

# Generalidades para el estudio de taludes



Los estudios de taludes se enfocan al diseño de excavaciones estables y a la corrección y estabilización de las roturas que suelen ser superficiales y afectar a volúmenes relativamente pequeños.

Los deslizamientos en laderas naturales pueden ser profundos y movilizar millones de metros cúbicos de material

# 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.

# Conceptos

Desmonte  
Trincheras  
Laderas  
Talud

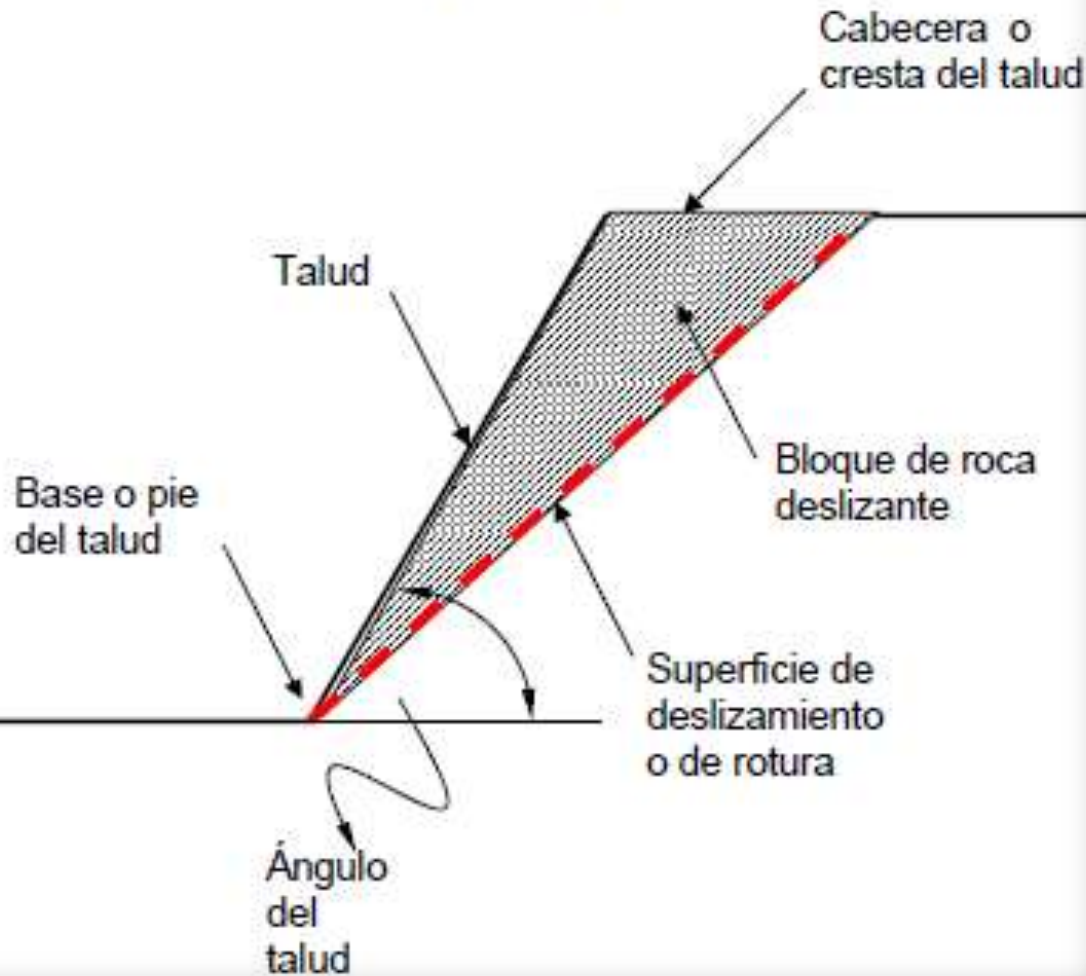


## TIPOS DE DESLIZAMIENTOS

Tipo	Subtipo
Caídas	Caída de roca (detritos o suelo)
Volcamiento	Volcamiento de roca (bloque) Volcamiento flexural de roca o del macizo rocoso
Deslizamiento de roca o suelo	Deslizamiento traslacional, deslizamiento en cuña Deslizamiento rotacional
Propagación lateral	Propagación lateral lenta Propagación lateral por licuación (rápida)
Flujo	Flujo de detritos Crecida de detritos Flujo de lodo Flujo de tierra Flujo de turba Avalancha de detritos Avalancha de rocas Deslizamiento por flujo o deslizamiento por licuación (de arena, limo, detritos, roca fracturada)
Reptación	Reptación de suelos Soliflucción, geliflucción (en permafrost)
Deformaciones gravitacionales profundas	

# Geotecnia: Tema 4 Estabilidad de taludes

## Talud



Inclinación o pendiente de un terreno que queda al excavar

## Factores que influyen a la estabilidad:

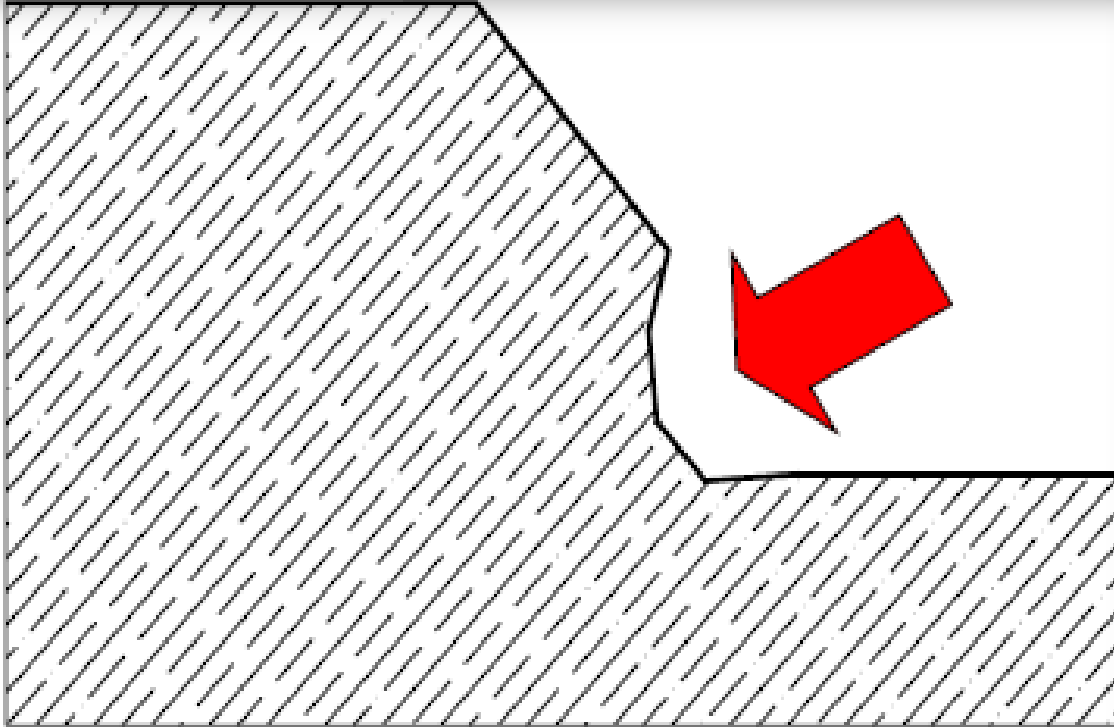
**Factores geométricos.** (altura e inclinación)

**Factores geológicos.** ( que condicionan la presencia de planos y zonas de debilidad y anisotropía en el talud. Ejemplos: estratigrafía, litología, estructuras geológicas)

