

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

Fernando Herrera Rodríguez

Director Técnico

Geólogo - Master en Ingeniería Geológica, U.C.M.

GEOTECNIA 2000

Análisis de estabilidad de taludes

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

Guía de cálculo de estabilidad de taludes

© Fernando Herrera Rodríguez

GEOTECNIA 2000

C/ Ponzano, 69 – 6º 11

28003 - MADRID -

Teléfono: 91-441-10-63

Fax: 91-399-36-46

E-Mail: f-herrera@geotecnia2000.com

INTRODUCCIÓN	3
1. MÉTODOS DE CÁLCULO	4
1.1. CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE CÁLCULO	4
1.1.1. Métodos de cálculo en deformaciones	4
1.1.2. Métodos de equilibrio límite	4
1.1.2.1. Métodos exactos	4
1.1.2.2. Métodos no exactos	5
2. ROTURA PLANAR	5
2.1. GEOMETRÍA DE LA ROTURA PLANAR	7
2.2. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN ROTURA PLANAR	7
2.3. COLOCACIÓN DE ANCLAJES	10
2.4. EJEMPLO NUMÉRICO	11
2.4.1. Resultados	12
3. ROTURA POR CUÑAS	12
3.1. GEOMETRÍA DE LA ROTURA POR CUÑAS	13
3.2. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN ROTURA POR CUÑAS	14
3.3. EJEMPLO NUMÉRICO	21
3.3.1. Resultados	22
4. ROTURAS CIRCULARES Y CURVAS	22
4.1. MÉTODO SIMPLIFICADO DE BISHOP	23
4.2. ÁBACOS DE HOEK Y BRAY	25

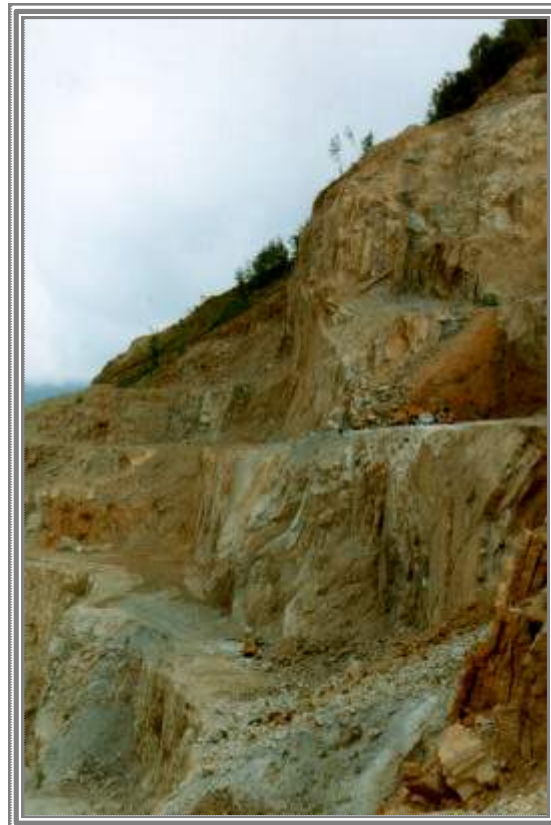


Introducción



La ingeniería geológica y geotécnica, entre muchos otros campos, abarca el cálculo de estabilidad de taludes, pudiéndose distinguir varios métodos de cálculo, en base a la diferente formulación matemática utilizada.

El buen conocimiento del comportamiento de un talud frente a sus posibles roturas, repercute enormemente en los costes y en la seguridad, por ello, las investigaciones de campo (in situ) y de laboratorio, deben ser las suficientes, como para poder caracterizar en la medida de lo posible las características geomecánicas del terreno, así como los posibles mecanismos de rotura.



1. MÉTODOS DE CÁLCULO

1.1. Clasificación de los métodos de cálculo

Los métodos de cálculo para analizar la estabilidad de un talud se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Métodos de cálculo en deformaciones.
- Métodos de equilibrio límite.

1.1.1. Métodos de cálculo en deformaciones

Consideran en el cálculo las deformaciones del terreno además de las leyes de la estática. Su aplicación práctica es de gran complejidad y el problema debe estudiarse aplicando el método de los elementos finitos u otros métodos numéricos.

1.1.2. Métodos de equilibrio límite

Se basan exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable. No tienen en cuenta las deformaciones del terreno. Suponen que la resistencia al corte se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de corte.

Se pueden clasificar a su vez en dos grupos:

- Métodos exactos.
- Métodos no exactos.

1.1.2.1. Métodos exactos

La aplicación de las leyes de la estática proporcionan una solución exacta del problema con la única salvedad de las simplificaciones propias de todos los métodos de equilibrio límite (ausencia de deformaciones, factor de seguridad constante en toda la superficie de rotura, etc.). Esto sólo es posible en taludes de geometría sencilla, como por ejemplo la rotura planar y la rotura por cuñas.

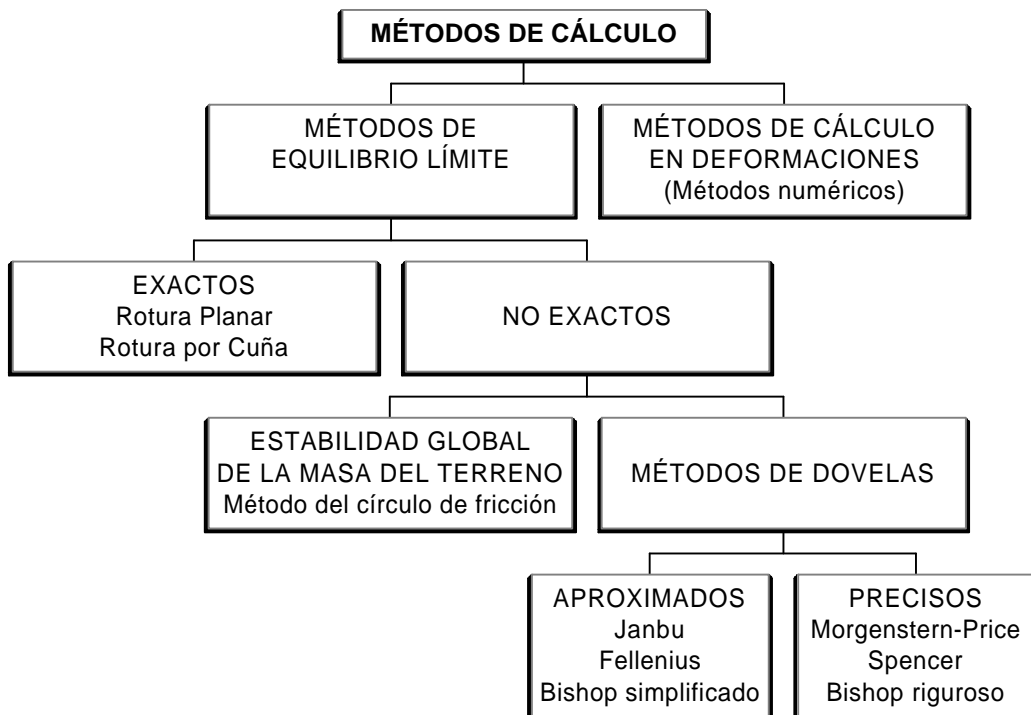
1.1.2.2. Métodos no exactos

En la mayor parte de los casos la geometría de la superficie de rotura no permite obtener una solución exacta del problema mediante la única aplicación de las leyes de la estática. El problema es hiperestático y ha de hacerse alguna simplificación o hipótesis previa que permita su resolución. Se pueden considerar así los métodos que consideran el equilibrio global de la masa deslizante, hoy en desuso, y los métodos de las dovelas o rebanadas, que consideran a la masa deslizante dividida en una serie de fajas verticales.

Los métodos de las dovelas o rebanas pueden clasificarse en dos grupos:

- Métodos aproximados: no cumplen todas las ecuaciones de la estática. Se pueden citar por ejemplo los métodos de *Fellenius*, *Janbu* y *Bishop simplificado*.
- Métodos precisos o completos: cumplen todas las ecuaciones de la estática. Los más conocidos son los de *Morgenstern-Price*, *Spencer* y *Bishop riguroso*.

En la figura 1, se muestra un gráfico en el que se recogen los diferentes métodos de cálculo.



2. ROTURA PLANAR

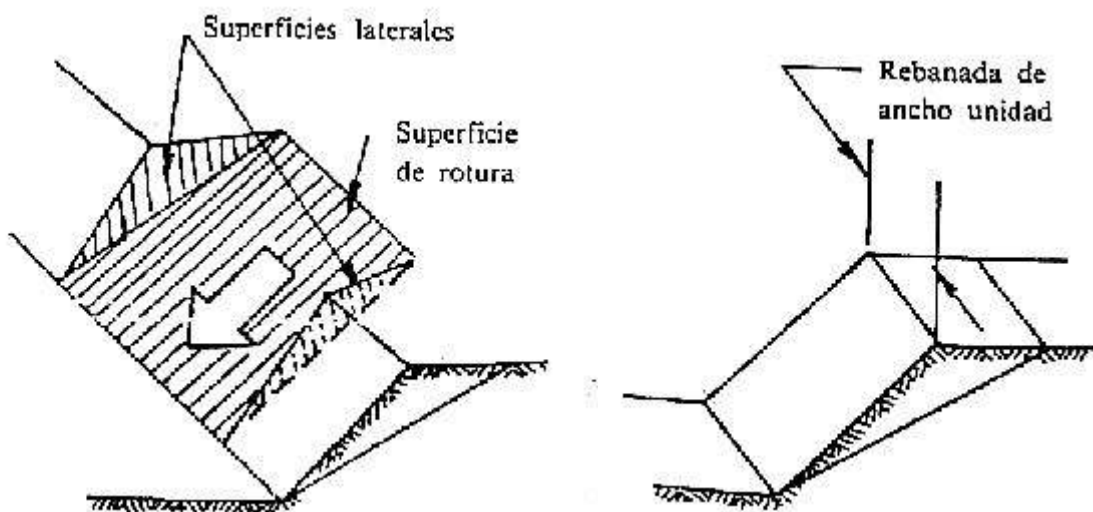
Se llama *rotura planar* o plana a aquella en la que el deslizamiento se produce a través de una única superficie plana.

