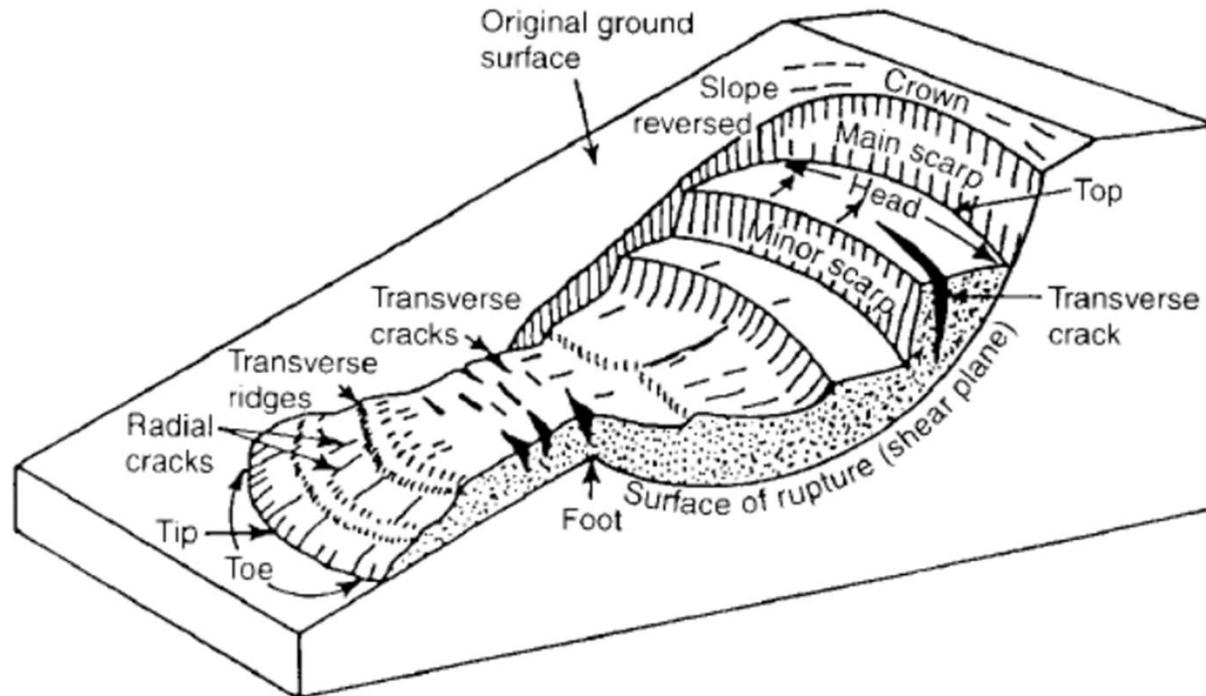




Estabilidad de taludes



Mecánica de Suelos y Geología

Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

Índice



- Definición del problema de estabilidad de taludes
- Método de dovelas
- Selección de parámetros
- Análisis probabilístico y LRFD
- Análisis sísmico de taludes
- Taludes en macizos rocosos

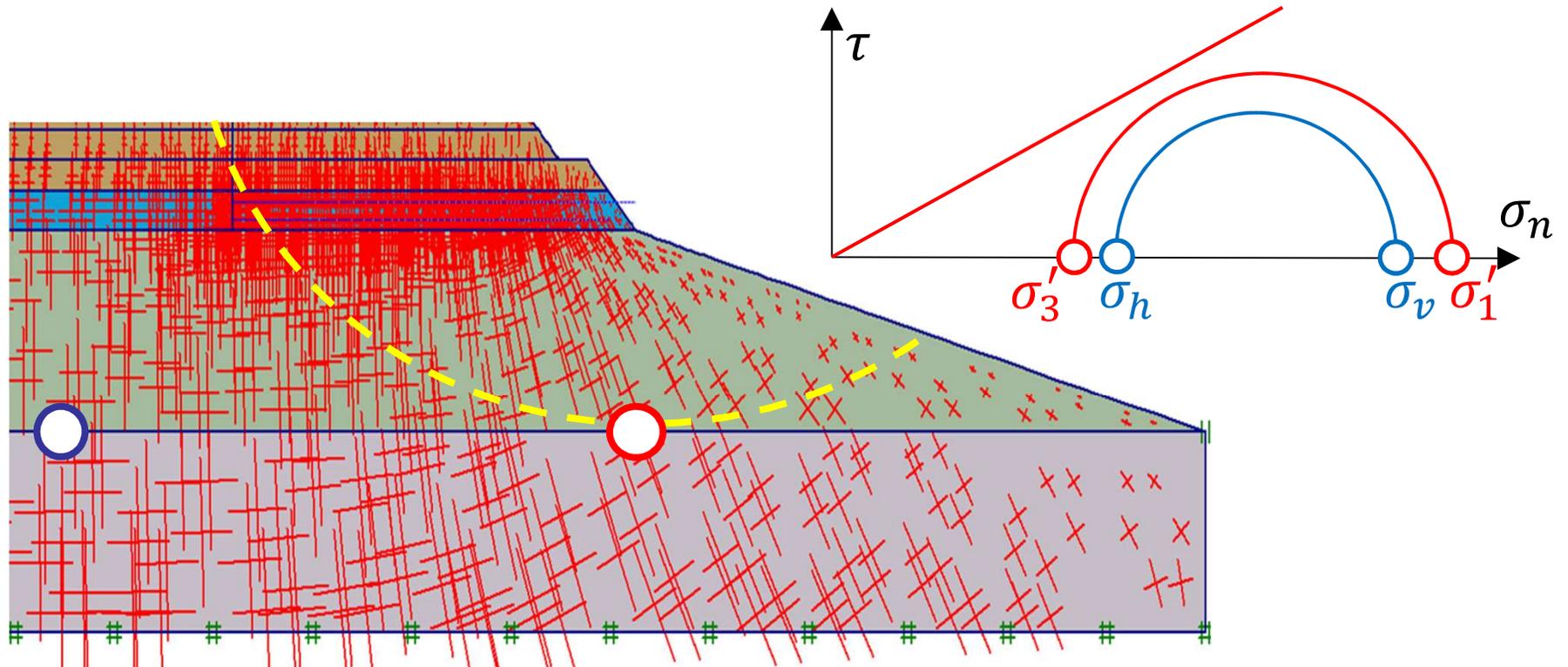


Descripción del problema

Terreno horizontal: $\sigma_h = \sigma'_3 \cong 0.5\sigma'_1 = \sigma_v$

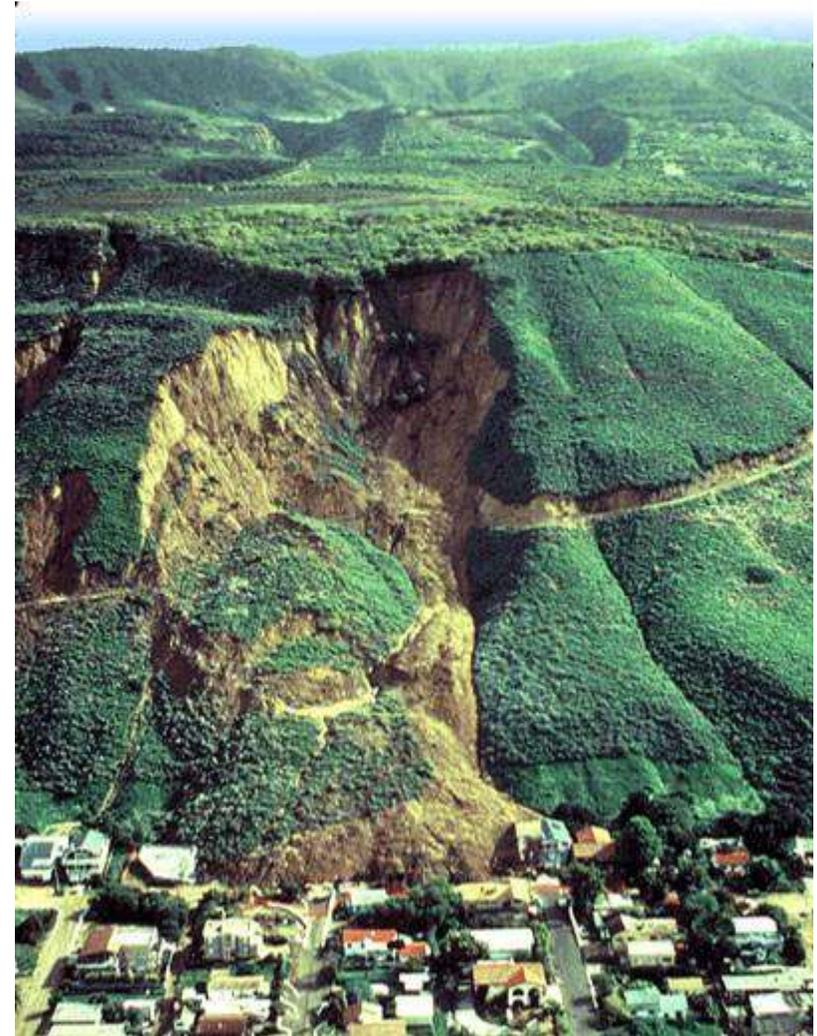
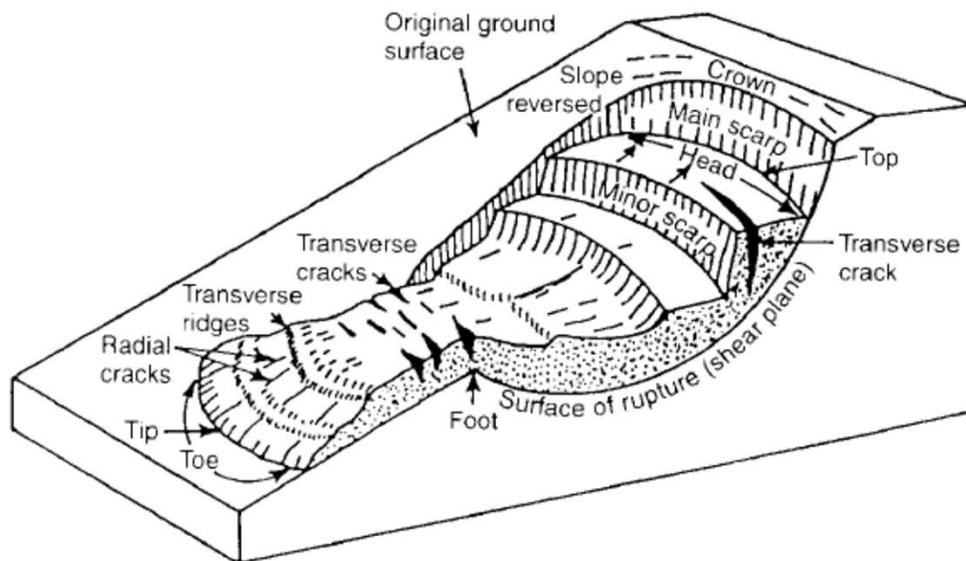
Terreno inclinado: tensiones de corte con σ_v constante

