(\gamma d) = 0.0, 0.25, 0.5$), tales que no aparecen tracciones, es decir, la ecuación (2.13) tiene signo positivo, por lo que para las gráficas con filtración se ha representado la ecuación (2.14) y no la (2.15).

También se ha planteado una hoja de cálculo en la que se introduce como datos los valores de los parámetros, entre ellos la presencia o no de agua (ψ), y en su caso las condiciones de filtración (α), y se obtiene el valor de $p / (\gamma \cdot d)$. A continuación se presenta en la Figura 2.6, la forma de dicha hoja de cálculo para un caso concreto.

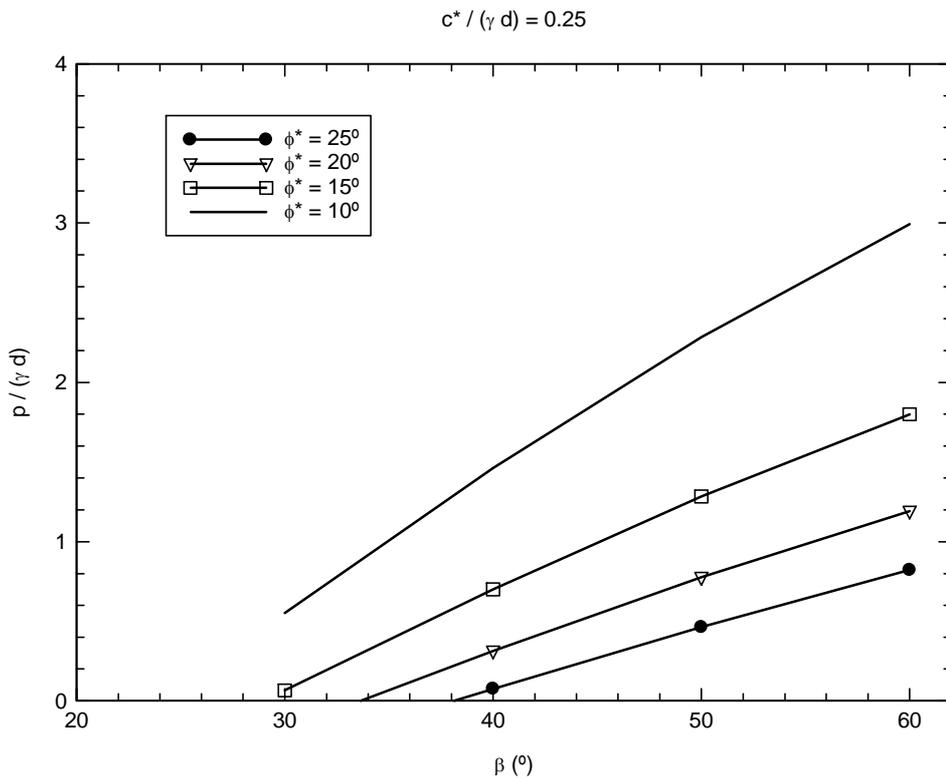


Figura 2.5. Gráfico para obtención de la presión necesaria sobre un talud seco para un cierto coeficiente de seguridad F

DATOS	
Ángulo de inclinación del talud	β (°) = <input type="text" value="20"/>
Espesor de la capa deslizante	d (m) = <input type="text" value="1"/>
Separación entre anclajes	s (m) = <input type="text" value="3"/>
Peso específico del suelo	γ (t/m ³) = <input type="text" value="2"/>
Cohesión	c (t/m ²) = <input type="text" value="0.2"/>
Ángulo de rozamiento interno	ϕ (°) = <input type="text" value="20"/>
Presión tangencial	δ (°) = <input type="text" value="0"/>
Presencia de agua (sí $\psi=1$; no $\psi=0$)	ψ = <input type="text" value="1"/>
Ángulo de la filtración con la horizontal	α (°) = <input type="text" value="30"/>
Coeficiente de seguridad	F = <input type="text" value="1.5"/>

RESULTADO
$p / (\gamma d) = 0.63$

Figura 2.6. Hoja de cálculo para la obtención de la presión necesaria sobre la superficie de un talud para un cierto coeficiente de seguridad F

2.3. REDUCCIÓN POR ALTURA FINITA

En la mayoría de los casos prácticos relacionados con la estabilidad de taludes en suelo la relación entre la altura del talud y el espesor de la capa inestable es suficientemente grande como para que la solución anterior correspondiente al caso de talud indefinido sea aplicable directamente. Sin embargo, puede ser conveniente estudiar el efecto que la altura finita del talud tiene en la presión calculada. Para ello, se ha analizado un mecanismo que responde a la posibilidad cinemática de deslizamiento implicada por los sistemas habituales de redes y anclajes.

