

CURSO DE EXPLOTACIÓN DE CANTERAS

Tema: Parámetros Geotécnicos
y Estabilidad de Taludes

Asociación de Ingenieros de Minas del Ecuador

<http://www.aimecuador.org>

AIME

Expositor:

Ing.MSc. Hernán Gavilanes J.

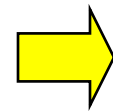
hgavilanesj@yahoo.com

Contenido

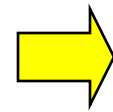
- Terminología.
- Propiedades Índice que influyen en la estabilidad de taludes.
- Influencia de las características estructurales.
- Resistencia al cizallamiento.
- Causas de desestabilización de taludes.
- Modos de rotura.
- Cálculo de la estabilidad.
- Evidencias de Movimiento.
- Medidas remediales.

Terminología

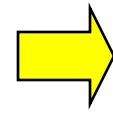
Cantera



Roca apropiada para la construcción.



Enrocados, filtros, obras de contención



Material para fines ornamentales (mármol, granito, etc.).

Se requiere perforación y voladura

Terminología (cont.)

Graveras

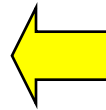


- ☞ Depósitos de grava (material detrítico, $\emptyset > 4$ mm).
- ☞ Cementación \Rightarrow las rocas se denomina *conglomerados*

Terminología (cont.)

Areneros

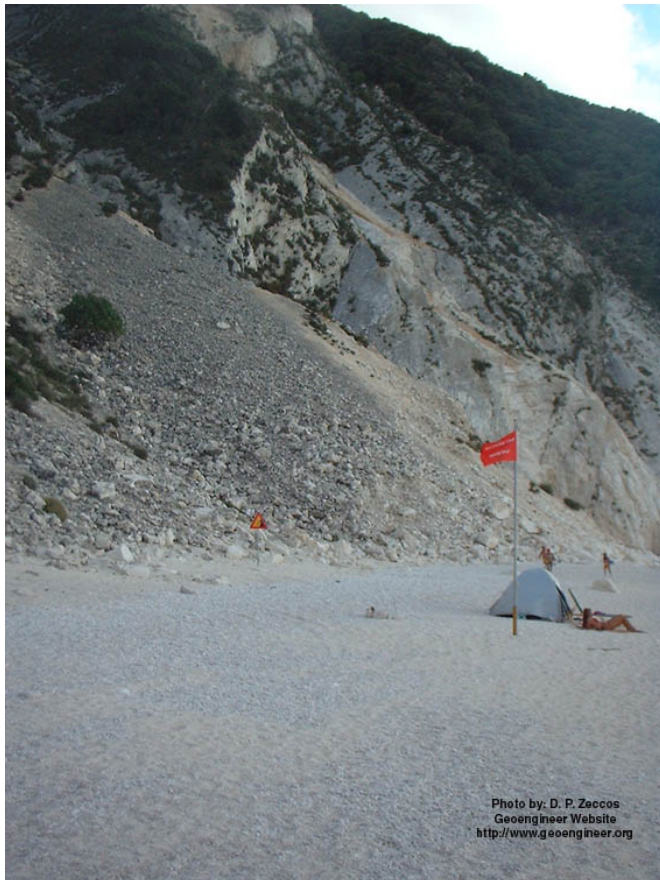
Árido usado para el
hormigón premezclado.



- ☞ Depósitos de arena (material detrítico, $\text{Ø} < 4 \text{ mm}$).
- ☞ Cementación \Rightarrow las rocas se denomina *areniscas*

Terminología (cont.)

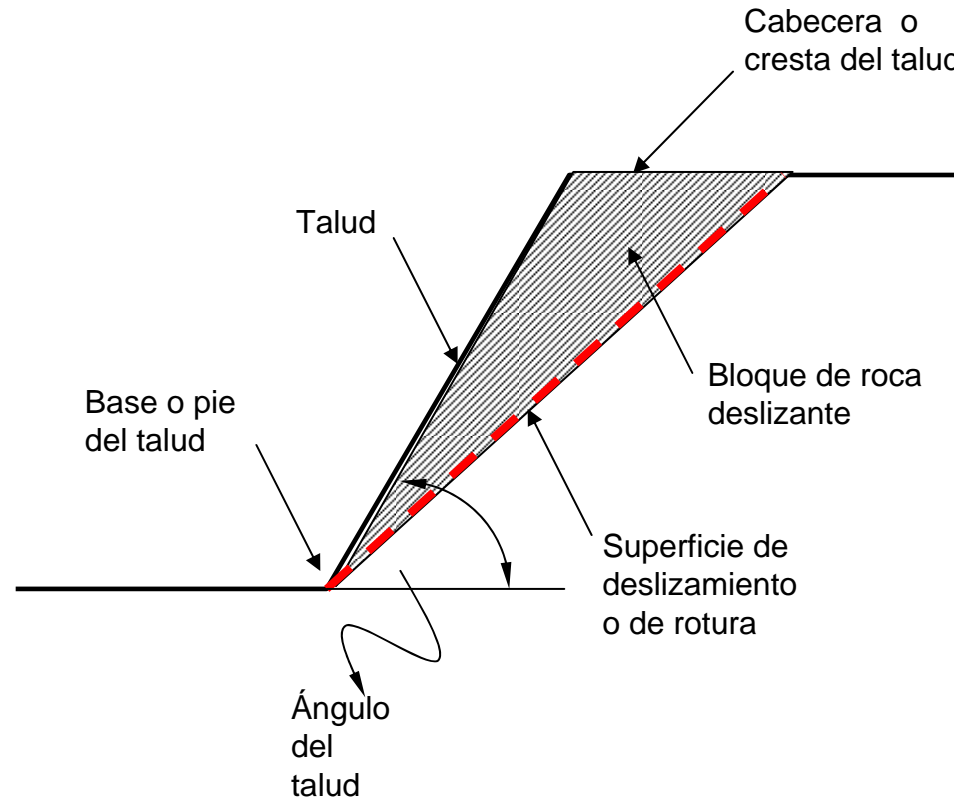
Deslizamiento



- ➡ Término más general y más comúnmente usado para describir los movimientos en los taludes a través de una superficie de rotura determinada.
- ➡ Se pueden producir en suelos, rocas, rellenos artificiales o combinaciones de los mismos.

Terminología (cont.)

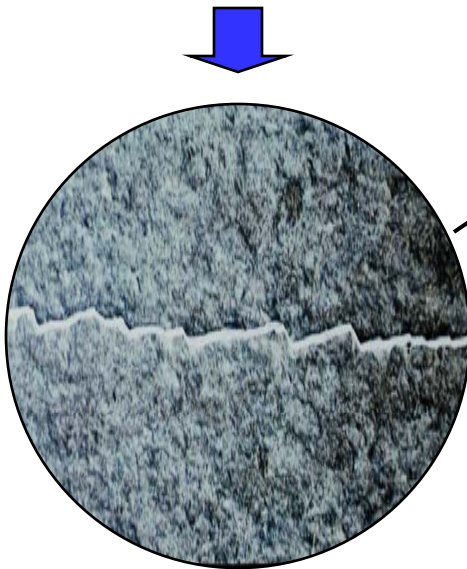
Talud



☞ **Inclinación o pendiente de un terreno que queda al excavar.**

Terminología (cont.)

- ☞ Un medio discontinuo.
- ☞ Bloques de *roca intacta* + *discontinuidades* (fracturas, planos de estratificación, fallas planos de debilidad, etc.).

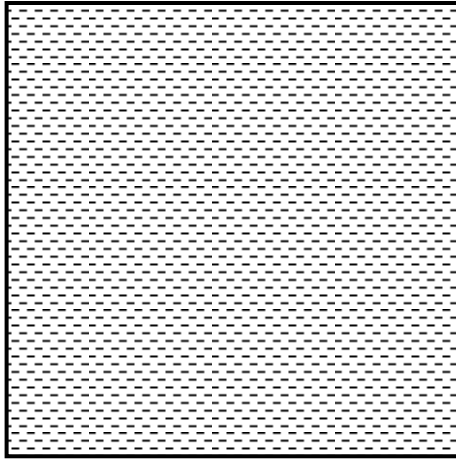


Macizo Rocoso



Terminología (cont.)

Suelo



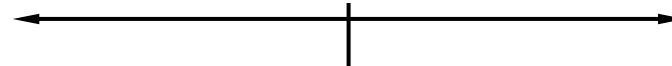
☞ Material meteorizado
suelto o poco consolidado
de origen mineral.

Roca



☞ Material natural resistente,
consolidado que ha de ser
removido mediante voladura.

Resistencia a la compresión simple



Mecánica de Suelos

0,25 MPa

Mecánica de Rocas

Terminología (cont.)

Grado	Descripción	Identificación en campo	Resistencia a la compresión simple (MPa)
S1	Arcilla muy blanda	Penetrada fácilmente varias pulgadas por el puño.	< 0,025
S2	Arcilla blanda	Penetrada fácilmente varias pulgadas por el dedo pulgar.	0,025 – 0,05
S3	Arcilla media	Penetrada varias pulgadas por el dedo pulgar, usando esfuerzo moderado.	0,05 – 0,10
S4	Arcilla semidura	Deja fácilmente hendidura por la acción del dedo pulgar, pero penetra solamente con gran esfuerzo.	0,10 – 0,25
S5	Arcilla dura	Mellada fácilmente por la uña del pulgar.	0,25 – 0,50
S6	Arcilla muy dura	Mellada con dificultad por la uña del pulgar.	0,50 – 1
R0	Roca extremadamente débil	Mellada por la uña del pulgar.	0,25 – 1
R1	Roca muy débil	Se disgrega por golpes fuertes de la punta de la piqueta; puede ser desconchada por una navaja.	1 – 5
R2	Roca débil	Puede ser desconchada por una navaja, con dificultad.	5 – 25
R3	Roca medianamente resistente	No puede ser rayada o desconchada por navaja; la muestra puede ser fracturada por un golpe fuerte de la punta de la piqueta.	25 – 50
R4	Roca fuerte	La muestra requiere más de un golpe de la piqueta para fracturarla.	50 – 100
R5	Roca muy fuerte	La muestra requiere varios golpes de la piqueta para fracturarla.	100 – 250
R6	Roca extremadamente resistente	La muestra puede ser solamente astillada por la piqueta.	> 250

Parámetros Geotécnicos

Propiedades Índice que influyen en la estabilidad de taludes

Porosidad (n)

$$n = \frac{\text{Volumen de vacíos (Vv)}}{\text{Volumen total (Vt)}}$$

Rocas sedimentarias:

- Factor responsable: **poros**
- Puede oscilar entre $0 < n < 90\%$
- n disminuye con la profundidad
- n depende del material cementante.

Propiedades Índice (cont.)

Rocas ígneas y metamórficas:

- Factor responsable: **fisuras**.
- Normalmente, $n < 1-2\%$.
- n aumenta con la meteorización (desgaste) hasta 20% o más.
- Menos porosas: ígneas extrusivas.

n afecta negativamente la propiedades de resistencia.

Propiedades Índice (cont.)

Densidad (ρ) y Peso Específico (γ)

$$\rho = \frac{\text{Masa de la roca (o suelo)} (m)}{\text{Volumen total } (V)}$$

$$\gamma = \frac{\text{Peso total de la roca (o suelo)} (W = mg)}{\text{Volumen total } (V)}$$

- El rango de variabilidad del peso específico de las rocas es mucho mayor que el de los suelos.
- Propiedad importante en Ingeniería de Minas:
 - * Está ligado a la tensión vertical $\sigma_v = \gamma \cdot z$
 - * Esta relacionado al rendimiento de los equipos de excavación.

Propiedades Índice (cont.)

Tipo de roca	Peso específico seco		Porosidad (n) (%)
	(t/m ³)	(kN/m ³)	
Ígneas			
Basalto	2,21 - 2,77	21,66 - 27,15	0,22 - 22,06
Diabasa	2,82 - 2,95	27,64 - 28,91	0,17 - 1,00
Gabro	2,72 - 3,0	26,66 - 29,40	0,00 - 3,57
Granito	2,53 - 2,62	24,79 - 25,68	1,02 - 2,87
Metamórficas			
Cuarcita	2,61 - 2,67	25,58 - 26,17	0,40 - 0,65
Esquisto	2,6 - 2,85	25,48 - 27,93	10,00 - 30,00
Gneis	2,61 - 3,12	25,58 - 30,58	0,32 - 1,16
Mármol	2,51 - 2,86	24,60 - 28,03	0,65 - 0,81
Pizarra	2,71 - 2,78	26,56 - 27,24	1,84 - 3,61
Sedimentarias			
Arenisca	1,91 - 2,58	18,72 - 25,28	1,62 - 26,40
Caliza	2,67 - 2,72	26,17 - 26,66	0,27 - 4,10
Dolomita	2,67 - 2,72	26,17 - 26,66	0,27 - 4,10
Lutita	2,0 - 2,40	19,60 - 23,52	20,00 - 50,00

Propiedades Índice (cont.)

Resistencia a la compresión uniaxial (σ_c)

- Parámetro geotécnico más citado.
- No es una propiedad intrínseca del material.
- Pueden realizarse ensayos en laboratorio sobre muestras cilíndricas con una relación $h/\varnothing > 2$, o también a través del ensayo de carga puntual.

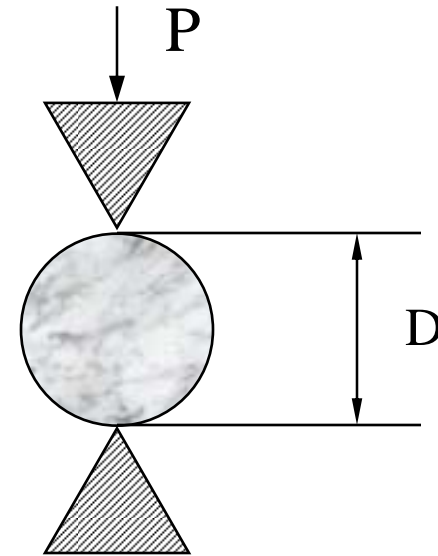
Propiedades Índice (σ_c)

Índice de Resistencia
de Carga Puntual

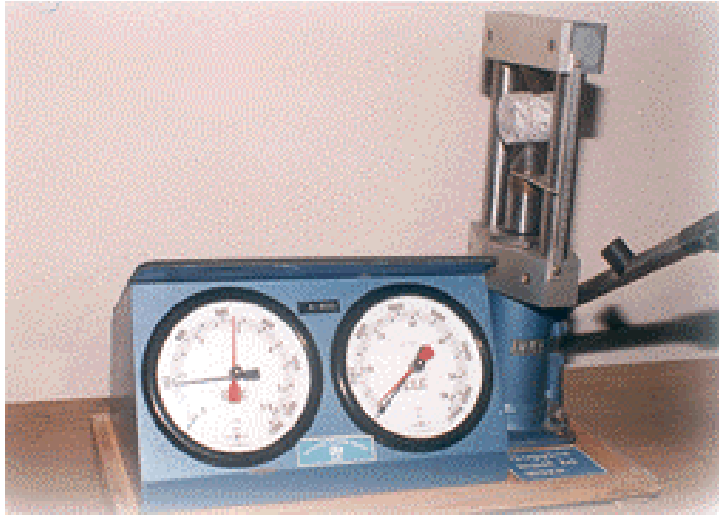
$$I_s = P/D^2$$

P : carga de rotura

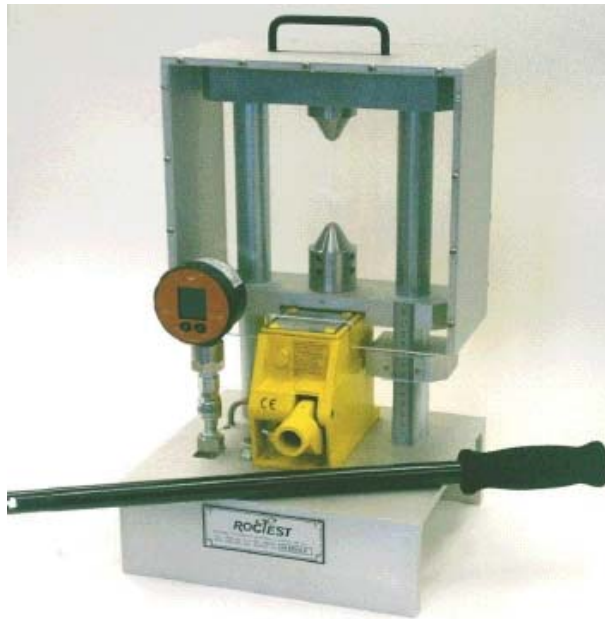
D : distancia entre
las puntas de los conos



- Probetas cilíndricas de 50 mm, con una longitud al menos de 1,4 veces el diámetro: $\sigma_c = 24 I_{s(50)}$
- No es adecuado para rocas blandas.



← Equipos para ensayo de carga puntual
↓ Máquina de compresión uniaxial.