($\sigma_1 > \sigma_v$, $\sigma_3 < \sigma_h$): riesgo de falla



Descripción del problema

Si las tensiones de corte superan la resistencia al corte del terreno: falla de talud



La Conchita, California, 1995
U.S. Geological Survey.

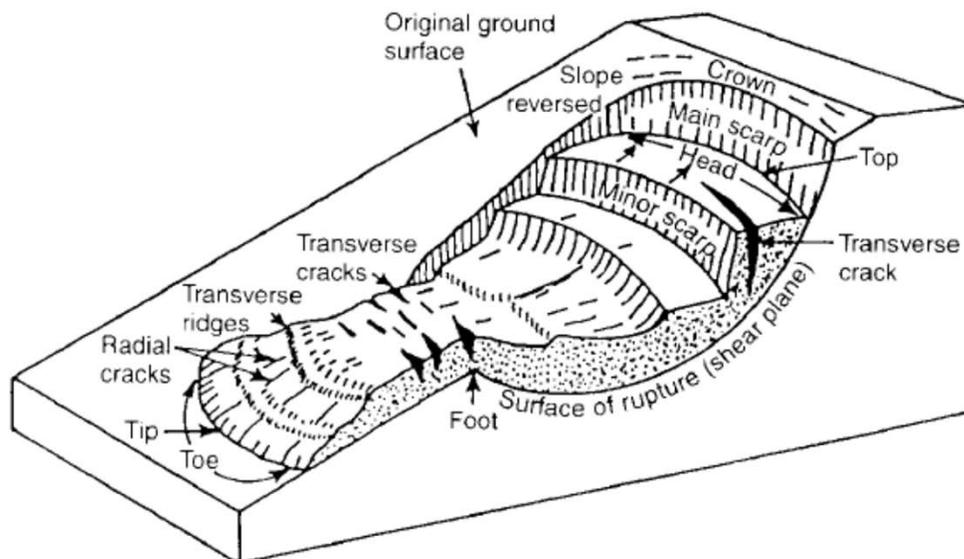


Factor de seguridad



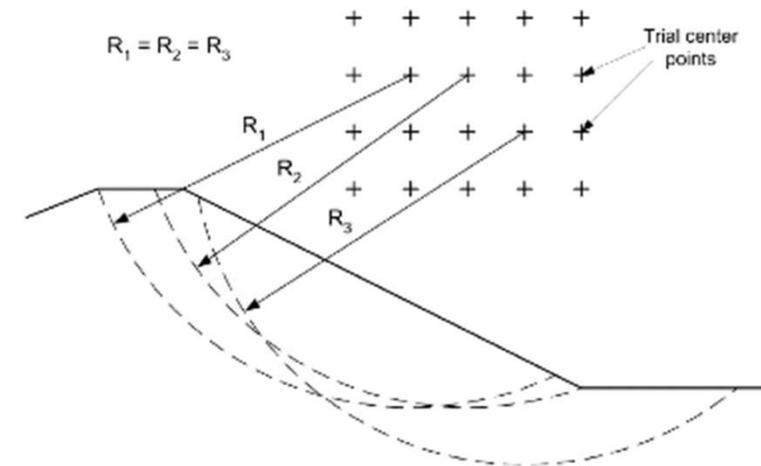
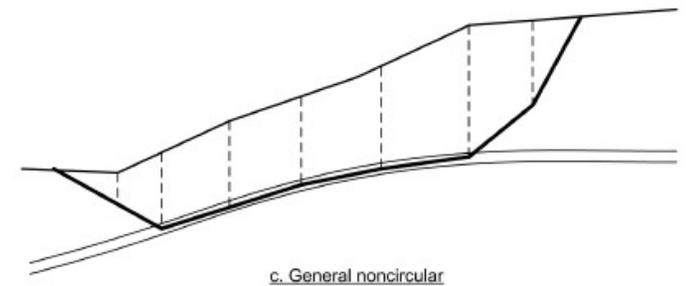
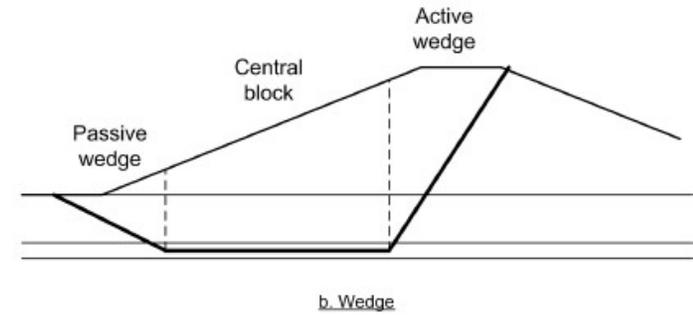
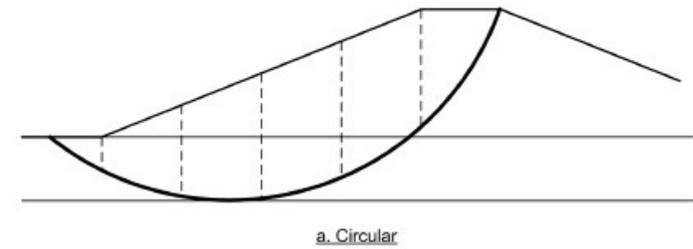
FoS : cociente entre la capacidad (valor de diseño de C) y la demanda (valor de diseño de D)

- C : integral de la resistencia al corte en la superficie de potencial deslizamiento
- D : Integral de las tensiones de corte en la misma superficie



Solución analítica: teorema cinemático

- Se postula un mecanismo cinemáticamente admisible
- Se asume que las tensiones de corte en la línea de potencial deslizamiento son una fracción de la resistencia al corte (FoS es único)
- Se calcula el equilibrio entre fuerzas equilibrantes y desequilibrantes (se calcula FoS)
- Se cambia el mecanismo y se itera hasta encontrar el mínimo FoS



Índice



- Definición del problema de estabilidad de taludes
- **Método de dovelas**
- Selección de parámetros
- Análisis probabilístico y LRFD
- Análisis sísmico de taludes
- Taludes en macizos rocosos

Análisis de taludes infinitos



Fuerzas actuantes

- $S = \gamma l z \cos[\beta] \operatorname{sen}[\beta]$
- $N = \gamma l z \cos^2[\beta]$

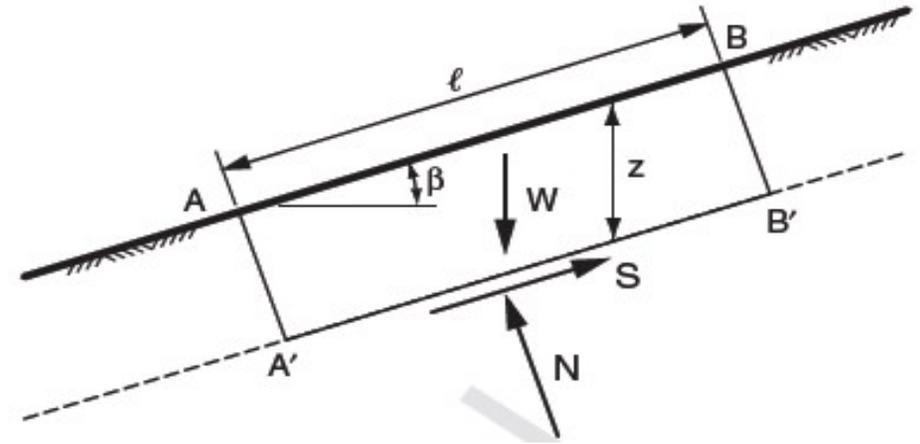
Tensiones equivalentes

- $\tau = \gamma z \cos[\beta] \operatorname{sen}[\beta]$
- $\sigma = \gamma z \cos^2[\beta]$

Resistencia al corte

- $s = c + (\sigma - u) \tan[\phi] = c + (\gamma z \cos^2[\beta] - u) \tan[\phi]$