En la Figura 2.7 se presenta el posible mecanismo de deslizamiento consistente en una serie de cuñas con sus posibles planos de deslizamiento. Estos planos, así como el número y tamaño de las cuñas, quedan definidos por la magnitud s (Figura 2.1), la cual, junto con el espesor d de la capa que desliza, definen el ángulo λ de salida del plano de deslizamiento. Estas magnitudes son, por tanto, necesarias para plantear el problema, y utilizadas para realizar el cálculo.

El método empleado consiste en ir estableciendo el equilibrio de las distintas cuñas desde la parte superior del talud hasta el pie del mismo. Para ello se consideran mecanismos de deslizamiento con el de la Figura 2.8, donde quedan definidos dos bloques A y B.

A continuación se expone la forma de cálculo considerada. En la primera fase ($i = 1$) se estudian las cuñas 1 y 2 (Figura 2.7), que forman los dos bloques, A y B respectivamente, sometidos a sus correspondientes fuerzas, de forma que estableciendo el equilibrio de ambos, se obtiene el valor de la presión p que es necesario que actúe sobre el bloque B (cuña 2), para obtener el coeficiente de seguridad deseado. Una vez conocida esta presión, se pasa a la segunda fase ($i = 2$) en la que se consideran las cuñas 1, 2 y 3 como bloque A y la 4 como bloque B, se vuelve a establecer el equilibrio de ambos bloques y se obtiene la presión que ha de actuar sobre el ahora bloque B (cuña 4).

En la Figura 2.9 se presenta un esquema de los bloques A y B de una fase i genérica, con las fuerzas que actúan sobre cada uno de ellos. En los bloques A son incógnitas N'_1 y N'_2 , mientras que en los B lo son N'_3 y p_i .

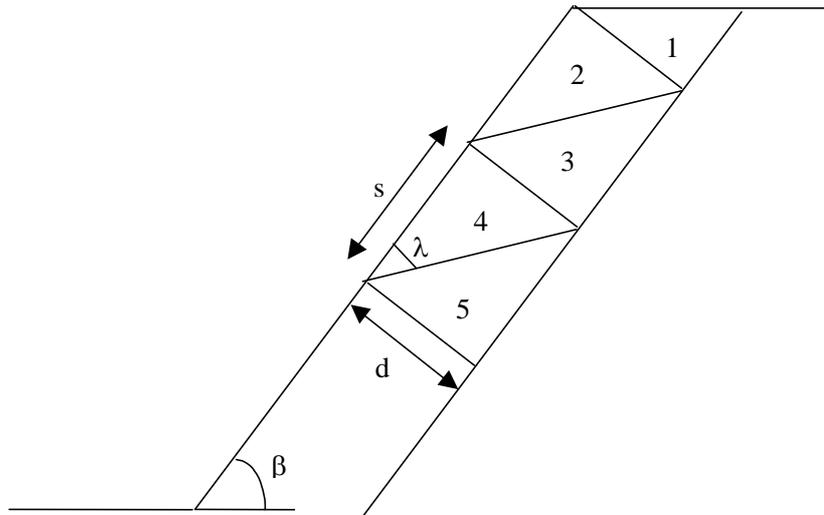


Figura 2.7. Esquema de deslizamiento de cuñas en el talud

Realizando este cálculo sucesivamente hasta llegar al pie del talud, se van obteniendo las presiones necesarias que han de actuar sobre su superficie. El resultado que se obtiene son unas presiones constantes en cada longitud de cuña (s), y de magnitud creciente desde la cuña situada en la parte superior del talud, hasta la situada en el pie del mismo.