ROCA	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL (MPa)
Andesita	40 - 320
Anfibolita	210 - 520
Anhidrita	42
Arcilla esquistosa	39 - 54
Arenisca	4 - 320
Basalto	15 - 420
Caliza	4 - 330
Corneana	34 - 120
Cuarcita	90 - 470
Dacita	80 - 160
Diabasa	120 - 500
Diorita	86 - 340
Dolomía	36 - 560
Esquisto	12 - 230
Gabro	150 - 280
Gneis	42 - 250
Granito	10 - 300
Granodiorita	100 - 280
Grauwaca	27 - 61
Marga	3 - 197
Mármol	47 - 240
Micaesquisto	20 - 65
Pedernal	120 - 150
Pizarra	27 - 320
Pórfido	140 - 250
Piolita	80 - 160
Sal	21 - 35
Yeso	1 50 - 45

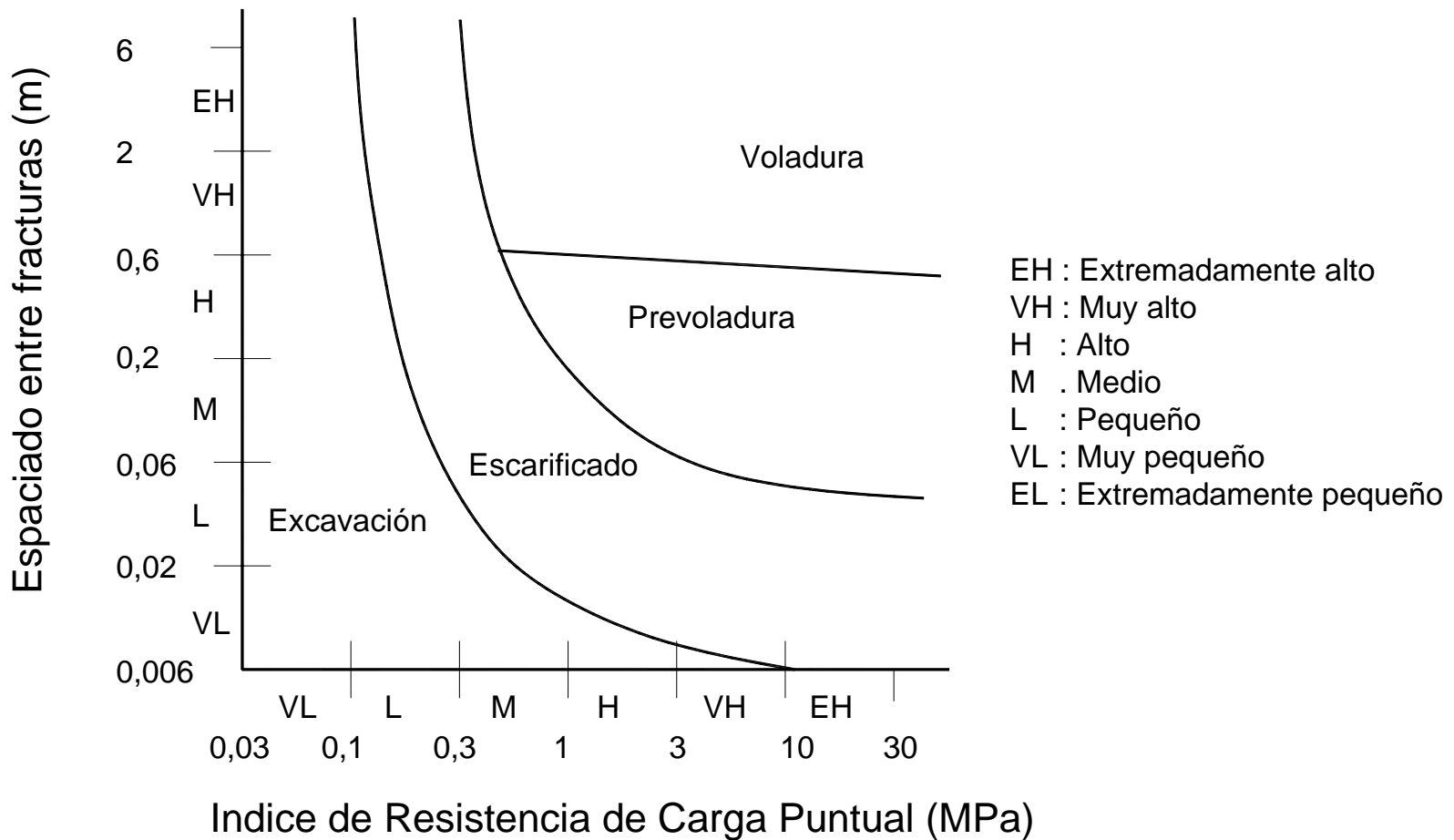
Propiedades Índice (σ_c)

Clasificación ingenieril de la roca de acuerdo a σ_c

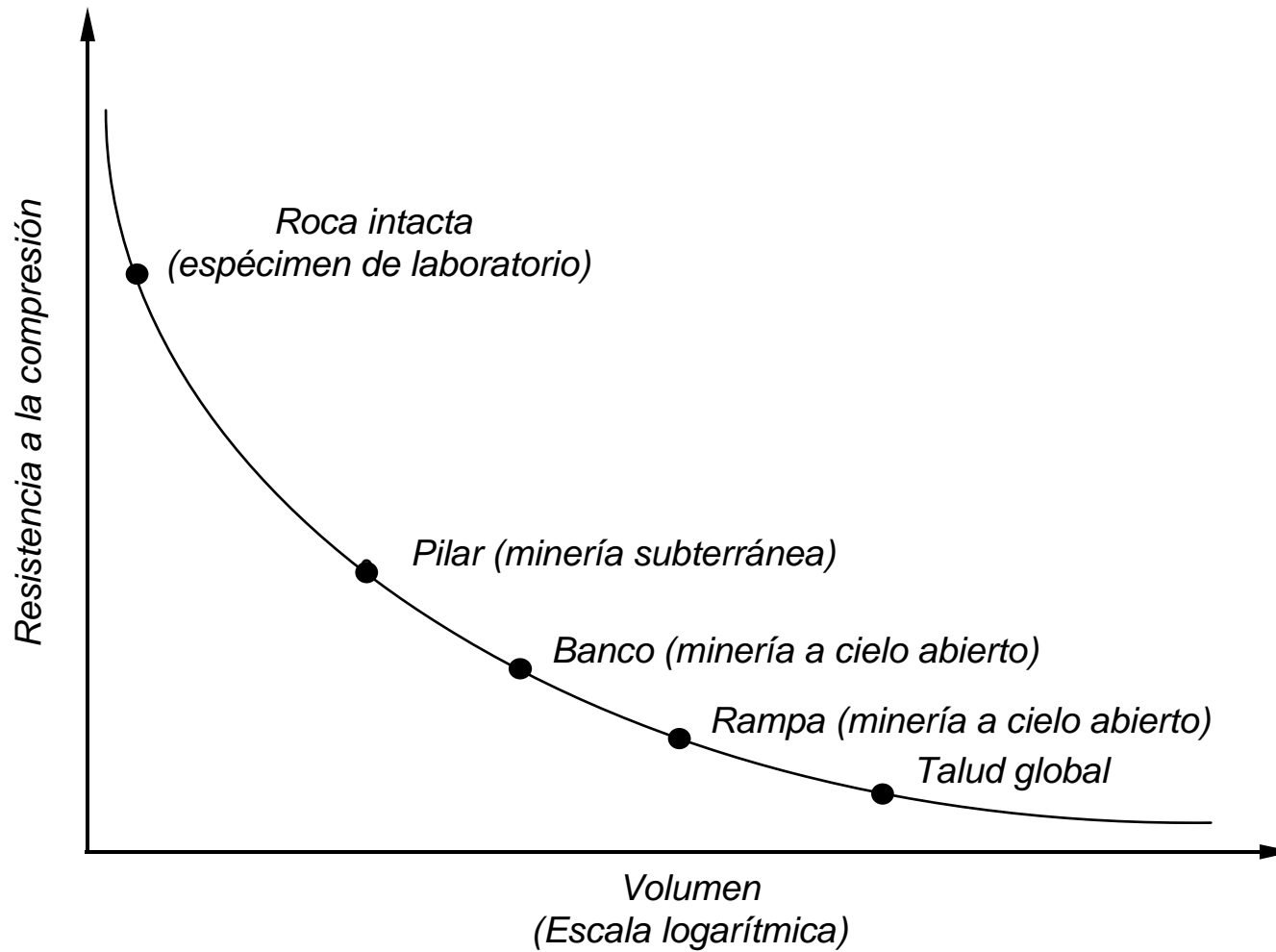
Clase	Descripción	Resistencia a la compresión uniaxial		Tipos de roca
		(PSI)	(MPa)	
A	Resistencia muy alta	> 32.000	≈ 220	Cuarzitas, diabasas. Mayoría de rocas ígneas. Ciertas rocas metamórficas. Areniscas frágilmente cementadas. Lutitas resistentes. Mayoría de las calizas. Ciertas dolomitas.
B	Resistencia alta	16.000 – 32.000	≈110 a ≈220	
C	Resistencia media	8.000 – 16.000	≈55 a ≈110	Algunas lutitas. Areniscas y calizas porosas. Esquistos y rocas metamórficas.
D	Resistencia baja	4.000 – 8.000	≈28 a ≈55	Rocas porosas de baja densidad. Areniscas deleznales. Tufas y lutitas arcillosas. Rocas meteorizadas y químicamente alteradas de cualquier litología.
E	Resistencia muy baja	< 4.000	< 28	

Propiedades Índice (σ_c)

Clasificación de los macizos rocosos para su excavación

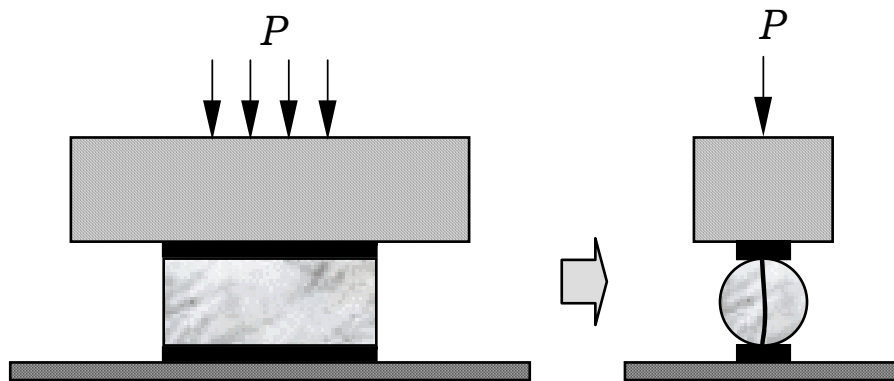


Propiedades Índice (σ_c)



Propiedades Índice

Resistencia a la tracción (Ensayo Brasileiro)



$$\sigma_{t,b} = \frac{2P}{\pi dt}$$

$$\sigma_t \approx \sigma_c / 8$$

- Muestras con una relación altura/diámetro igual a 0,5
- Tensiones compresivas a lo largo de la muestran producen la rotura del cuerpo de prueba, debido a las tensiones de tracción.
- Adaptación de las máquinas para la realización del ensayo de compresión simple.

Capacidad de Carga Portante del terreno



- ☞ Puede llegar a condicionar la selección de maquinaria minera tanto de arranque, como de carga y transporte.

Capacidad de Carga Portante (cont.)

$$q = cN_c + 0,5\gamma BN_\gamma + \gamma DN_q$$

$$N_c = 2\sqrt{N_\phi}(N_\phi + 1)$$

$$N_\gamma = \sqrt{N_\phi}(N_\phi^2 - 1)$$

$$N_q = N_\phi^2$$

$$N_\phi = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)$$

donde:

q : capacidad portante del terreno.

γ : peso específico del terreno.

B : ancho de la sección del terreno.

D : profundidad considerada.

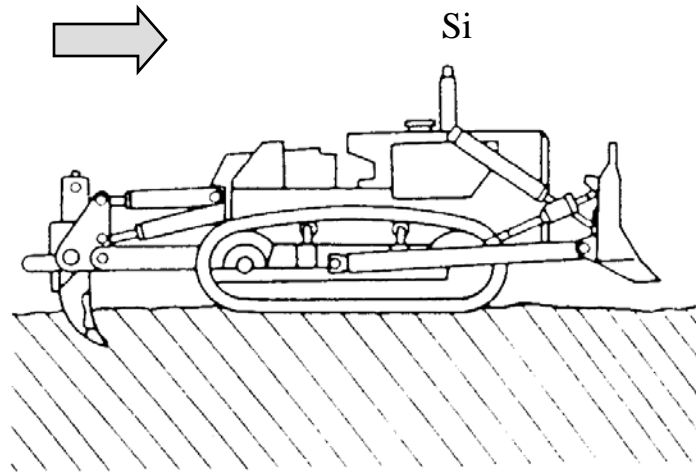
c y ϕ : parámetros de resistencia del terreno.

Capacidad de Carga Portante (cont.)

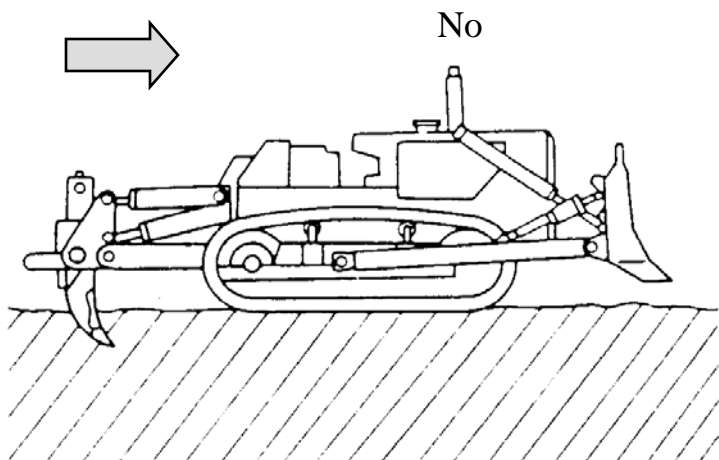
Equipo minero	Presión específica (kPa)
Excavadoras de cables	200 - 350
Excavadoras hidráulicas	
• Retro	30 - 100
• Frontales	80 - 120
Dragalinas	
• Zancas	100 - 250
• Orugas	130 - 300
Rotopalas	60 - 170
• Minadores continuos	100 - 180
Tractores de orugas	
• Pequeños	50 - 75
• Grandes	90 - 160
Apiladoras	30 - 120
Trituradoras móviles	
• Neumáticos	500 - 1000
• Patines	200 - 500
• Orugas	100 - 150
Trituradora semimóvil	
• Carro transportador	200
Volquetes	480 - 620
Perforadoras rotativas	50 - 130

$q > \text{presión específica equipo minero (Pe): } q/Pe > 2$

Influencia de las características estructurales

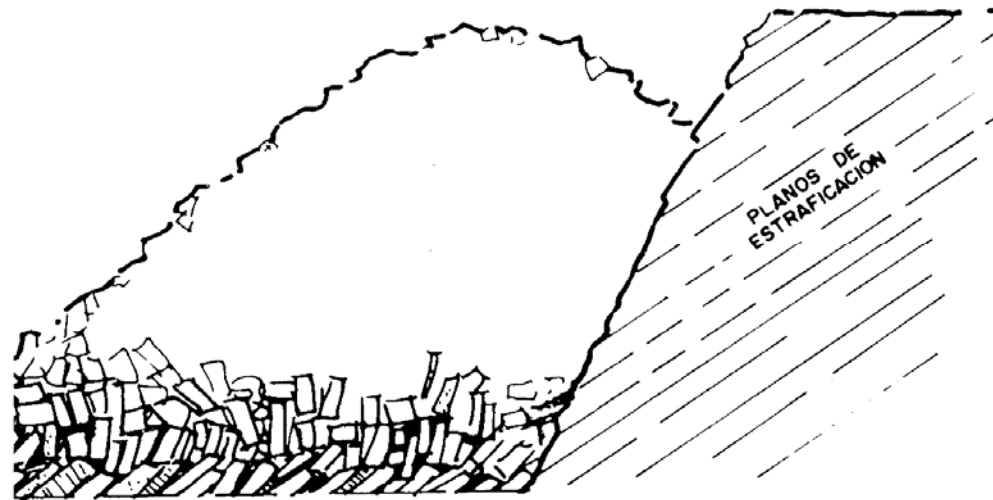


☞ La orientación de las discontinuidades afecta el rendimiento de los equipos de *arranque*.



☞ Debe considerarse la dirección y buzamiento de las discontinuidades.

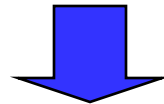
Influencia de las características estructurales (cont.)



- ☞ La configuración estructural del macizo rocoso determina no solo el tamaño de los bloques sino también la forma.

Influencia de las características estructurales (cont.)

- ☞ Datos estructurales de mayor interés en la *excavación*:
- * Espaciado.
 - * Orientación.
 - * Grado de fracturación del macizo rocoso.



Producción de los equipos de arranque y transporte

Grado de fracturación del macizo rocoso	Descripción del tamaño de bloque	Jv (diaclasas/m³)
Masivo	Bloques considerablemente grandes.	< 0,3
Muy ligeramente fracturado	Bloques muy grandes	0,3 - 1
Ligeramente fracturado	Bloques grandes	1 - 3
Moderadamente fracturado	Bloques medianos	3 - 10
Fuertemente fracturado	Bloques pequeños	10 - 30
Considerablemente fracturado	Bloques muy pequeños	30 - 100
Triturado	Bloques considerablemente pequeños.	> 100

$$Jv = \frac{N_1}{L_1} + \frac{N_2}{L_2} + \dots + \frac{N_n}{L_n} \text{ (diaclasas/m}^3\text{)}$$

Influencia de las características estructurales (cont.)



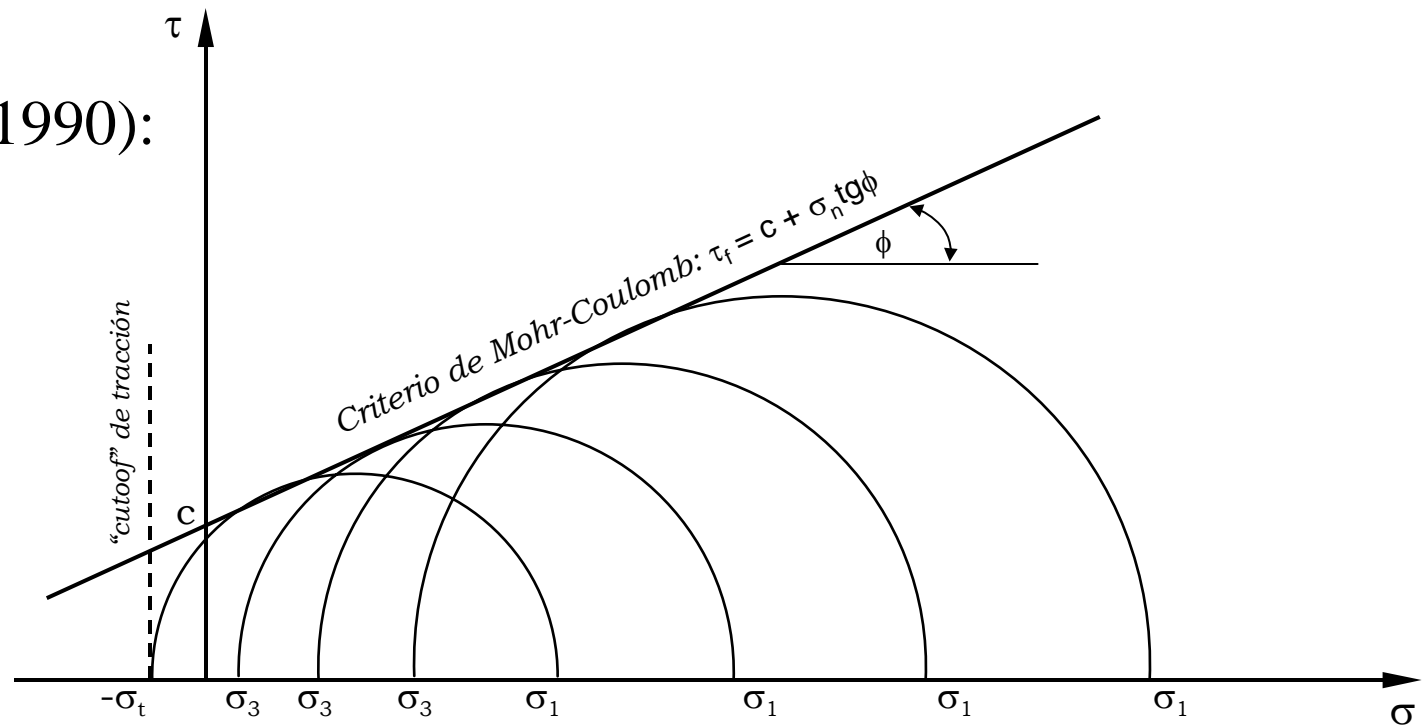
- ☞ Los bloques de roca se mueven más fácilmente en la dirección cinemáticamente posible.