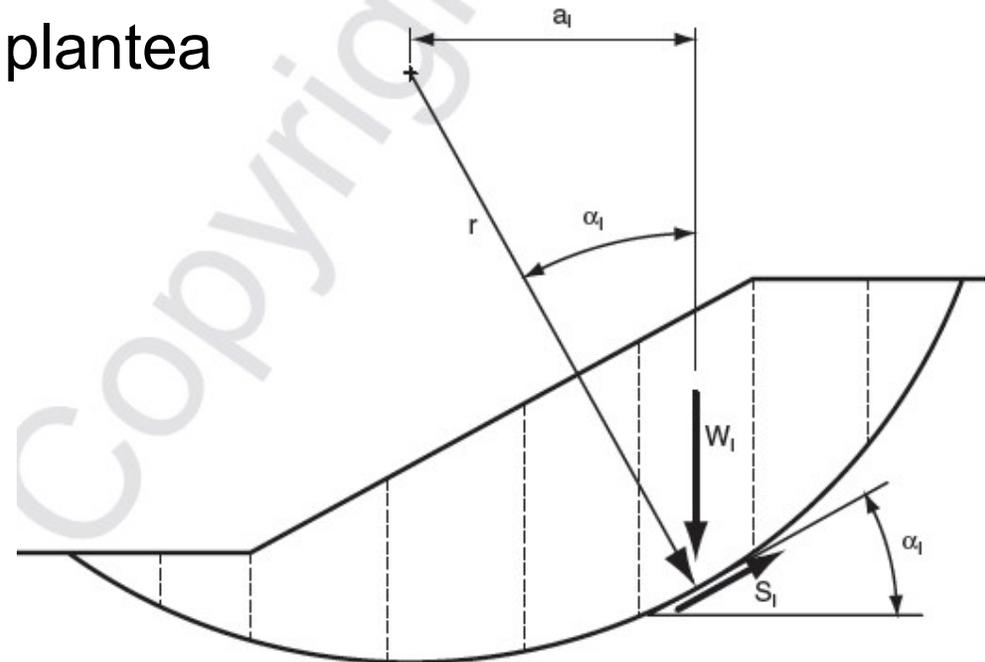
Criterio de seguridad: $s/\tau \geq FoS$



Método de las dovelas



- La masa en potencial deslizamiento se subdivide en fajas y se plantea el equilibrio de cada faja
- Para superficies simples, se plantea el equilibrio de grupos de fajas
- Para superficies circulares, se plantea el equilibrio (de momentos) de toda la masa



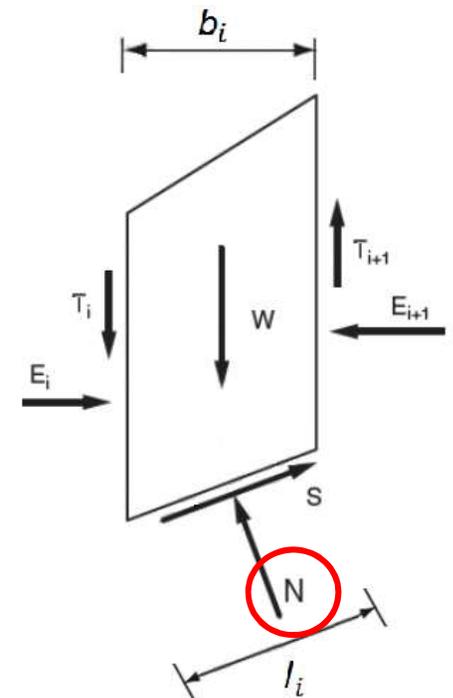
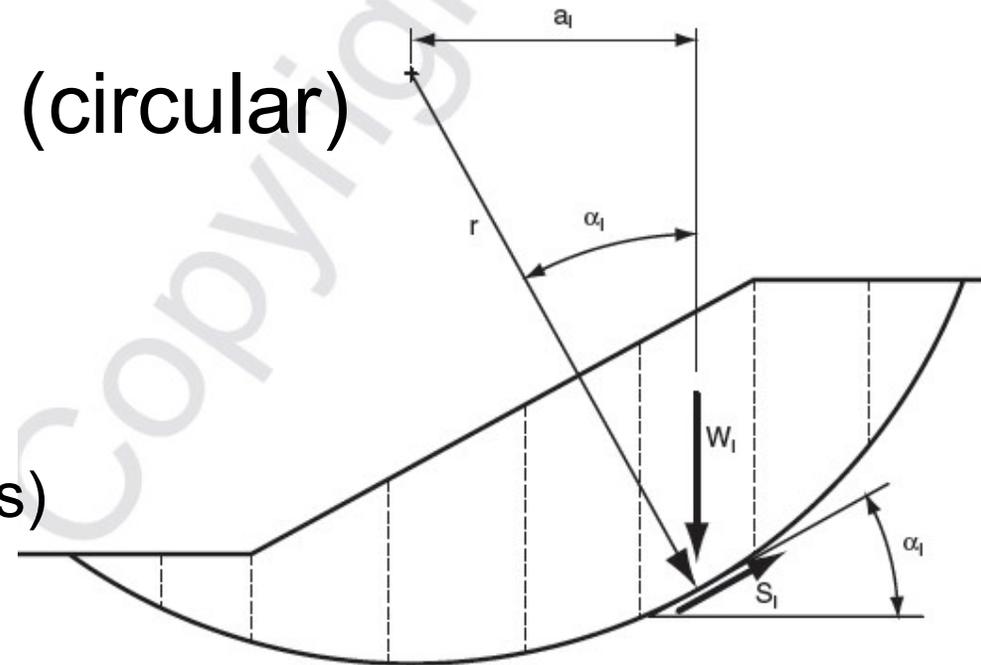
Análisis: método de fajas (circular)

Para superficies circulares, se plantea el equilibrio (de momentos) de toda la masa

- $s_i = c_i + \sigma_i \tan[\phi_i]$
- $M_r = r \sum \tau_i \Delta l_i = r \sum s_i \Delta l_i$
- $M_d = \sum W_i a_i = r \sum w_i \sin[\alpha_i]$

Criterio de seguridad: $M_r / M_d \geq FOS$

Cáda método tiene una manera diferente de calcular N (o sea, σ_i)

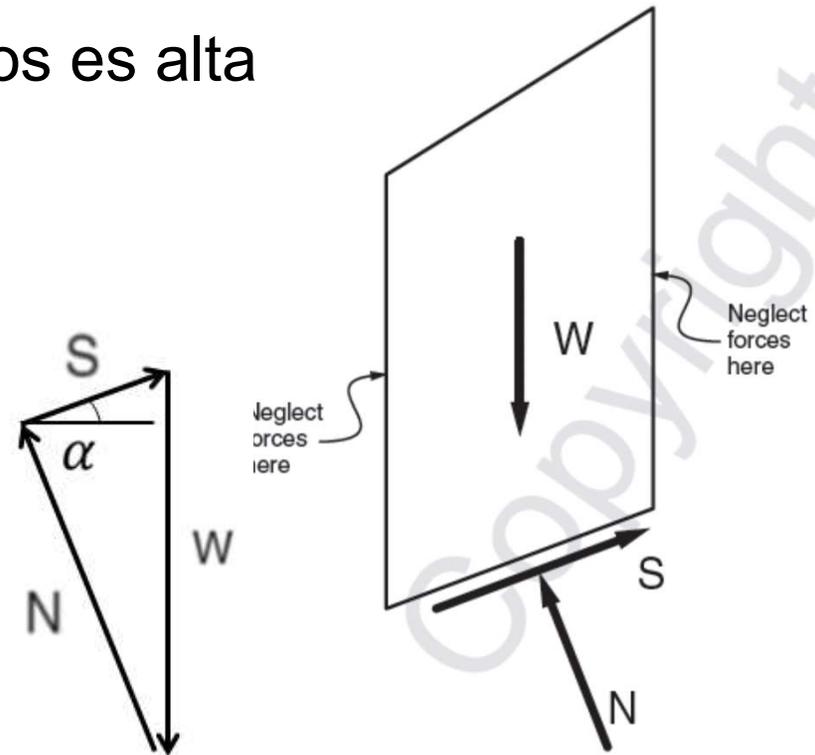


Método de Fellenius (circular)



- Desprecia las fuerzas entre fajas
- No resuelve el equilibrio de fuerzas verticales
- Es conservador
- Puede dar $\sigma < 0$ si la presión de poros es alta

- $N_i = W_i \cos[\alpha_i]$
- $\sigma_i = \frac{N_i}{\Delta l_i} - u_i$
- $M_r = \sum (c_i + \sigma_i \tan[\phi_i]) \Delta l_i$
- $FoS = \frac{M_r}{M_d}$





Método de Bishop simplificado (circular)