Al plantear el equilibrio en una cuña, se puede dar el caso, al igual que ocurría en el análisis como talud indefinido, de que la tensión normal efectiva en alguno de los planos de deslizamiento resulte negativa. De ser así, al no considerar resistencia a tracción del suelo, se ha de repetir el cálculo igualando a cero dichas

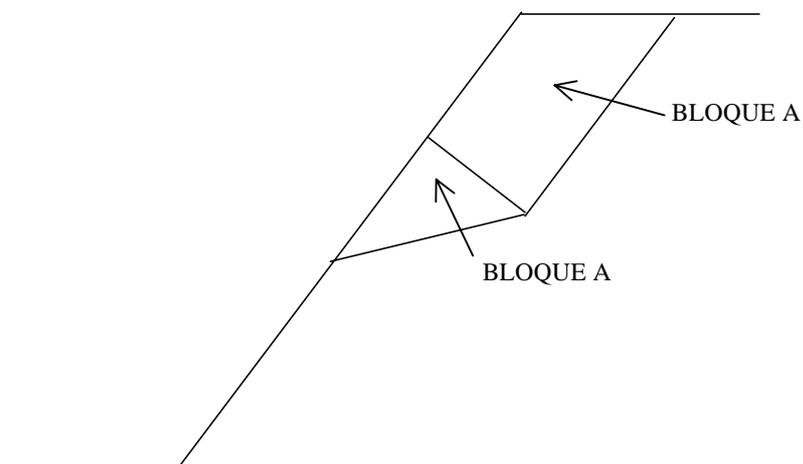


Figura 2.8. Esquema de bloques A y B

tensiones y dejando libres los correspondientes coeficientes de seguridad (hasta que se llegue a un equilibrio con tensiones normales efectivas mayores o iguales a cero).

En estos casos, el dar una solución sencilla resulta muy complejo ya que en cada fase i , cada una de las tres tensiones normales efectivas (una en cada plano de deslizamiento), pueden resultar negativas una a una o varias a la vez, siendo distinto en cada caso el sistema de ecuaciones a resolver.

A continuación se presentan los posibles casos que se pueden plantear para cada fase de análisis:

- I. Al resolver las ecuaciones se obtiene: N'_1, N'_2 y $N'_3 > 0$.

En este caso la solución que se obtiene es correcta y los coeficientes de seguridad en los tres planos de deslizamiento son el deseado F_0 ($F_i = F_0$).

- II. Al resolver las ecuaciones se obtiene: N'_1 y $N'_2 > 0$ y $N'_3 < 0$.

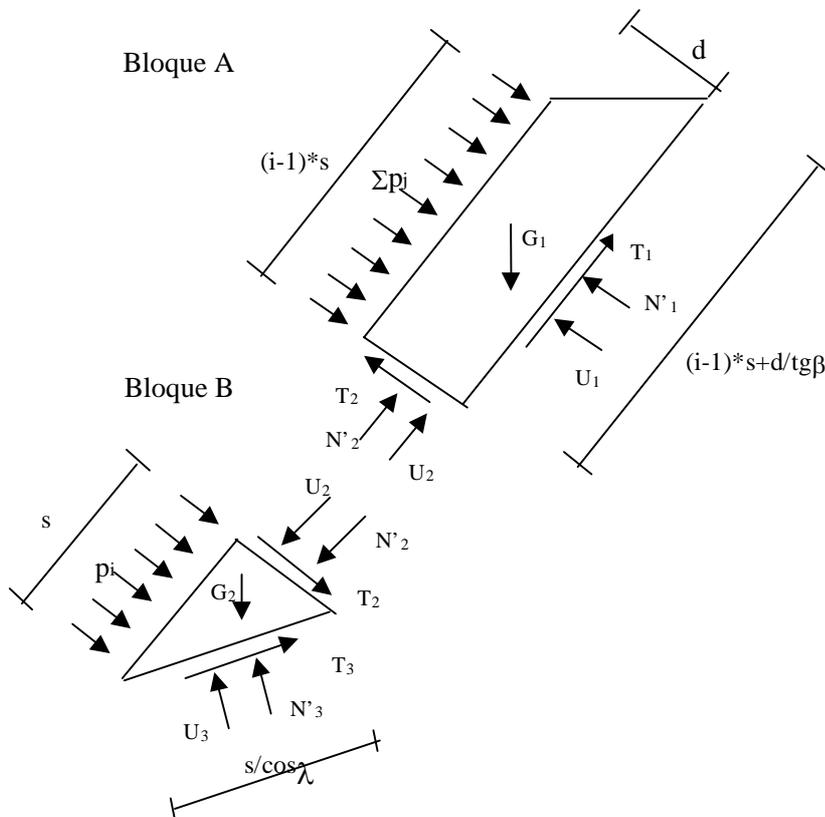


Figura 2.9. Fuerzas actuantes en los bloques A y B

Al ser N'_3 negativa, hay que resolver el sistema planteando $N'_3 = 0$ y dejando libre, que tome el valor que le corresponda, el coeficiente de seguridad al deslizamiento en el plano correspondiente a esta tensión, es decir F_3 libre.