Resistencia al cizallamiento

Criterio de Mohr - Coulomb

Coulomb (1773): $\tau_f = c + \sigma_n \operatorname{tg} \phi$

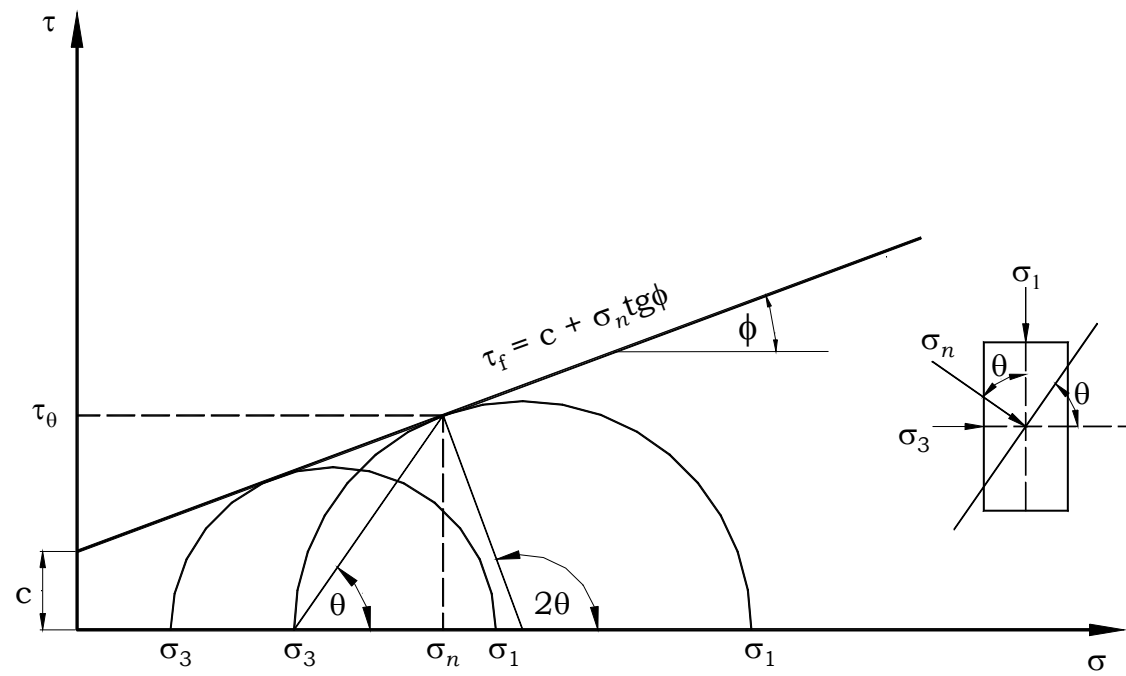
Mohr (1990):



Resistencia (cont.)

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \cos 2\theta$$

$$\tau = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \operatorname{sen} 2\theta$$



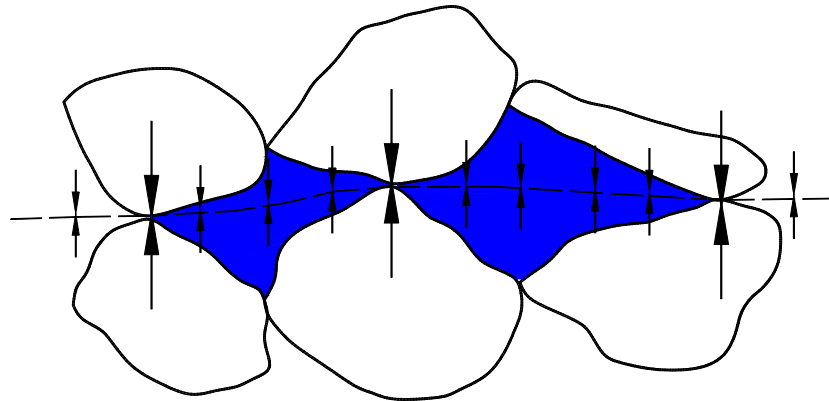
Resistencia (cont.)

Materiales no cohesivos	Ángulo de fricción (ϕ)	Cohesión (kPa)
Arenas	28 - 34	0
Gravas	34 - 37	0
<i>Roca triturada</i>		
Basalto	40 - 50	0
Granito	45 - 50	
Caliza	35 - 40	
Arenisca	35 - 45	

Materiales cohesivos	Ángulo de fricción (ϕ)	Cohesión (kPa)
Arcillas	22 - 27	20 - 50
	27 - 32	30 - 70
<i>Rocas</i>		
Ígneas	35 - 45	5.000 - 55.000
Metamórficas	30 - 40	20.000 - 40.000
Sediment. duras	35 - 45	10.000 - 30.000
Sediment. blandas	25 - 35	10.000 - 20.000

Efecto del agua en la resistencia

- ☞ La presión de agua reduce la estabilidad del talud:
Reduce la resistencia al cizallamiento:



Terzaghi:

$$\sigma = \sigma' + u$$

$$\sigma' = \sigma - u$$

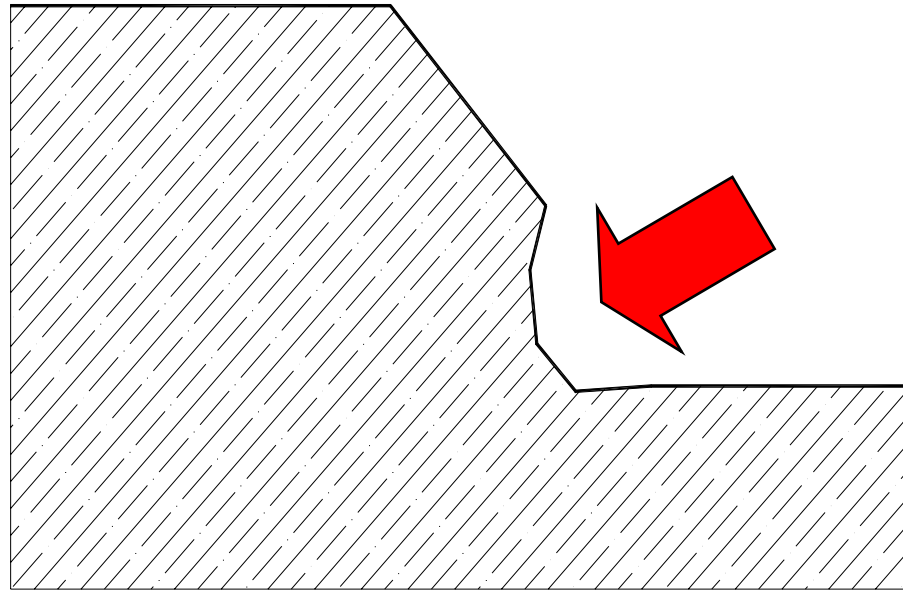
$$\sigma'_n = \sigma_n - u$$

$$\tau = c' + \sigma'_n \tan \phi'$$

Estabilidad de Taludes

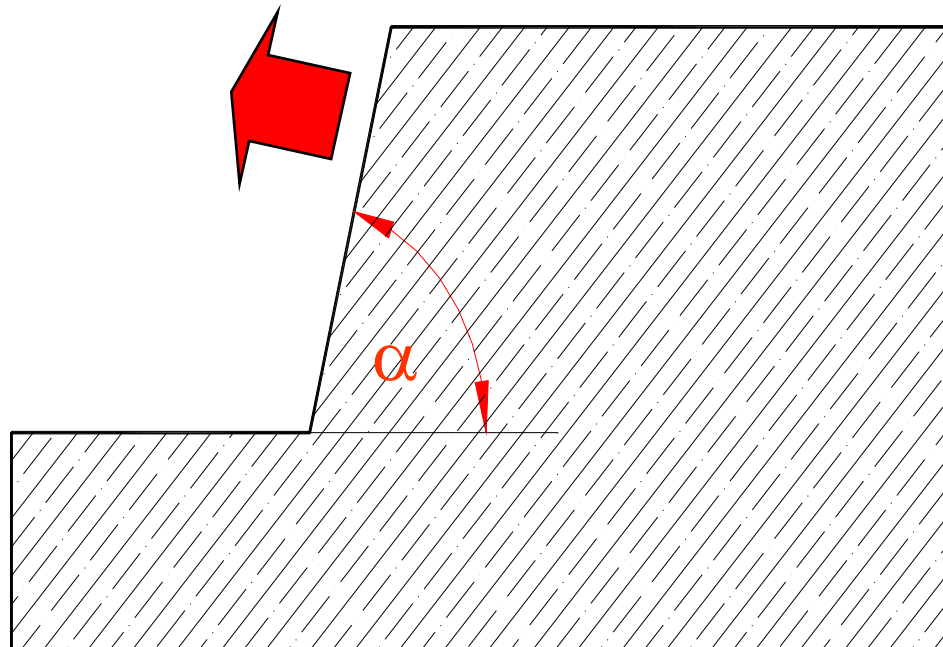
Causas de desestabilización

☞ Sobreexcavación
de la base del talud.



Causas de desestabilización (cont.)

☞ Excavación de taludes escarpados.



Causas de desestabilización (cont.)



Condiciones hidrogeológicas:

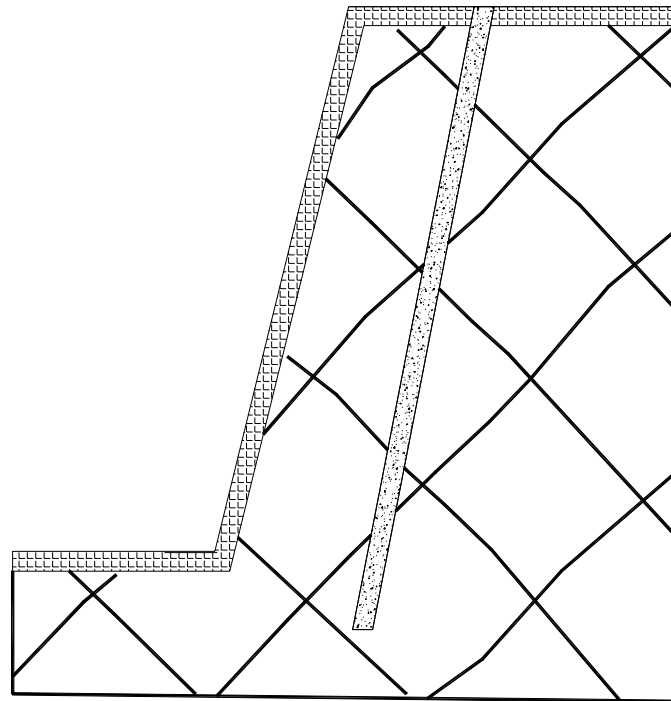
☞ Lluvia.

☞ Presencia de agua subterránea.

- * Aumento del peso del terreno.
- * Procesos de meteorización.
- * Relleno de fisuras y grietas.
- * Cambios en la composición mineralógica.

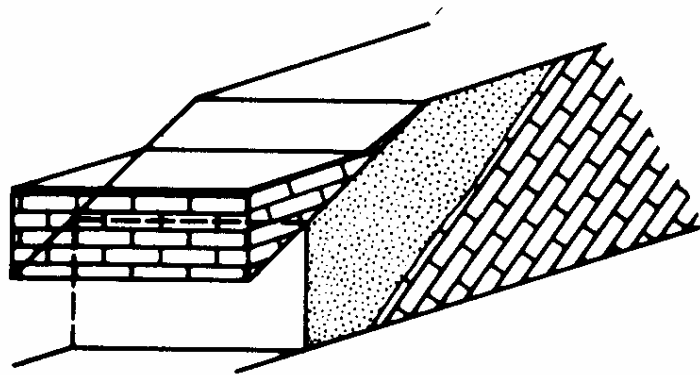
Causas de desestabilización (cont.)

- ☞ Prácticas inadecuadas de perforación y voladura.
- ☞ Presencia de planos de debilidad (fracturas, planos de estratificación, zonas de cizalla, etc).

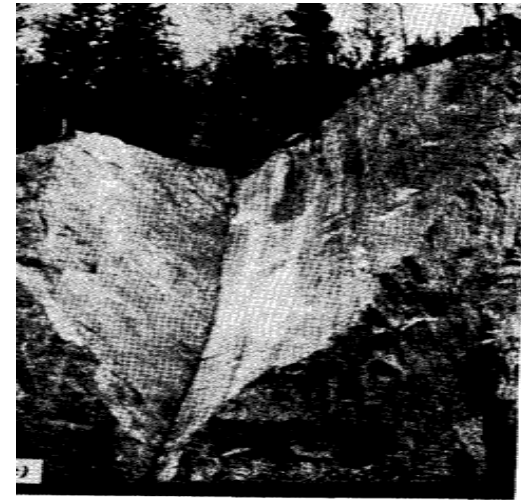


Modos de rotura en taludes rocosos

Planar:



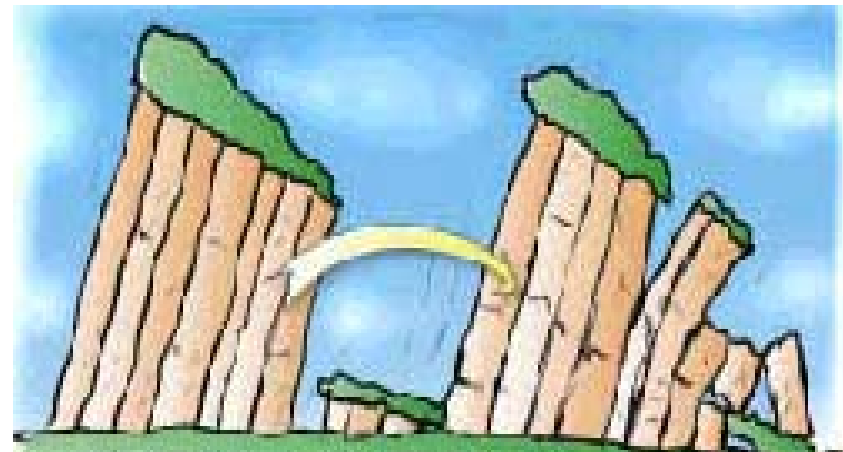
Cuña:



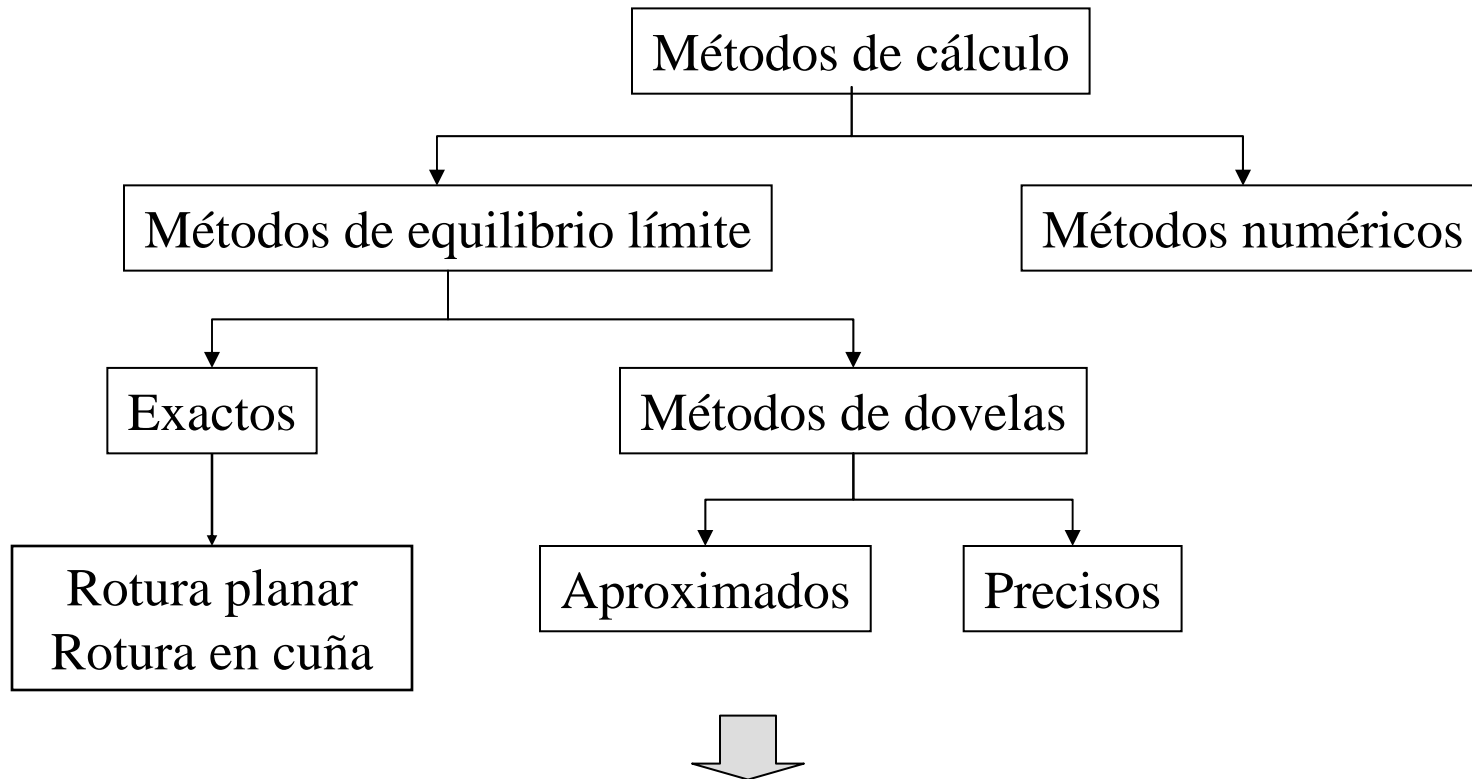
Circular:



Volcamiento:



Cálculo de la estabilidad de taludes



Factor o Coeficiente de Seguridad (FS)

Factor de Seguridad (FS)

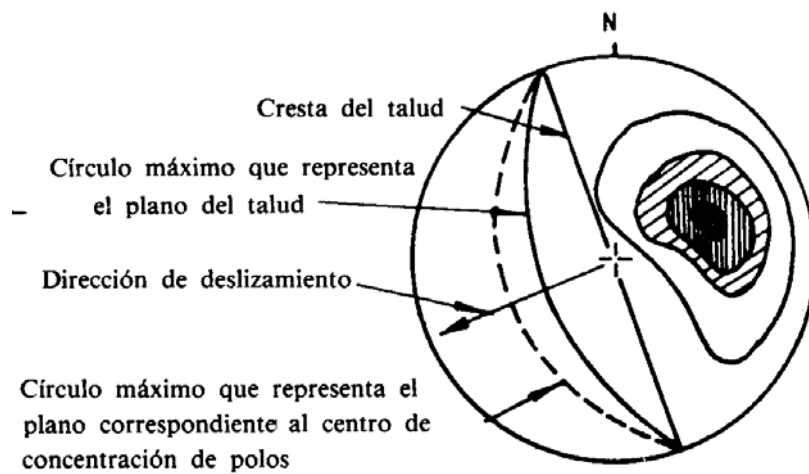
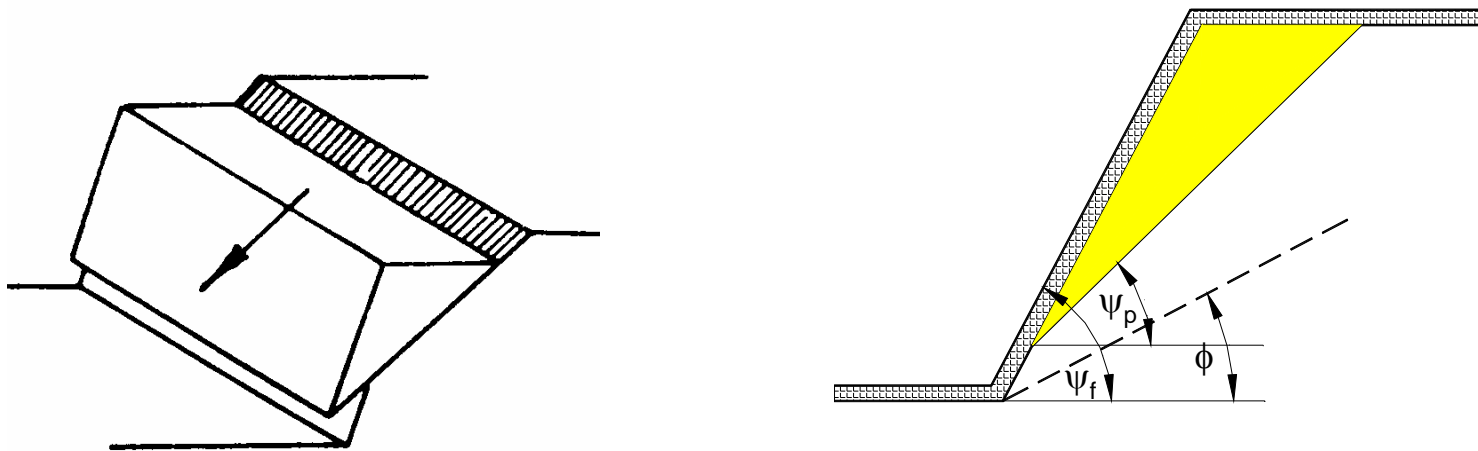
$$FS = \frac{\Sigma(\text{Fuerzas que se oponen al deslizamiento})}{\Sigma(\text{Fuerzas que inducen el deslizamiento})}$$

$$FS = \frac{\text{Resistencia al cizallamiento en la superficie de rotura}(\tau)}{\text{Tensión cizallante movilizada en la superficie de rotura}(\tau_{mb})}$$

FS < 1 --> Inestable

FS > 1,1 --> Estable

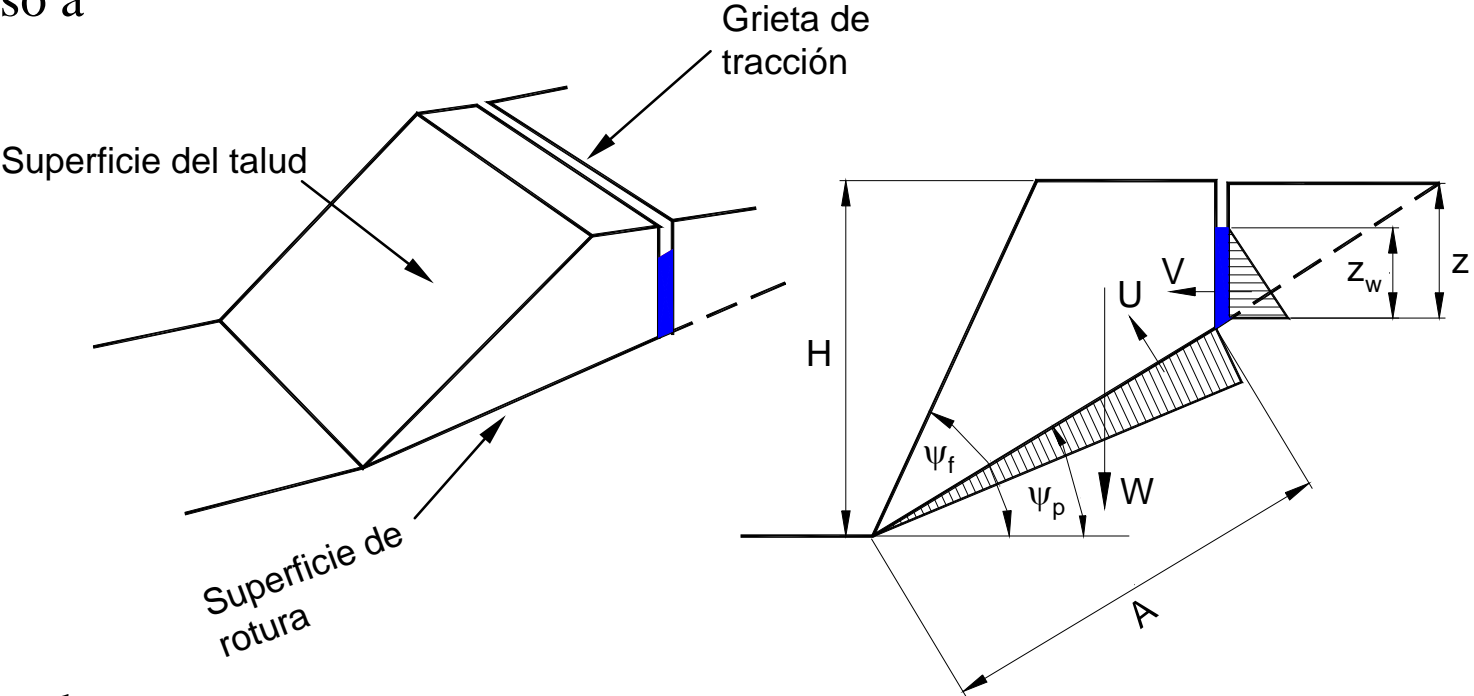
Rotura Planar



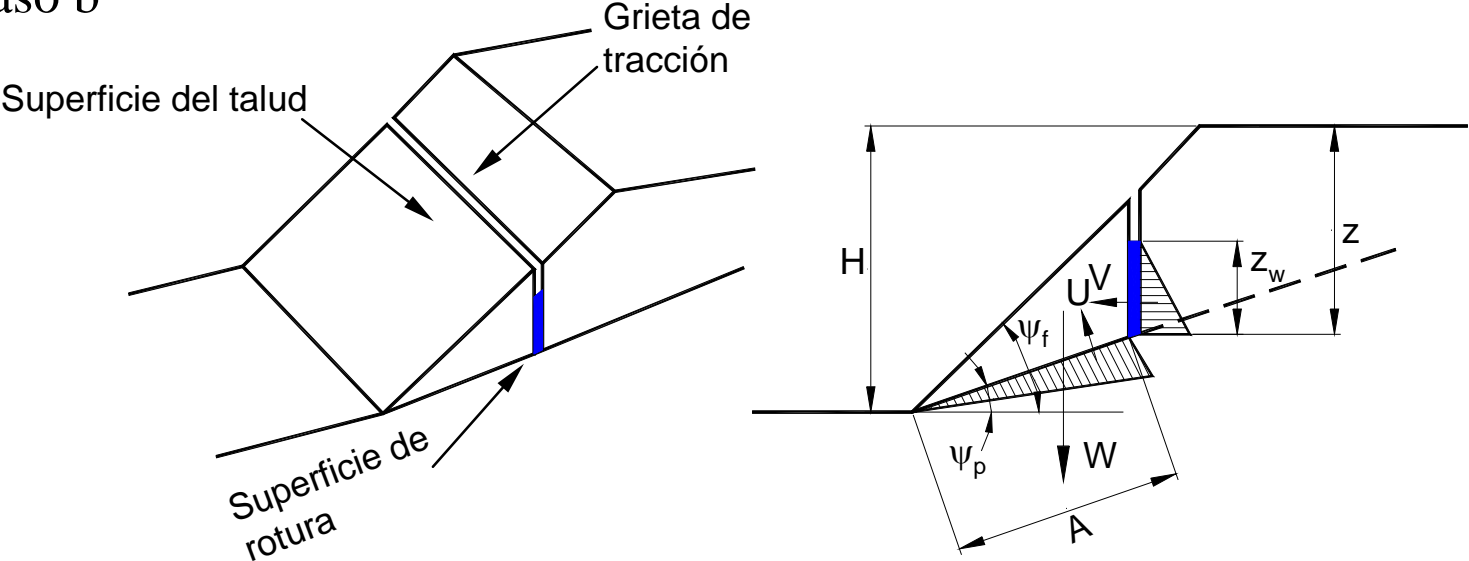
CONDICIONES:

- ☞ Cuando existe una fracturación dominante en la roca.
- ☞ Entre terrenos de buenas características de resistencia, intercalados por otro de menor calidad.
- ☞ Rumbo de la superficie de rotura: $\pm 20^\circ$ con respecto a la frente del talud.
- ☞ $\psi_f > \psi_p > \phi$

Caso a



Caso b



$$FS = \frac{c' A + [W \cos \psi_p - U - V \sin(\psi_p + \delta)] \tan \phi'}{W \sin \psi_p + V \cos(\psi_p + \delta)} \quad (\text{Ec.1})$$

donde:

$$A = \frac{H - z}{\sin \psi_p}$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w z_w \frac{H - z}{\sin \psi_p}$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w z_w^2$$

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\frac{1 - \left(\frac{z}{H}\right)^2}{\tan \psi_p} - \frac{1}{\tan \psi_t} \right] \text{Caso a}$$

$$W = \frac{1}{2} \frac{\gamma H^2 \left(1 - \frac{z}{H}\right)^2 \left(\frac{\tan \psi_t}{\tan \psi_p} - 1\right)}{\tan \psi_p} \text{Caso b}$$

o alternativamente:

$$FS = \frac{\left(\frac{2c'}{\gamma H}\right)P + \left[\frac{Q}{\operatorname{tg} \psi_p} - R(P + S)\right] \operatorname{tg} \varphi'}{Q + \frac{R \cdot S}{\operatorname{tg} \psi_p}} \quad (\text{Ec.2})$$

donde:

$$P = \frac{\left(1 - \frac{z}{H}\right)}{\operatorname{sen} \psi_p}$$

$$Q = \left[\frac{1 - \left(\frac{z}{H}\right)^2}{\operatorname{tg} \psi_p} - \frac{1}{\operatorname{tg} \psi_t} \right] \operatorname{sen} \psi_p$$

(caso a)

$$Q = \left(1 - \frac{z}{H}\right)^2 \cos \psi_p \left(\frac{\operatorname{tg} \psi_t}{\operatorname{tg} \psi_p} - 1\right)$$

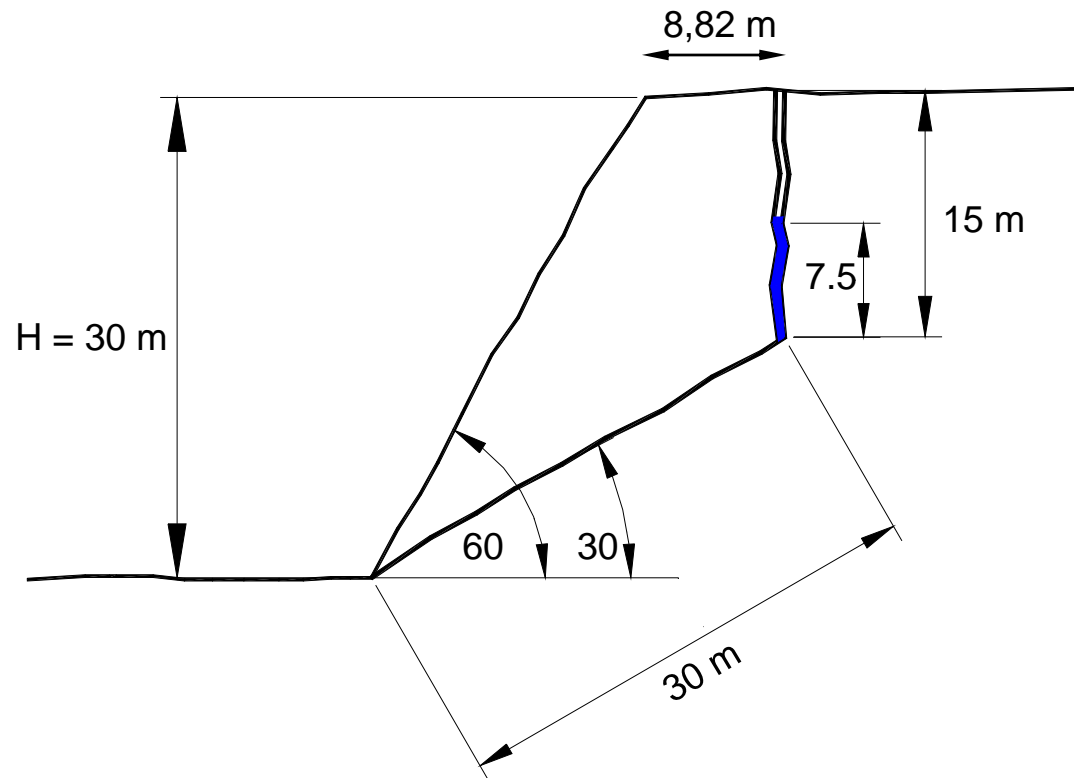
(caso b)

$$R = \frac{\gamma_w}{\gamma} \cdot \frac{z_w}{z} \cdot \frac{z}{H}$$

$$S = \frac{z_w}{z} \cdot \frac{z}{H} \operatorname{sen} \psi_p$$

- H : altura del talud.
- z : altura de la grieta de tracción.
- z_w : altura del agua en la grieta de tracción.
- c' y ϕ' : parámetros de resistencia del terreno en términos de tensiones efectivas.
- A : área de la superficie de deslizamiento (supuesta de ancho unidad).
- ψ_p : ángulo que forma el plano de deslizamiento con la horizontal.
- ψ_t : ángulo del talud con la horizontal.
- U : resultante de las presiones intersticiales que actúan en el plano de deslizamiento.
- V : resultante de las presiones intersticiales que actúan en el plano de deslizamiento.

ejemplo



Datos

H	30,00	m	c'	47,88	kPa
ψ_t	60,00	$^\circ$	ϕ	30,00	$^\circ$
Ψ_p	30,00	$^\circ$			
Z	15,00	m	γ	25,14	kN/m ³
Z _w	7,50	m	γ_w	9,81	kN/m ³

$$A = \frac{H - z}{\sin \varphi_p} = \frac{30 - 15}{\sin 30} = 30 \text{ m}$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w z_w \left(\frac{H - z}{\sin \varphi_p} \right) = \frac{1}{2} \times 9,81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \times 7,5 \text{ m} \times 30 \text{ m} = 1103,63 \text{ kN/m}$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w z_w^2 = \frac{1}{2} \times 9,81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \times (7,5)^2 \text{ m}^2 = 275,91 \text{ kN/m}$$

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\frac{1 - \left(\frac{z}{H} \right)^2}{\tan \varphi_p} - \frac{1}{\tan \varphi_c} \right]$$