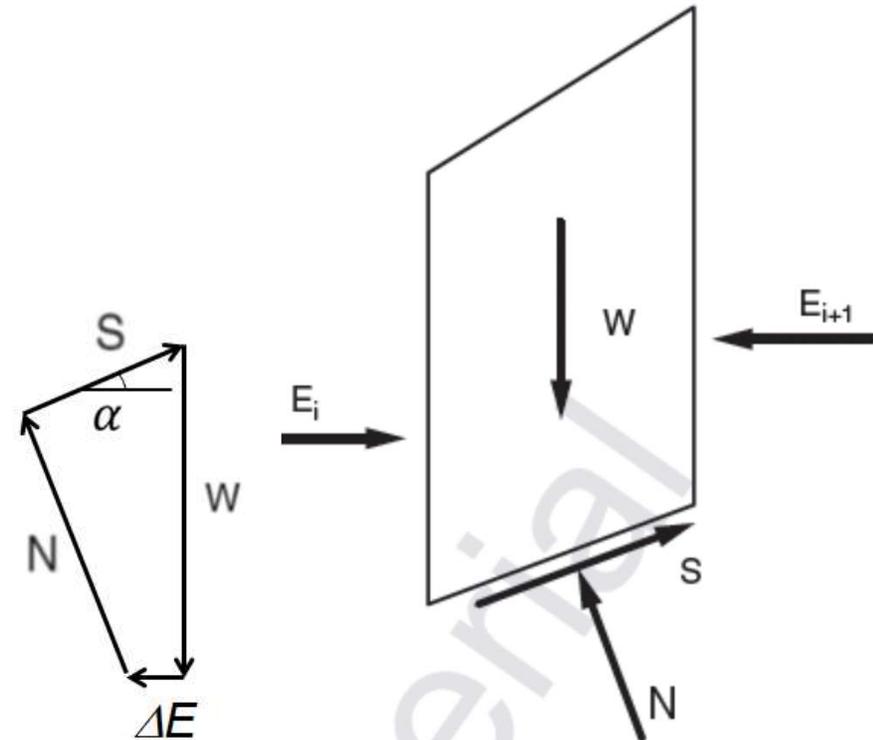
- Asume que las fuerzas entre fajas son horizontales
- Resuelve el equilibrio de fuerzas verticales
- $W_i = N_i \cos[\alpha] + S_i \sin[\alpha]$

$$N_i = \frac{W_i - (c_i - u_i \tan[\phi_i]) \frac{(\sin[\alpha_i] \Delta l_i)}{FoS} \cos[\alpha_i]}{\cos[\alpha_i] + \frac{\sin[\alpha_i] \tan[\phi_i]}{FoS}}$$

$$\sigma_i = \frac{N_i [FoS]}{\Delta l_i} - u_i$$

$$M_r = \sum (c_i + \sigma_i [FoS] \tan[\phi_i]) \Delta l_i$$

$$FoS = \frac{M_r [FoS]}{M_d}$$

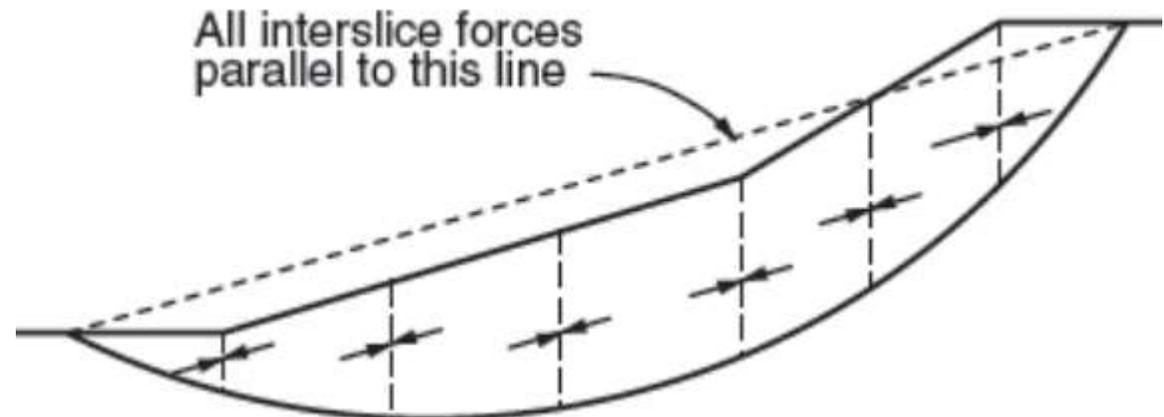


Superficies de falla no circulares



Métodos que resuelven sólo $F_x - F_y$

- Se asume una inclinación para las fuerzas entre fajas
- Método sueco modificado: inclinación de fuerzas igual a la del talud promedio
- Janbu simplificado: inclinación de fuerzas nula
- Janbu corregido: corrige el error con ábacos



Superficies de falla no circulares



Métodos que resuelven $M - F_x - F_y$

- Spencer: la inclinación para las fuerzas entre fajas es la misma pero es incógnita, N actúa en el centro de la base de la faja, se cumple el equilibrio de momentos en cada faja
- Morgenstein-Price: asume fuerzas con inclinación variable ($T = \lambda f[x]E$) según una función $f[x]$ pre-establecida que depende de la abscisa y cuya magnitud λ es incógnita, N actúa en el centro de la base de la faja, se verifica que $T/E < \tan[\phi]$ y que la ubicación de las fuerzas sea razonable

Comparación entre métodos



- ~~Fellenius: Desprecia fuerzas entre fajas (vars: 1)~~
- Bishop S.: Resuelve equilibrio de fuerzas verticales (vars: $n+1$), asume fuerzas horizontales entre fajas
- Janbu Simplificado: Resuelve $F_x - F_y$ (vars: $2n$), asume inclinación constante de fuerzas entre fajas
- Janbu Corregido: Corrige el error mediante ábacos que dependen de la profundidad del círculo de falla
- Spencer: Resuelve $M - F_x - F_y$ (vars: $3n$), fuerzas paralelas, inclinación incógnita, normal en centro de base de faja
- Morgenstern-Price: Resuelve $M - F_x - F_y$ (vars: $3n$), asume fuerzas con inclinación variable según una ley pre-establecida, normal en centro de base de faja

Índice

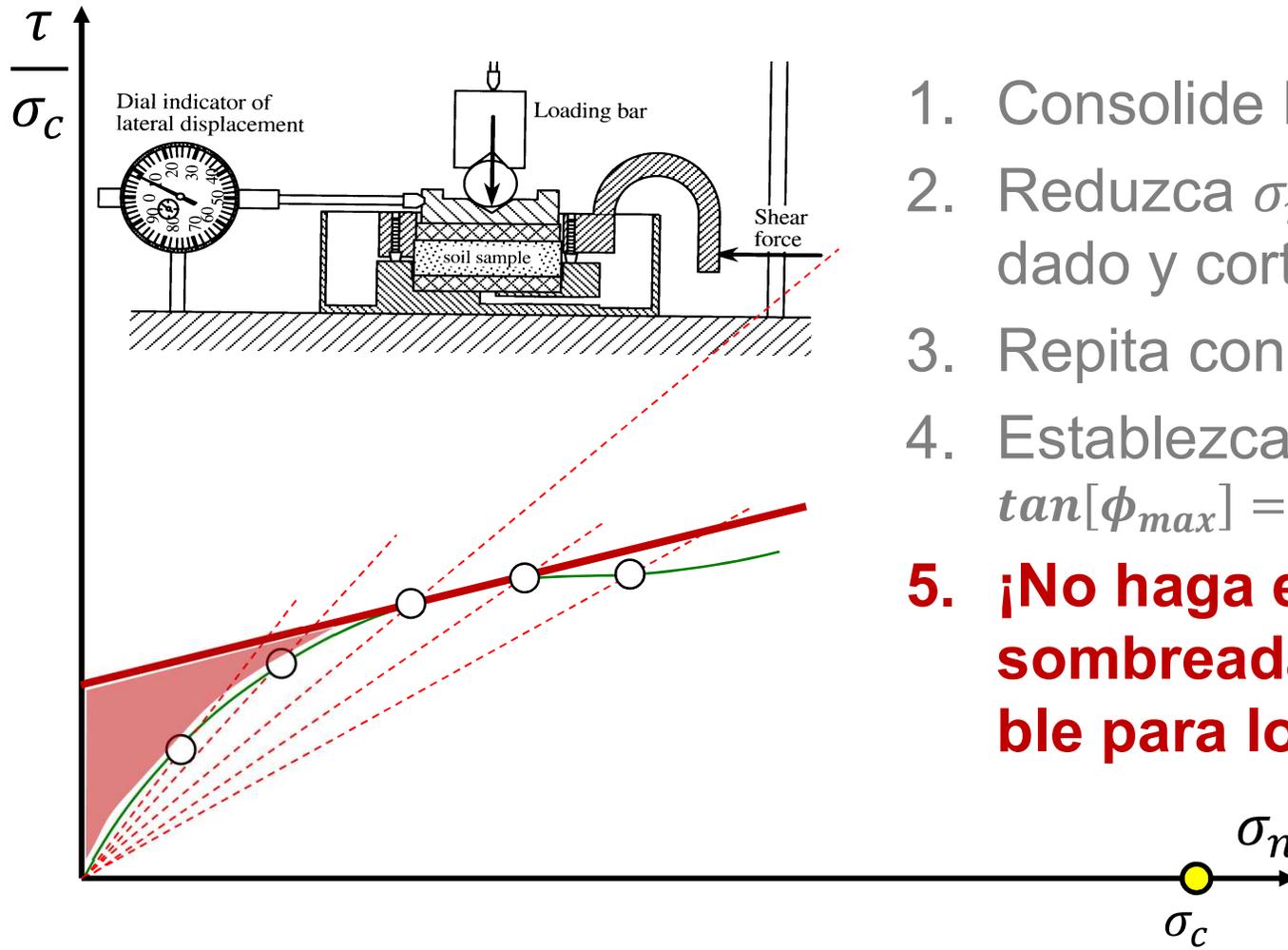


- Definición del problema de estabilidad de taludes
- Método de dovelas
- **Selección de parámetros**
- Análisis probabilístico y LRFD
- Análisis sísmico de taludes
- Taludes en macizos rocosos