III. Al resolver las ecuaciones se obtiene: $N'_1 > 0$ y $N'_2 < 0$.

Se resuelve de nuevo el equilibrio en el bloque A con las condiciones $N'_2 = 0$ y F_2 libre.

A continuación se resuelve el bloque B pudiéndose obtener dos casos:

1. $N'_3 > 0$. El cálculo queda resuelto correctamente.
2. $N'_3 < 0$. Habrá que volver a resolver el equilibrio con $N'_3 = 0$ y F_3 libre.

IV. Al resolver las ecuaciones se obtiene: $N'_1 < 0$ y $N'_2 > 0$.

Se resuelve de nuevo el equilibrio en el bloque A con las condiciones $N'_1 = 0$ y F_1 libre. A continuación se resuelve el bloque B pudiéndose obtener dos casos:

1. $N'_3 > 0$. El cálculo queda resuelto correctamente.
2. $N'_3 < 0$. Habrá que volver a resolver el equilibrio con $N'_3 = 0$ y F_3 libre.

V. Al resolver las ecuaciones se obtiene: $N'_1 < 0$ y $N'_2 < 0$.

Se resuelve de nuevo el equilibrio en el bloque A con las condiciones $N'_1 = 0$, $N'_2 = 0$ y F_1 y F_2 libres. A continuación se resuelve el bloque B pudiéndose obtener dos casos:

1. $N'_3 > 0$. El cálculo queda resuelto correctamente.
2. $N'_3 < 0$. Habrá que volver a resolver el equilibrio con $N'_3 = 0$ y F_3 libre.

Como se puede observar, cuando aparecen tracciones, cada caso a resolver es muy específico y no se puede dar una solución sencilla en forma de ábacos o

tablas. En el segundo apartado del Apéndice A, se muestran las expresiones correspondientes a las variables N'_i y de p_i que se obtienen para cada uno de los casos citados anteriormente.

En los casos en que no aparecen tracciones (caso I), sí es posible presentar los resultados en forma de gráficos de una forma sencilla. Todo lo que se expone a continuación se refiere a estos casos tipo I, y se presentarán las gráficas correspondientes, que como se comentará más adelante estarán limitadas a valores tales que no aparezcan tracciones.

Del equilibrio en cada fase se obtiene la presión p_i que depende de los siguientes parámetros (la expresión completa se da en el apartado 2 del Apéndice A, en el caso I):

$$\frac{p_i}{\gamma \cdot d} = f \left(\frac{c^*}{d \cdot h}, \phi^*, i, \frac{s}{d}, \beta, \delta, \frac{\sum_{j=1}^{i-1} p_j}{\gamma \cdot d}, \alpha, \frac{\gamma_w}{\gamma}, \psi \right) \quad (2.17)$$

donde c^* es la cohesión afectada por el coeficiente de seguridad; ϕ^* el ángulo de rozamiento afectado por el coeficiente de seguridad; i la fase en estudio; s la dimensión de las cuñas; d el espesor de la posible zona a deslizar; β el ángulo de inclinación del talud; δ ángulo tal que $t = p \cdot \operatorname{tg} \delta$; α ángulo de la filtración de agua con la horizontal; p_j presiones obtenidas en las cuñas anteriores; γ la densidad del terreno; γ_w la densidad del agua; ψ indica la presencia ($\psi = 1$) o no ($\psi = 0$) de agua y p es a presión necesaria para conseguir el coeficiente de seguridad al deslizamiento F_0 .

Al realizar el cálculo, el valor de la presión que se obtiene en una determinada cuña, es mayor que el obtenido en la anterior y menor que el de la siguiente. Este crecimiento de la presión al aproximarse al pie del talud, es asintótico hacia el valor que se obtendría en un análisis como talud indefinido. Por tanto, y como se podía esperar, a partir de una cierta altura de talud, éste se comporta como indefinido.