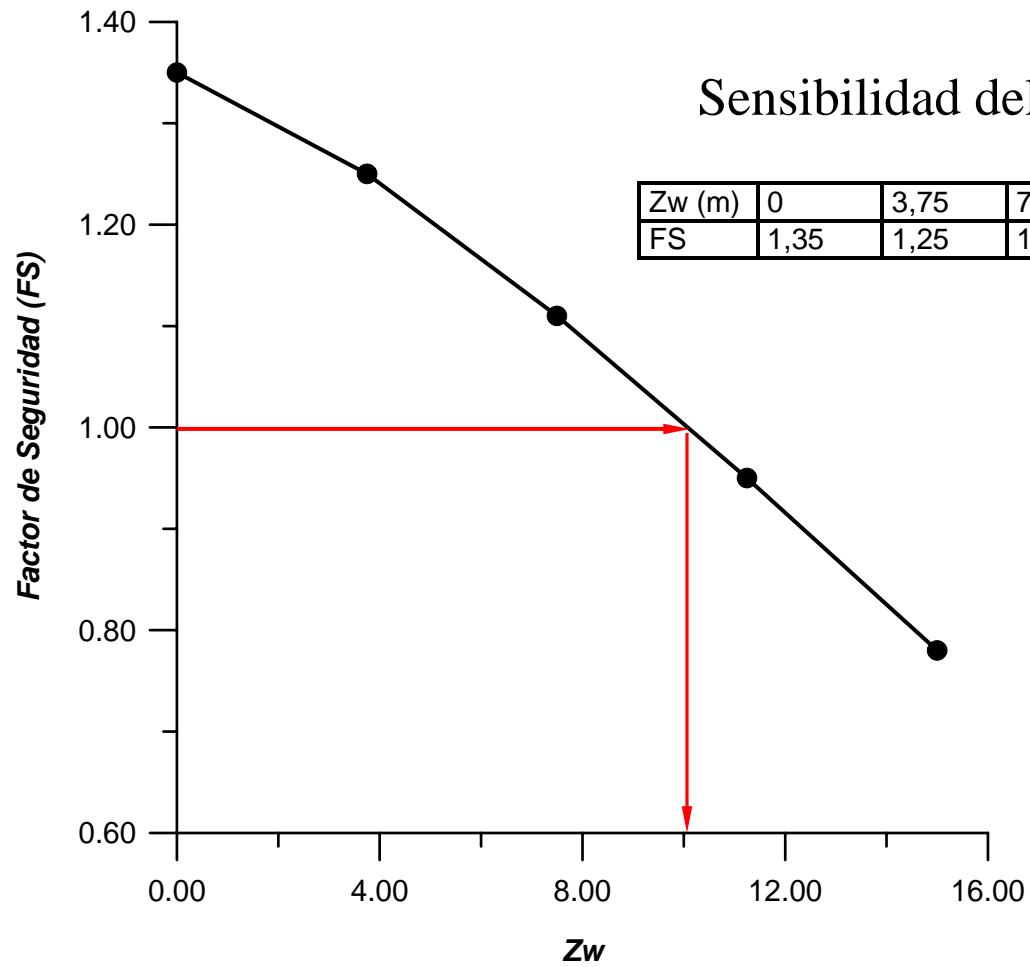
$$W = \frac{1}{2} \times 25,14 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \times 30^2 \text{ m}^2 \left[\frac{1 - (15/30)^2}{\tan 30^\circ} - \frac{1}{\tan 60^\circ} \right] = 8.164,45 \text{ kN/m}$$

$$FS = \frac{c' A + (W \cos \varphi_p - U - V \sin \varphi_p) \tan \varphi'}{W \sin \varphi_p + V \cos \varphi_p}$$

$$FS = \frac{47,88 \text{ kN/m}^2 \times 30 \text{ m} + (8.164,45 \cos 30^\circ - 1103,63 - 275,91 \sin 30^\circ) \tan 30^\circ}{8.164,45 \sin 30^\circ + 275,91 \cos 30^\circ} \cdot \text{kN/m}$$

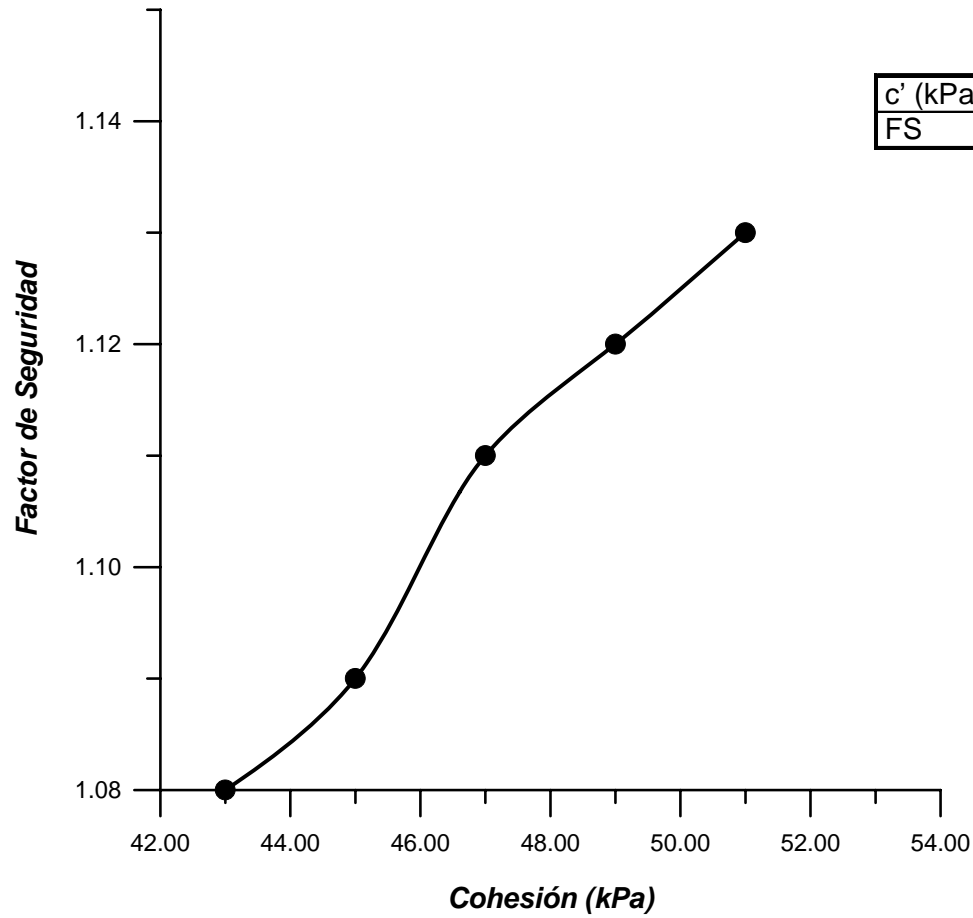
$$FS = 1,11$$

ejemplo (cont.)



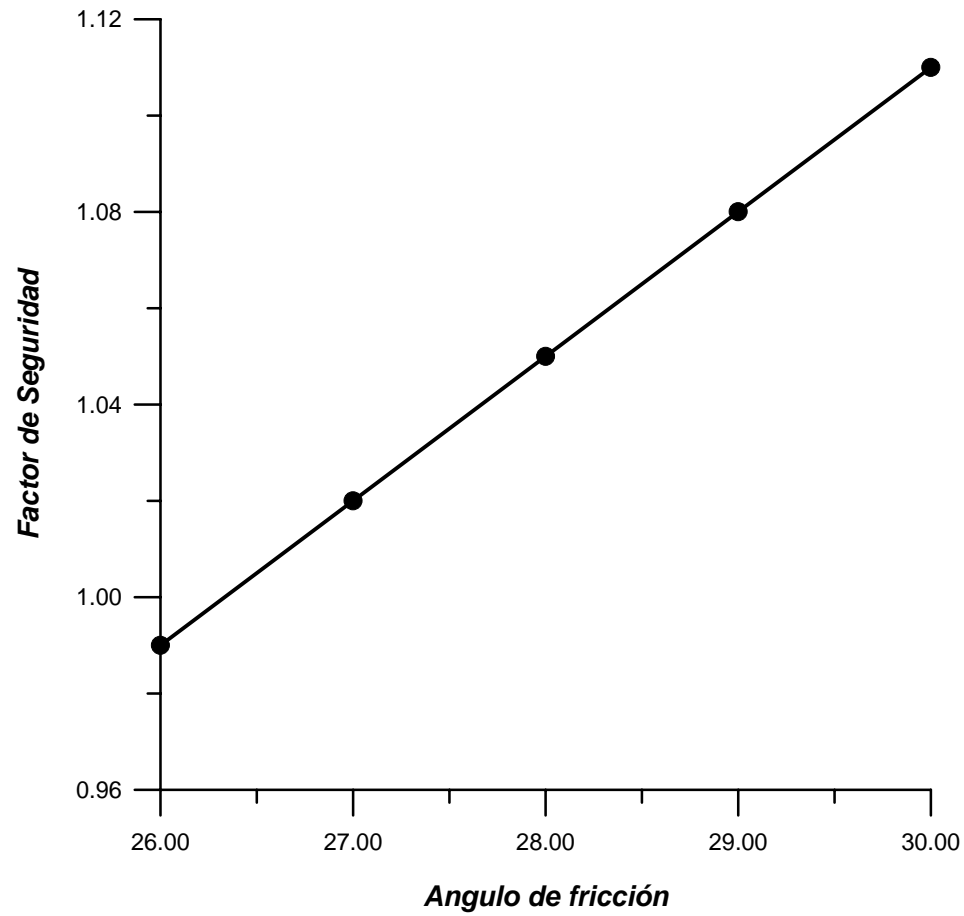
ejemplo (cont.)

Variabilidad de c'



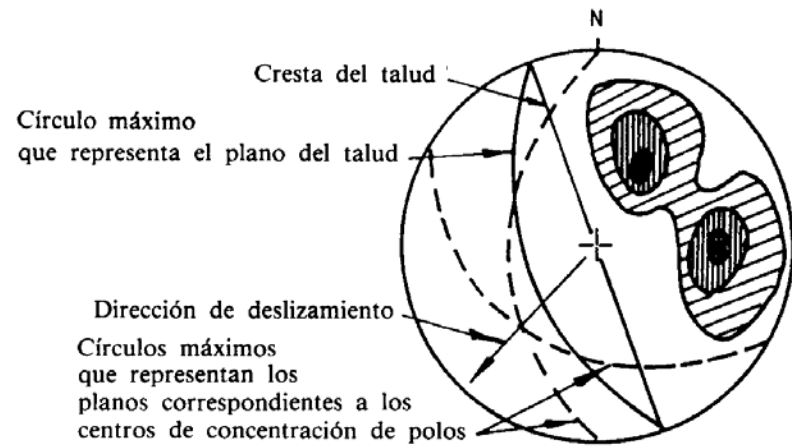
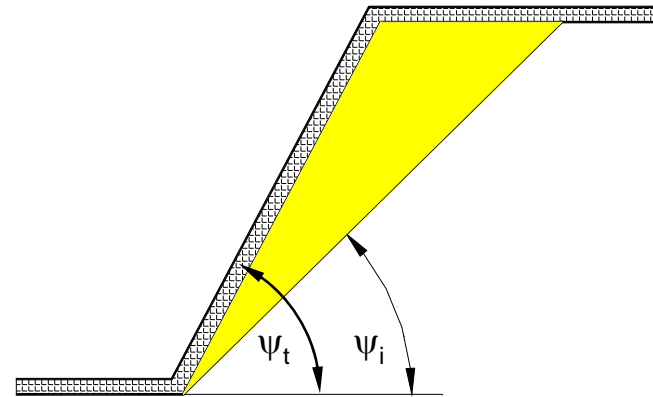
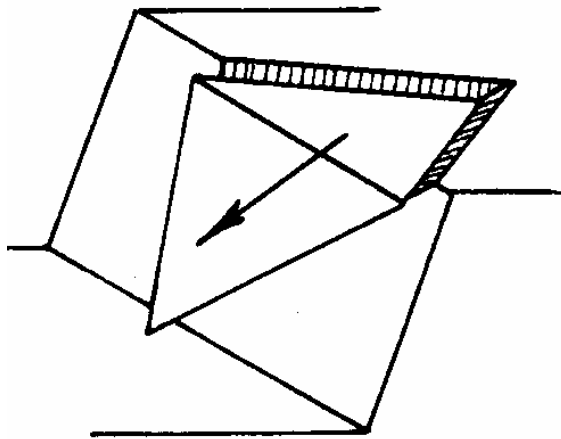
ejemplo (cont.)

Variabilidad de ϕ



ϕ (°)	26	27	28	29	30
FS	0,99	1,02	1,05	1,08	1,11

Rotura en cuña



CONDICIONES:

- ☞ Cuando existen dos discontinuidades dispuestas oblicuamente a la superficie del talud (línea de intersección con inclinación desfavorable).
- ☞ Común en macizos rocosos con discontinuidades bien marcadas (fallas, fracturas, etc).
- ☞ $\psi_t > \psi_i > \phi$

$$FS = \frac{3}{\gamma H} (c_A \cdot X + c_B \cdot Y) + \left(A - \frac{\gamma_w}{2\gamma} \cdot X \right) \tan \phi_A + \left(B - \frac{\gamma_w}{2\gamma} \cdot Y \right) \tan \phi_B$$

$$X = \frac{\text{sen } \theta_{24}}{\text{sen } \theta_{45} \cdot \text{cos } \theta_{2na}}$$

$$Y = \frac{\text{sen } \theta_{13}}{\text{sen } \theta_{35} \cdot \text{cos } \theta_{1nb}}$$

$$A = \frac{\text{cos } \psi_a - \text{cos } \psi_b \cdot \text{cos } \theta_{na.nb}}{\text{sen } \psi_5 \cdot \text{sen}^2 \theta_{na.nb}}$$

$$B = \frac{\text{cos } \psi_b - \text{cos } \psi_a \cdot \text{cos } \theta_{na.nb}}{\text{sen } \psi_5 \cdot \text{sen}^2 \theta_{na.nb}}$$

donde:

H : altura total de la cuña.

c' y ϕ' : parámetros de resistencia en términos de tensiones efectivas

γ : peso específico de la roca.

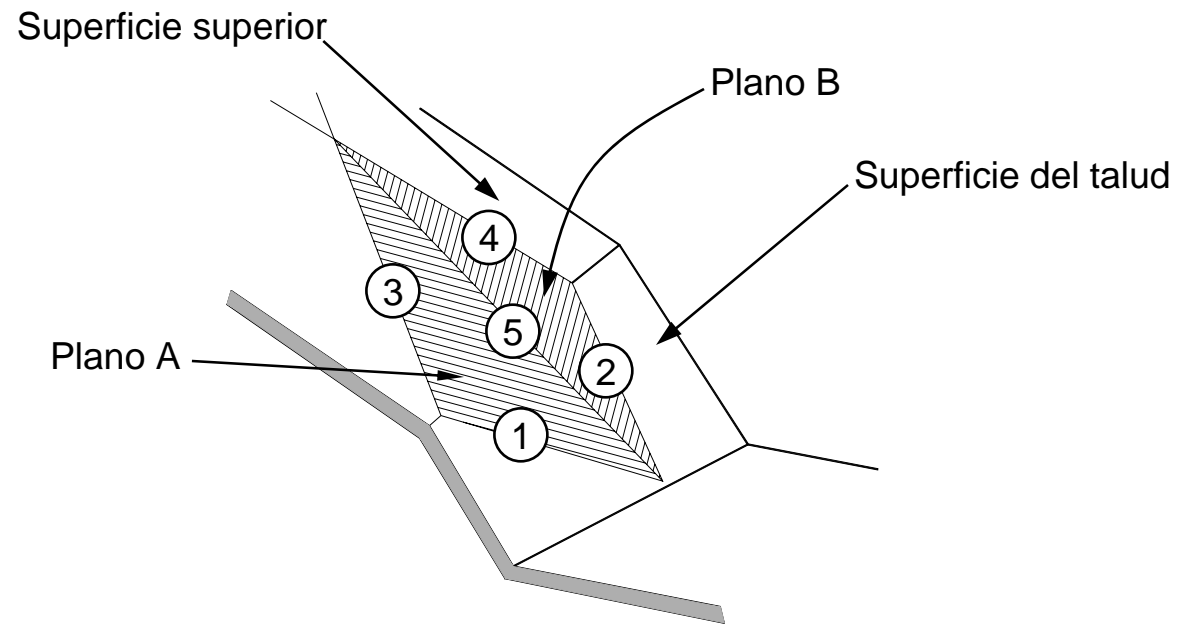
γ_w : peso específico del agua.

X, Y, A, B : factores adimensionales que representan la geometría de la cuña.

ψ_a , ψ_b : buzamientos de los planos A y B.