Es la más sencilla de las formas de rotura posibles y se produce cuando existe una fracturación dominante en la roca y convenientemente orientada respecto al talud. Frecuentemente se trata de fallas que interceptan al talud.

También puede producirse en terrenos granulares en los que, entre dos terrenos de buenas características resistentes, se intercala un estrato de poco espesor de material con menos resistencia.

Este tipo de rotura no es muy frecuente, ya que deben darse las dos condiciones siguientes:

- Los rumbos o trazas horizontales del plano del talud y del plano de deslizamiento deben ser paralelos o casi paralelos, formando entre sí un ángulo máximo de 20° .
- Los límites laterales de la masa deslizante han de producir una resistencia al deslizamiento despreciable.



Estas condiciones permiten estudiar la estabilidad del talud como un problema bidimensional que se analiza considerando una rebanada de ancho unidad, limitada por dos planos verticales, perpendiculares al plano del talud.

2.1. Geometría de la rotura planar

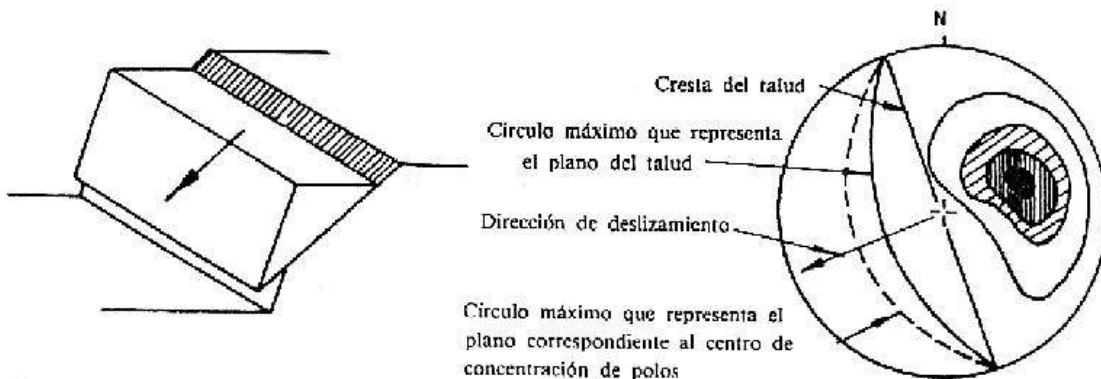
Si se representa el plano del talud y las discontinuidades en una estereofalsilla equiareal o de Schmidt se puede tener una rotura de tipo planar cuando existe una familia de discontinuidades de rumbo similar al del talud y buzamiento menor que éste.

$$\psi_t > \psi_p$$

donde:

ψ_t = ángulo de buzamiento del talud.

ψ_p = ángulo de buzamiento del plano de rotura.



2.2. Análisis de estabilidad en rotura planar

En el caso de rotura planar el factor de seguridad FS se obtiene de forma directa como cociente entre las fuerzas que tienden a producir el movimiento y las fuerzas resistentes del terreno que se oponen al mismo, proyectadas todas según la dirección del plano de rotura. Al calcular FS de esta manera, se supone implícitamente constante a lo largo de toda la superficie de rotura, lo cual se acepta a pesar de no ser estrictamente cierto.

En el caso más general (ver figura), se considera que el plano de deslizamiento se encuentra limitado en su parte superior por una grieta de tracción, que se puede suponer plana, total o parcialmente llena de agua. En el plano de rotura aparecen unas presiones intersticiales que dependen de la situación de la línea de saturación y de las características del terreno. Sobre la masa deslizante puede considerarse

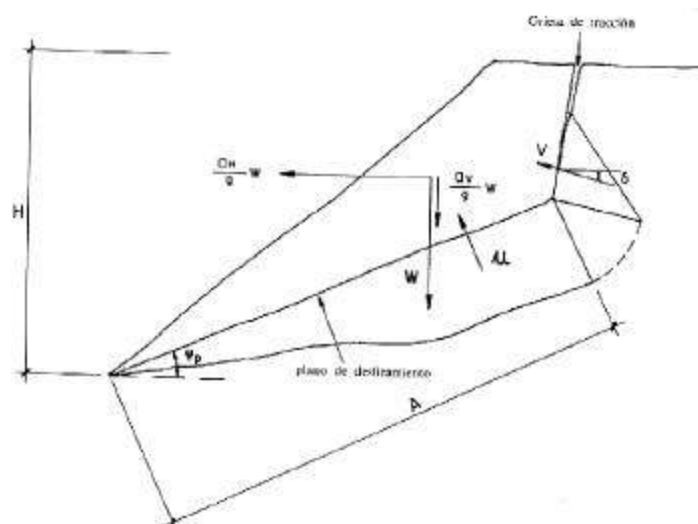
la actuación de un terremoto cuyo efecto se asimila a una aceleración vertical \mathbf{a}_v y una aceleración horizontal \mathbf{a}_H .

En este caso el factor de seguridad es:

$$FS = \frac{c' A + \left\{ W \left[\left(1 + \frac{a_v}{g} \right) \cos \gamma p - \frac{a_H}{g} \sin \gamma p \right] - U - V \sin(\gamma p + d) \right\} \operatorname{tg} f}{W \left[\left(1 + \frac{a_v}{g} \right) \sin \gamma p + \frac{a_H}{g} \cos \gamma p \right] + V \cos(\gamma p + d)}$$

Donde:

- c' = cohesión efectiva en la superficie de deslizamiento.
- f = ángulo de rozamiento interno efectivo en la superficie de deslizamiento.
- A = área de la superficie de deslizamiento, supuesta de ancho unidad.
- W = peso de la masa deslizante, supuesta de ancho unidad.
- γp = ángulo que forma el plano de deslizamiento con la horizontal.
- U = resultante de las presiones intersticiales que actúan sobre el plano de deslizamiento.
- δ = ángulo que forma la grieta de tracción con la vertical.
- V = resultante de las presiones intersticiales que actúan sobre la grieta de tracción.
- g = aceleración de la gravedad.

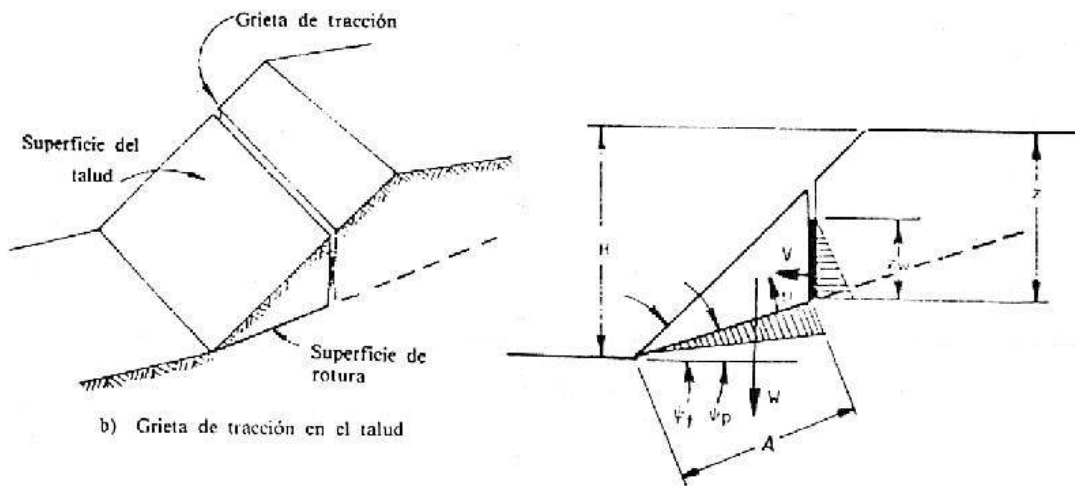
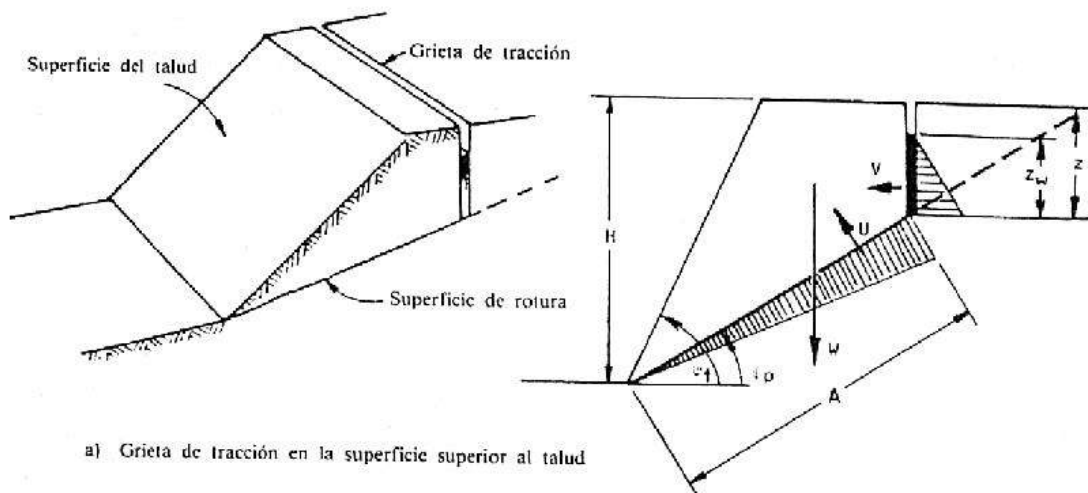


La fórmula es aplicable al caso en el que no exista terremoto, haciendo $\mathbf{a}_v = \mathbf{a}_H = 0$, y al caso en que se considere el terreno seco haciendo $U = V = 0$.

Hoek y Bray (1977) han desarrollado unos ábacos que facilitan el cálculo del factor de seguridad frente a rotura planar. A continuación se describe el planteamiento desarrollado por ellos.