Selección de parámetros resistentes

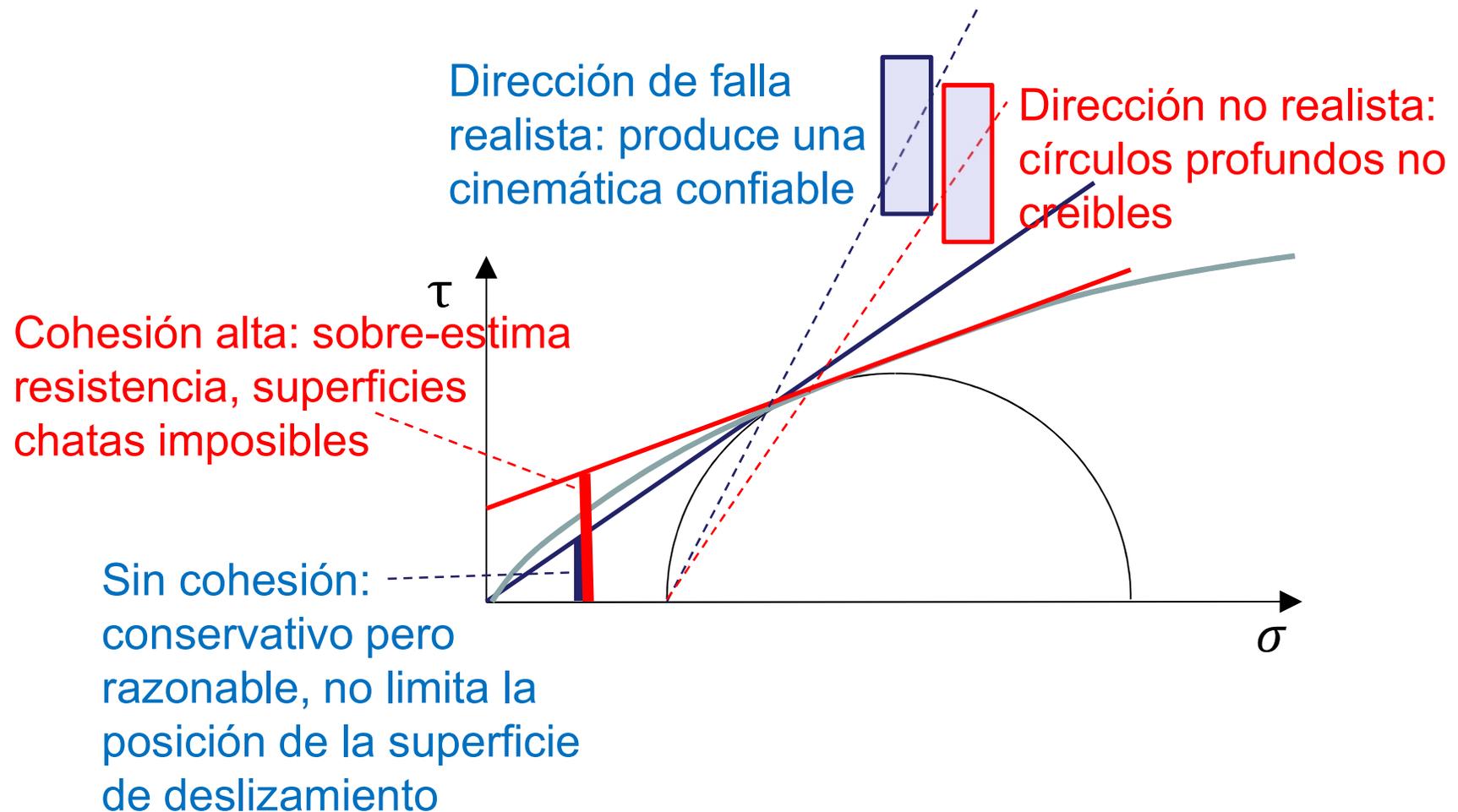
Recordatorio de resistencia al corte



1. Consolide hasta σ_c
2. Reduzca σ_n hasta un OCR dado y corte hasta la falla
3. Repita con distintos OCR
4. Establezca la relación $\tan[\phi_{max}] = \tan[\phi_{cv}] + \tan[\psi]$
5. **¡No haga esto! El área sombreada es inalcanzable para los suelos**

(Mitchell 1996)

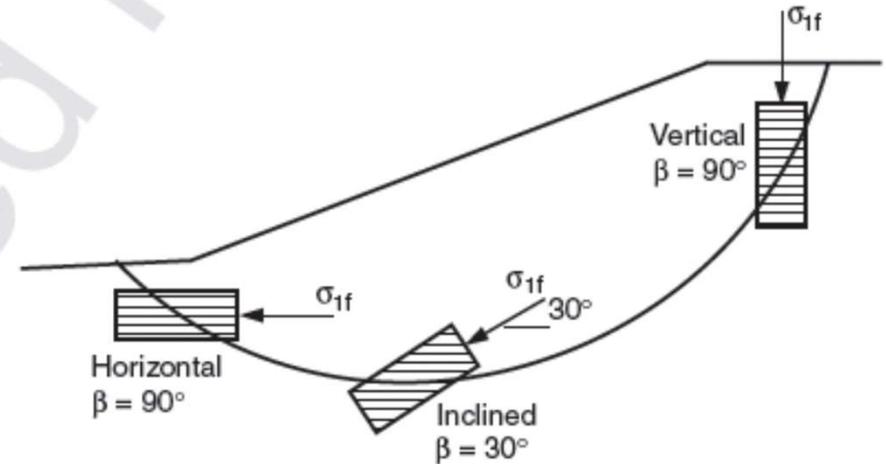
Selección de parámetros resistentes



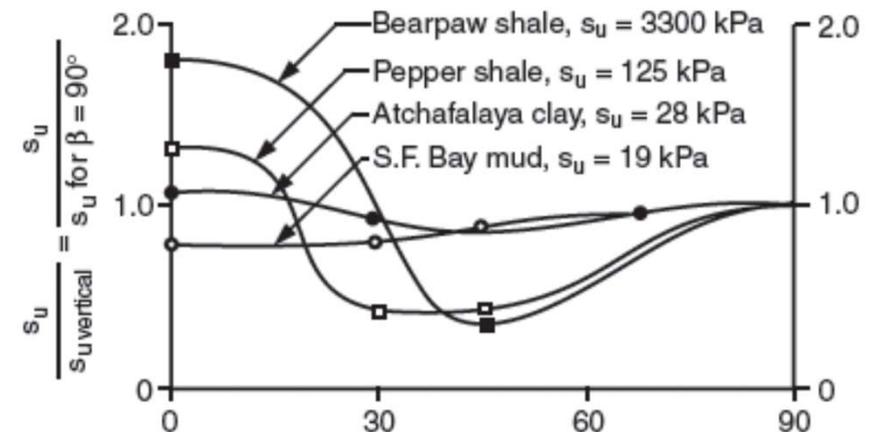
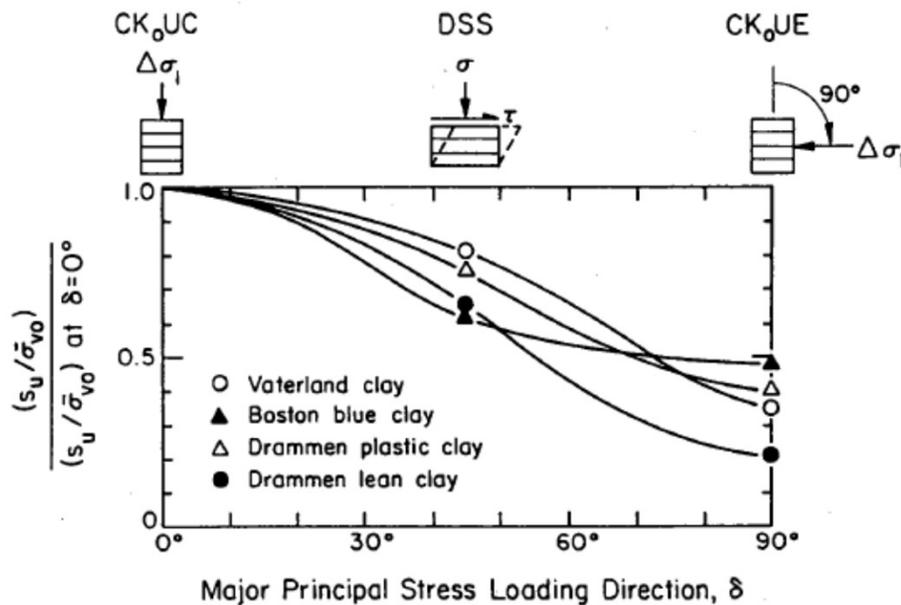
Selección de parámetros resistentes: resistencia al corte no drenada



La resistencia al corte no drenada depende de la orientación del plano de falla con respecto al eje de consolidación primaria