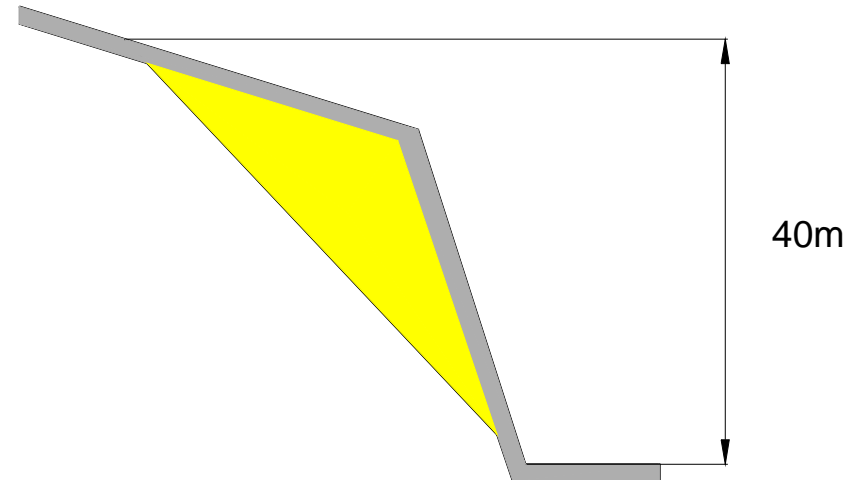
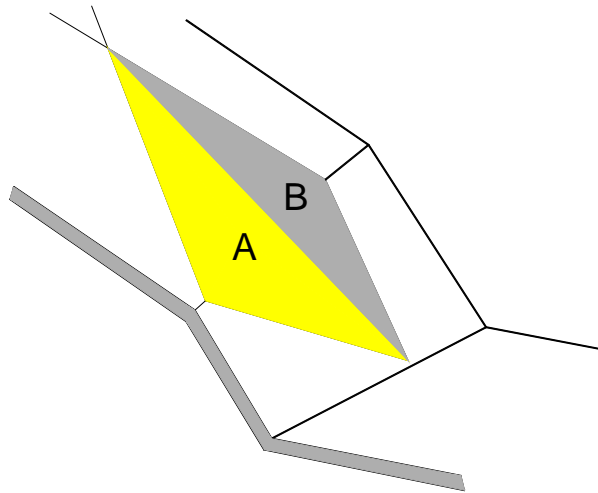
ψ_5 : inclinación de la recta de intersección (5)

θ_{ij} : ángulo que forman las rectas de intersección

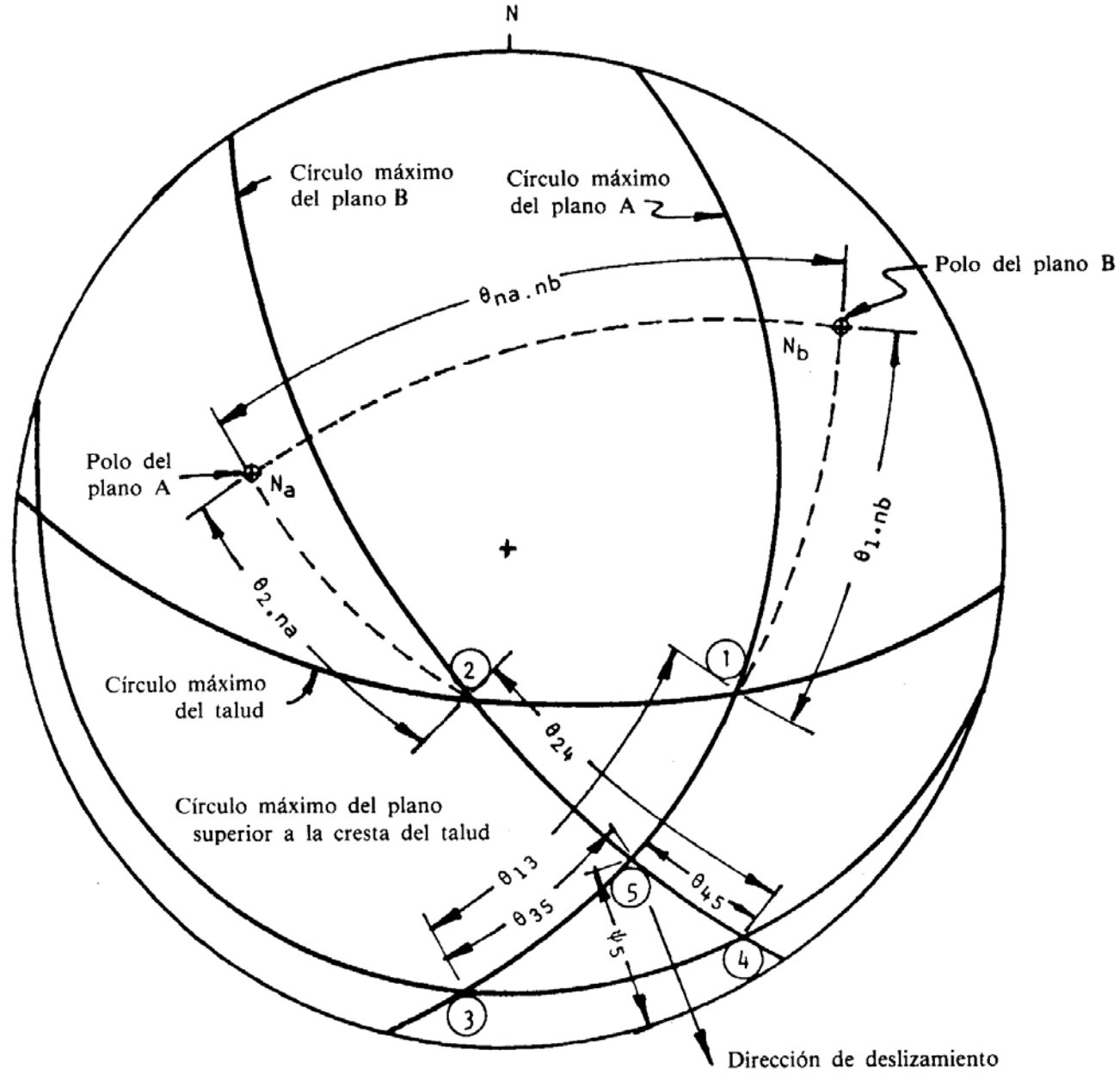


- 1 Intersección del plano A con el frente del talud.
- 2 Intersección del plano B con el frente del talud.
- 3 Intersección del plano A con la superficie superior del talud.
- 4 Intersección del plano B con la superficie superior del talud.
- 5 Intersección de los planos A y B.

ejemplo



Plano	Buzamiento (°)	Dirección de buzamiento (°)	Propiedades	
			c' (kPa)	ϕ' (°)
A	45	105	23,94	20
B	70	235	47,88	30
Talud	65	185	$\gamma = 24.14 \text{ kN/m}^3$ $\gamma = 9,81 \text{ kN/m}^3$	
Parte superior del talud	12	195		



$$\begin{aligned}\varphi_a &= 45^\circ \\ \varphi_b &= 70^\circ \\ \varphi_s &= 21^\circ \\ \Theta_{na, nb} &= 101^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\cos \varphi_a &= 0,7071 \\ \cos \varphi_b &= 0,3420 \\ \sum \varphi_s &= 0,5780 \\ \cos \Theta_{na, nb} &= -0,191 \\ \sum \Theta_{na, nb} &= 0,982\end{aligned}$$

$$A = \frac{\cos \varphi_a - \cos \varphi_b \cdot \cos \Theta_{na, nb}}{\sum \varphi_s \cdot \sum \Theta_{na, nb}} = 1,5475$$

$$B = \frac{\cos \varphi_b - \cos \varphi_a \cdot \cos \Theta_{na, nb}}{\sum \varphi_s \cdot \sum \Theta_{na, nb}} = 0,9557$$

$$\begin{aligned}\Theta_{24} &= 65^\circ \\ \Theta_{45} &= 25^\circ \\ \Theta_{2na} &= 50^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum \Theta_{24} &= 0,9063 \\ \sum \Theta_{45} &= 0,4226 \\ \cos \Theta_{2na} &= 0,6428\end{aligned}$$

$$x = \frac{\sum \Theta_{24}}{\sum \Theta_{45} \cdot \cos \Theta_{2na}} = 3,3363$$

$$\begin{aligned}\Theta_{13} &= 62^\circ \\ \Theta_{35} &= 31^\circ \\ \Theta_{1nb} &= 60^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum \Theta_{13} &= 0,8829 \\ \sum \Theta_{35} &= 0,5150 \\ \cos \Theta_{1nb} &= 0,5000\end{aligned}$$

$$y = \frac{\sum \Theta_{13}}{\sum \Theta_{35} \cdot \cos \Theta_{1nb}} = 3,4287$$

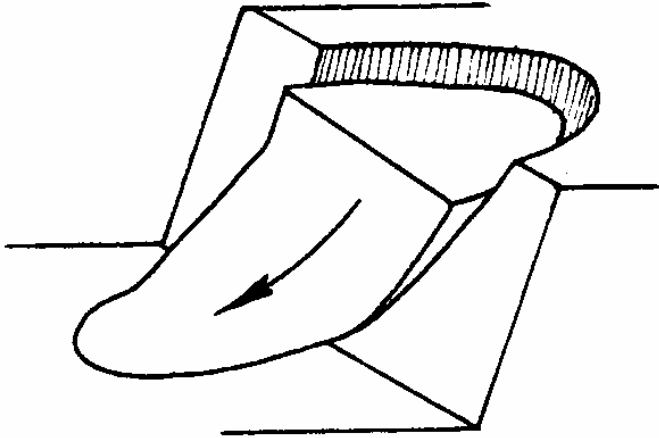
$$\begin{aligned}\phi_A &= 30^\circ \\ \phi_B &= 20^\circ \\ \gamma &= 25,14 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_w &= 9,81 \text{ kN/m}^3 \\ c_A &= 23,94 \text{ kN/m}^2 \\ c_B &= 47,88 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tan \phi_A &= 0,577 \\ \tan \phi_B &= 0,3640 \\ \gamma_w / 2\gamma &= 0,1951 \\ 3c_A / \gamma H &= 0,0714 \\ 3c_B / \gamma H &= 0,1428\end{aligned}$$

$$FS = \frac{3c_A}{\gamma H} \cdot x + \frac{3c_B}{\gamma H} \cdot y + \left(A - \frac{\gamma_w}{2\gamma} \cdot x\right) \tan \phi_A + \left(B - \frac{\gamma_w}{2\gamma} \cdot y\right) \tan \phi_B$$

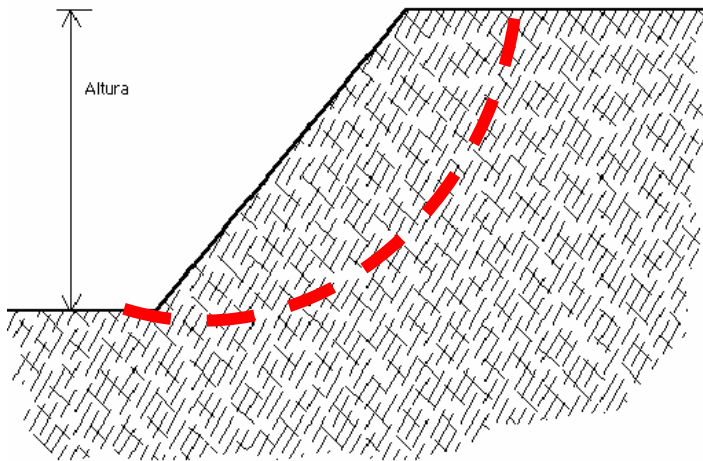
$$FS = 1,8495$$

Rotura Rotacional



CONDICIONES:

- Macizos rocosos altamente fracturados.
- Suelos y rocas blandas.
- Taludes formados por roca estéril.
- Macizos rocosos altamente meteorizados y alterados.



Métodos de Análisis

☞ **MÉTODO DEL CÍRCULO DE ROTURA.**

☞ **MÉTODO DE DOVELAS:**

- **Métodos aproximados.**

- * Método ordinario o de Fellenius.
- * Método simplificado de Bishop
- * Método simplificado de Janbu.

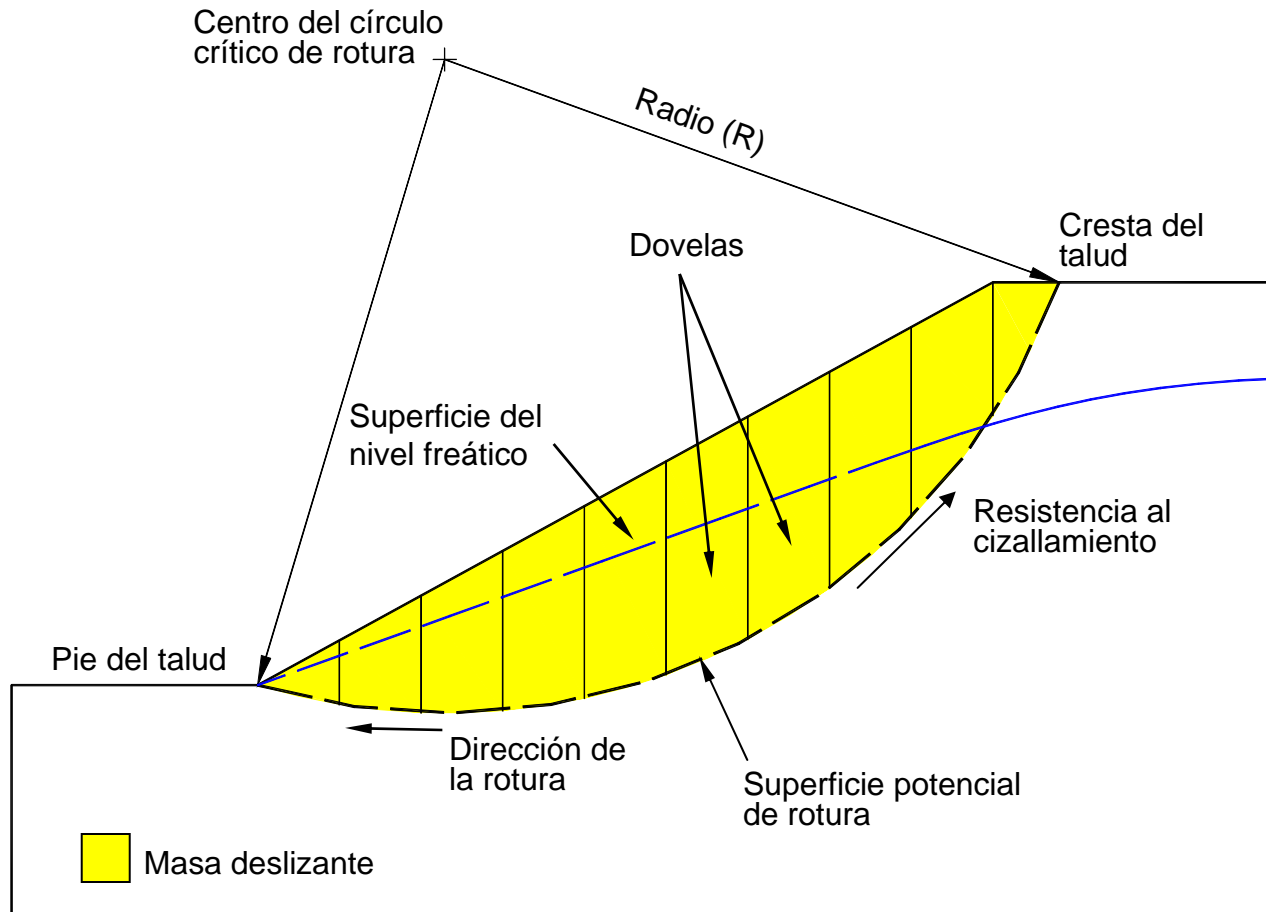
- **Métodos precisos.**

- * Método de Morgenstern - Price.
- * Método de Spencer
- * Método de Sarma.

☞ **SOLUCIONES BASADAS EN ÁBACOS**

- * Taylor
- * Bishop
- * Hoek y Bray.

Método de Dovelas



Método de Fellenius

- ➡ Primer método de dovelas en ser ampliamente aceptado.
- ➡ Ignora las fuerzas entre dovelas a fin de convertir el problema en estáticamente determinado.
- ➡ Considera el peso (W), y de las presiones intersticiales (u)
- ➡ El más simple de todos los métodos de dovelas y a la vez el más conservador, proporciona el Factor de Seguridad (FS) más bajo.
- ➡ Se aplica *solo a superficies circulares*.

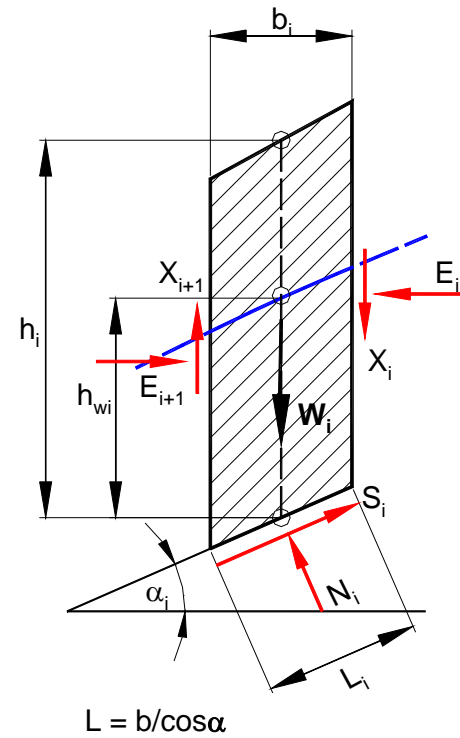
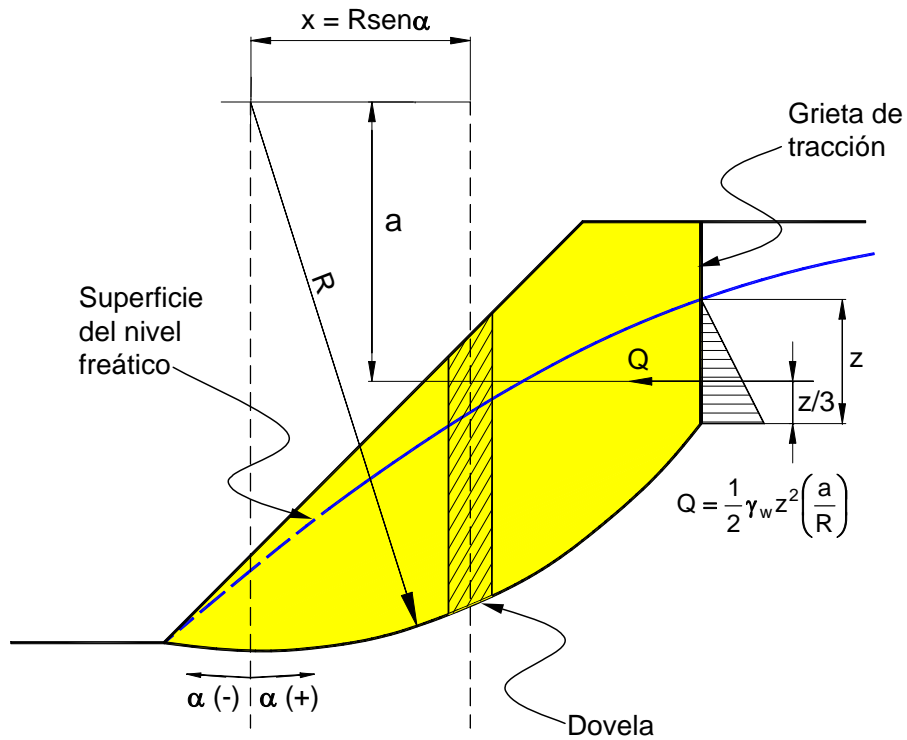
Método de Fellenius

Ecuación gobernante:

$$\sum M_E = \sum M_D$$

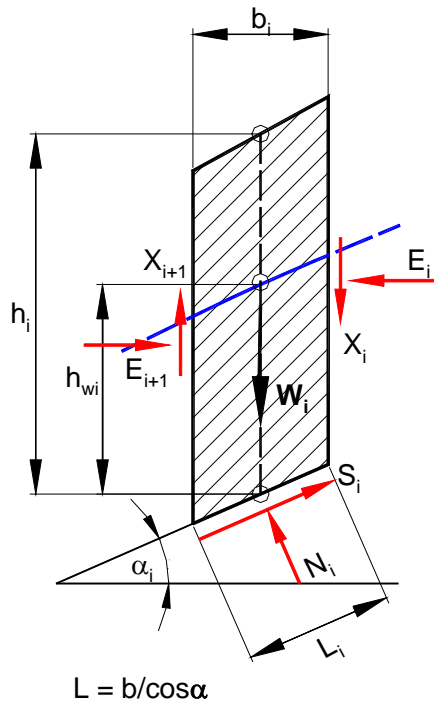
- Momentos estabilizadores son generados por la resistencia al cizallamiento en la superficie de rotura.
- Momentos desestabilizadores son generados por el peso del terreno incluyendo el peso del agua.