Se parte de las siguientes simplificaciones:

- El talud a estudiar es un plano de inclinación γt . La superficie que queda por encima del talud es un plano horizontal.
- No se considera el efecto sísmico.
- La grieta de tracción es vertical.
- Se supone una distribución triangular en las presiones intersticiales que actúan sobre la base de la masa deslizando y sobre la grieta de tracción. El valor máximo se da, en ambos casos, en la intersección entre las dos superficies.



Asumiendo estas simplificaciones se obtiene para la ecuación del FS anterior:

	Caso A	Caso B
$A = \frac{H - z}{\text{sen } \gamma p}$	$V = \frac{1}{2} g_w Z^2 w$	
$U = \frac{1}{2} g_w Z w \frac{(H - z)}{\text{sen } \gamma p}$	$W = \frac{1}{2} g H^2 \left[\frac{1 - \left(\frac{z}{H}\right)^2}{\text{tg } \gamma p} - \frac{1}{\text{tg } \gamma t} \right]$	$W = \frac{1}{2} \frac{g H^2 \left(1 - \frac{z}{H}\right)^2 (\text{tg } \gamma t - 1)}{\text{tg } \gamma p}$

Donde:

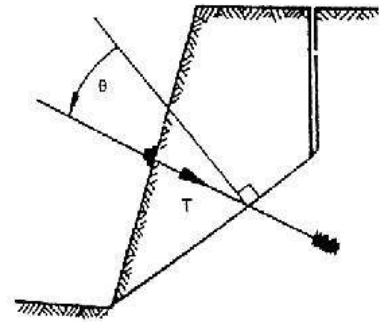
- H = altura del talud.
- z = profundidad de la grieta de tracción, medida respecto del límite superior del talud.
- zw = altura de agua en la grieta de tracción.
- γ = peso específico de la masa deslizante.
- γ_w = peso específico del agua.

Herrera (1995) elaboró un programa informático para la simplificación y rapidez en los cálculos, dicho programa calcula el factor de seguridad de un talud con posibilidad de rotura de tipo planar aplicando las formulaciones de Hoek y Bray (1977). En dicho programa **PLANO** © se pueden considerar taludes con presiones intersticiales, grietas de tracción, existencia o no de terremoto, anclajes necesarios para conseguir determinados factores de seguridad y con qué ángulos de inclinación deben colocarse para conseguir la mayor seguridad.

2.3. Colocación de anclajes

Cuando el factor de seguridad de un talud determinado se considere insuficiente se puede mejorar la estabilidad por medio de la colocación de anclajes con una cierta tensión T, con lo que se consigue aumentar el valor de FS.

El anclaje realiza dos acciones beneficiosas para la estabilidad de la masa deslizante, por una parte su componente horizontal se opone a las fuerzas que tienen al deslizamiento y por otra parte, su componente vertical aumenta la resistencia al corte de la discontinuidad. En la expresión del FS, se traduce en una disminución del denominador y un aumento del numerador.



Considerando la presencia de anclajes la expresión del FS queda como sigue:

$$FS = \frac{c' A + \left\{ W \left[\left(1 + \frac{a_v}{g} \right) \cos \gamma p - \frac{a_H}{g} \sin \gamma p \right] - U - V \sin(\gamma p + d) + T \cos q \right\} \operatorname{tg} f}{W \left[\left(1 + \frac{a_v}{g} \right) \sin \gamma p + \frac{a_H}{g} \cos \gamma p \right] + V \cos(\gamma p + d) - T \sin q}$$

Donde:

- T = tensión de anclaje por unidad de longitud de talud. Será igual al número de anclajes multiplicado por la tensión en cada uno de ellos y dividido por la longitud total de talud.
- θ = ángulo que forma el anclaje con la normal al plano de deslizamiento (el plano está situado en el plano de la sección transversal del talud).

2.4. Ejemplo numérico

Se desea conocer el factor de seguridad de un talud con las siguientes características:

$$H = 42 \text{ metros}$$

$$\psi_t = 75^\circ$$

$$\psi_p = 25^\circ$$

$$z = 16 \text{ metros}$$

$$z_w = 8 \text{ metros}$$

Las características resistentes de la discontinuidad son:

$$c' = 0,5 \text{ T/m}^2$$

$$\phi = 32^\circ$$

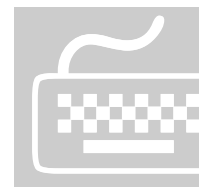
El peso específico del terreno es:

$$\gamma = 2,45 \text{ T/m}^3$$

Se pide:

1. Calcular el FS del talud, considerando la no existencia de terremoto y considerando un terremoto con 0,3 g y 0,2 g de aceleración vertical y horizontal respectivamente.
2. Calcular la tensión de anclaje necesario para conseguir un FS = 1,5.
3. Calcular el ángulo de inclinación del anclaje para que la tensión sea mínima.

2.4.1. Resultados



CALCULO N° :	1
---------------------	----------

BUZAMIENTO PLANO DISCONTINUIDAD:	25
COHESION (T/m ²):	0.5
ANGULO DE ROZAMIENTO:	32
BUZAMIENTO PLANO TALUD:	75
ALTURA DEL TALUD (m):	42
PROFUNDIDAD GRIETA (m):	16
PROFUNDIDAD AGUA EN GRIETA (m):	8
ANGULO GRIETA CON LA HORIZONTAL:	0
ACELERACION VERTICAL DEL TERRENO (m/seg ²):	0
ACELERACION HORIZONTAL DEL TERRENO (m/seg ²):	0
TENSION BULON (T/m/m lineal de Talud):	0
ANGULO BULON CON LA HORIZONTAL:	0
FACTOR DE SEGURIDAD:	1.22
FACTOR DE SEGURIDAD DESEADO:	1.25
TENSION MINIMA:	27.91
ANG. CON LA HORIZONTAL PARA BULON MINIMO:	1.56

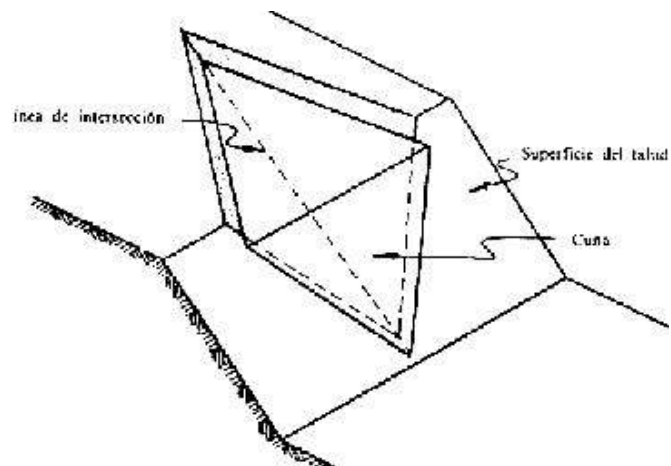
CALCULO N° :	2
---------------------	----------

BUZAMIENTO PLANO DISCONTINUIDAD:	25
COHESION (T/m ²):	0.5
ANGULO DE ROZAMIENTO:	32
BUZAMIENTO PLANO TALUD:	75
ALTURA DEL TALUD (m):	42
PROFUNDIDAD GRIETA (m):	16
PROFUNDIDAD AGUA EN GRIETA (m):	8
ANGULO GRIETA CON LA HORIZONTAL:	0
ACELERACION VERTICAL DEL TERRENO (m/seg ²):	2.943
ACELERACION HORIZONTAL DEL TERRENO (m/seg ²):	1.962
TENSION BULON (T/m/m lineal de Talud):	0
ANGULO BULON CON LA HORIZONTAL:	0
FACTOR DE SEGURIDAD:	0.87
FACTOR DE SEGURIDAD DESEADO:	1.25
TENSION MINIMA:	27.91
ANG. CON LA HORIZONTAL PARA BULON MINIMO:	1.56

3. ROTURA POR CUÑAS

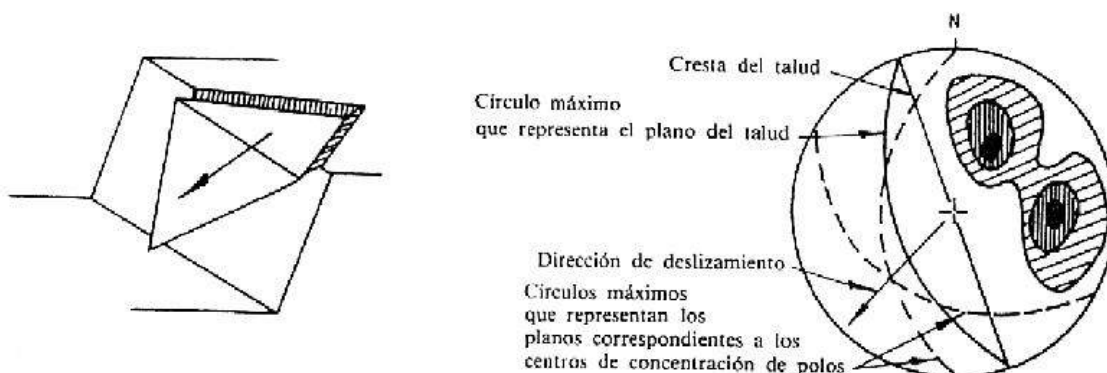
Se denomina rotura por cuña, aquella que se produce a través de dos discontinuidades oblicuamente a la superficie del talud, con la línea de intersección de ambas aflorando en la superficie del mismo y buzando en sentido desfavorable.

Este tipo de rotura se origina preferentemente en macizos rocosos en los que se da una disposición adecuada, en orientación y buzamiento de las diaclasas.



3.1. Geometría de la rotura por cuñas

Si proyectamos el plano del talud y las discontinuidades en una proyección semiesférica equiareal de Schmidt, la disposición típica de los casos en que es posible este tipo de rotura, es como el que aparece en la figura adjunta. En ella se aprecian dos familias de discontinuidades de rumbos oblicuos respecto al del talud, quedando el rumbo de éste comprendido entre los de las familias de discontinuidades.