**Factores hidrogeológicos.** (presencia de agua)

**Factores geotécnicos.** (relacionados con el comportamiento mecánico del terreno)

## Causas de desestabilización

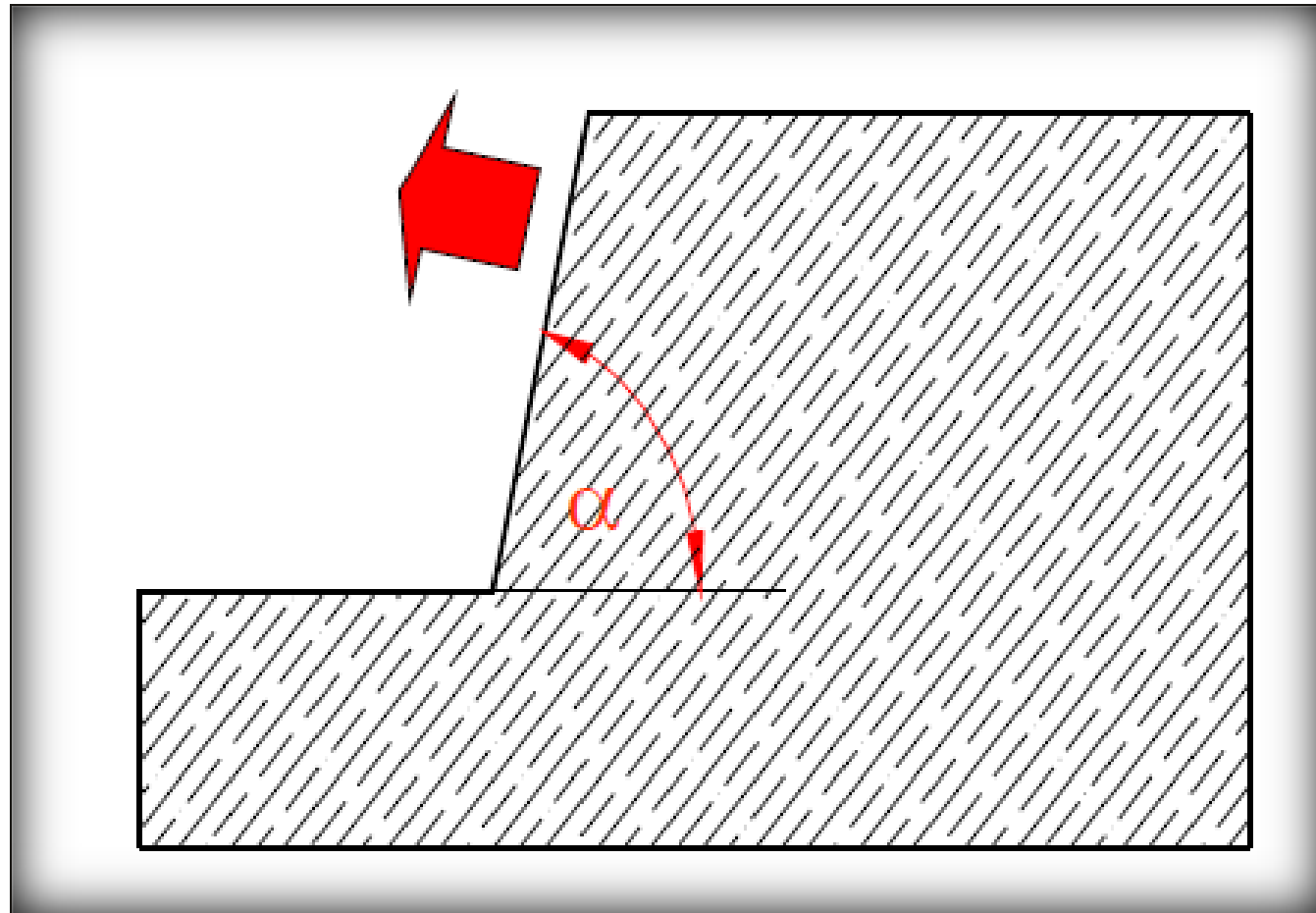


Sobreexcavación  
de la base del  
talud



## Causas de desestabilización

Excavación de taludes escarpados



# Causas de desestabilización

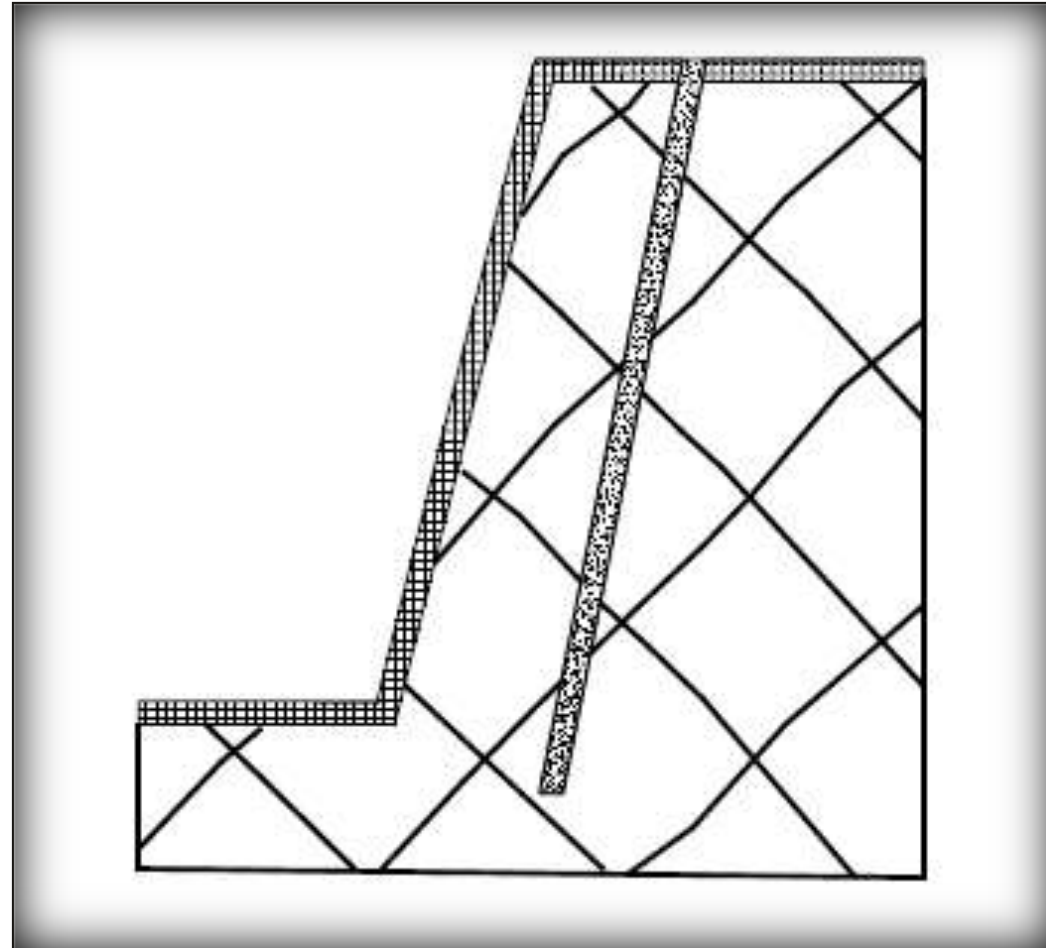


## Condiciones hidrogeológicas:

- Lluvia.
- Presencia de agua subterránea.
  - \* Aumento del peso del terreno.
  - \* Procesos de meteorización.
  - \* Relleno de fisuras y grietas.
  - \* Cambios en la composición mineralógica.

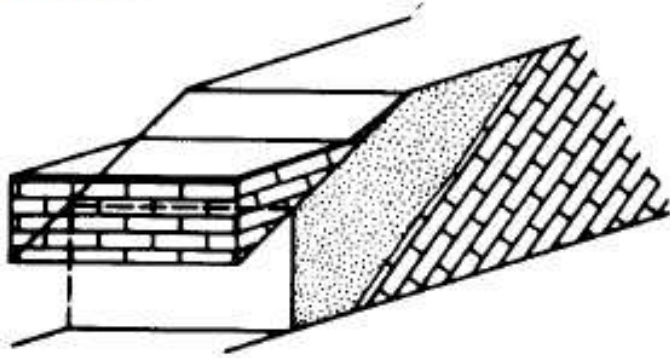
## Causas de desestabilización

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

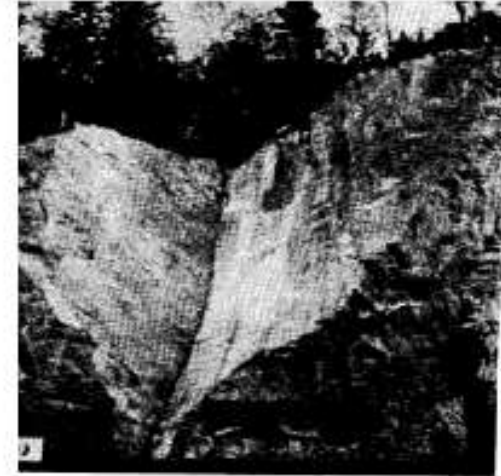


# Tipos de rotura en taludes

Planar:



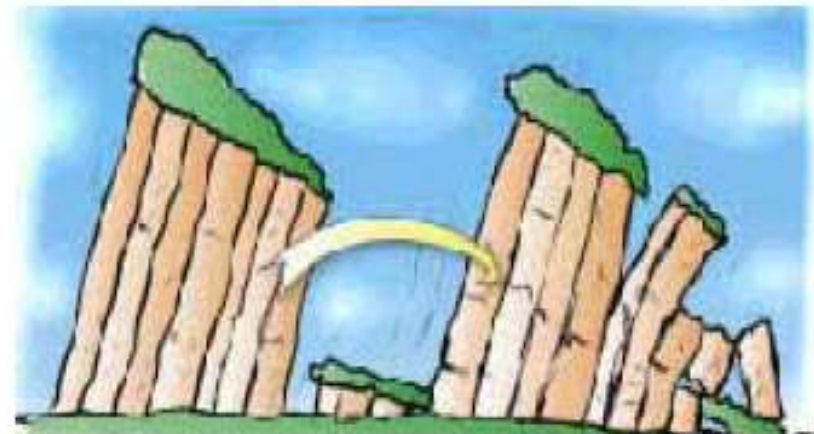
Cuña:



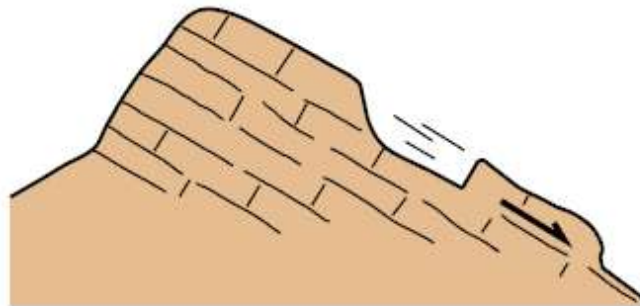
Circular:



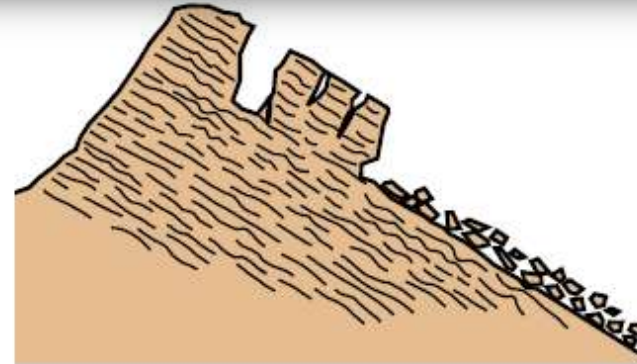
Volcamiento:



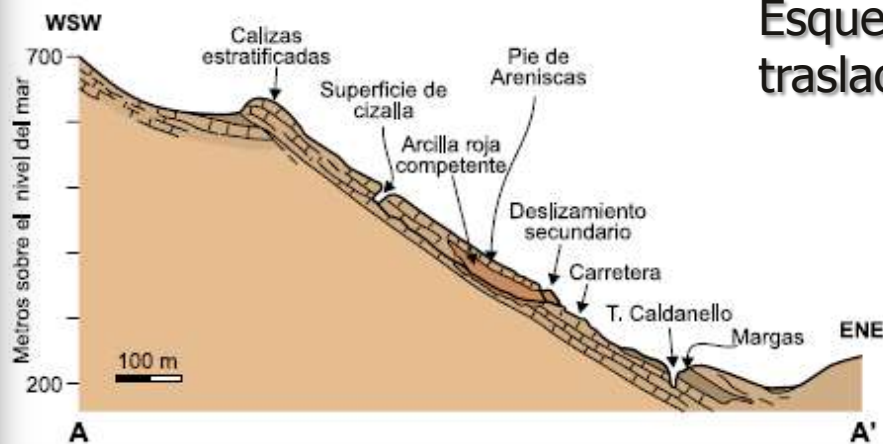
## Rotura plana = Deslizamiento traslacional (GEMMA, 2007)



(a)



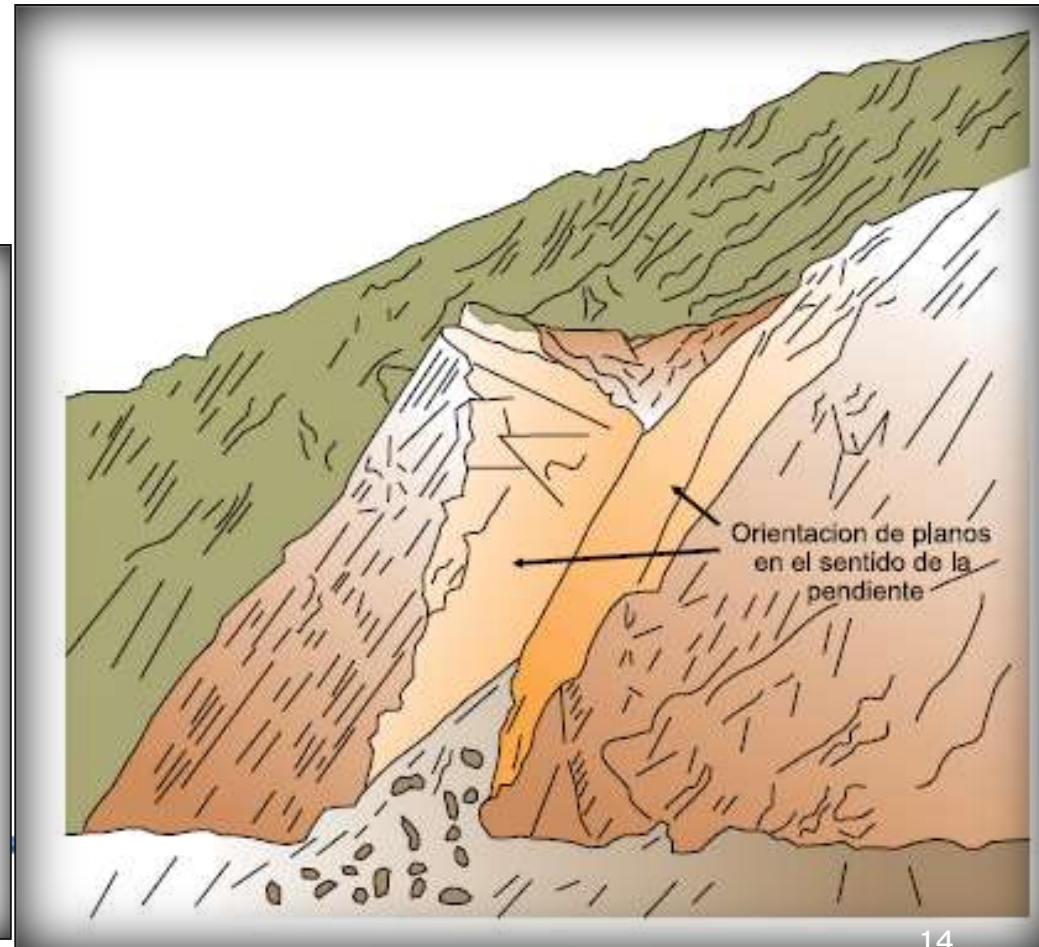
(b)



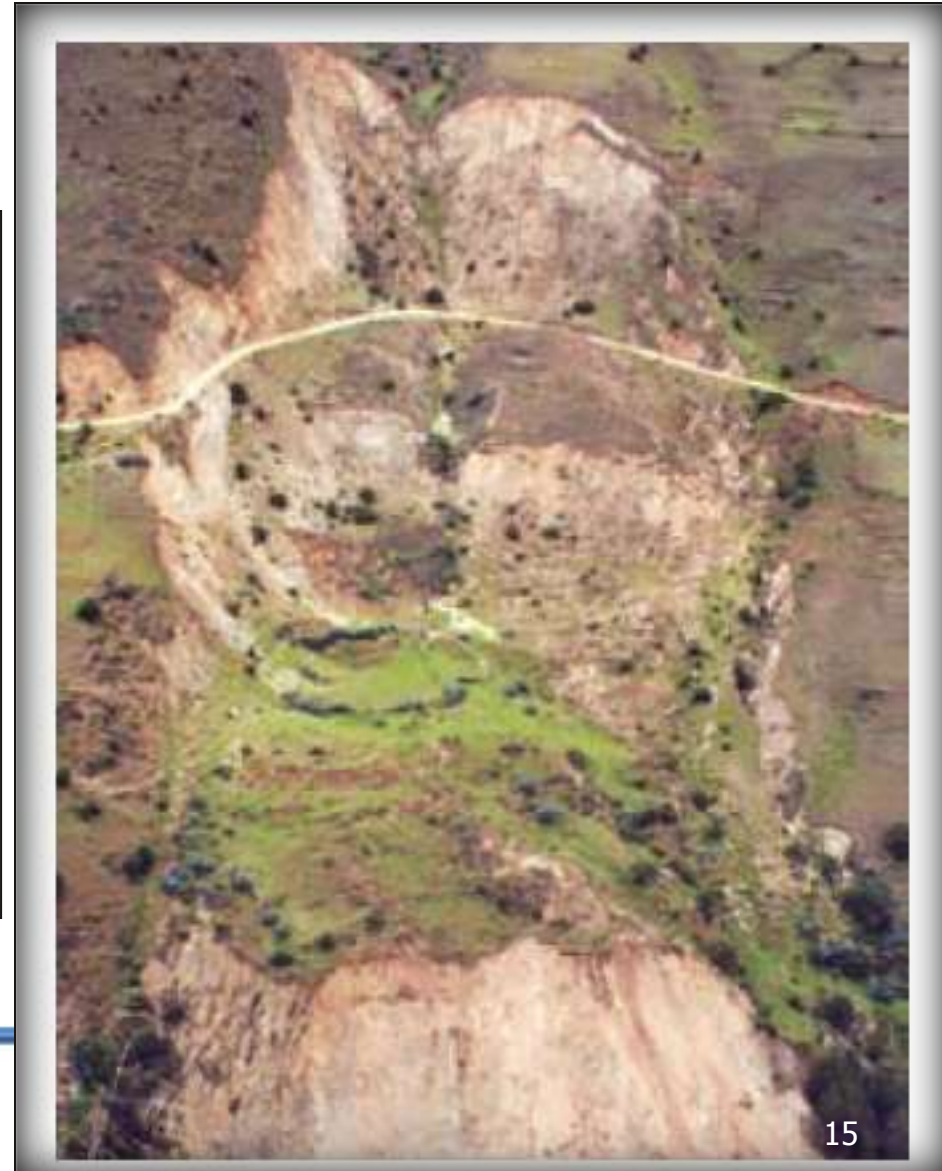
(c)