Método de Fellenius (cont.)



$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n [c' L_i + (W_i \cos \alpha_i - u_i L_i) \tan \phi']}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i + \frac{1}{2} \gamma_w z^2 \left(\frac{a}{R} \right)}$$

Dovela	b (m)	H (m)	α (°)	$L = b/\cos\alpha^\circ$	$A = b*H$	$W = \gamma*A*(1)$	h_w	$u=\gamma_w*h_w$	N	D
1										
2										
.										
.										
.										
.										
n										
									Σ	Σ



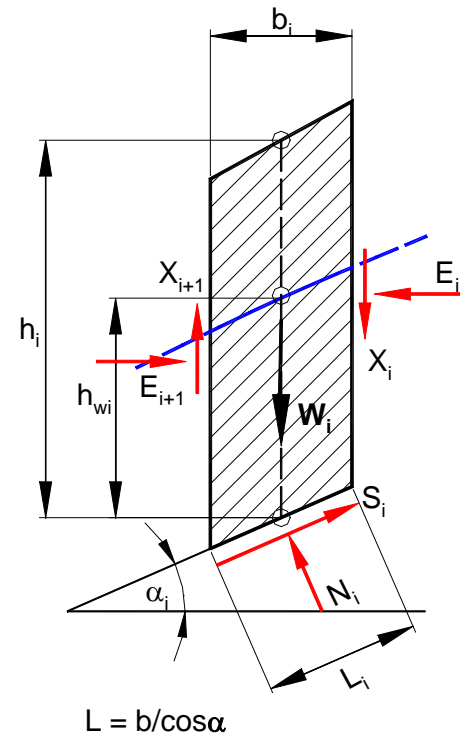
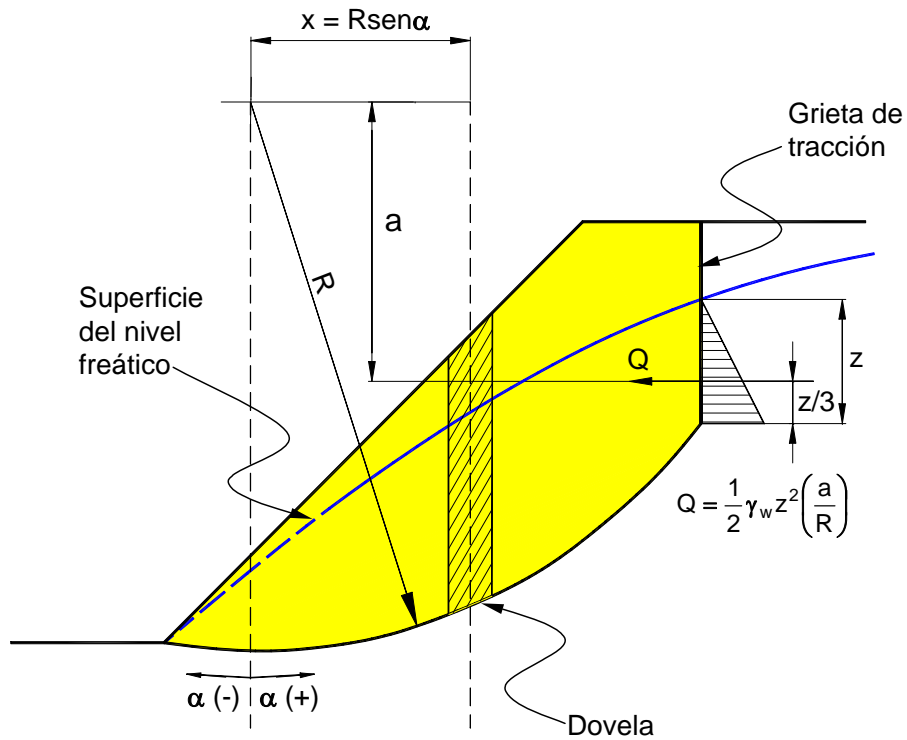
$$FS = \frac{\sum N}{\sum D}$$

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n [c'L_i + (W_i \cos \alpha_i - u_i L_i) \tan \phi']}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i}$$

Método simplificado de Bishop

- ➡ Se aplica *solo a superficies de rotura circulares*
- ➡ Método similar al de Fellenius, excepto que considera equilibrio de fuerzas en la dirección vertical.
- ➡ La solución es indeterminada, por lo que requiere un proceso iterativo.
- ➡ Los resultados obtenidos del FS tienden a ser más elevados que en el método de Fellenius.
- ➡ Proporciona resultados similares a los métodos precisos.

Método simplificado de Bishop (cont.)

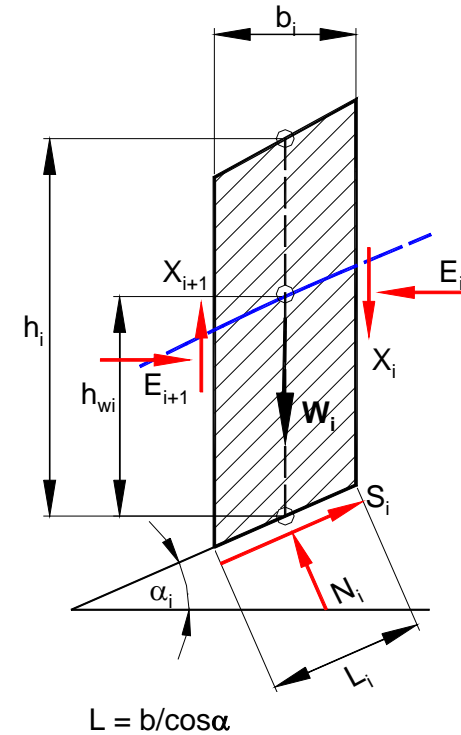
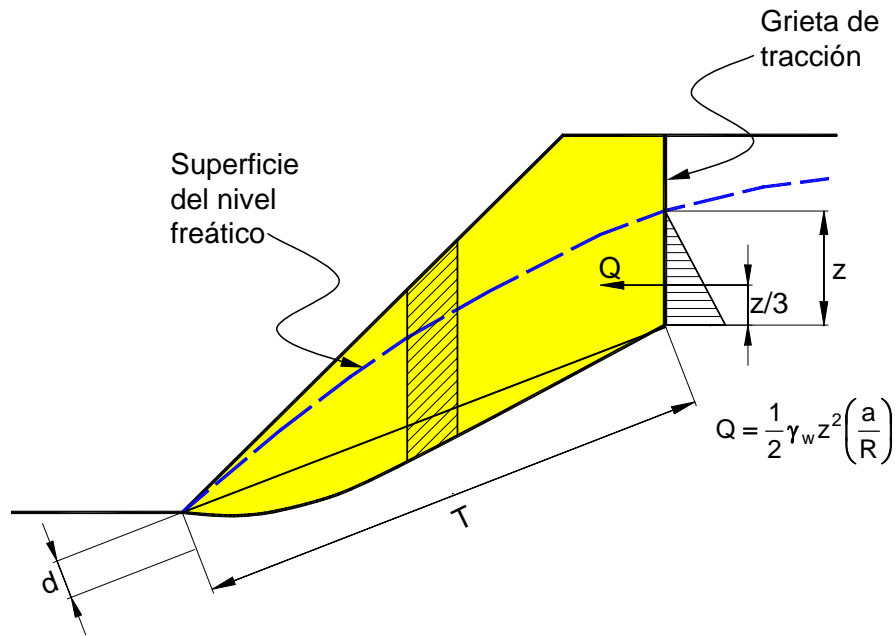


$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{c' b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \phi'}{\cos \alpha_i \left[1 + \frac{\tan \alpha_i \tan \phi'}{FS} \right]} \right]}{\sum_{i=1}^n W_i \text{sen} \alpha_i + \frac{1}{2} \gamma_w z^2 \left(\frac{a}{R} \right)}$$

Método simplificado de Janbu

- ➡ Se aplica a cualquier superficie de rotura.
- ➡ No cumple el equilibrio de momentos pero si el de fuerzas.
- ➡ Al igual que el método de Bishop, la solución requiere un proceso iterativo.

Método simplificado de Janbu



$$f_o = \frac{\sum_{i=1}^n \left[c' + (\gamma h_i - \gamma_w h_{wi}) \tan \phi' \right] (1 + \tan^2 \alpha_i) b_i}{\sum_{i=1}^n \left[W_i \tan \alpha_i + \frac{1}{2} \gamma_w z^2 \right] \left(1 + \frac{\tan \alpha_i \tan \phi'}{FS} \right)}$$

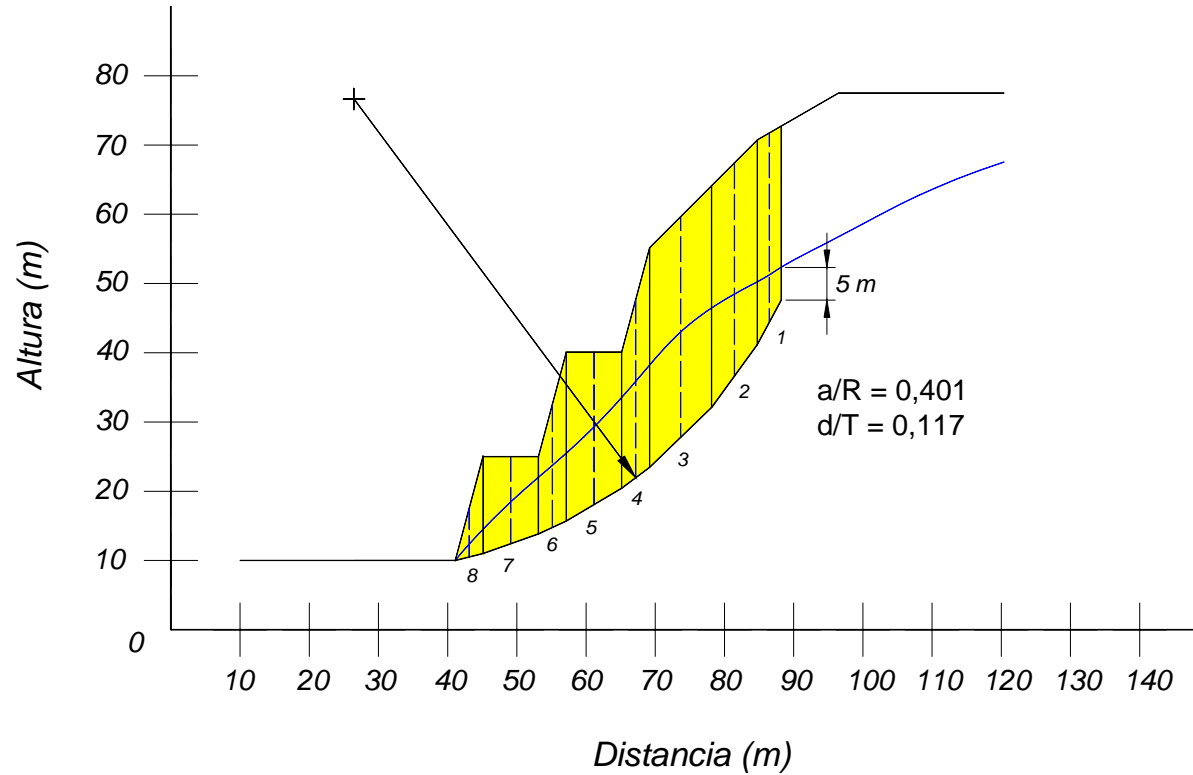
$$f_o = 1 + k \left(\frac{d}{T} - 1,4 \left(\frac{d}{T} \right)^2 \right)$$

Para $c' = 0$; $\Rightarrow k = 0,31$
 Para $c' > 0$, $\phi' > 0$ $\Rightarrow k = 0,50$

- c' : cohesión en términos de tensiones efectivas; [kN/m²]
- ϕ' : ángulo de fricción interna; [°]
- γ : peso específico del terreno; [kN/m³]
- γ_w : peso específico del agua; [9,8 kN/m³]
- h : altura de la dovela en la parte media, [m]
- h_w : altura del nivel de agua; [m]
- α : ángulo **positivo** o **negativo** de la base de la dovela con respecto a la horizontal; [°].
- b : ancho de la dovela; [m].
- L : longitud de la base de la dovela; [m].
- W : peso; [kN/m].
- z : altura del nivel de agua en la grieta de tracción; [m].

REALIZAR ANÁLISIS DIMENSIONAL

Ejemplo



Datos:

Peso específico	: 25,4 kN/m ³	Ángulo del talud (banco)	: 75°
Cohesión	: 140 kPa	Ángulo del talud de coronación	: 45°
Ángulo de fricción	: 45°	Altura del banco	: 15 m
		Ancho de la berma	: 8 m

Ejemplo (cont.)

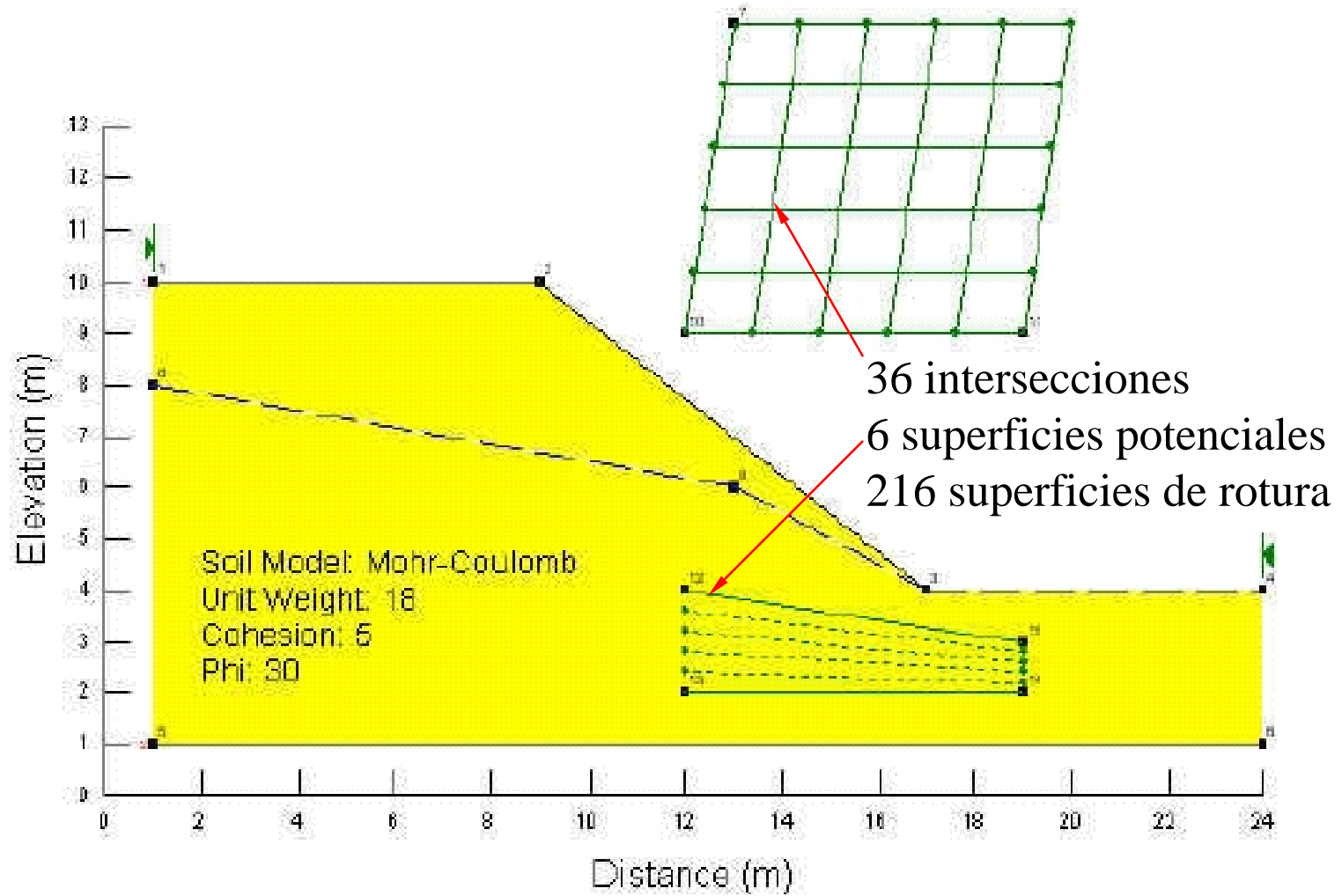
Solución por Fellenius	Dovela	b (m)	h(m)	α (°)	$L=b/\cos\alpha$ (m)	Area (m ²) A	$W=\gamma \cdot A$ (kN/m)	hw	$u=\gamma \cdot hw$	c'	ϕ'	$c' \cdot L + (W \cos\alpha - u \cdot L) \cdot \text{tg}\phi$	$W \cdot \text{sen}\alpha$
	1	3,46	27,34	61,74	7,31	94,69	2405,13	6,66	65,3346	140	45	1684,40	2118,45
	2	6,60	30,79	53,95	11,22	203,14	5159,76	11,8	115,758	140	45	3308,35	4171,68
	3	8,95	31,87	44,01	12,44	205,32	5215,13	15,23	149,4063	140	45	3633,76	3623,39
	4	4,04	25,68	36,66	5,04	103,56	2630,42	13,91	136,4571	140	45	2127,95	1570,53
	5	8,00	22,01	30,64	9,30	176,09	4472,69	11,21	109,9701	140	45	4127,46	2279,47
	6	4,04	17,77	24,86	4,45	71,84	1824,74	8,89	87,2109	140	45	1890,70	767,12
	7	8,00	12,58	19,43	8,48	100,31	2547,87	8,03	78,7743	140	45	2922,15	847,56
	8	4,04	7,03	14,13	4,17	28,27	718,06	1,84	18,0504	140	45	1204,38	175,29
Sumatoria											20899,15	15553,51	
												FS = 1,34	