La dirección de deslizamiento es la de la intersección de las dos familias de discontinuidades y ha de tener menos inclinación que el talud.

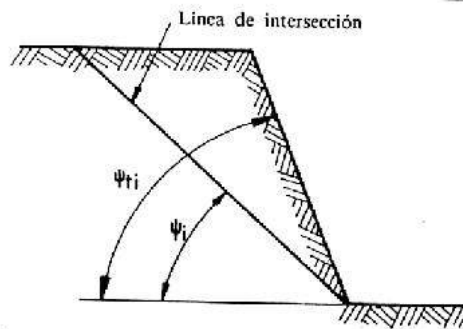
Si se representa una sección vertical del talud por la línea de intersección de los dos planos sobre los que desliza la cuña, la condición geométrica que hace posible el deslizamiento es:

$$\Psi_i < \Psi_{ti}$$

donde:

Ψ_i = ángulo de inclinación de la línea de intersección, cuya dirección es la dirección de deslizamiento.

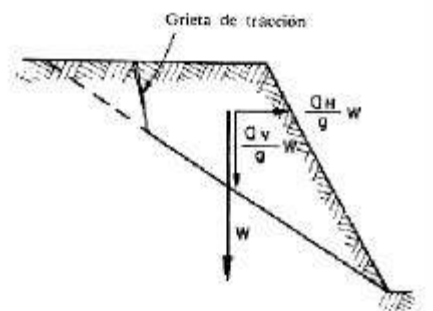
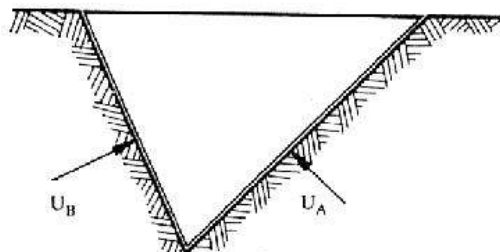
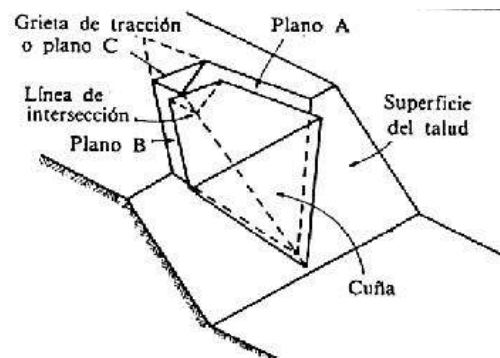
Ψ_{ti} = ángulo de inclinación del talud, medido en la sección vertical indicada, que sólo será igual al talud, Ψ_t si la línea de intersección está contenida en una sección perpendicular al mismo.



3.2. Análisis de estabilidad en rotura por cuñas

La obtención del factor de seguridad es tarea más compleja que en el caso de rotura planar, debido a que el cálculo debe realizarse en tres dimensiones y no en dos como ocurría en la rotura planar.

A continuación se describe el caso más general, definido en el gráfico, en que se aprecia el plano del talud, el plano situado por encima de la cresta del mismo, los planos de deslizamiento A y B y una grieta de tracción plana y denominada plano C. Se considera la presencia de presiones intersticiales sobre los planos A, B y C y la acción de un terremoto cuyo efecto se asimila estáticamente a una aceleración vertical a_v y otra horizontal a_h .



Las fuerzas actuantes son las siguientes:

$U_A, U_B:$	resultantes de presiones intersticiales sobre los planos A y B. Actúan perpendicularmente a esos planos.
$V:$	resultante de presiones intersticiales sobre el plano C. Actúan normalmente sobre dicho plano.
$W_V = W(1 + a_v/g)$	Fuerza vertical debida al peso de la cuña y a la acción del terremoto. En ocasiones el factor de seguridad es más bajo cuando se toma a_v con signo negativo, por lo que se recomienda realizar el cálculo con los dos signos y tomar el FS más pequeño.
$W_H = W(1 + a_h/g)$	Fuerza horizontal debida al peso de la cuña y a la acción del terremoto.
$W:$	Peso de la cuña.
$g:$	aceleración de la gravedad.

Si la geometría de la cuña está definida, las direcciones de todas las fuerzas lo están también. Las fuerzas W_V , W_H y V se descomponen vectorialmente en tres direcciones: la dirección de deslizamiento o dirección de la línea de intersección, y las direcciones normales a los planos A y B.

En la notación que se empleará ahora, el subíndice D indica la componente según la dirección de deslizamiento y los subíndices A y B indican las componentes normales a los planos A y B.

Así por ejemplo,

$$\vec{W}_V = \vec{W}_{VD} + \vec{W}_{VA} + \vec{W}_{VB}$$

El factor de seguridad FS se obtiene como cociente entre las fuerzas resistentes del terreno y las fuerzas que tienden a provocar el deslizamiento.

Se supone despreciable el efecto sobre la estabilidad de la cuña de los momentos de las fuerzas actuantes.

La expresión que define FS es:

$$FS = \frac{c_A A_A + c_B A_B + N_A \operatorname{tg} j_A + N_B \operatorname{tg} j_B}{F_D}$$

Donde:

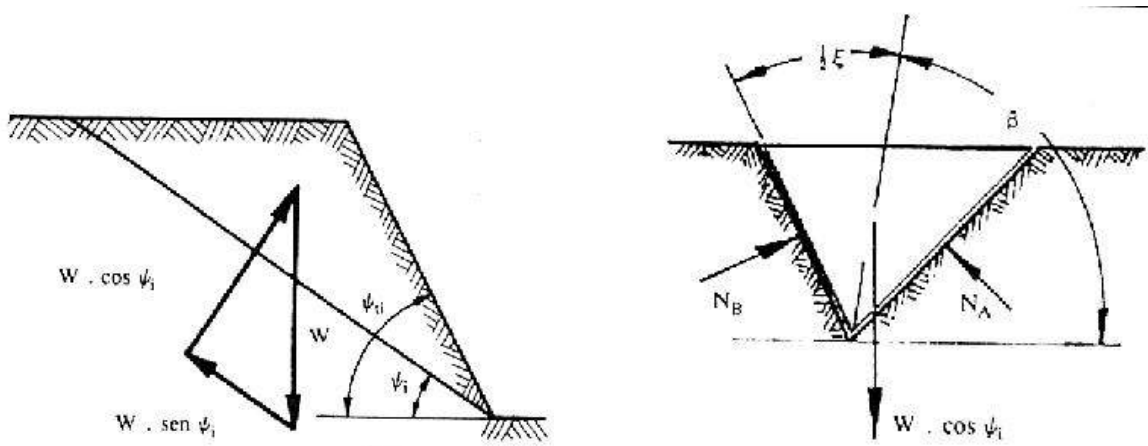
$c_A, c_B:$	cohesión efectiva en las superficies de deslizamiento A y B.
$\varphi_A, \varphi_B:$	ángulo de rozamiento interno efectivo en las superficies de deslizamiento A y B.
$A_A, A_B:$	áreas de las superficies de deslizamiento A y B.
$N_A:$	es la reacción normal efectiva sobre el plano A.

N_B : es la reacción normal efectiva sobre el plano B.

F_D : es la resultante de las componentes de las fuerzas que tienden a producir el deslizamiento.

Hoek y Bray han simplificado, en parte, el cálculo de estabilidad por rotura tipo cuña. Se aplica para las cuñas más sencillas:

- Cuñas sin grietas de tracción.
- Con el mismo ángulo de rozamiento en los dos planos de discontinuidad.
- Con cohesión nula.
- Sin presiones intersticiales.
- Sin efecto sísmico.



Aplicando el equilibrio de fuerzas horizontales y verticales en una sección de la cuña perpendicular a la línea de intersección se obtiene:

$$N_A \operatorname{sen}(\beta - \zeta/2) = N_B \operatorname{sen}(\beta - \zeta/2)$$

$$N_A \operatorname{sen}(\beta - \zeta/2) - N_B \operatorname{sen}(\beta - \zeta/2) = W \cos \psi_i$$

Donde:

ζ : ángulo de apertura de la cuña o ángulo que forman los planos A y B.

β : ángulo que forma con la horizontal la bisectriz de la cuña.

De las dos ecuaciones anteriores se obtiene:

$$N_A + N_B = \frac{W \cos \psi_i \operatorname{sen} b}{\operatorname{sen}(z/2)}$$

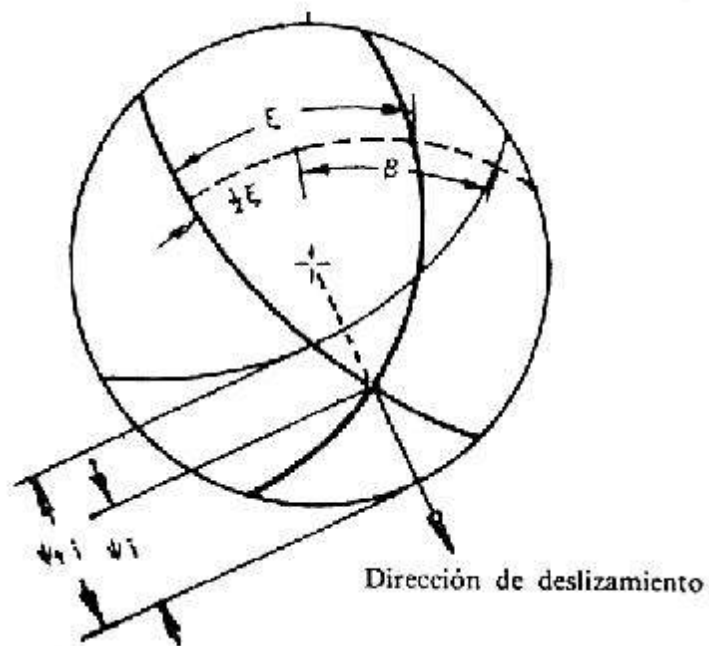
El factor de seguridad FS tiene la expresión:

$$FS = \frac{(N_A + N_B) \operatorname{tg} j}{W \operatorname{sen} \gamma_i}$$

Sustituyendo y simplificando se obtiene:

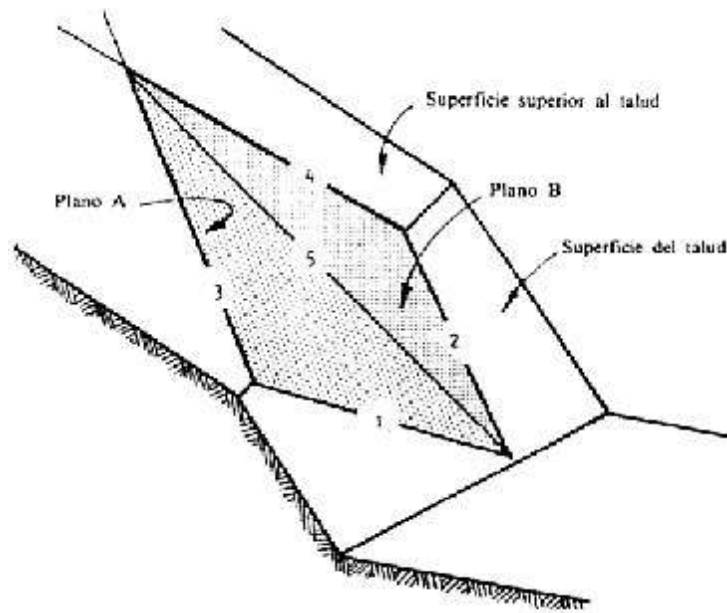
$$FS = \frac{\operatorname{sen} b}{\operatorname{sen}(z/2)} \operatorname{tg} j$$

Los ángulos β y ζ no se pueden medir directamente en el terreno. En la figura siguiente se muestra como medirlos ayudándonos de una falsilla equiareal o de Schmidt.

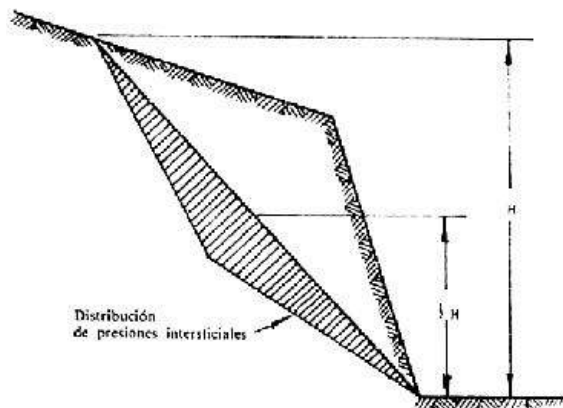


A continuación se recoge el cálculo, algo más complejo, que recoge el análisis de estabilidad de una cuña en el caso supuesto de existencia de cohesiones y ángulos de rozamiento efectivos diferentes en los dos planos de discontinuidad, se consideran las presiones intersticiales y se desprecian las grietas de tracción y los efectos sísmicos derivados de los terremotos.

En la figura siguiente se muestra la representación geométrica del problema.



Se puede apreciar que en este análisis no se impone ninguna restricción a la dirección del plano superior a la cresta del talud. A la hora de considerar el efecto del agua, se considera a la **cuña impermeable**. La infiltración se produce por las líneas 3 y 4 y el drenaje por las líneas 1 y 2. La presión intersticial vale 0 a lo largo de las cuatro líneas mencionadas y alcanza su valor máximo a lo largo de la línea 5 o línea de intersección. La distribución de presiones intersticiales a lo largo de esta línea que presenta en el siguiente gráfico.



Estas condiciones de presión intersticial representan las circunstancias extremas provocadas por unas precipitaciones muy fuertes.

El factor de seguridad FS asumiendo las hipótesis apuntadas tiene la siguiente expresión:

$$FS = \frac{3}{gH} (c_A X + c_B Y) + \left(A - \frac{g^W}{2g} X \right) \operatorname{tg} j_A + \left(B - \frac{g^W}{2g} Y \right) \operatorname{tg} j_B$$

Donde:

- γ : peso específico de la roca.
- γ^W : peso específico del agua.
- H: altura total de la cuña.
- X, Y, A, B: factores adimensionales que dependen de la geometría de la cuña y que se extraen de las siguientes expresiones:

$$X = \frac{\operatorname{sen} q_{24}}{\operatorname{sen} q_{45} \operatorname{cos} q_{2na}} \quad A = \frac{\operatorname{cos} y_a - \operatorname{cos} y_b \operatorname{cos} q_{nanb}}{\operatorname{sen} y_5 \operatorname{sen}^2 q_{nanb}}$$

$$Y = \frac{\operatorname{sen} q_{13}}{\operatorname{sen} q_{35} \operatorname{cos} q_{1nb}} \quad B = \frac{\operatorname{cos} y_b - \operatorname{cos} y_a \operatorname{cos} q_{nanb}}{\operatorname{sen} y_5 \operatorname{sen}^2 q_{nanb}}$$

Donde:

- ψ_a, ψ_b : buzamiento de los planos A y B.
- ψ_5 : inclinación de la recta 5.
- θ_{ij} : ángulo que forman las rectas i y j. Se han llamado na y nb a las rectas perpendiculares a los planos A y B respectivamente.

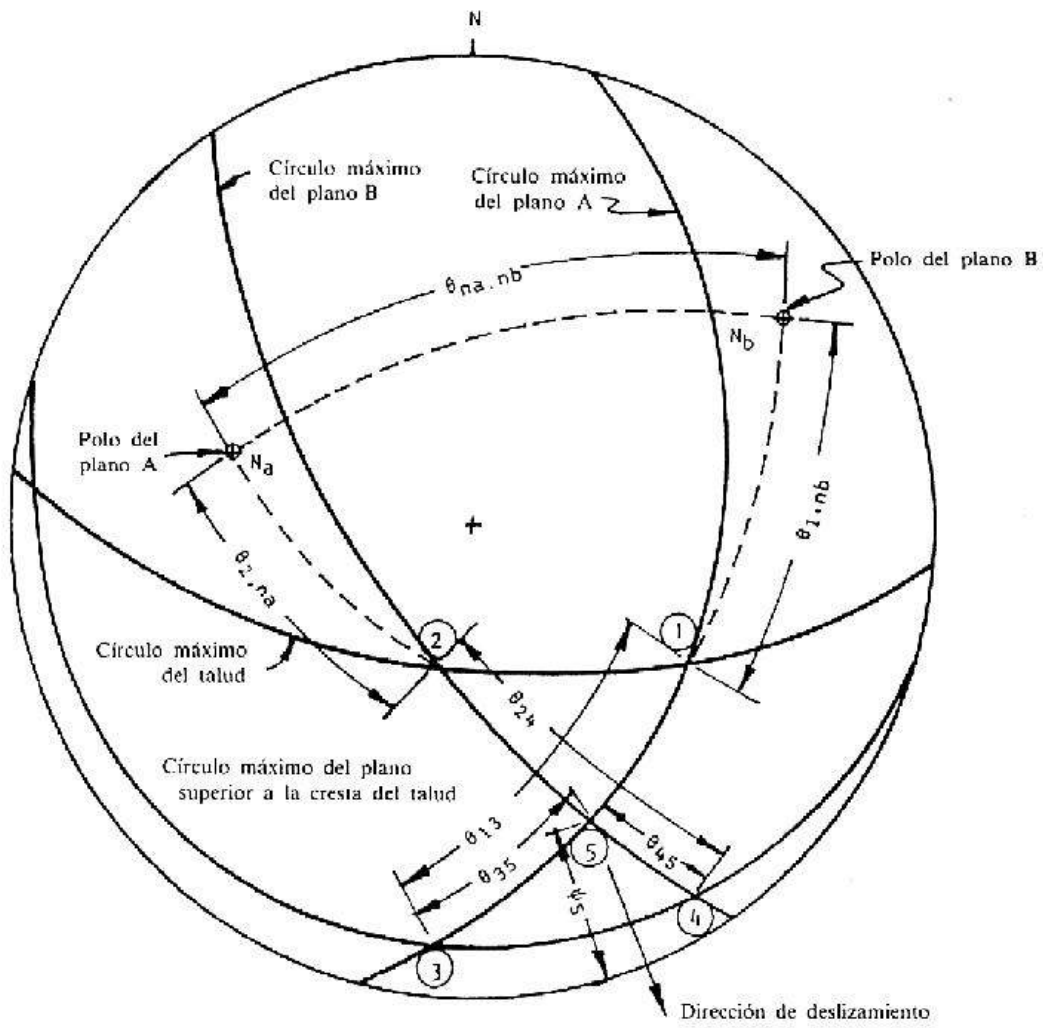
Todos los ángulos necesarios para el cálculo pueden obtenerse con ayuda de una estereofalsilla equiareal o de Schmidt, como muestra el gráfico adjunto.

En el caso de que se considere terreno seco y sin cohesión, la expresión del factor de seguridad queda como sigue:

$$FS = A \operatorname{tg} \phi_a + B \operatorname{tg} \phi_b$$

Hoek y Bray han construido ábacos que proporcionan los coeficientes A y B en función del buzamiento y de las direcciones de buzamiento de los planos de discontinuidad.

Herrera (1995) elaboró un programa informático **WEDGE** © para la simplificación y rapidez en los cálculos, dicho programa calcula el factor de seguridad de un talud con posibilidad de rotura de tipo cuña aplicando las formulaciones de Hoek y Bray (1977).



3.3. Ejemplo numérico

Se desea conocer el factor de seguridad de un talud con posibilidades de rotura por cuña con las siguientes características:

$H = 13$ metros

Dirección de buzamiento y buzamiento plano A = $100/63^\circ$

Dirección de buzamiento y buzamiento plano B = $212/80^\circ$

Dirección de buzamiento y buzamiento talud = $165/65^\circ$

Las características resistentes de las discontinuidades son:

$c'A = 2,2 \text{ T/m}^2$

$\phi_a = 28^\circ$

$c'B = 0 \text{ T/m}^2$

$\phi_b = 28^\circ$

El peso específico del terreno es:

$\gamma = 2,75 \text{ T/m}^3$

Se pide:

1. Calcular el factor de seguridad de la cuña en las siguientes condiciones:
 - considerando cohesión, fricción y presencia de agua.
 - considerando cohesión y fricción.
 - considerando únicamente fricción.