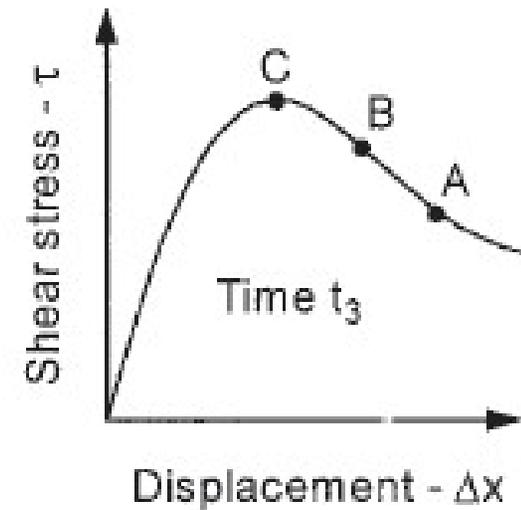
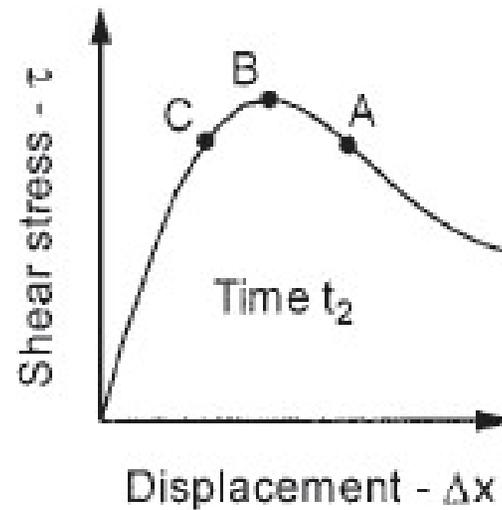
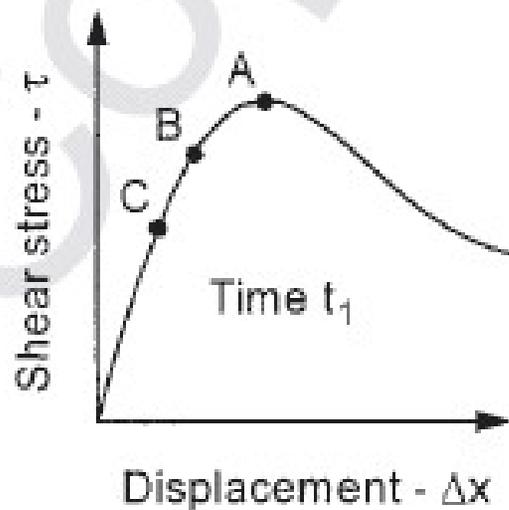
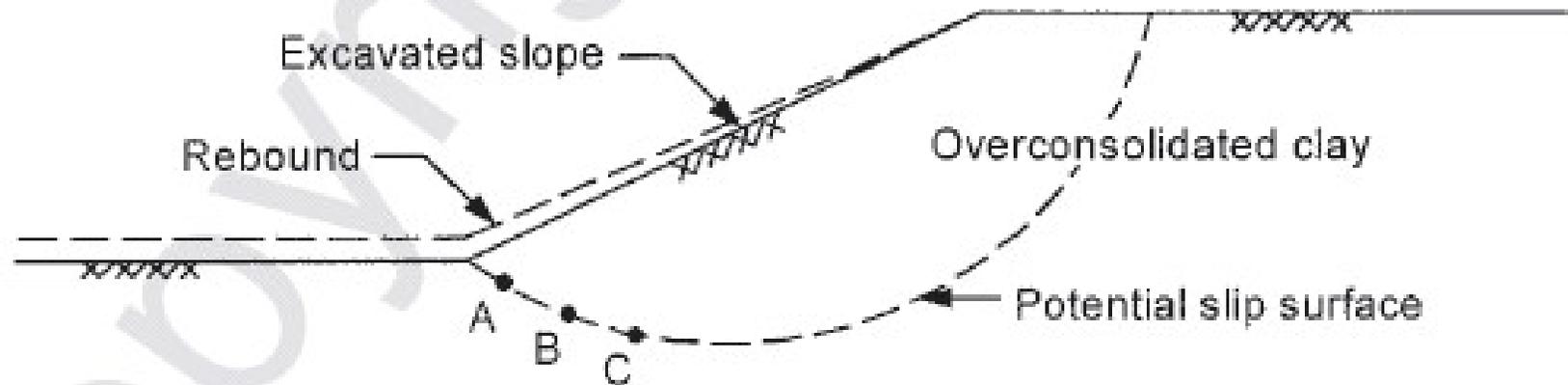


(a)



(b)

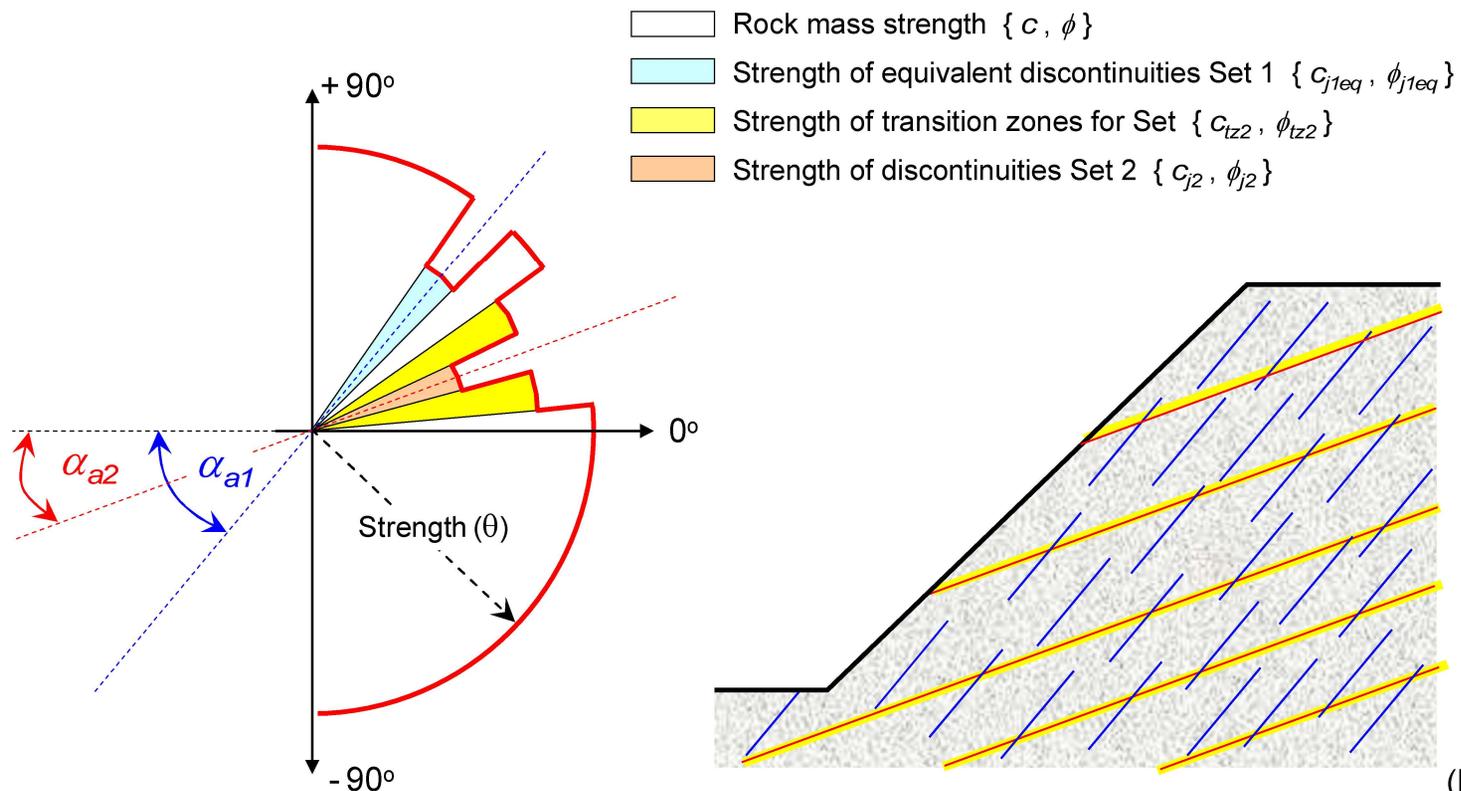
El problema de la rotura progresiva



Anisotropía resistente

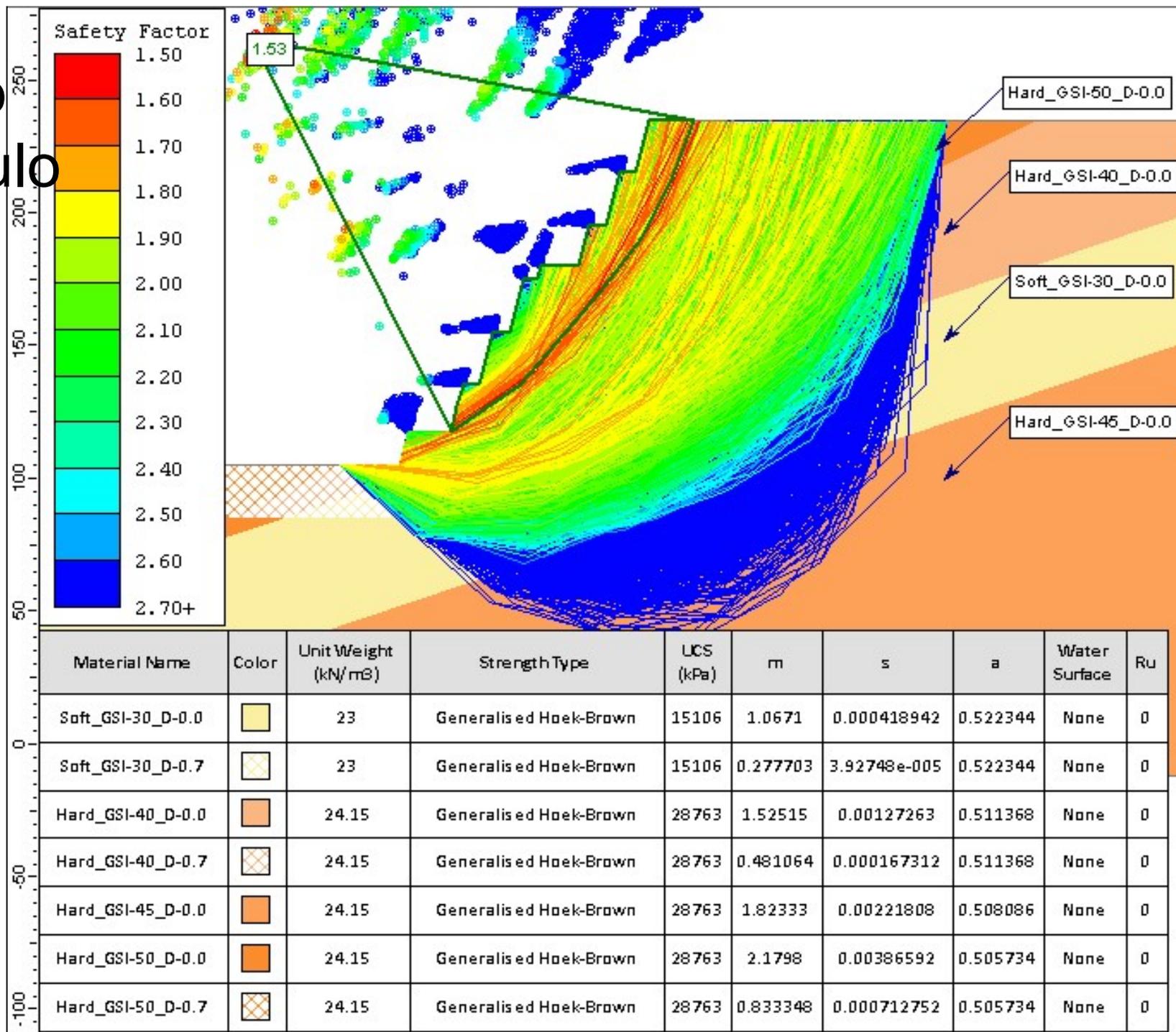


Existen herramientas numéricas que permiten la consideración de la anisotropía del terreno (suelos y rocas)