Se han analizado una serie de casos para distintos valores de los parámetros que definen el problema. De dicho análisis se han establecido las conclusiones que se presentan a continuación, que han permitido definir la forma de los gráficos necesarios

para la presentación de resultados, en lo que se refiere a la dependencia del parámetro $p_i / (\gamma \cdot d)$ con el resto de variables.

- Para un talud de altura H , una vez calculadas las presiones p_i correspondientes a cada uno de los tramos en que se divide el talud (cuñas), se puede definir un coeficiente de reducción R , como cociente entre la presión necesaria en la última cuña del talud y la que se obtiene del análisis del talud como indefinido. Por tanto, se puede establecer una relación, dada en forma de gráficas, entre los valores de la variable H / d (H : altura del talud, d : espesor de la zona inestable) y el coeficiente R .
- El parámetro s / d (Figura 2.7), para valores usuales de uno, dos o tres, apenas influye en los resultados.
- Las curvas que representan el valor de los parámetros (H / d) en abscisas y R en ordenadas, obtenidas para distintos valores de la cohesión y manteniendo los demás parámetros constantes, son la misma, desplazada un cierto valor en horizontal, que depende de la magnitud de la cohesión.

Esta última conclusión se corresponde con el conocido enunciado del denominado teorema de los estados correspondientes de Caquot, que relacionan los casos sin y con cohesión. Un caso conocido es la ley de empujes sobre un muro, donde la ley para el caso de cohesión cero tendrá una forma, y para los casos de cohesiones distintas a cero la ley que se obtiene es paralela a la anterior y desplazada una magnitud que depende del valor de la cohesión, apareciendo una zona sometida a tracción en la parte superior del muro.

Sobre la base de estas conclusiones se puede abordar el problema de altura finita del talud, estableciendo dos reducciones a aplicar a la solución obtenida en el caso de considerar el talud como indefinido.

2.3.1. Reducción por altura

Esta reducción viene dada por el coeficiente R , de forma que para un talud de altura H el valor de la presión necesaria para garantizar un cierto coeficiente de seguridad es:

$$p_{\text{talud finito}} = R \cdot p_{\text{talud indefinido}} \quad (2.18)$$

siendo $p_{\text{talud indefinido}}$ el valor de la presión necesaria para garantizar dicho coeficiente de seguridad, en el caso de considerar el talud como indefinido.

En la Figura 2.10 se ha representado el valor del coeficiente de reducción R , frente al valor del parámetro $(H/d)^*$, para distintos valores de inclinación del talud (β) y de ángulo de rozamiento interno (ϕ^*), y para el caso de cohesión nula. El parámetro adimensional $(H/d)^*$, está relacionado con (H/d) , en función del valor de la cohesión, refiriéndose el asterisco a dicha corrección, la cual se presenta en el siguiente apartado.

En el tercer apartado del Apéndice A se presentan gráficos $(H/d)^*$, R , para diferentes condiciones de filtración, y todos ellos para el caso de cohesión nula (la influencia de la cohesión se establece en el siguiente apartado).

2.3.2. Reducción por cohesión

Como ya se ha comentado, las gráficas (H/d) , R que se obtienen para distintos valores de cohesión, e igualdad del resto de parámetros, son la misma,