3.3.1. Resultados

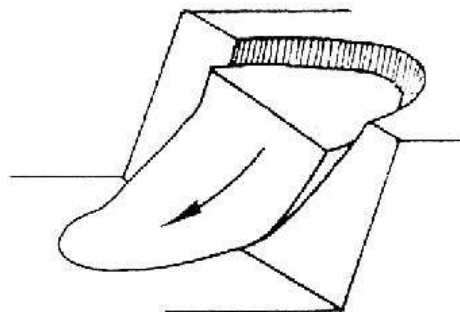
CALCULO N°:	1
DIR. BUZAMIENTO PLANO A DE DISCONTINUIDAD:	100
BUZAMIENTO PLANO A DE DISCONTINUIDAD:	63
COHESION PLANO A (T/m ²):	2.2
ANGULO DE ROZAMIENTO PLANO A:	28
DIR. BUZAMIENTO PLANO B DE DISCONTINUIDAD:	212
BUZAMIENTO PLANO B DE DISCONTINUIDAD:	80
COHESION PLANO B (T/m ²):	0
ANGULO DE ROZAMIENTO PLANO B:	28
DIR. BUZAMIENTO PLANO DE TALUD:	165
BUZAMIENTO PLANO TALUD:	65
ALTURA DE LA CUÑA (m):	13
DENSIDAD (T/m ³):	2.75
DIR. BUZAMIENTO CUÑA:	137.85
INMERSION DE LA CUÑA:	57.16
F.S.(cohesión+fricción+agua):	1.08
F.S.(cohesión+fricción):	2.33
F.S.(fricción):	0.52

4. ROTURAS CIRCULARES Y CURVAS

Se llama *rotura circular* a aquella en la que la superficie de deslizamiento es asimilable a una superficie cilíndrica cuya sección transversal se asemeja a un arco de círculo.

Este tipo de rotura se suele producir en terrenos homogéneos, ya sea suelos o rocas altamente fracturadas, sin direcciones preferenciales de deslizamiento, en los que además ha de cumplirse la condición de que el tamaño de las partículas de suelo o roca sea muy pequeño en comparación con el tamaño del talud.

El método más utilizado para resolver el cálculo de estabilidad por rotura circular es el de las *dovelas o rebanadas*, que es bastante laborioso, por lo que se suele realizar ayudándose de programas de ordenador.



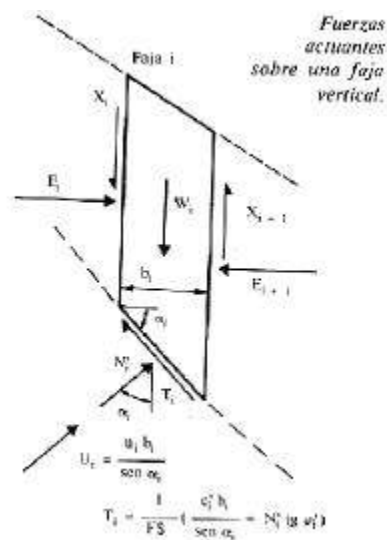
A continuación se revisan algunos métodos de cálculo.

4.1. Método simplificado de BISHOP

El método de BISHOP supone la superficie de deslizamiento *circular*. Como se indicó en el capítulo 1, es un método de cálculo por *dovelas o rebanadas*. Se supone la masa deslizante dividida en fajas verticales. En la figura se recogen las fuerzas actuantes sobre una de esas fajas.

Estableciendo el *equilibrio de momentos* de toda la masa deslizante respecto al centro del círculo de deslizamiento y despejando FS se obtiene:

$$FS = \frac{1}{\sum_{i=1}^n W_i \operatorname{sen} \alpha_i} \sum_{i=1}^n \left[c_i \frac{b_i}{\operatorname{sen} \alpha_i} + N_i \operatorname{tg} j_i \right]$$



De las ecuaciones de equilibrio de fuerzas verticales de cada rebanada se puede despejar los N_i y sustituyendo en la ecuación anterior se obtiene:

$$FS = \frac{1}{\sum_{i=1}^n W_i \operatorname{sen} a_i} \left\{ \sum_{i=1}^n [c_i b_i + \operatorname{tg} j_i (W_i - u_i b_i + X_i - X_{i+1})] \frac{\sec a_i}{1 + \frac{\operatorname{tg} j_i \operatorname{tg} a_i}{FS}} \right\}$$

En el método simplificado de Bishop se supone que se cumple:

$$\sum_{i=1}^n \frac{(X_i - X_{i+1}) \operatorname{tg} j_i \sec a_i}{1 + \frac{\operatorname{tg} j_i \operatorname{tg} a_i}{FS}} = 0$$

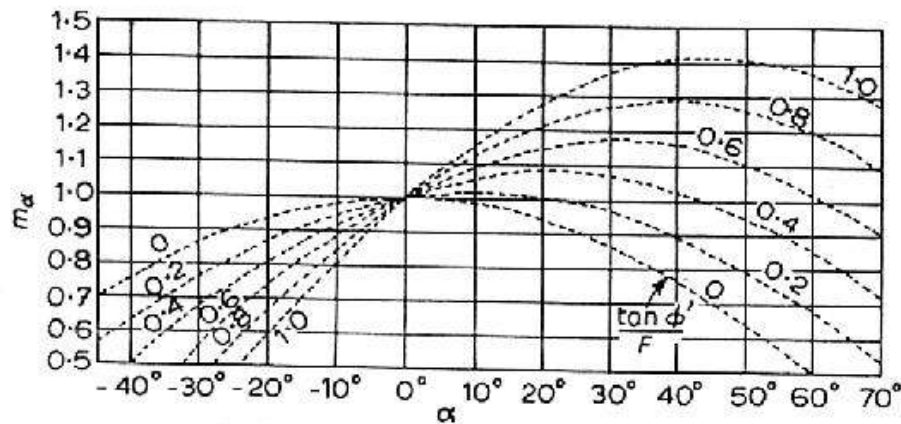
Con esta simplificación la expresión queda:

$$FS = \frac{1}{\sum_{i=1}^n W_i \operatorname{sen} a_i} \sum_{i=1}^n \left\{ [c_i b_i + \operatorname{tg} j_i (W_i - u_i b_i)] \frac{\sec a_i}{1 + \frac{\operatorname{tg} j_i \operatorname{tg} a_i}{FS}} \right\}$$

Como FS aparece de modo implícito ha de obtenerse mediante un proceso iterativo que suele converger rápidamente. La simplificación asumida por Bishop, hace que este método no cumpla el equilibrio de fuerzas horizontales.

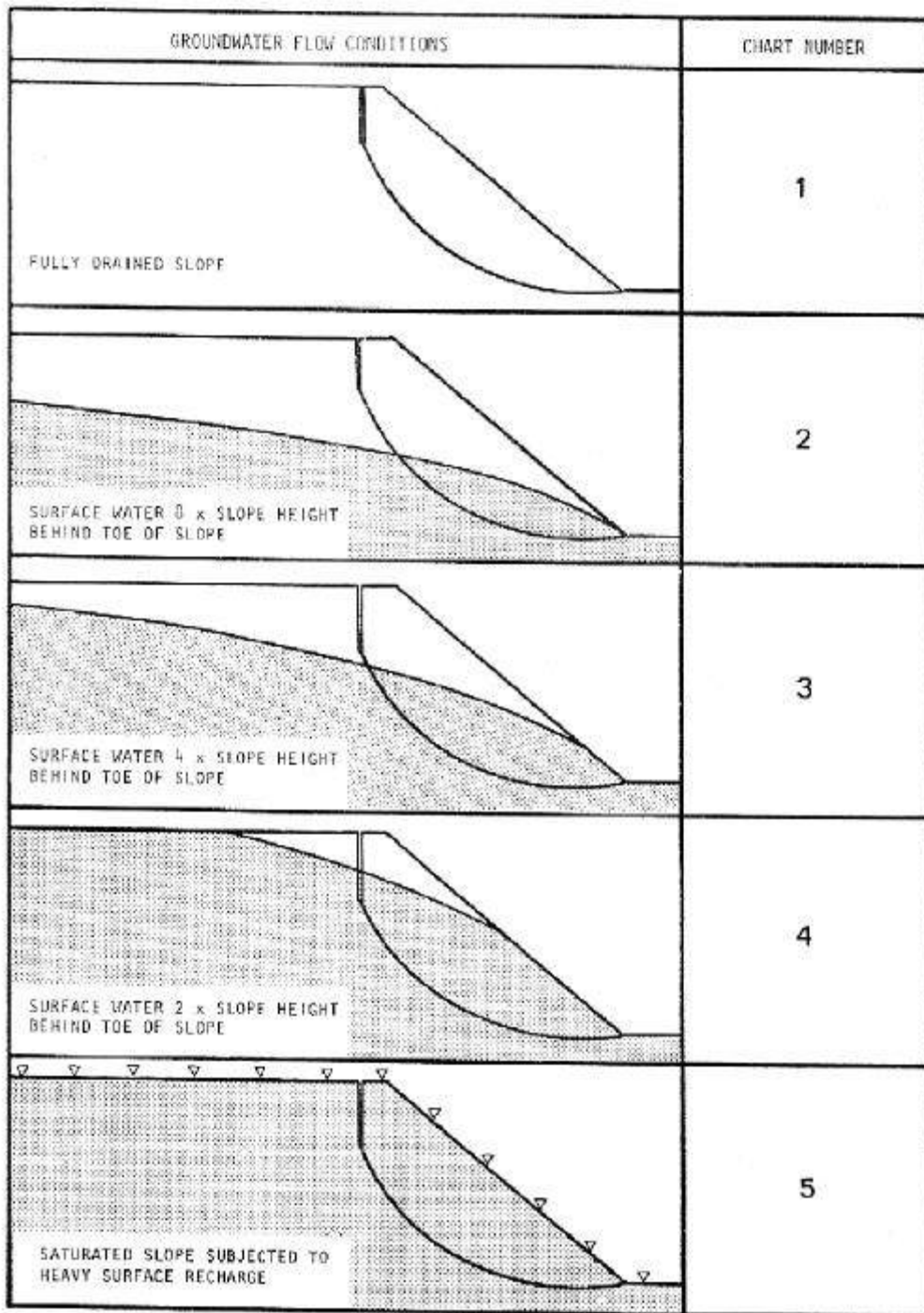
Se define un parámetro M_α , que recoge implícitamente el FS, de esta manera y ayudándose del gráfico siguiente se puede conocer el factor de seguridad de una rotura circular, conociendo el ángulo de rozamiento de la superficie de rotura y el ángulo α .