(Programa Slide, Rocscience)

Ejemplo de cálculo



Índice



- Definición del problema de estabilidad de taludes
- Método de dovelas
- Selección de parámetros
- **Análisis probabilístico y LRFD**
- Análisis sísmico de taludes
- Taludes en macizos rocosos

Probabilidad de falla

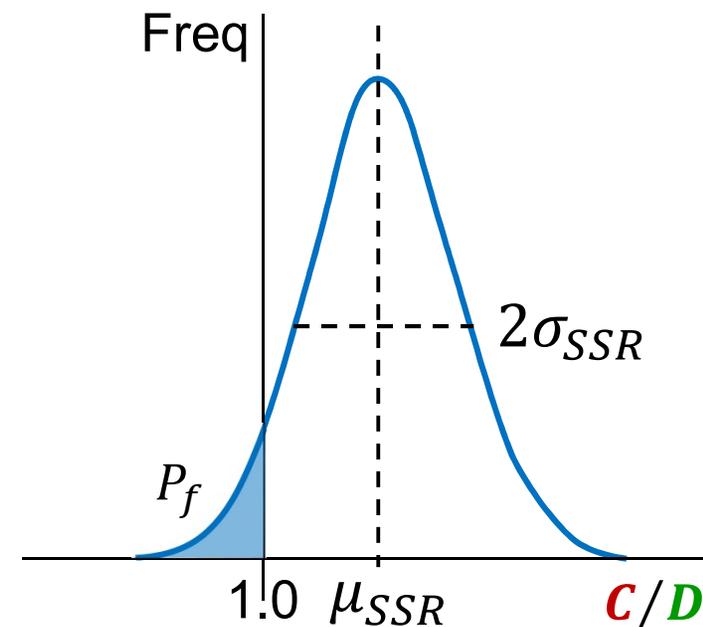
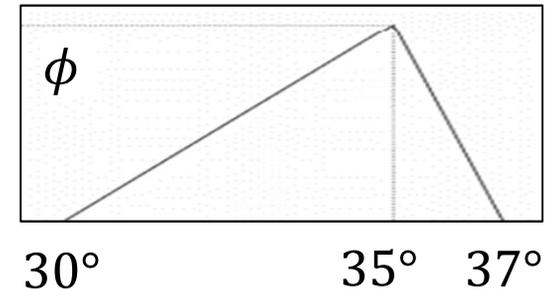


Las variables que controlan el comportamiento de un talud tienen incertidumbre

- Suelos: estratigrafía, densidad, resistencia...
- Rocas: Litología, alteración, discontinuidades...
- Materiales estructurales: resistencia...
- Procedimientos constructivos

Probabilidad de falla: probabilidad de que la capacidad (**C**) sea menor que la demanda (**D**)

- Estadísticamente: $P_f = P[C < D]$
- Ingenierilmente: $P_f = P[FS < 1]$

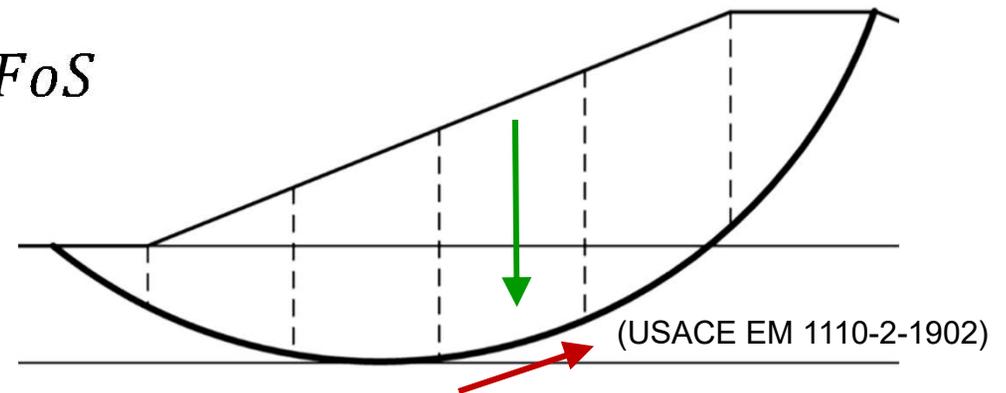


Estabilidad de taludes: justificación del método probabilístico



Si todo fuera “exacto”

- Resistencia: $M_r = r \sum s_i \Delta l_i / FOS$
- Carga: $M_d = r \sum w_i \sin[\alpha_i]$
- Factor de seguridad:
 $M_r [FOS] - M_d = 0$



Pero todo tiene incertidumbres

- Variables aleatorias: γ , c , ϕ
- Presión de poros
- Geometría de la superficie de potencial deslizamiento (círculo, poligonal, ...)
- Método de cálculo (Bishop, Spencer, ...)



Estabilidad de taludes: el enfoque probabilístico

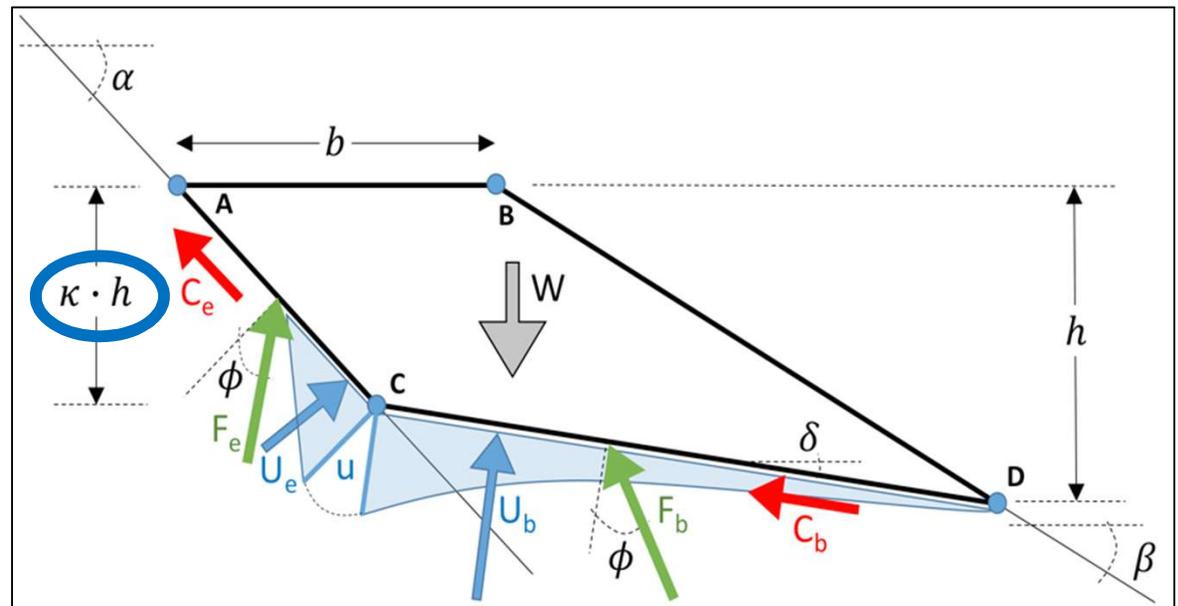
Ej: bloque guiado por una discontinuidad

Fuerzas en juego (son variables aleatorias)

- Resistentes: **cohesivas** y **friccionales**
- Desestabilizantes: peso propio y **presión de agua**

Ejemplo de análisis

- Determinístico:** encontrar k que minimiza el FoS
- Probabilístico:** estimar P_f para rangos de (κ, h) , (u, γ) , (c, ϕ)



Probabilidad de falla (riesgo tolerado) para taludes



Temporary structures: no potential life loss, low repair cost	0.1
Minimal consequences of failure: high cost to reduce the probability of failure (bench slope or open pit mine)	0.1–0.2
Minimal consequences of failure: repairs can be done when time permits (repair cost is less than cost of reducing probability of failure)	0.01
Existing large cut on interstate highway	0.01–0.02
Large cut on interstate highway to be constructed	<0.01
Lives may be lost when slopes fail	0.001
Acceptable for all slopes	0.0001
Unnecessarily low	<0.00001

Variabilidad de los ensayos (terreno)



$$COV = \sigma / \mu$$

Ensayo (terreno)		Terreno	COV	Escala [m]
Resistencia al corte no drenado				
- Correlación con CPT	s_u	C	30 40	
- Correlación con SPT	s_u	C	40 60	
Ángulo de fricción interna				
- Correlación con CPT	ϕ'	S	10 15	
- Correlación con SPT	ϕ'	S	15 20	
Resist. a penet. SPT	N	C, S	25 50	2.4 (v)
Resist. de punta CPT	q_t	C	<20	0.3 (v) 45 (h)
Densidad relativa c/SPT	D_r	S	50 70	