Esquemas de deslizamiento traslacional (GEMMA, 2007)

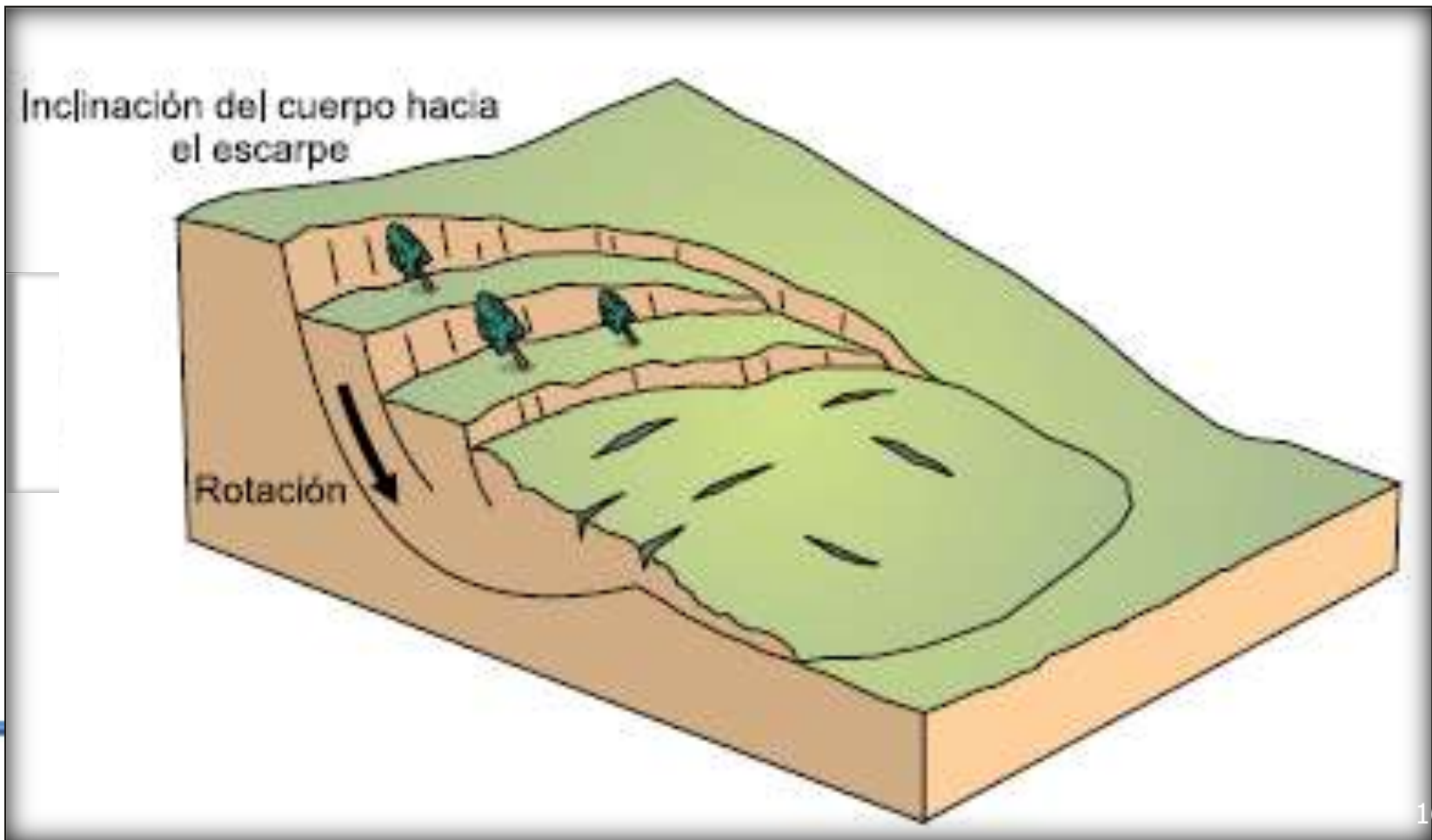
## Esquema y figura de un deslizamiento en cuña (GEMMA, 2007)



**Rotura circular = deslizamiento rotacional  
(GEMMA, 2007)**

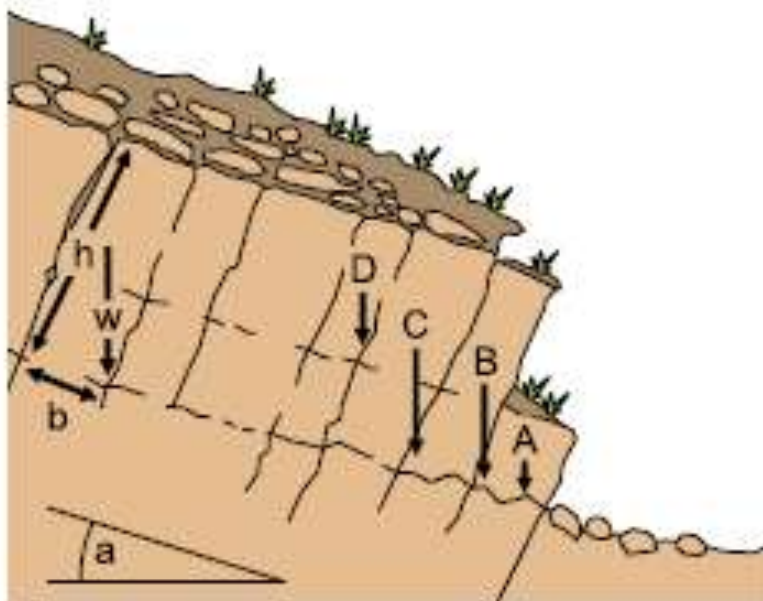


## Esquema de un deslizamiento rotacional, mostrando los rasgos morfológicos característicos.

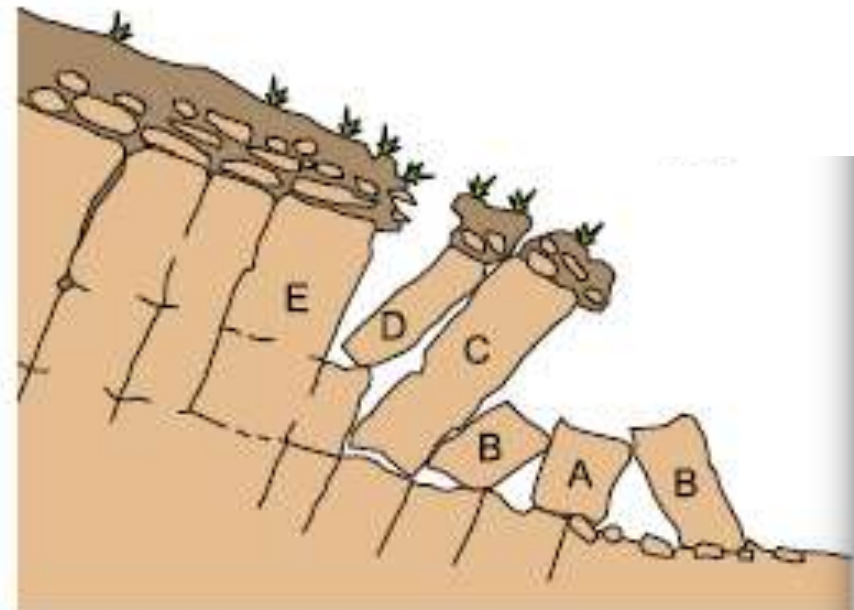




## Esquema de Rotura por Vuelco

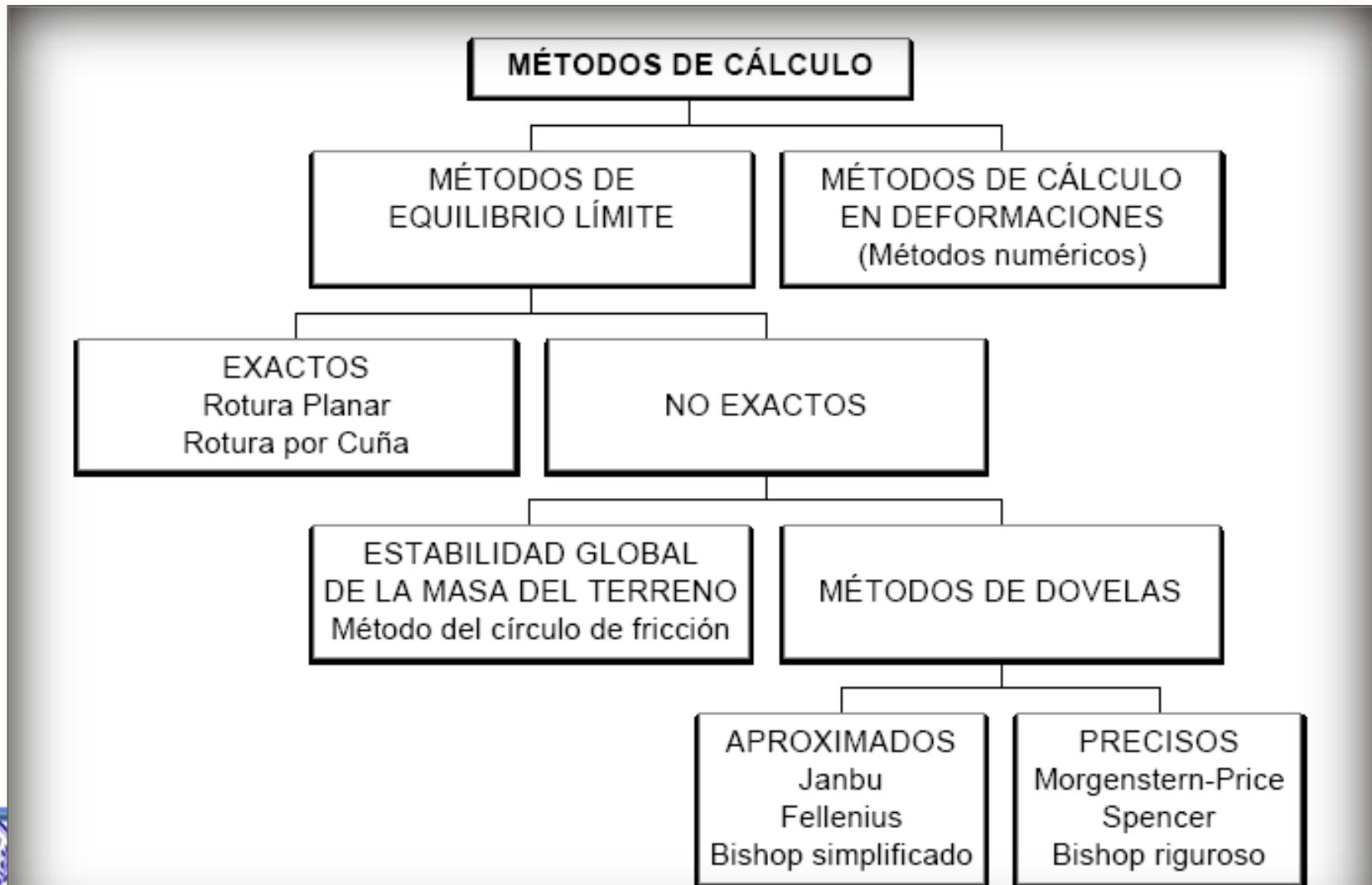


(a)



(b)

## Métodos de Cálculo de la estabilidad de taludes



## **ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD.**

- 1.- Selección de una superficie teórica de rotura en el talud.
- 2.- Aplicación del criterio de Morh - Coulomb.  $\tau_{\alpha} = C + \sigma_n \tan \phi$
3. Definición del coeficiente de seguridad (factor de seguridad).

$$FS = \frac{\text{Fuerzas estabilizadoras}}{\text{Fuerzas desestabilizadoras}}$$

$$FS = \frac{\text{Tensiones tangenciales resistentes}}{\text{Tensiones tangenciales deslizantes}}$$

# ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD.

$$FS = \frac{C + N \cdot \tan\phi}{T}$$

FS = Factor de seguridad.