$$M_\alpha = \frac{\sec a_i}{1 + \frac{\operatorname{tg} j_i \operatorname{tg} a_i}{FS}}$$



4.2. Ábacos de Hoek y Bray

Los ábacos de Hoek y Bray (1977) proporcionan un límite inferior del factor de seguridad, asumiendo que las tensiones normales en la superficie de deslizamiento se concentran en un solo punto. En la construcción de los ábacos se han tenido en cuenta diferentes condiciones de presiones intersticiales debidas a la presencia de un nivel freático en el terreno, que divide el talud en una zona seca y otra saturada. Se cuenta con 5 ábacos, dos de ellos para talud totalmente seco y totalmente saturado y 3 para casos intermedios (diferentes alturas del nivel freático). En el gráfico H indica la altura del talud y X la distancia entre el pie del talud y el punto de corte del nivel freático con la superficie del terreno.



Los ábacos se han construido con las siguientes condiciones:

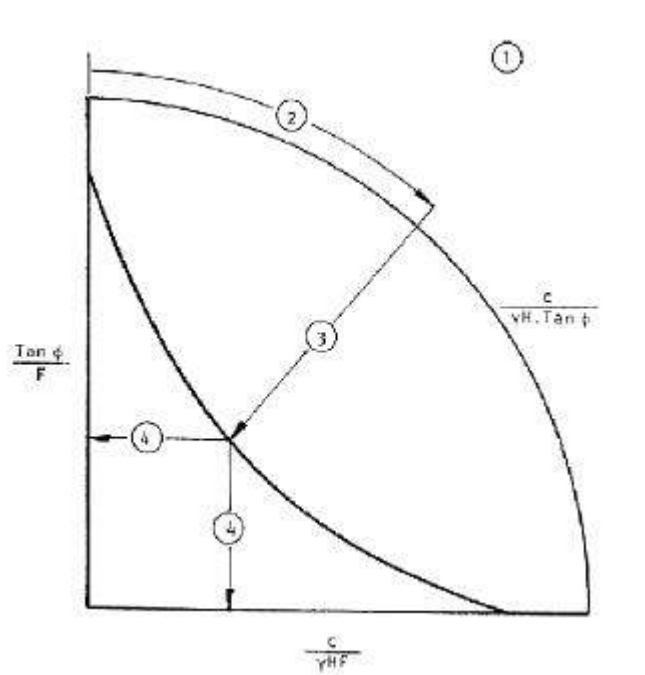
- El material constitutivo del talud se considera homogéneo en toda la extensión del mismo.
- El círculo de rotura se hace pasar siempre por el pie del talud.
- Se considera la existencia de una grieta de tracción que puede estar situada por encima o por debajo de la cresta del talud.

En los ábacos proporcionados se llama:

H	altura del talud
c	cohesión efectiva del terreno
ϕ	ángulo de rozamiento interno efectivo
γ	peso específico del terreno
FS	factor de seguridad

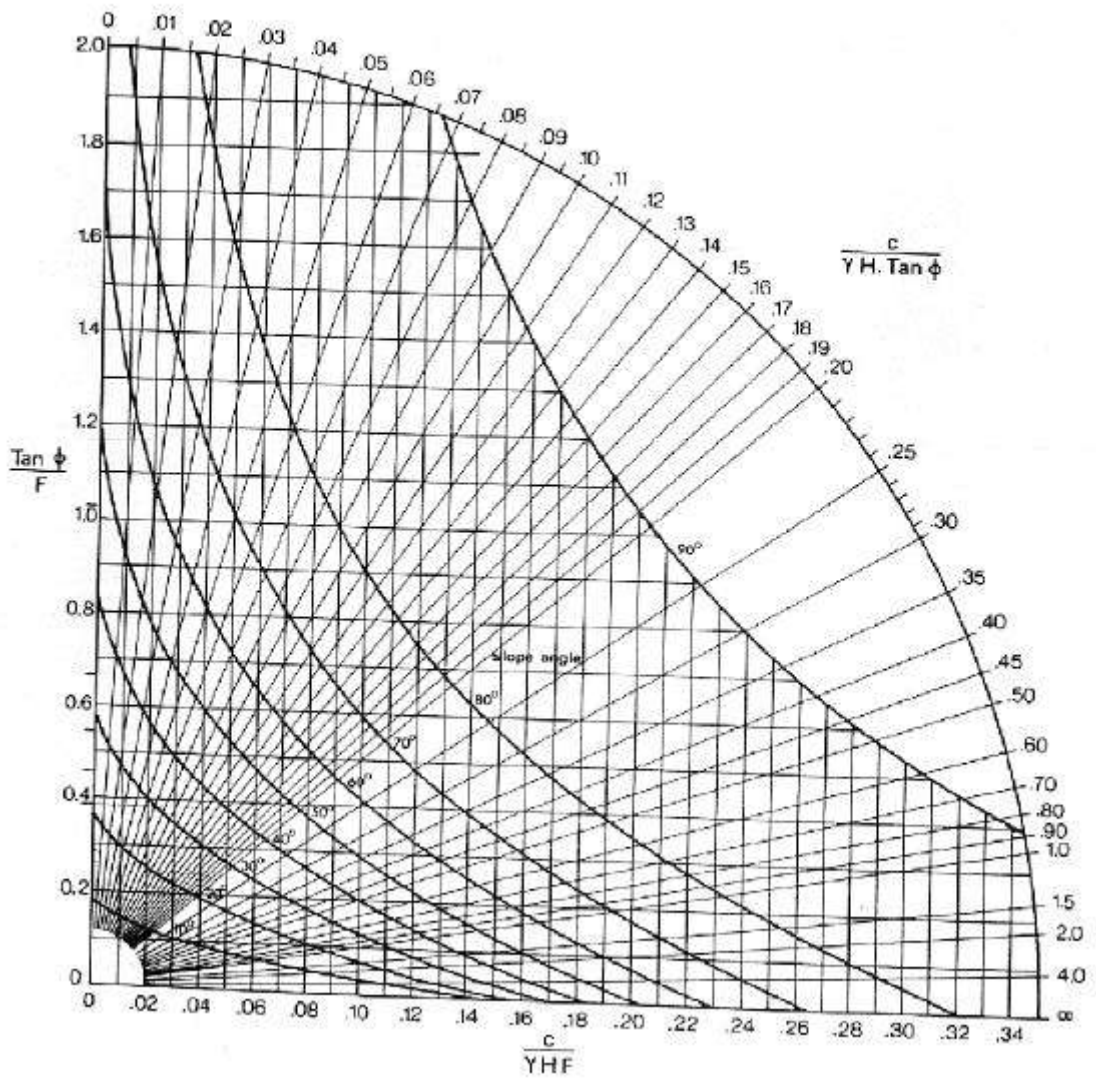
La forma de utilizar los ábacos es la siguiente:

- Se selecciona el ábaco cuyas condiciones de nivel freático se acerquen más a las del talud en cuestión.
- Se calcula el valor del parámetro adimensional $c/(\gamma H t g \phi)$ que nos proporciona una recta radial en el ábaco en cuestión.
- La intersección de dicha recta con la curva correspondiente al ángulo del talud nos da un valor de $t g \phi / F S$ y de $c/(\gamma H F S)$. Cualquiera de los dos nos sirve para obtener el factor de seguridad FS.