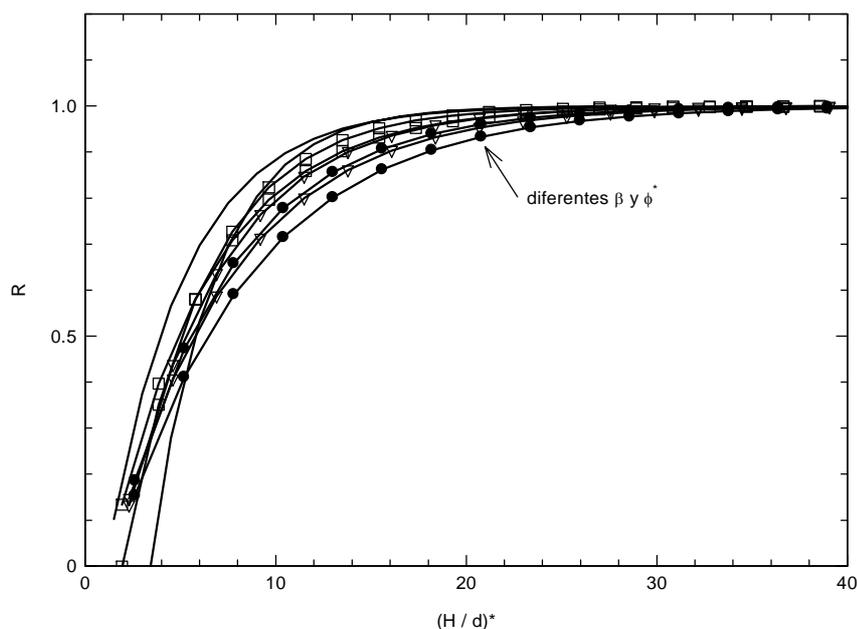


Figura 2.10. Factor de reducción por altura de talud par el caso $c = 0$

desplazada paralelamente al eje R una magnitud que depende del valor de la cohesión en cada caso. Por tanto, cuando exista una cohesión distinta de cero, a efectos de cálculo, se puede considerar el caso de un talud de menor altura que la real, y con un valor de la cohesión igual a cero. Es decir, un talud con una altura (H/d) y una cierta cohesión, tendrá el mismo factor de reducción R que un talud de altura $(H/d)^*$ y cohesión nula, estando relacionadas ambas alturas por la expresión:

$$\left(\frac{H}{d}\right)^* = \left(\frac{H}{d}\right) - \left(\frac{H_c}{d}\right) \quad (2.19)$$

donde (H_c/d) representa la corrección a aplicar.

Esta corrección de altura (H_c/d) es función de la cohesión, el ángulo de rozamiento interno y la inclinación del talud. En la Figura 2.11 se muestra un ejemplo del valor de la corrección por altura, para el caso de un talud seco con una inclinación de 50° .

En el cuarto apartado del Apéndice A se presentan gráficas semejantes, correspondientes a distintas condiciones de filtración e inclinación de talud.

Ya se ha comentado la dificultad del cálculo cuando aparecen tracciones en alguno de los planos de deslizamiento. Por esta razón las gráficas de reducción de altura por cohesión que se presentan en dicho apéndice, han sido limitadas a valores de los parámetros tales que no se produzcan tensiones normales negativas en ninguno de los planos de deslizamiento. De esta forma, queda definida una zona cerrada, dentro de la cual es posible la interpolación. La extrapolación no es correcta, ya que, como se ha dicho anteriormente, el sistema de ecuaciones a resolver es distinto según cada caso.

Todas las curvas presentadas corresponden a un valor del parámetro (s/d) de 3. Se ha comentado anteriormente, que este parámetro, para valores usuales, apenas influye en el resultado. Además, en todos los casos presentados, se ha considerado un valor del ángulo δ de 0° , lo que corresponde con la condición de tensión tangencial nula sobre la superficie del talud.