N = Fuerzas que actúan en la dirección normal al plano de deslizamiento.

T = Fuerzas que actúan en la dirección paralela al deslizamiento.

C = Cohesión sobre el plano de deslizamiento.

## Criterios generales para seleccionar un factor de seguridad para el diseño de taludes. Suarez Jaime (2007)

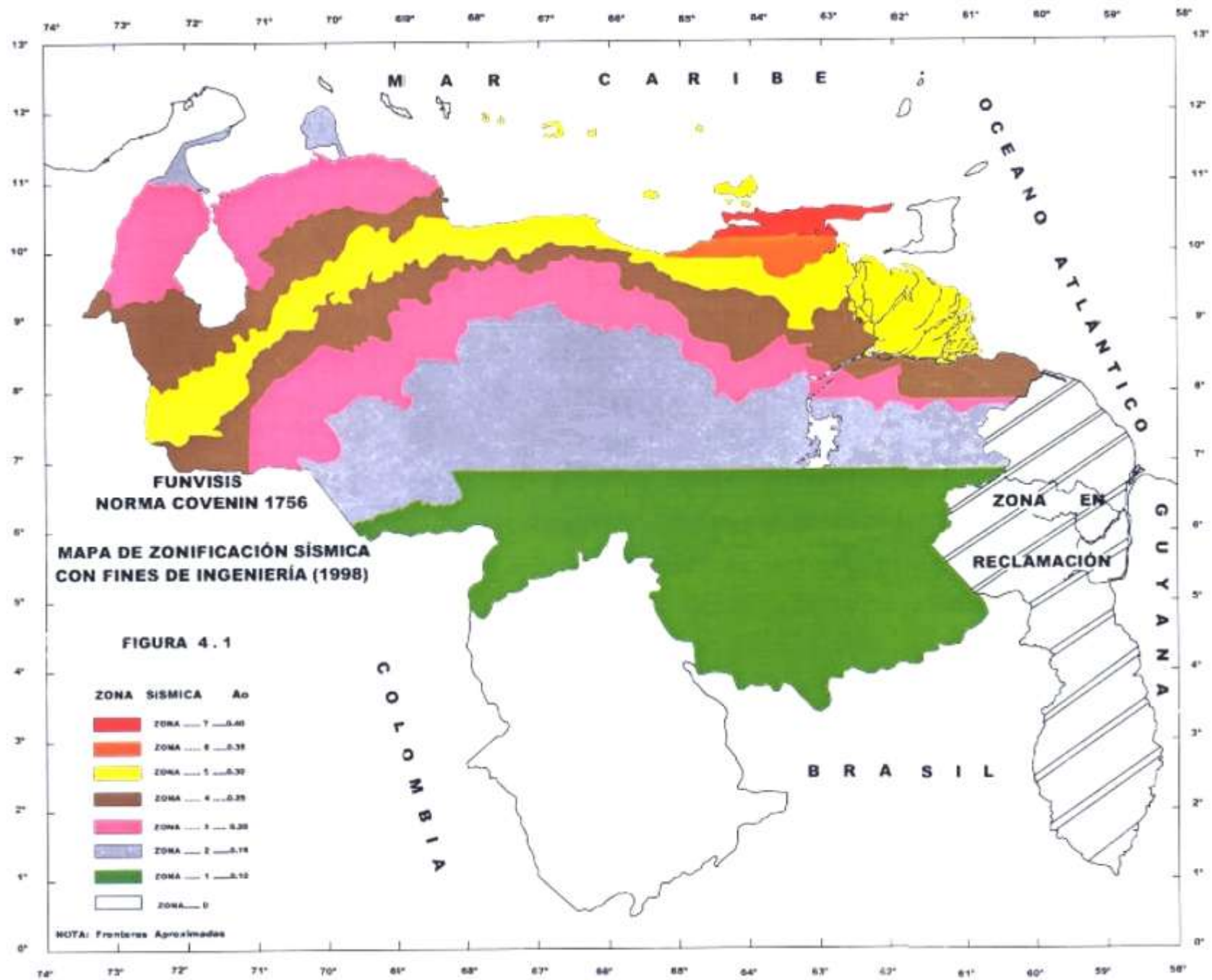
Caso	Factor de Seguridad para Cargas Estáticas	Factor de Seguridad para Cargas Dinámicas $K_h = 0.5 A$
Pérdida de vidas humanas al fallar el talud.	1.5	1.2
Pérdida de más del 30% de la inversión de la obra específica o pérdidas consideradas importantes.	1.3	1.15
Pérdidas económicas no muy importantes.	1.2	1.1
La falla del talud no causa daños.	1.1	1.0

## Rango del factor de seguridad en taludes. Sowers y Sowers (1970), en Ucar (2004)

FACTOR DE SEGURIDAD	SIGNIFICADO
$< 1$	Inseguro
1,00 - 1,20	Seguridad cuestionable
1,30 - 1,40	Satisfactorio para cortes y terraplenes, cuestionables para presas
$> 1,50$	Seguro para presas

## Rango del factor de seguridad en taludes. D'Appolonia (1975), en Ucar (2004)

CARACTERISTICAS	FACTOR DE SEGURIDAD (FS)		
	Alto	Moderado	Bajo
Diseño basado en los parámetros de corte medidos en el laboratorio	1,50	1,40	1,30
Diseño que considera la máxima aceleración sísmica en el sitio	1,20	1,10	1,00





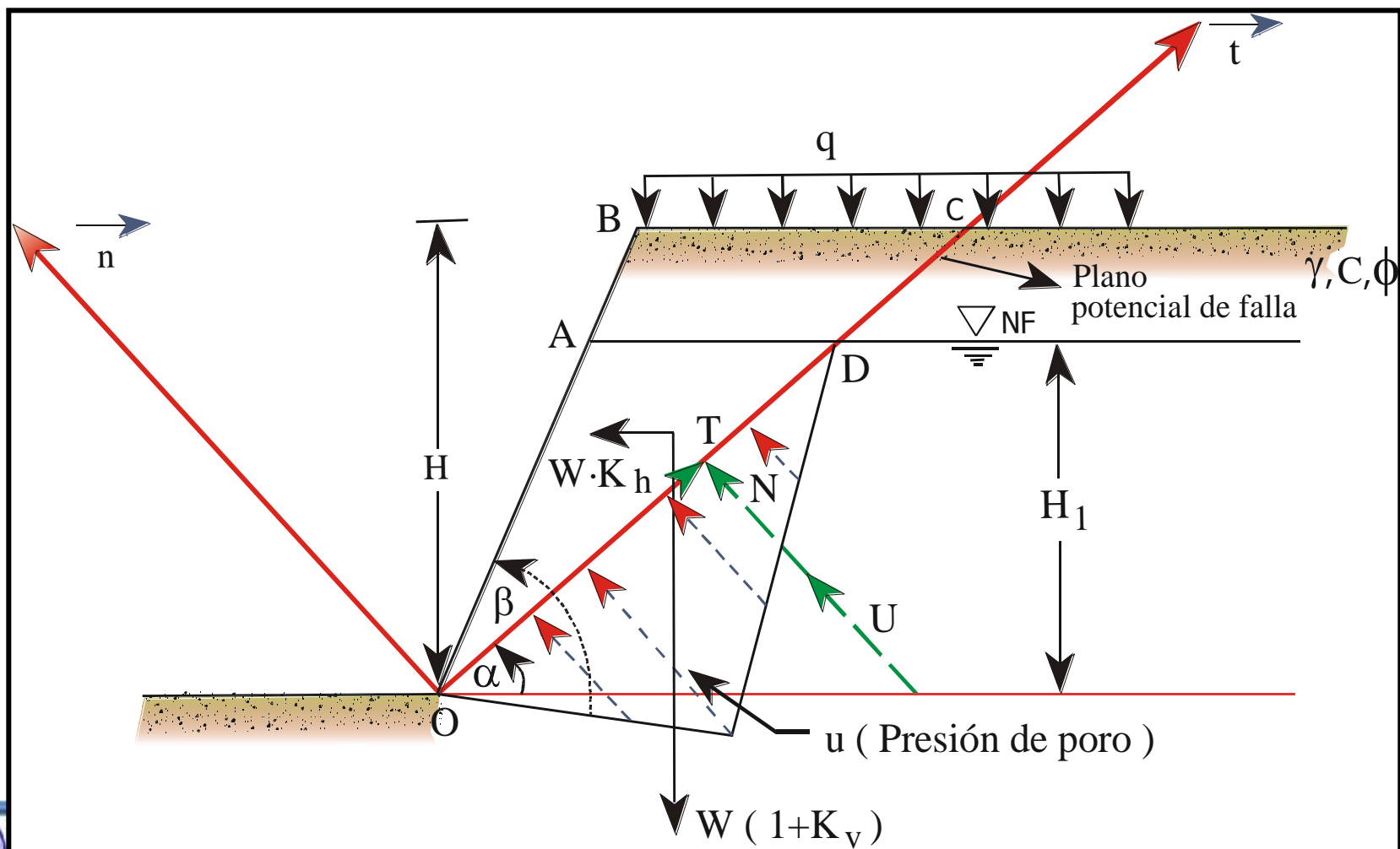
## DESARROLLO ANALITICO - ROTURA PLANA

Determinar la superficie crítica de deslizamiento y el mínimo coeficiente de seguridad teniendo en cuenta:

- ✦ Peso de la cuña  $W_T$ ,
- ✦ Las fuerzas sísmicas  $F_h$  y  $F_v$ ,
- ✦ Resultante  $U$  de las presiones intersticiales que actúan sobre la superficie potencial de rotura,
- ✦ La sobrecarga  $q$ ,
- ✦ Parámetros  $C = C_j$  y  $\phi = \phi_j$ , que gobiernan la resistencia al corte en el plano de discontinuidad.

# Geotecnia: Tema 4 Estabilidad de taludes

## Geometría del talud mostrando las fuerzas y el plano potencial de deslizamiento (método bidimensional)



## DESARROLLO ANALITICO - ROTURA PLANA

Dichas fuerzas se expresan:

$$\text{Fuerza Sísmica Horizontal} = F_h = m \cdot a_h = \frac{W_T}{g} a_h = W_T \cdot k_h$$

$$\text{Fuerza Sísmica Vertical} = W_T \cdot k_v$$

$$\text{Donde: } k_v \approx \frac{1}{2} k_h \text{ a } \frac{3}{4} k_h \quad \text{y} \quad k_h = \frac{a_h}{g}$$

$U$  = Fuerza total debido al agua actuando sobre el plano de discontinuidad

$$U = \frac{1}{2} H_1 \gamma_w \cdot \overline{OD} \quad \longrightarrow \quad U = \frac{H_1^2}{2} \gamma_w (\cot \alpha - \cot \beta) \sec \alpha$$

## DESARROLLO ANALITICO - ROTURA PLANA

Siendo:  $\psi_1 = \frac{\gamma_w \cdot H_1^2}{2}$

El peso total de la cuña de falla es:

$$W_T = \gamma_{sat} \overline{ADO} + \frac{1}{2} (\overline{AD} + \overline{BC}) (H - H_1) \gamma + q \overline{BC}$$

$$W_T = \frac{\gamma_{sat}}{2} \cdot H_1^2 (\cot \alpha - \cot \beta) + \frac{1}{2} (\overline{AD} + \overline{BC}) \cdot (H - H_1) \gamma + q \cdot H (\cot \alpha - \cot \beta)$$

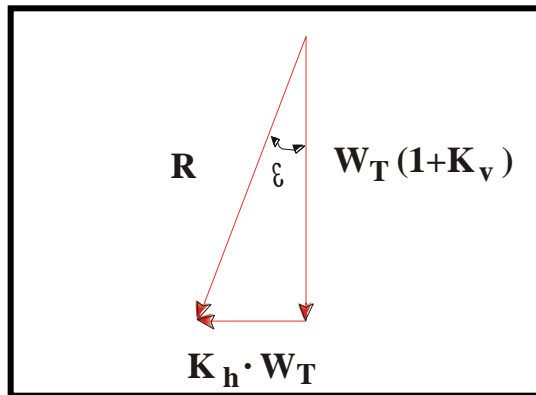
$$W_T = \left[ \frac{\text{sen}(\beta - \alpha)}{\text{sen} \beta \cdot \text{sen} \alpha} \right] \cdot \psi$$