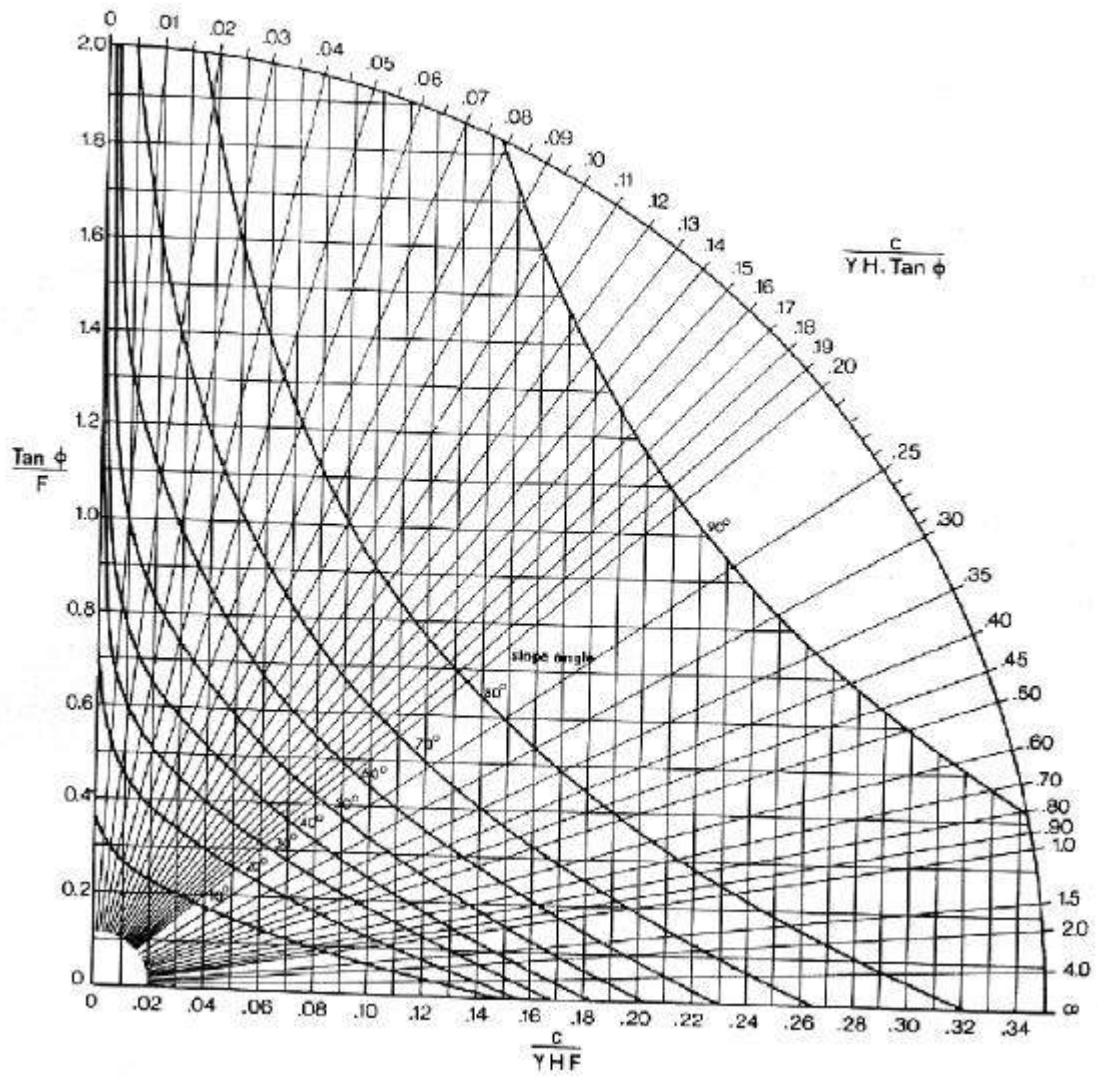


A continuación figuran los cinco ábacos de Hoek y Bray.

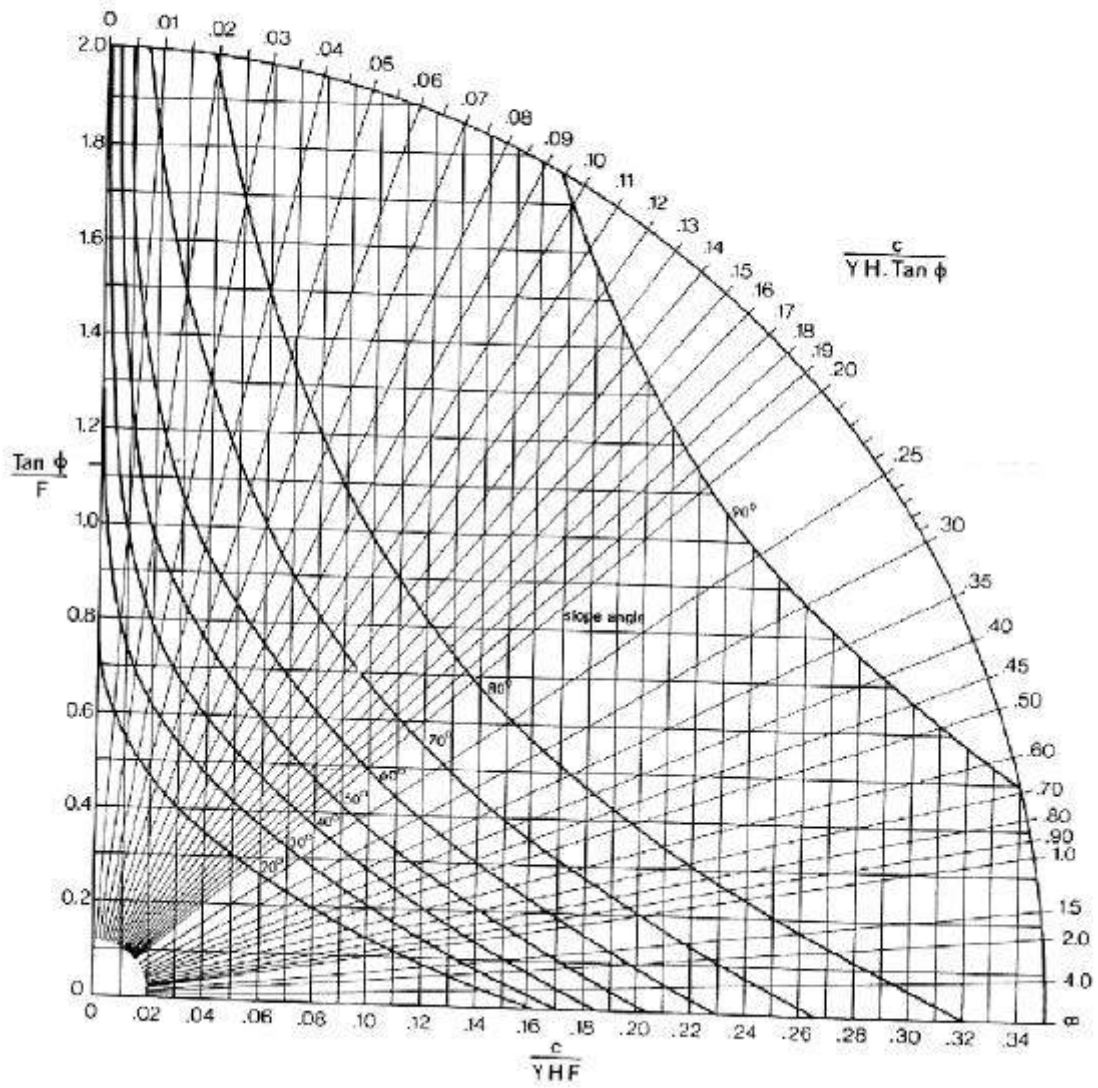
CIRCULAR FAILURE CHART NUMBER 1



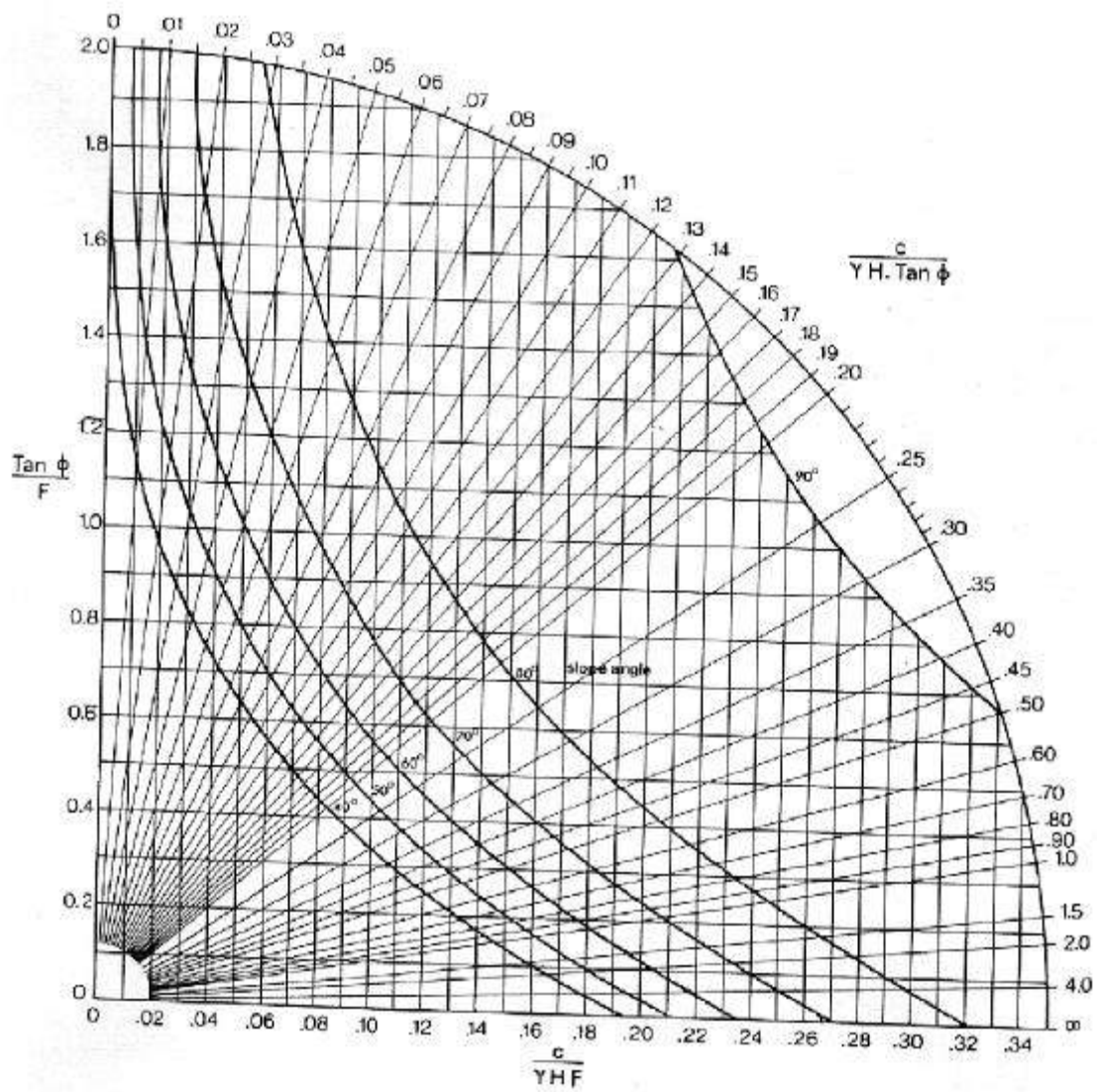
CIRCULAR FAILURE CHART NUMBER 2



CIRCULAR FAILURE CHART NUMBER 3



CIRCULAR FAILURE CHART NUMBER 4



CIRCULAR FAILURE CHART NUMBER 5