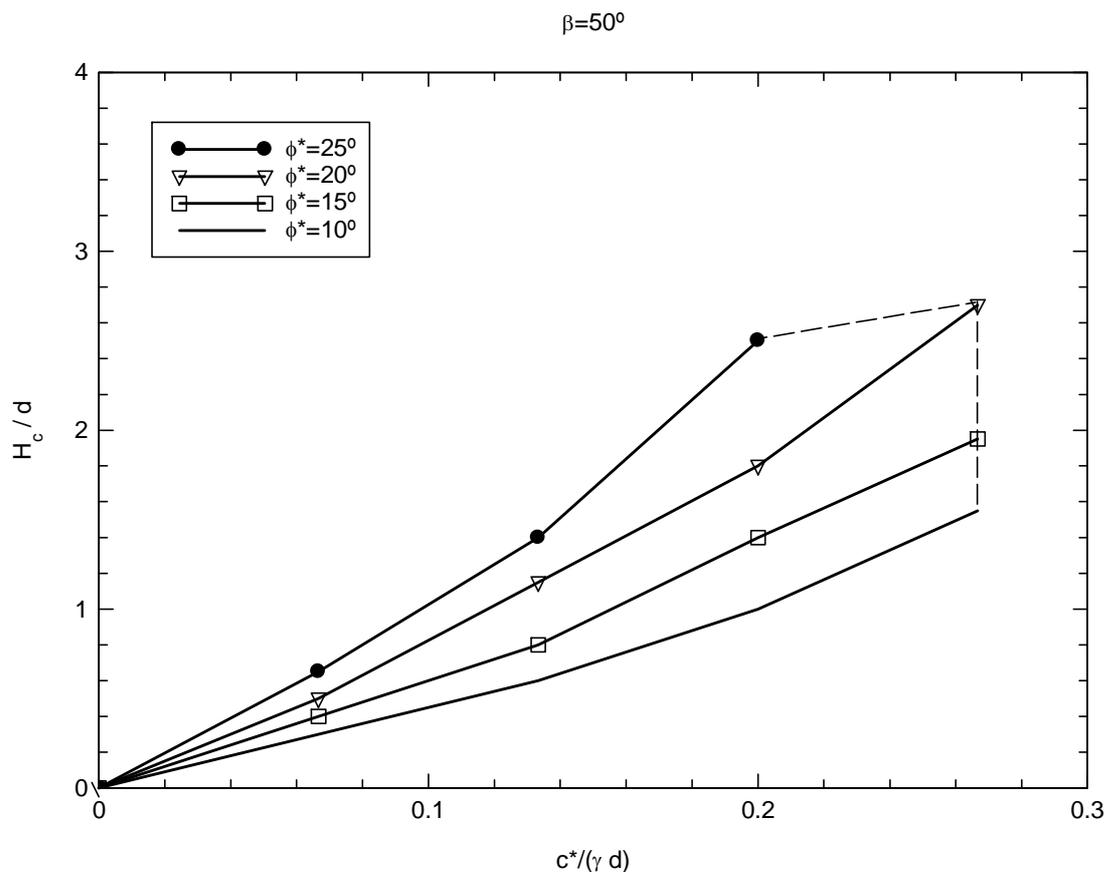


Figura 2.11. Reducción de altura de talud por cohesión. Talud seco

2.3.3. Proceso de obtención de la presión requerida en taludes de altura finita

El procedimiento de cálculo para obtener el valor de la presión que es necesario que actúe sobre el paramento de un talud, para conseguir un cierto valor de coeficiente de seguridad al deslizamiento, frente a inestabilidades superficiales, será el siguiente:

1. Cálculo de la presión necesaria p considerando el talud como indefinido ($p_{\text{talud indefinido}}$), mediante el empleo de las ecuaciones (2.7), (2.8) y (2.14) o (2.15) según corresponda.
2. Obtención de la reducción de altura por cohesión (H_c / d) a partir de los gráficos correspondientes.

3. Obtención de la altura del talud, corregida por efecto de la cohesión ($H/d)^* = (H/d) - (H_c/d)$
4. Obtención del factor de reducción por altura finita, R , en función de la altura corregida $(H/d)^*$, y a partir de los gráficos correspondientes.
5. Cálculo de la presión para la altura real del talud, según la expresión,
 $p_{\text{talud finito}} = R \cdot p_{\text{talud indefinido}}$

En el caso de cohesión nula, los pasos 2 y 3 no se realizan, ya que no es necesario corregir la altura de talud por cohesión.

2.4. CONSIDERACIONES SOBRE EL ANÁLISIS

Del análisis realizado en este Capítulo sobre el estudio de taludes sometidos a presiones en su superficie, y como resumen de los resultados obtenidos, se pueden destacar las siguientes ideas:

- Del análisis de taludes sometidos a presión en su superficie, se obtiene el valor de la presión que es necesario que actúe sobre el paramento de un talud, para garantizar un cierto valor del coeficiente de seguridad frente al deslizamiento debido a inestabilidades superficiales. Dicha presión es función de la geometría del talud y de las características resistentes del suelo.

- La relación anterior se puede obtener tanto para el caso de talud indefinido, como de talud de altura finita, y en ambos casos para distintas condiciones de filtración de agua en el talud.

- El estudio de un talud de altura finita se puede reducir al estudio considerándolo como indefinido, aplicando a esta solución dos reducciones, una por altura finita de talud y otra por cohesión, en caso de ser ésta distinta de cero.

- La presencia de cohesión no supone más que un desplazamiento horizontal de las curvas coeficiente de reducción debido a altura finita frente a altura.

- De las gráficas que definen el coeficiente de reducción R , se deduce que en general, para taludes de altura mayor que doce a quince veces el espesor de la capa que desliza, la solución de talud indefinido resulta suficientemente precisa, no siendo necesario afinar el cálculo mediante las reducciones correspondientes a talud finito.