Siendo:  $\psi = \frac{\gamma_{sat}}{2} \cdot H_1^2 + \frac{1}{2} \cdot (H^2 - H_1^2) \gamma + q \cdot H$

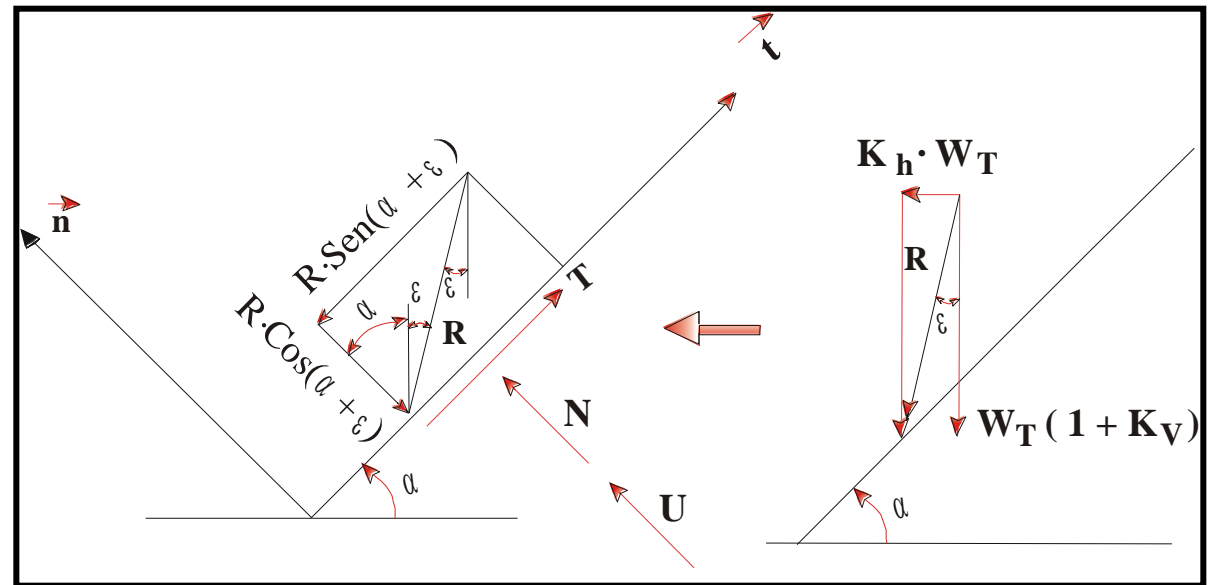
## DESARROLLO ANALITICO - ROTURA PLANA

Al aplicar la condición de equilibrio :

$$\begin{aligned} \Sigma F_n = 0 & \quad N + U - R \cdot \cos(\alpha + \varepsilon) = 0 \\ \Sigma F_t = 0 & \quad T - R \cdot \sin(\alpha + \varepsilon) = 0 \end{aligned}$$



$$\tan \varepsilon = \frac{k_h}{(1 + k_v)}$$



## DESARROLLO ANALITICO - ROTURA PLANA

El coeficiente de seguridad al aplicar el criterio de rotura de Mohr-Coulomb es:

$$FS = \frac{\frac{C.H}{\text{sen}\alpha} + [R \cos(\alpha + \varepsilon) - U] \cdot \tan \phi}{R \text{sen}(\alpha + \varepsilon)}$$

Siendo R la resultante de las fuerzas actuantes,

$$R = W_T \cdot \sqrt{k_h^2 + (1 + k_v)^2} = W_T \cdot k$$

$C = C_j$ , es la cohesión, o resistencia al corte cuando tensión normal es nula, medida en el plano de discontinuidad.

## DESARROLLO ANALITICO - ROTURA PLANA

Reemplazando R y U/R, se obtiene:

$$FS = \frac{\frac{C.H \operatorname{sen} \beta}{\operatorname{sen}(\beta - \alpha) \cdot \psi \cdot k} + \left[ \cos(\alpha + \varepsilon) - \sec \alpha \cdot \frac{\psi_1}{k \cdot \psi} \right] \tan \phi}{\operatorname{sen}(\alpha + \varepsilon)}$$

Llamando:

$$k_1 = \frac{\psi_1}{k \cdot \psi}$$

$$k_2 = \frac{C.H}{\psi \cdot k} \cdot \operatorname{sen} \beta$$

$$FS = \frac{k_2}{\operatorname{sen}(\beta - \alpha) \cdot \operatorname{sen}(\alpha + \varepsilon)} + \frac{\tan \phi}{\tan(\alpha + \varepsilon)} - k_1 \cdot \tan \phi \frac{\sec \alpha}{\operatorname{sen}(\alpha + \varepsilon)}$$

## DESARROLLO ANALITICO - ROTURA PLANA

$$\frac{\partial FS}{\partial \alpha} = 0$$

$$\frac{K_2 \operatorname{sen}(\beta - 2\alpha - \varepsilon)}{\operatorname{sen}^2(\beta - \alpha)} + \tan \phi - K_1 \tan \phi \sec^2 \alpha \cos(2\alpha + \varepsilon) = 0$$

$$k = \left[ k_h^2 + (1 + k_v)^2 \right]^{1/2}, \quad R = W_T \cdot k$$

$$\psi_1 = \frac{\gamma_w \cdot H_1^2}{2}, \quad W_T = \left[ \frac{\operatorname{sen}(\beta - \alpha)}{\operatorname{sen} \beta \cdot \operatorname{sen} \alpha} \right] \cdot \psi, \quad k_1 = \frac{\psi_1}{k \cdot \psi}$$

$$\psi = \left\{ \frac{\gamma_{sat}}{2} \cdot H_1^2 + \frac{1}{2} (H^2 - H_1^2) \gamma + q \cdot H \right\}, \quad k_2 = \frac{C \cdot H}{\psi \cdot k} \operatorname{sen} \beta$$

$$\tan \varepsilon = \frac{k_h}{(1 + k_v)}, \quad K_v = \text{negativo cuando la fuerza sísmica es hacia arriba}$$



## Geotecnia: Tema 4 Estabilidad de taludes

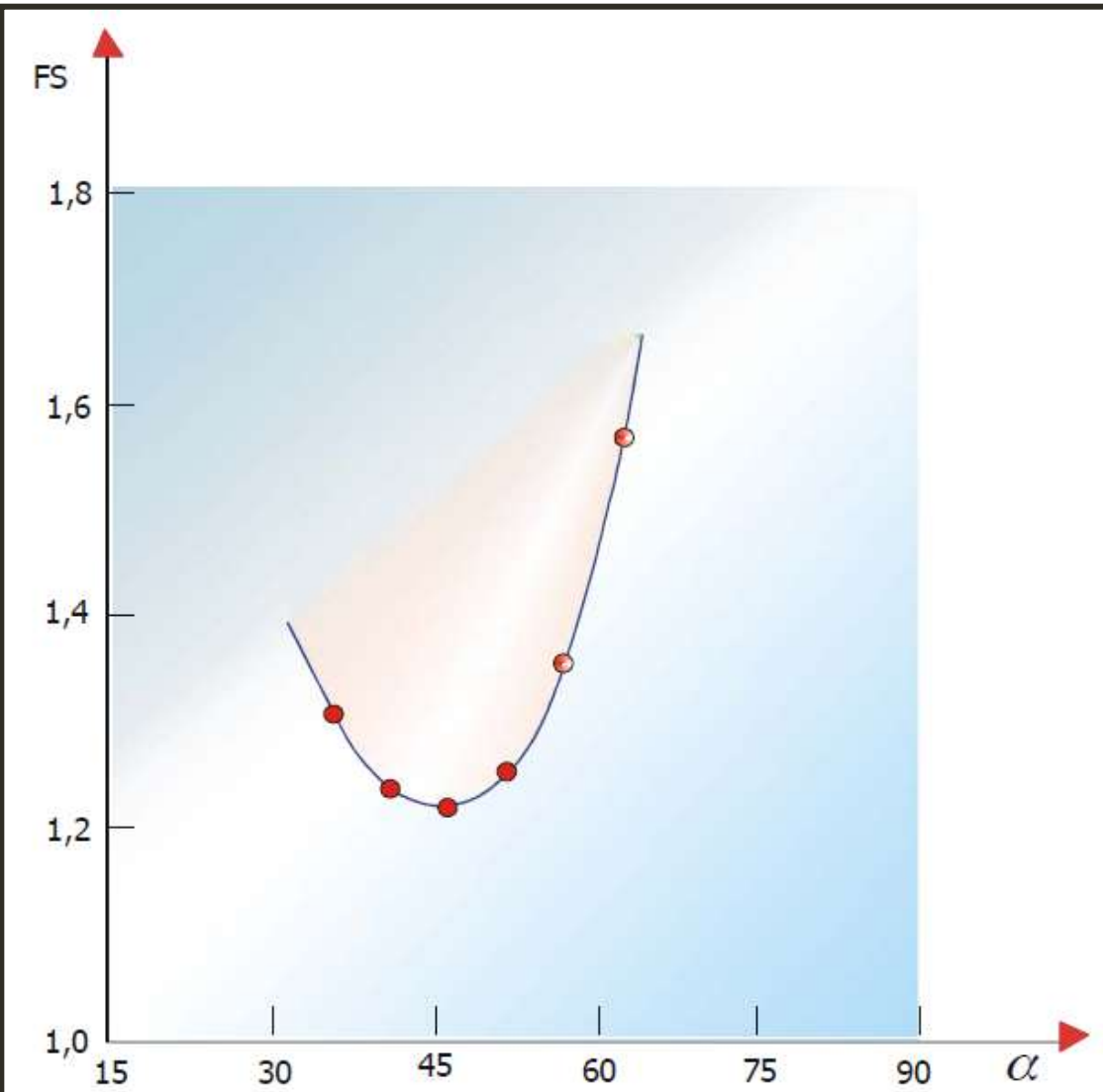
La Expresión que define el coeficiente de seguridad al aplicar el criterio de rotura de Hoek y Brown es:

$$FS = \left[ \frac{\frac{m\sigma_c}{8} \left( \frac{1 - \text{sen}\phi_i}{\tan\phi_i} \right)}{T} \right] \left( \frac{H}{\text{sen}\alpha} \right)$$

$$FS = \left( \frac{m.\sigma_c}{8} \right) \left( \frac{1 - \text{sen}\phi_i}{\tan\phi_i . R . \text{sen}(\alpha + \varepsilon)} \right) \left( \frac{H}{\text{sen}\alpha} \right)$$

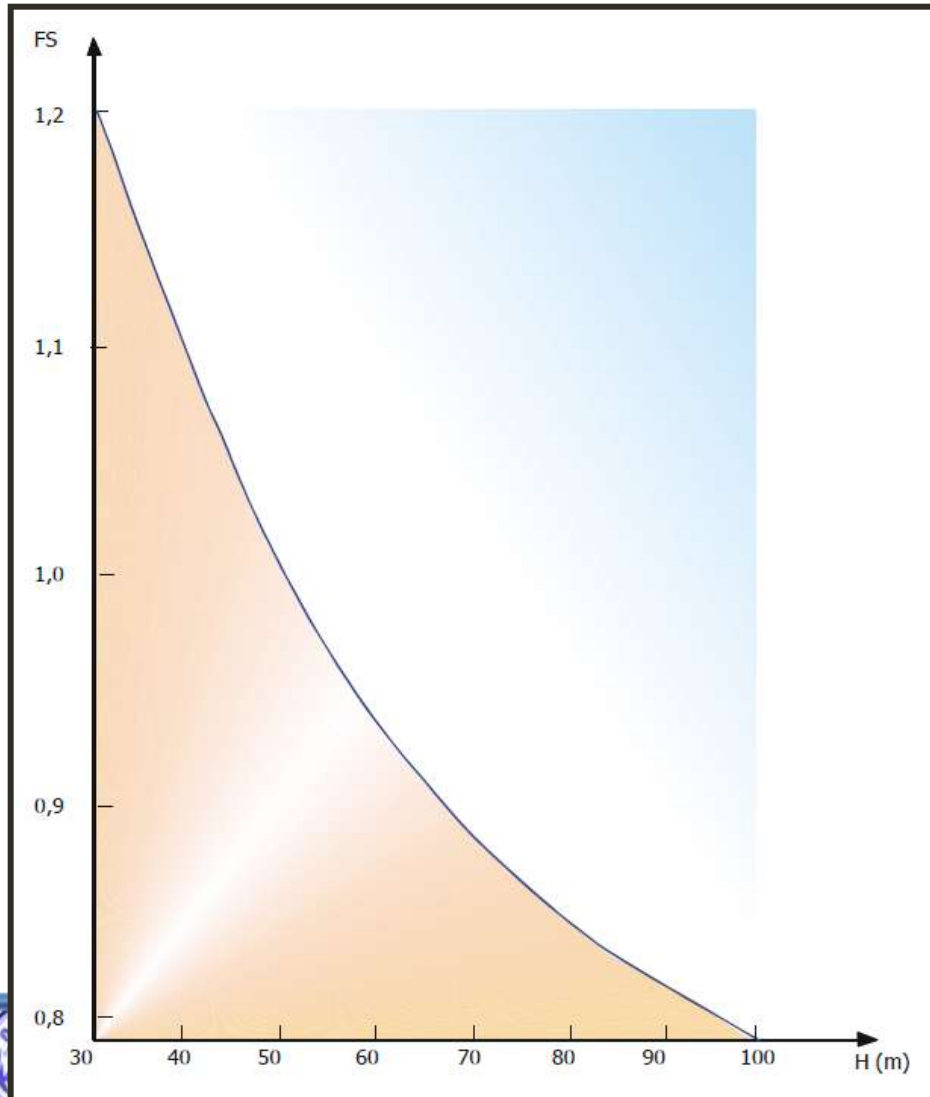
$$FS = \left( \frac{m.\sigma_c . H . \text{sen}\beta}{8.\psi.K} \right) \left( \frac{1 - \text{sen}\phi_i}{\tan\phi_i . \text{sen}(\beta - \alpha) . \text{sen}(\alpha + \varepsilon)} \right)$$