Solución por Bishop	Dovela	$c' \cdot b$	$W \cdot ub$	tg ϕ	Iteración 1	Iteración 2	Iteración 3	Iteración 4	Iteración 5	Iteración 6	Iteración 7
	1	484,40	2179,07	1,00	2354,85	2434,73	2464,76	2475,77	2464,76	2475,77	2479,77
	2	924,00	4395,75	1,00	4462,52	4593,78	4642,84	4660,79	4642,84	4660,79	4667,30
	3	1253,00	3877,94	1,00	4144,80	4245,18	4282,44	4296,03	4282,44	4296,03	4300,96
	4	565,60	2079,14	1,00	2119,28	2162,87	2178,98	2184,84	2178,98	2184,84	2186,96
	5	1120,00	3592,93	1,00	3798,08	3864,96	3889,56	3898,51	3889,56	3898,51	3901,75
	6	565,60	1472,40	1,00	1668,86	1693,42	1702,42	1705,69	1702,42	1705,69	1706,87
	7	1120,00	1917,68	1,00	2549,67	2580,02	2591,10	2595,12	2591,10	2595,12	2596,58
	8	565,60	645,13	1,00	1050,99	1060,45	1063,90	1065,14	1063,90	1065,14	1065,59
	Sumatoria					22149,04	22635,40	22816,00	22881,89	22816,00	22881,89
Q					49,17						
FS(arbitrario)					1,34	1,42	1,45	1,46	1,47	1,46	1,47
FS(calculado)					1,42	1,45	1,46	1,47	1,46	1,47	1,47

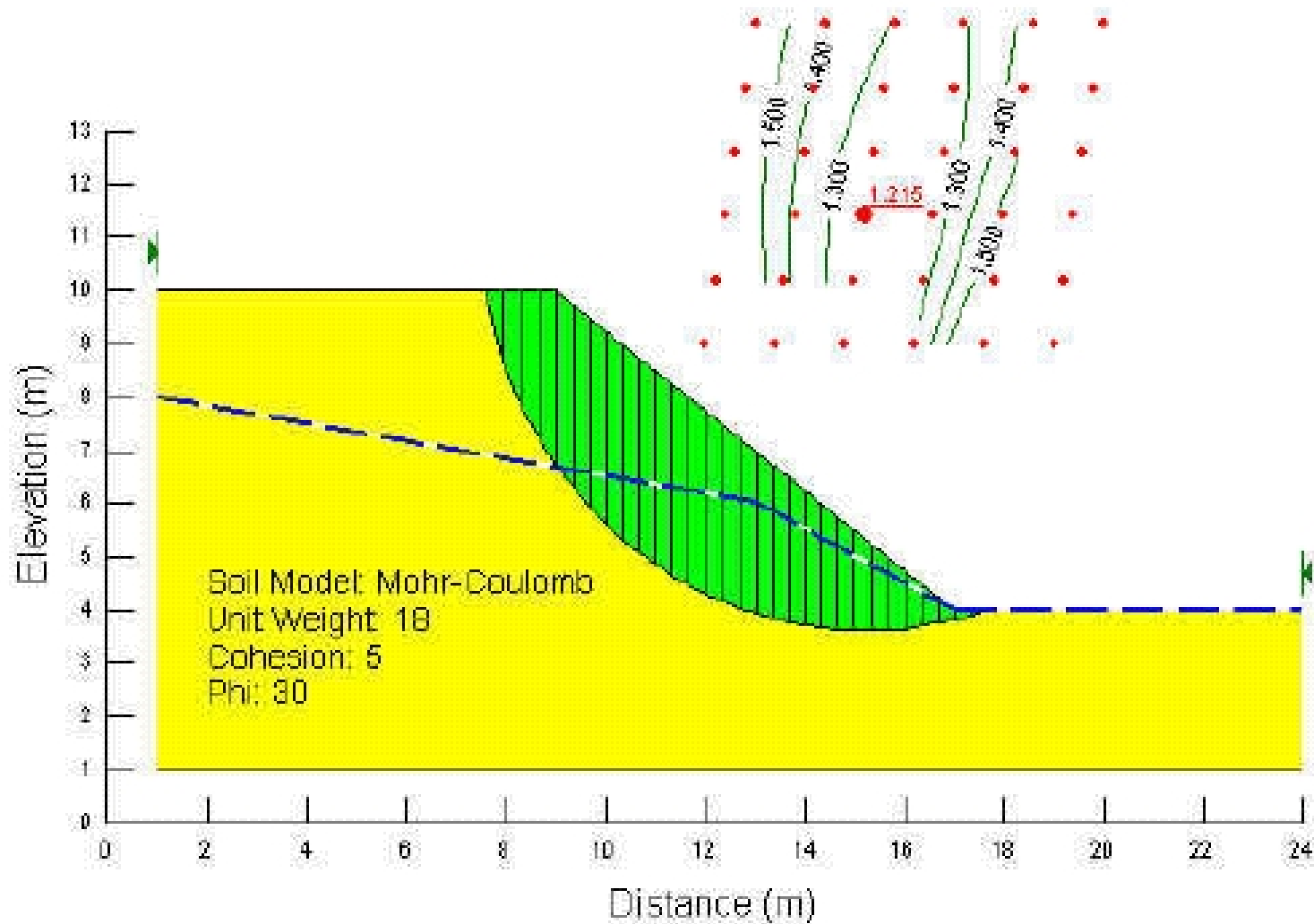
Ejemplo (cont.)

Solución por Janbu	Dovela	c`b	W-ub	W*tga	Iteración 1	Iteración 2	Iteración 3	Iteración 4	Iteración 5	Iteración 6	Iteración 7	
	1	484,40	2179,07	4474,28	4973,55	5098,32	5148,90	5169,02	5176,97	5180,10	5181,33	
	2	924,00	4395,75	7088,78	7582,99	7748,13	7814,77	7841,23	7851,68	7855,79	7857,41	
	3	1253,00	3877,94	5037,95	5762,92	5866,39	5907,92	5924,38	5930,87	5933,43	5934,43	
	4	565,60	2079,14	1957,80	2641,85	2682,18	2698,31	2704,69	2707,21	2708,20	2708,59	
	5	1120,00	3592,93	2649,36	4414,39	4472,11	4495,12	4504,22	4507,80	4509,21	4509,77	
	6	565,60	1472,40	845,47	1839,29	1859,41	1867,40	1870,56	1871,80	1872,29	1872,48	
	7	1120,00	1917,68	898,75	2703,65	2727,58	2737,07	2740,81	2742,28	2742,86	2743,09	
	8	565,60	645,13	180,76	1083,78	1091,04	1093,91	1095,04	1095,49	1095,66	1095,73	
	Sumatoria				23133,15	31002,42	31545,17	31763,40	31849,96	31884,10	31897,54	31902,83
	fo				1,05							
	Q				122,63							
FS(arbitrario)					1,34	1,40	1,42	1,43	1,44	1,44	1,44	
FS(calculado)					1,40	1,42	1,43	1,44	1,44	1,44	1,44	





Cálculo del mínimo FS



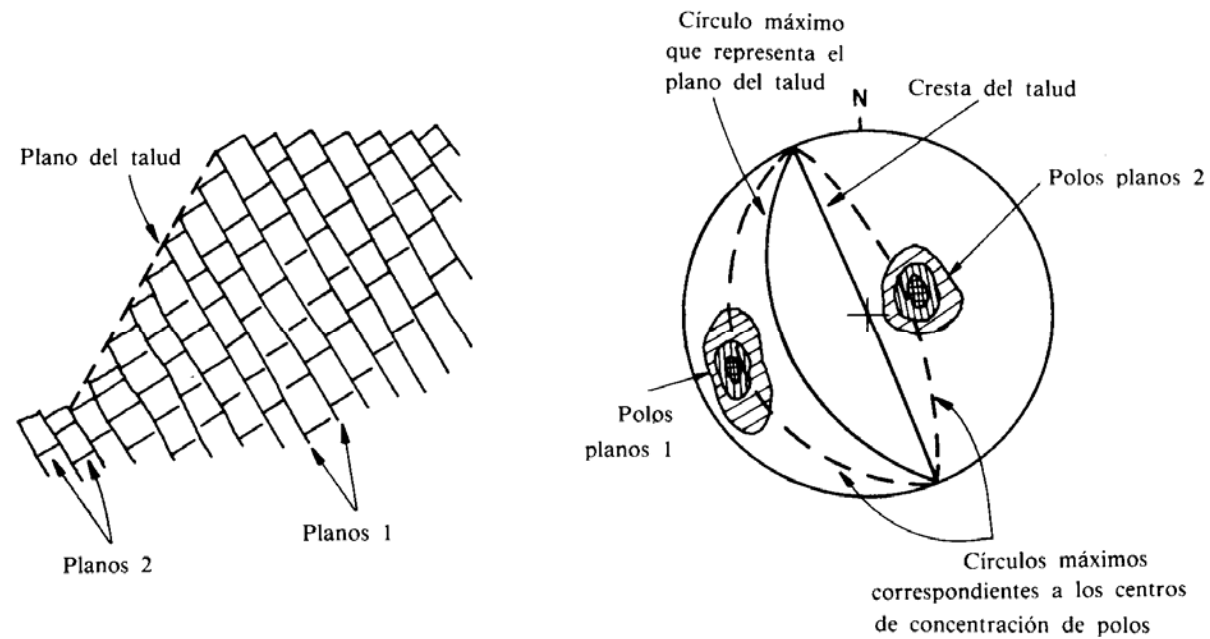
Cálculo del mínimo FS



Observaciones

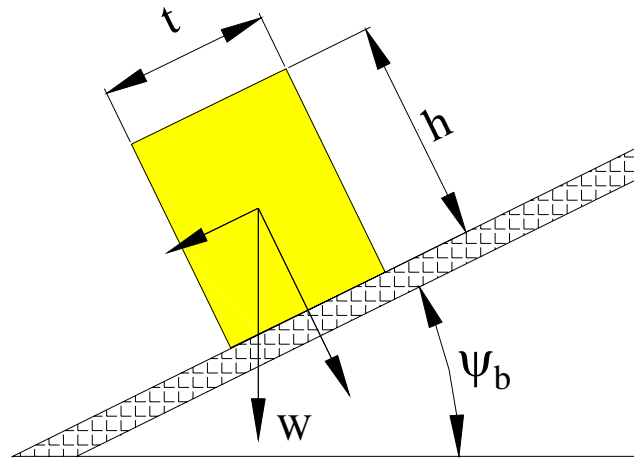
-  Evitar valores de $\alpha \approx 0^\circ$ o α muy elevados.
-  El término $(W \cos \alpha - uL) < 0$ es inadmisibile.
-  Si $m_\alpha < 0,2$, usar métodos con cautela.
-  El método de Bishop proporciona resultados muy próximos a los obtenidos por los métodos precisos.
Solo es aplicable a superficies de rotura **CIRCULARES**

Rotura por volcamiento



- ☞ Rotación de “columnas” o bloques de roca sobre una base sobre la acción de la gravedad y fuerzas adyacentes.
- ☞ El concepto de FS no es aplicable.

Rotura por volcamiento



Condición de deslizamiento : $\psi_b > \phi$

Condición de vuelco : $\tan\psi_b > t/h$

a) $\psi_b < \phi$ No existe deslizamiento.

1) $\tan\psi_b < t/h$ No existe vuelco.

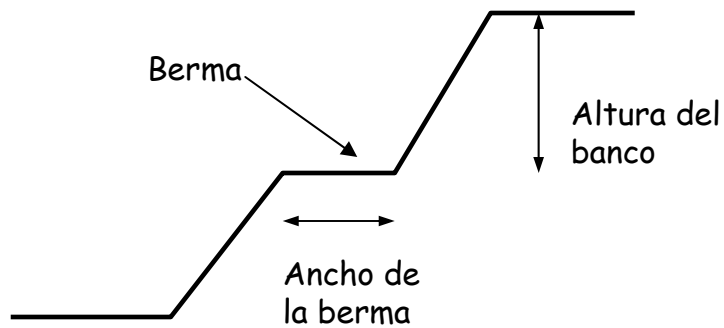
2) $\tan\psi_b > t/h$ Existe vuelco.

a) $\psi_b > \phi$ Existe deslizamiento.

1) $\tan\psi_b < t/h$ No existe vuelco.

2) $\tan\psi_b > t/h$ Existe vuelco.

Medidas remediales



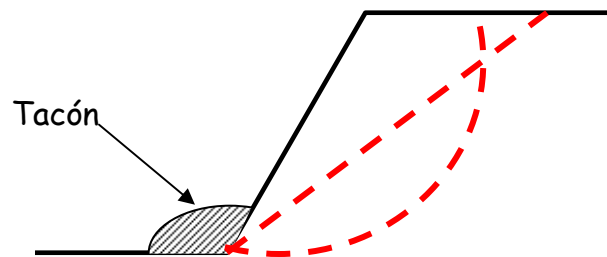
☞ **Modificación de la geometría:**

- **Objetivo:** Aumentar la resistencia al cizallamiento del terreno:

→ Disminución del ángulo del talud.

→ Construcción de bermas.

→ Colocación de tacones

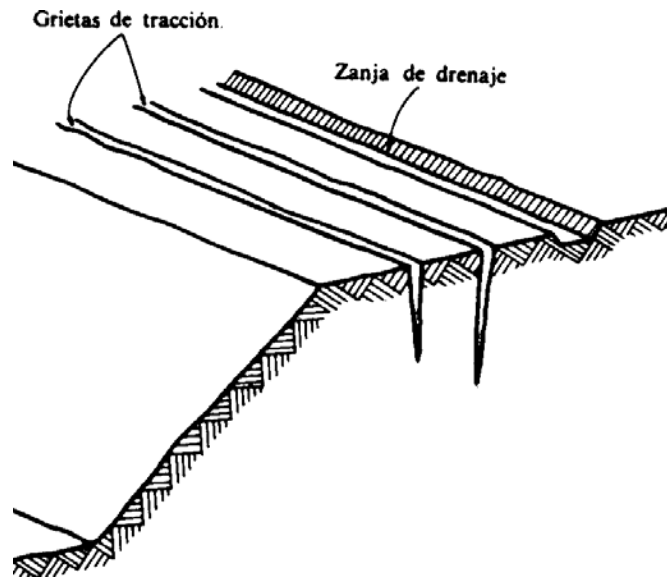


Evidencias de desestabilización

La rotura o deslizamiento de un talud no es un evento instantáneo, es **PROGRESIVO**.

- Roturas de pendiente con acumulación de material al pie del talud.
- Bloques de roca caídos al pie de taludes y escarpes.
- Presencia de grietas de tracción
- Reptaciones de material blando.
- Árboles, arbustos o postes inclinados a favor de la pendiente
- Cicatrices que evidencien planos de rotura.

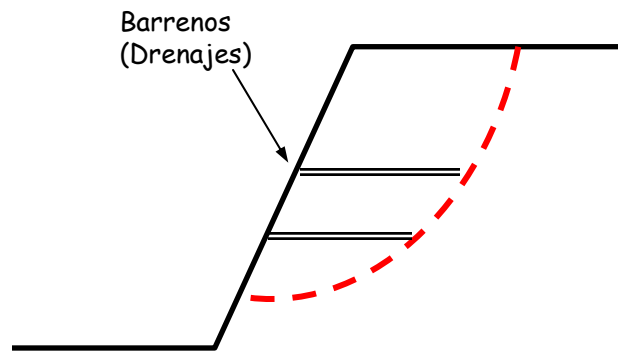
Medidas remediales (cont.)



☞ **Drenaje:**

- Objetivo: reducir las presiones de agua.

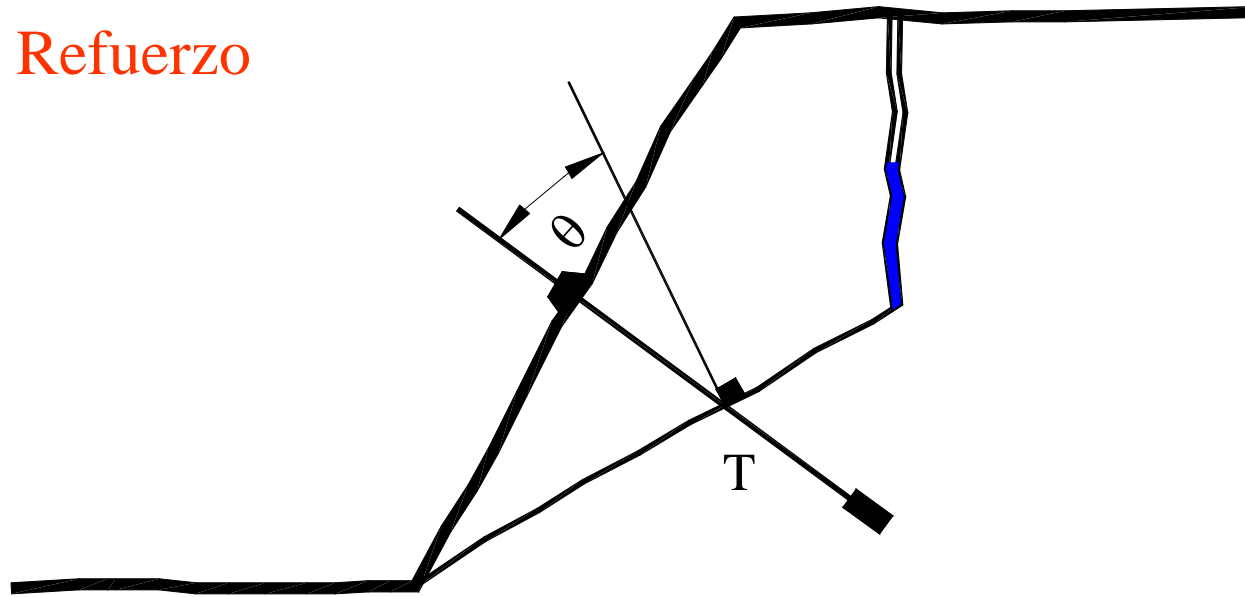
→ Drenaje superficial (Construcción de zanjas de drenaje en la cresta del talud).



→ Drenaje profundo (Perforación de barrenos en el frente del talud):

Medidas remediales (cont.)

☞ Refuerzo



$$FS = \frac{c' A + [W \cos \psi_p - U - V \sin(\psi_p + \delta) + T \cos \theta] \tan \phi'}{W \sin \psi_p + V \cos(\psi_p + \delta) - T \sin \theta}$$

Medidas remediales (cont.)

☞ Técnicas adecuadas de voladura.