## DESARROLLO ANALITICO - ROTURA PLANA



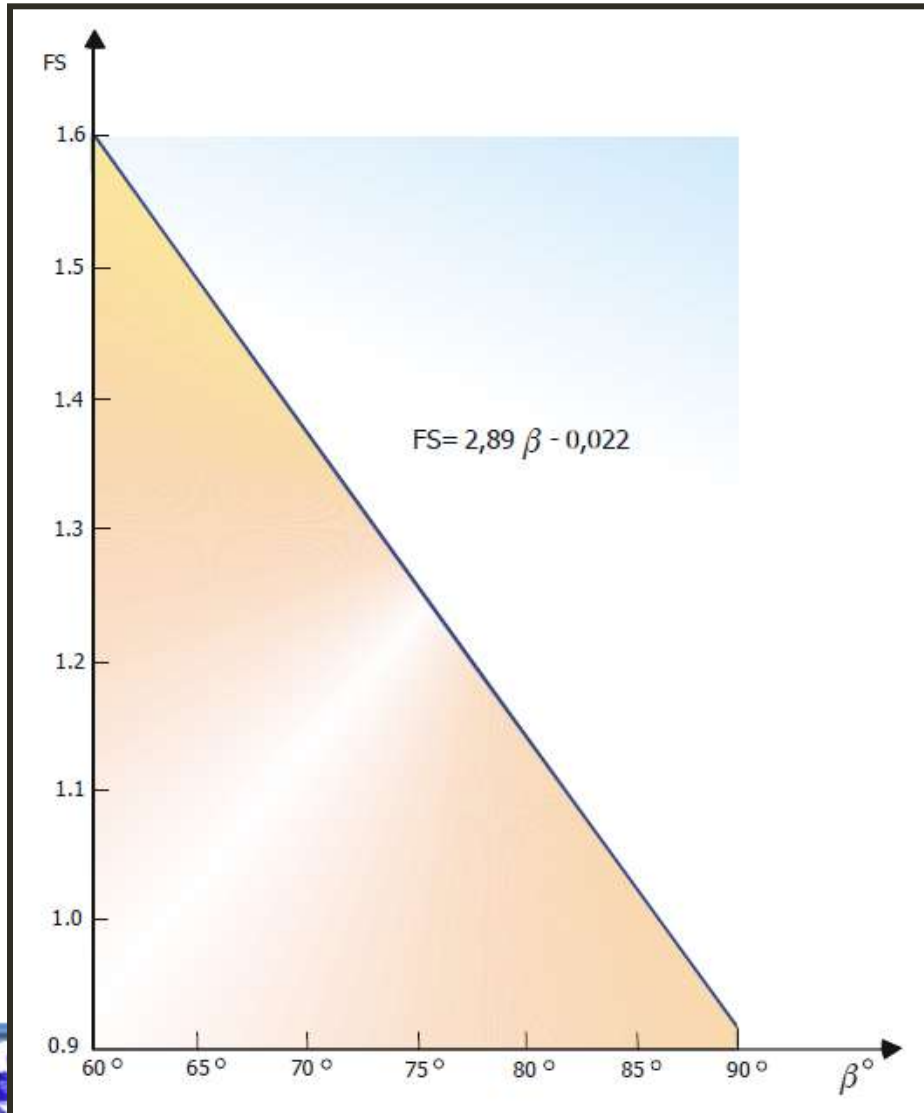
Variación del factor de seguridad (FS) en función de la inclinación del plano de falla.

## DESARROLLO ANALITICO - ROTURA PLANA



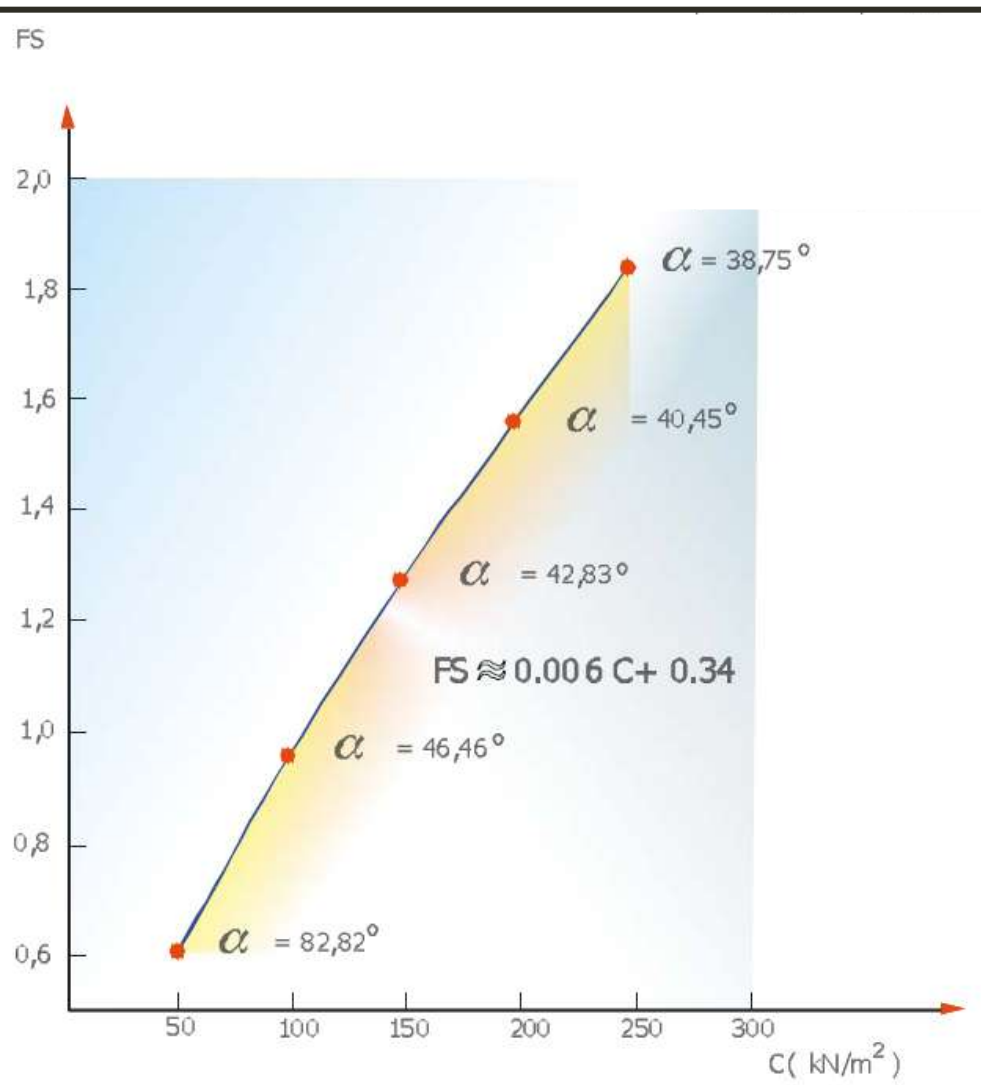
Variación del factor de seguridad (FS) en función de la altura del talud (H) , considerando que la inclinación del plano de rotura  $\alpha$  es constante.

## DESARROLLO ANALITICO - ROTURA PLANA



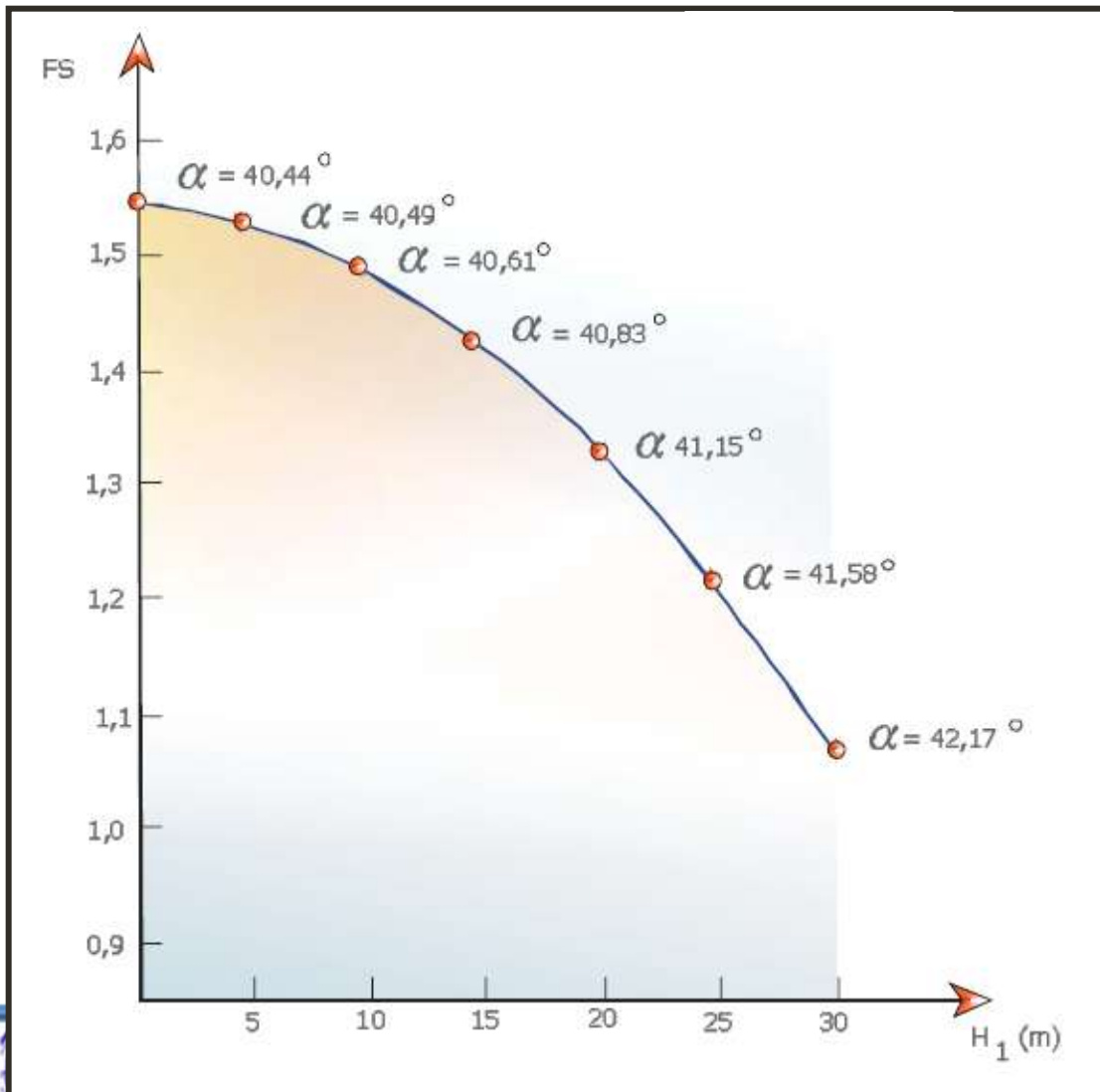
Variación del factor de seguridad (FS) en función de la inclinación del talud  $\beta$ , considerando que el ángulo del plano de rotura  $\alpha$  es constante.

## DESARROLLO ANALITICO - ROTURA PLANA



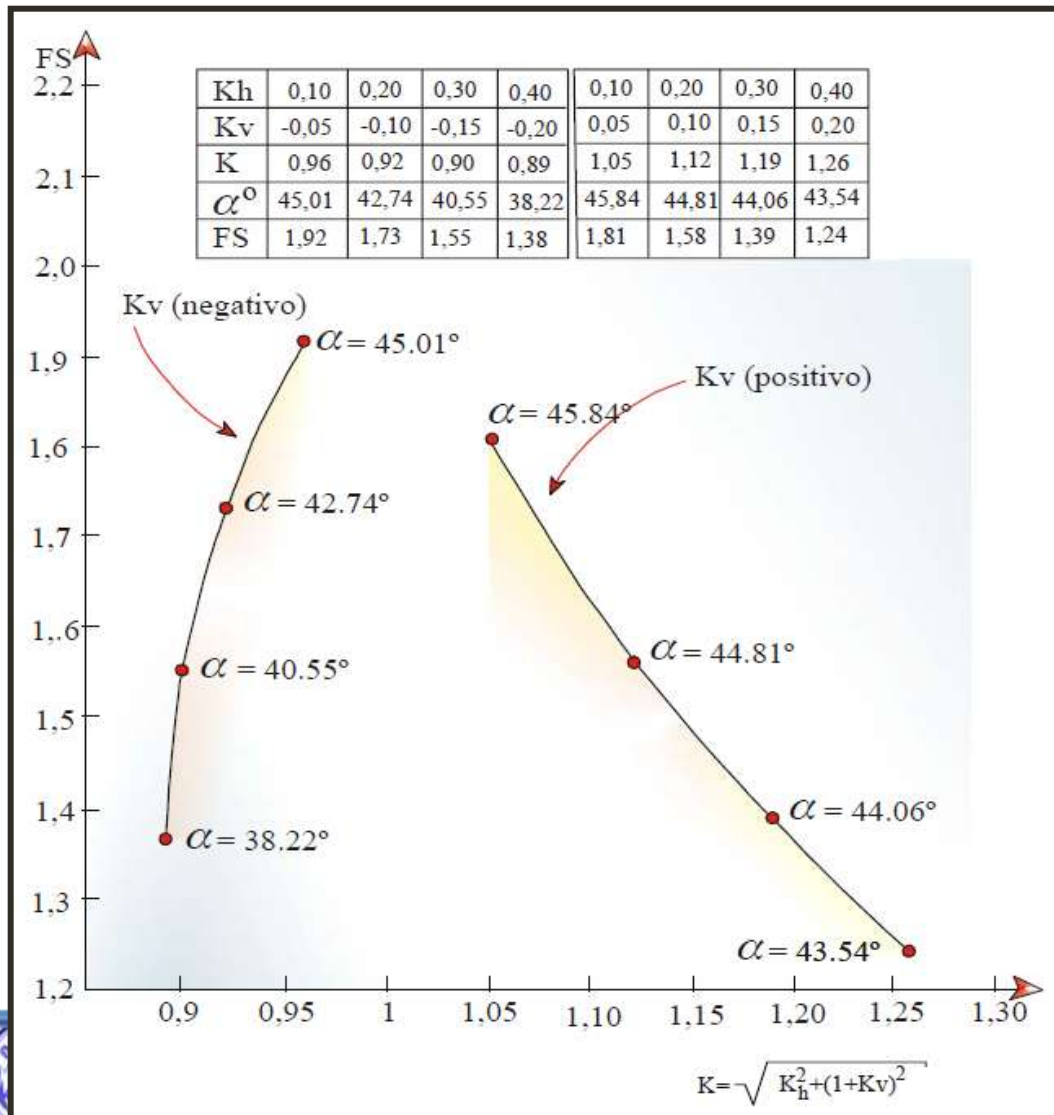
Variación del mínimo factor de seguridad respecto a al cohesión del macizo rocoso.

## DESARROLLO ANALITICO - ROTURA PLANA



Variación del mínimo factor de seguridad en función de la altura del nivel freático  $H_1$

## DESARROLLO ANALITICO - ROTURA PLANA



Variación del mínimo factor de seguridad en función del factor del sismo.

## DESARROLLO ANALITICO - ROTURA PLANA

### EJEMPLO 1

Se desea calcular el factor de seguridad de una excavación en roca, considerando los valores geométricos, las características resistentes en el plano de discontinuidad, conjuntamente con los siguientes parámetros determinantes en la estabilidad del macizo rocoso.

$$H = 30 \text{ m}$$

$$H_1 = 20 \text{ m}, \beta = 76^\circ$$

$$\phi = \phi_j = 30^\circ, C = C_j = 295 \text{ kPa}$$

$$\gamma = 24 \text{ kN/m}^3, \gamma_{\text{sat}} = 25 \text{ kN/m}^3$$

$$q = 300 \text{ kN/m}^2$$

$$K_h = 0,2 \text{ y } K_v = 0,1$$



## DESARROLLO ANALITICO - ROTURA PLANA

### EJEMPLO 2

Consideremos una sección del talud de la formación Río Negro, expuesta en la carretera Zea – Panamericana del Estado Mérida, cuyas propiedades geométricas, físicas y de resistencia al corte son las siguientes.

$$H = 30 \text{ m}$$

$$\beta = 76^\circ, \quad \text{talud } 1/4 : 1(v)$$

$$\phi = \phi_j = 35^\circ$$

$$C = C_j = 200 \text{ kPa } (20 \text{ t/m}^2)$$

$$\gamma = 25 \text{ kN/m}^3 \quad (2,5 \text{ t/m}^3)$$

$$q = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$K_h = 0,3 \text{ y } K_v = -0,15$$

### Determinar:

$$\alpha_c = ?, \text{ FS} = ?$$

**Variación FS Vs  $\alpha$**

**Variación FS Vs H , para  $\alpha = 60^\circ$**

**Variación FS Vs  $\beta$  , para  $\alpha = 60^\circ$**

**Si  $\alpha = 60^\circ$  y FS = 1,5. det:  $\beta = ?$**

# Cálculo de la fuerza del anclaje considerando el caso activo y pasivo

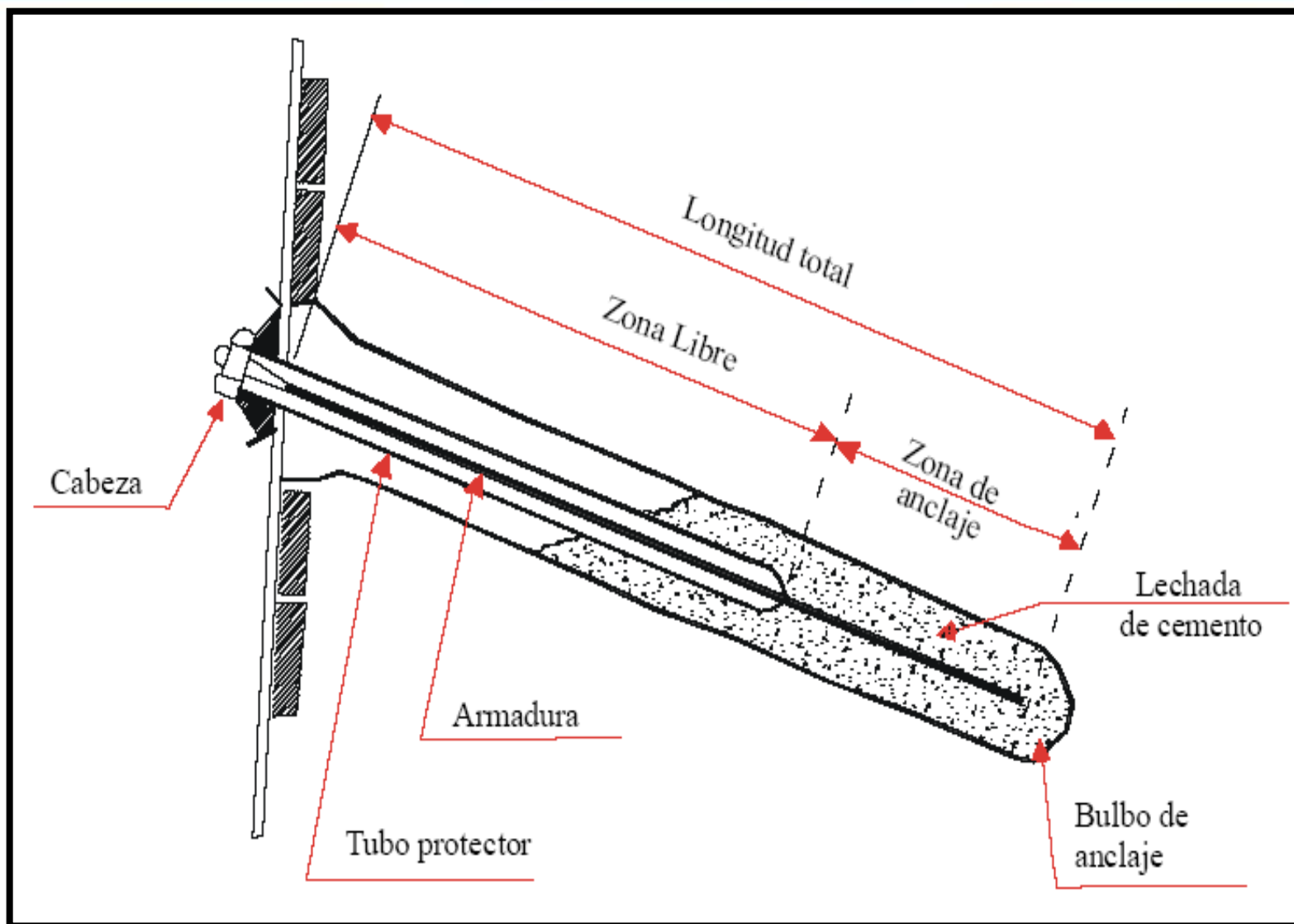
### Los anclajes activos:

Se someten a tracción antes de que ocurra o exista cualquier movimiento de la masa rocosa. Esto genera la reacción inmediata de las fuerzas tangenciales resistentes de la roca adyacentes

### Los anclajes pasivos:

Los anclajes no se tensan y actúan como una fuerza resistente, es decir, dichos anclajes entran en acción oponiéndose al deslizamiento cuando el macizo rocoso a comenzado a moverse.

# Geotecnia: Tema 4 Estabilidad de taludes



**La zona de anclaje:** Es la parte solidaria del terreno, es la encargada de transferir los esfuerzos al mismo.

**La zona libre:** es la parte en la cual la armadura metálica se encuentra separada o independizada del terreno que la rodea, lo que permite deformarse con plena libertad al ponerse en tensión.

**La cabeza:** que corresponde a la zona de unión de la armadura a la placa de apoyo

La longitud del anclaje oscila entre 10 a 80 m. y el diámetro de perforación entre 75 a 150 mm (según Ayala)

	TIPO	AREA (mm <sup>2</sup> )	Es (tf)	T <sub>g</sub> (tf)	F <sub>pu</sub> (tf)	Tipo de acero St (Normas francesas) (kgf/mm <sup>2</sup> )	T <sub>a</sub> (tf) Para anclajes perma- nentes
Barras	φ26DY <sup>b</sup>	551,00	41,00	47,00	58,00	85,00-105,00 (Esfuerzo de tracción al 0,1% de deformación – resistencia última)	28,00
	φ32DY	804,00	60,00	68,00	84,00		41,00
	φ36DY	1.018,00	76,00	87,00	107,00		52,00
Cordones (torones)	1T13 <sup>c</sup>	93,00	12,00	15,00	17,00	163,00-185,00	9,00
	2T13	186,00	24,00	30,00	34,00		18,00
	4T13	372,00	48,00	60,00	68,00		36,00
	6T13	558,00	72,00	90,00	102,00		54,00
	7T13	651,00	84,00	105,00	119,00		63,00
	8T13	744,00	96,00	12,00	136,00		72,00
	9T13	837,00	108,00	135,00	153,00		81,00
	10T13	930,00	120,00	150,00	170,00		90,00
	11T13	1.023,00	132,00	165,00	187,00		99,00
	12T13	1.116,00	144,00	180,00	204,00		108,00
	1T15	139,00	18,00	22,00	24,00		13,00
	6T15	834,00	108,00	132,00	148,00		79,00
	7T15	973,00	126,00	154,00	173,00		92,00
	8T15	1.112,00	144,00	176,00	198,00		105,00
	9T15	1.251,00	162,00	198,00	222,00		118,00
	10T15	1.390,00	180,00	220,00	247,00		132,00
	11T15	1.529,00	198,00	242,00	272,00		145,00
	12T15	1.668,00	216,00	264,00	296,00		158,00
	13T15	1.807,00	234,00	286,00	321,00		171,00
	14T15	1.946,00	252,00	308,00	346,00		184,00
	15T15	2.085,00	270,00	330,00	371,00		198,00
	16T15	2.224,00	288,00	352,00	395,00		211,00
	17T15	2.363,00	306,00	374,00	420,00		224,00
	18T15	2.502,00	324,00	396,00	445,00		237,00
9T18	2.007,00	266,00	297,00	349,00	178,00		
12T18	2.676,00	354,00	396,00	465,00	237,00		
Alambres	6W8 <sup>d</sup>	301,00	30,00	39,60	44,40	148,00-194,00	23,00
	8W8	401,00	40,00	52,80	59,20		31,00
	10W8	502,00	50,00	66,00	74,00		40,00
	12W8	604,00	60,00	79,20	88,80		47,00
						131,00-148,00	



## Geotecnia: Tema 4 Estabilidad de taludes

$$\begin{aligned}\Sigma F_n &= 0 & N + U - R \cdot \cos(\alpha + \varepsilon) - Fa \sin(\alpha - \Delta) &= 0 \\ \Sigma F_t &= 0 & T - R \cdot \sin(\alpha + \varepsilon) + Fa \cos(\alpha - \Delta) &= 0\end{aligned}$$

$$FS(a) = \frac{\frac{C.H}{\text{sen}\alpha} + \left[ R \cos(\alpha + \varepsilon) - U + Fa \sin(\alpha - \Delta) \right] \cdot \tan \phi}{R \sin(\alpha + \varepsilon) - Fa \cos(\alpha - \Delta)}$$

Como:

$$FS = \frac{\frac{C.H}{\text{sen}\alpha} + \left[ R \cos(\alpha + \varepsilon) - U \right] \cdot \tan \phi}{R \sin(\alpha + \varepsilon)} = \frac{\lambda_1}{\lambda_3}$$

Sustituyendo:

$$FS(a) = \frac{\lambda_1 + Fa \sin(\alpha - \Delta) \cdot \tan \phi}{\lambda_3 - Fa \cos(\alpha - \Delta)}$$

## Geotecnia: Tema 4 Estabilidad de taludes

Despejando la fuerza del anclaje:

$$Fa = \frac{\lambda_3 [FS(a) - FS]}{\text{sen}(\alpha - \Delta) \cdot \tan \phi + \cos(\alpha - \Delta)} = \frac{\lambda_3 [FS(a) - FS]}{f(\Delta)}$$

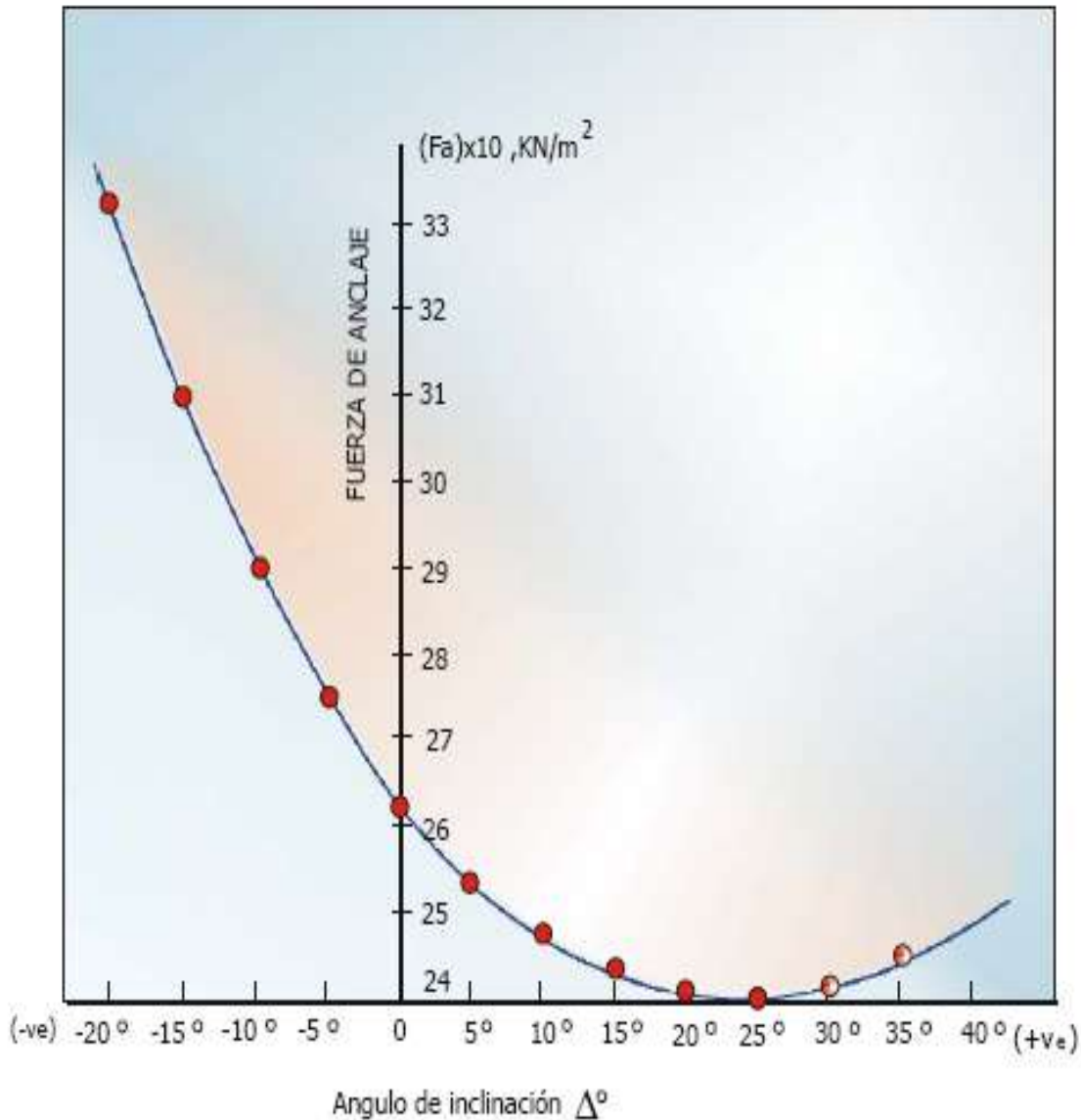
Efectuando:  $\frac{d f(\Delta)}{d\Delta} = 0$

$$f'(\Delta) = -\cos(\alpha - \Delta) \cdot \tan \phi + FS(a) \text{sen}(\alpha - \Delta) = 0$$

$$\tan(\alpha - \Delta) = \frac{\tan \phi}{FS(a)}$$



# Geotecnia: Tema 4 Estabilidad de taludes



Variación de la fuerza activa  $F_a$  en función de la inclinación  $\Delta$  del tirante anclado . El ángulo  $\Delta$  es positivo hacia arriba (up dip )

## Determinación del área ( $S_c \times S_f$ ) donde actúa el anclaje:

El área de acción de cada tirante anclado, así como el número requerido para estabilizar la masa rocosa, se determinan partiendo del hecho que se conocen las características del anclaje. (diámetro, tipo de acero, carga admisible o tracción admisible ( $T_a$ )).

El número de anclajes  $N$  en función de la longitud total del talud ( $L_t$ ), Fuerza del anclaje y tracción admisible, es:

$$F_a \cdot L_t = N \cdot T_a$$

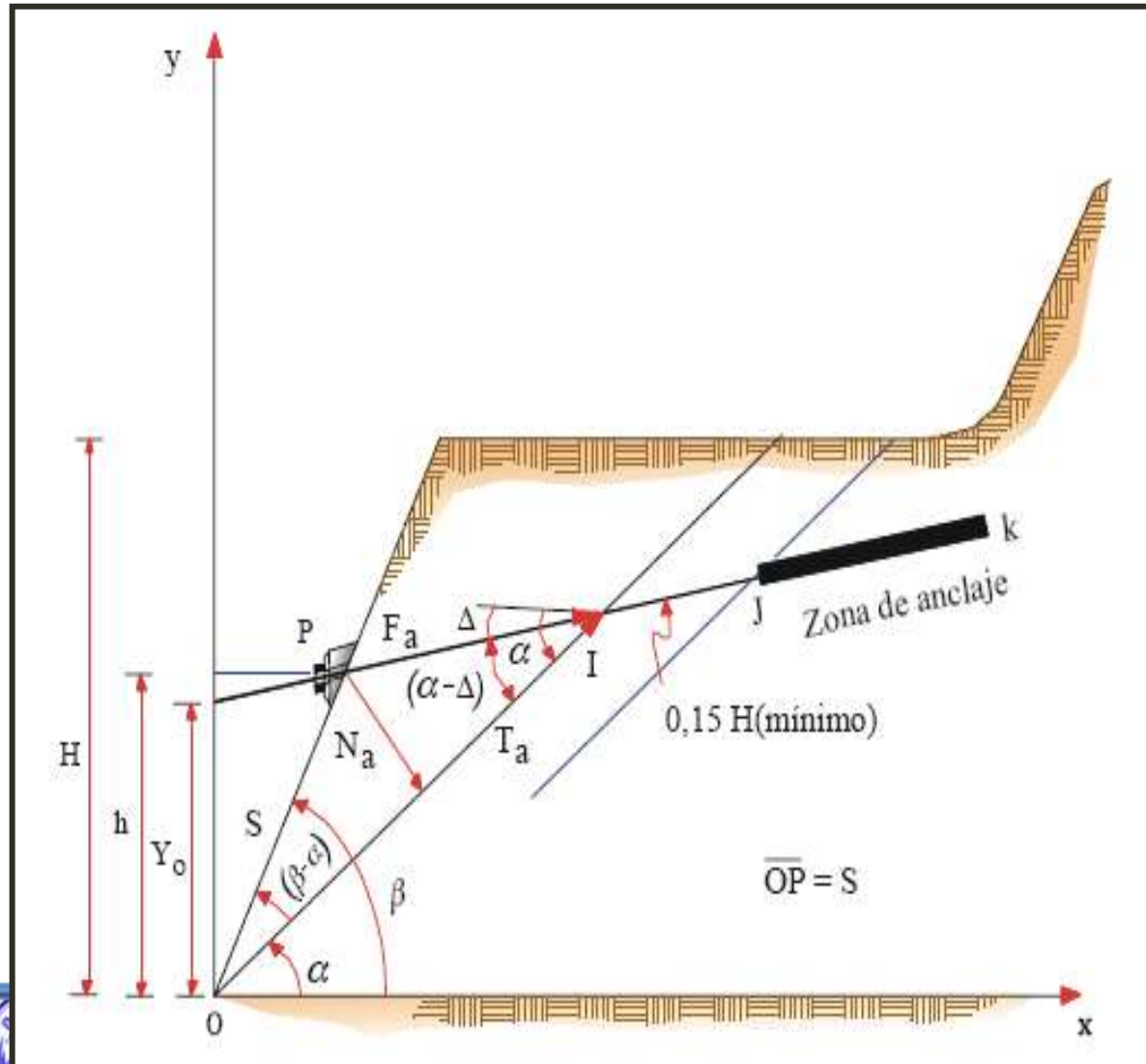
Expresión en función del área del talud a estabilizar:

$$(S_c \cdot S_f) \cdot N = L_t \cdot (H / \text{sen} \beta)$$



$$S = \left[ \frac{H}{\text{sen} \beta} \cdot \frac{T_a}{F_a} \right]^{1/2}$$

## Determinación de la longitud del anclaje:



PI = longitud entre el anclaje y la superficie de falla.

IJ = Longitud mínima, localizada en la roca estable.  
(15% de H)

JK = zona de anclaje

# Geotecnia: Tema 4 Estabilidad de taludes

Longitud del anclaje:

$$L = L_L + L_S$$

$L_L = PI + IJ$  ( zona libre, independizada del terreno que la rodea)

$L_S = JK$  ( zona de anclaje)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Ley del seno} \\ \frac{\overline{PI}}{\text{sen}(\beta - \alpha)} = \frac{\overline{OP}}{\text{sen}(\alpha - \Delta)} \\ S = \overline{OP} \end{array} \right. \longrightarrow \overline{PI} = S \cdot \left[ \frac{\text{sen}(\beta - \alpha)}{\text{sen}(\alpha - \Delta)} \right]$$

# Geotecnia: Tema 4 Estabilidad de taludes

$$L_S = \left[ \frac{m \cdot Ta}{\pi \cdot \phi_p \cdot \tau_u} \right]$$

Donde:

$m$  = coeficiente de seguridad 1,5 a 2.

$Ta$  = tracción admisible del anclaje.

$\phi_p$  = diámetro de perforación del barreno.

$\tau_u$  = resistencia al corte en la interface cemento roca:  $\tau_u = (1/10) (\sigma_c \text{ o } f'_c)$

$$L_t = \left[ S \cdot \frac{\text{sen}(\beta - \alpha)}{\text{sen}(\alpha - \Delta)} + 0,15H \right] + \left[ \frac{m \cdot Ta}{\pi \cdot \phi_p \cdot \tau_u} \right]$$