(AASHTO 2017)

Variabilidad de los ensayos (laboratorio)



$$COV = \sigma / \mu$$

Ensayo (laboratorio)		Terreno	COV	Escala [m]
Humedad natural	ω_n	C, M	8 30	5.7 (v) 170 (h)
Límites Atterberg	ω_L	C, M	6 30	5.2 (v)
Pesos unitarios	γ, γ_d	C, M	<10	1.6 (v)
Densidad relativa	D_r	S	10 40	
Resistencia al corte no drenado				
- Compresión simple	s_u	C	20 55	2.5 (v) 50 (h)
- Triaxial no drenado	s_u	C	10 35	
- TX cons. no drenado	s_u	C	20 45	
Ángulo de fricción (TX)	ϕ'	C, M, S	5 10	

(AASHTO 2017)



Factor de seguridad desde la perspectiva probabilística

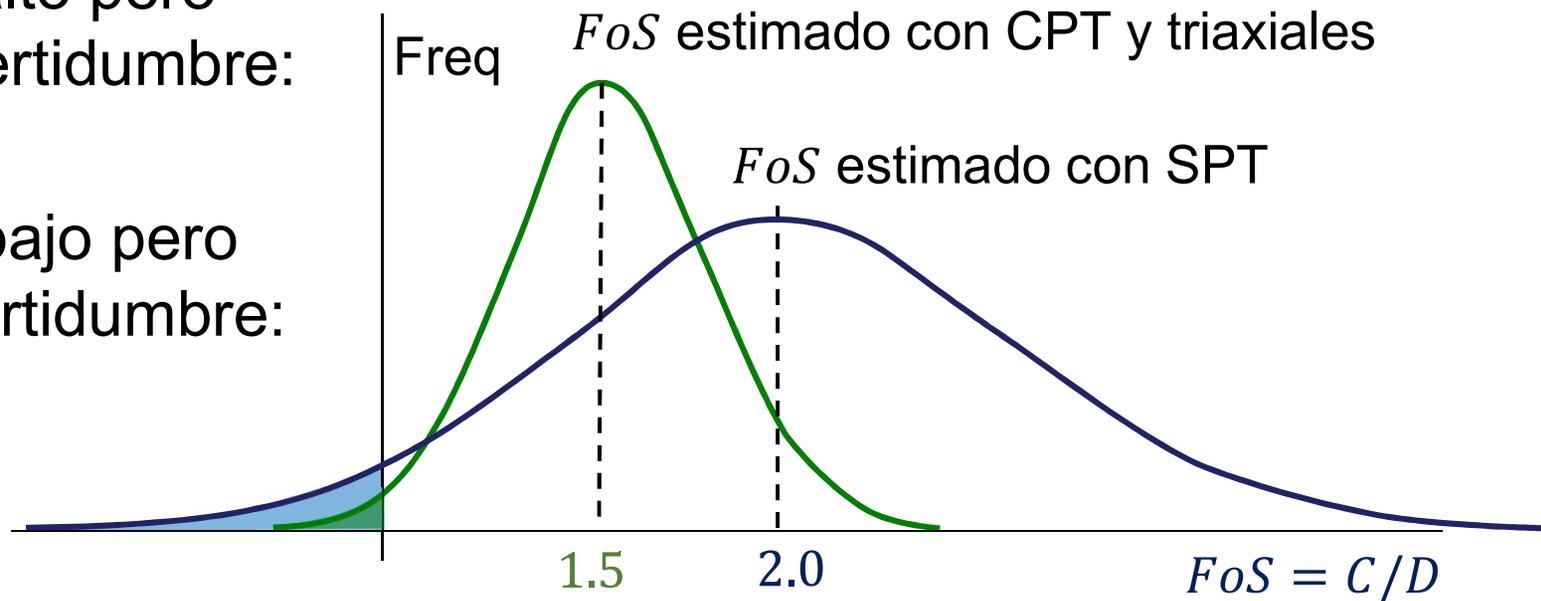
Cociente entre la capacidad de carga (nominal) y la carga aplicada (también nominal)

- FoS es un cociente de valores medios (es un criterio de falla)

Un mayor FoS no implica una menor P_f

- **SPT**: FoS alto pero mucha incertidumbre: P_f alta

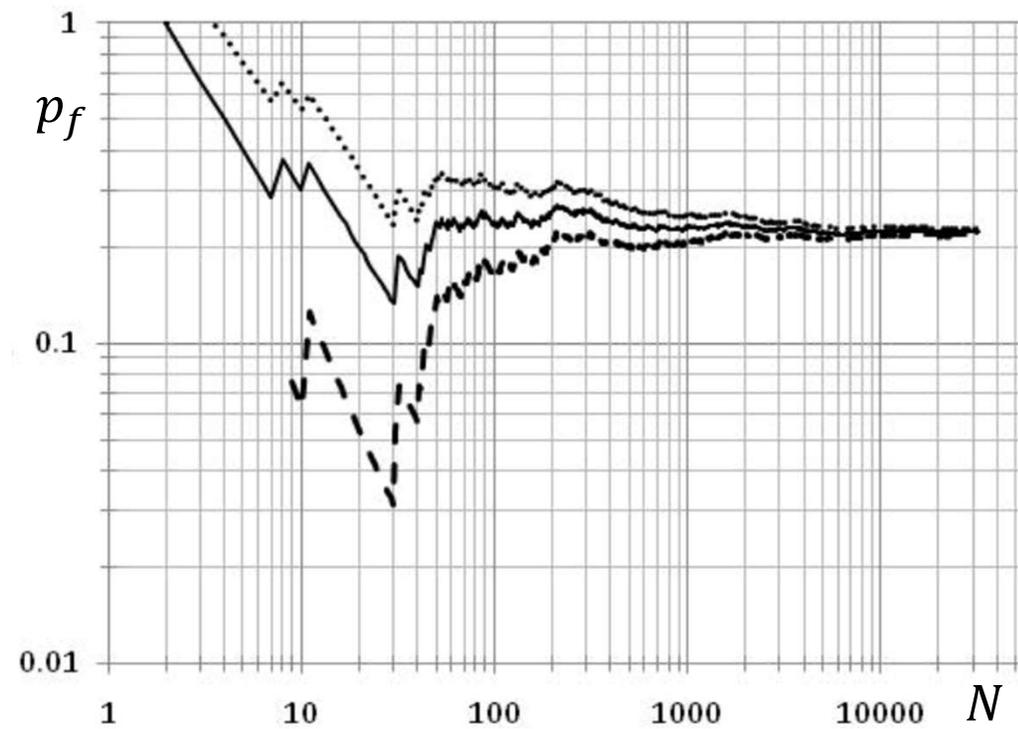
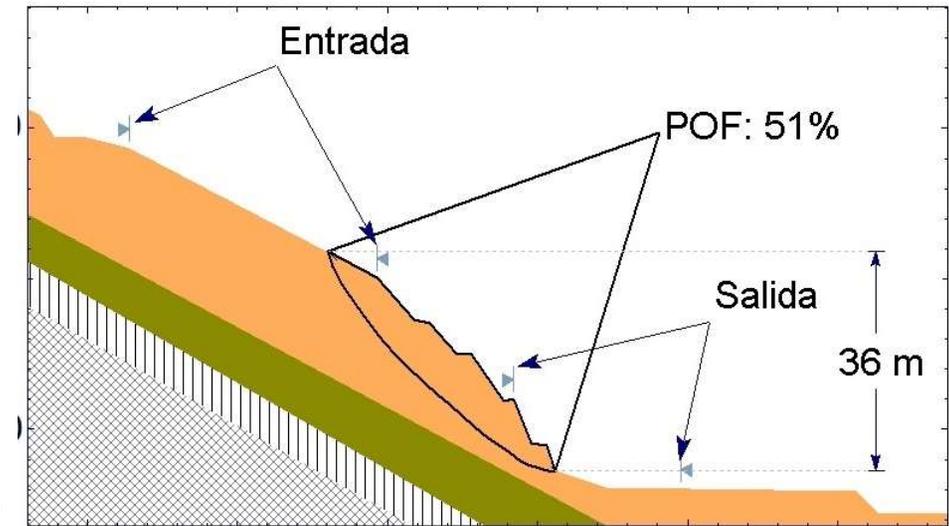
- **CPT**: FoS bajo pero menor incertidumbre: P_f baja



Cálculo de P_f : Método de Monte Carlo

- Se establecen funciones de distribución para γ , c , ϕ , napa...
- Se eligen valores aleatorios
- Se calcula (C) y (D)
 - Bishop: $C = M_R$, $D = M_D$
- Se calcula

$$P_f = \frac{n = \text{cantidad } C < D}{N = \text{cantidad total}}$$
- Se repite el ejercicio hasta que P_f se estabiliza
 - Enorme cantidad de corridas para P_f bajas



(Gibson 2011)

Cálculo de P_f : Monte Carlo con variables correlacionadas



Muchas veces, dos variables tienen alguna forma de correlación

- Mayor densidad γ – menor relación de vacíos e – mayor ϕ
- Mayor rigidez E – mayor cementación c

Si x, y tienen un coeficiente de correlación cruzada ρ_{xy}

- Se eligen números R_1 y R_2 al azar en el intervalo $(0,1]$
- Se calculan $\{N_1, N_2\} = \sqrt{2 \ln[R_1]} \{ \cos[2\pi R_2], \sin[2\pi R_2] \}$
- Se calcula $N_2^* = N_1 \rho_{xy} + N_2 \sqrt{1 - \rho_{xy}^2}$
- Las variables se calculan a la vez:

$$x = \mu_x + N_1 \sigma_x$$

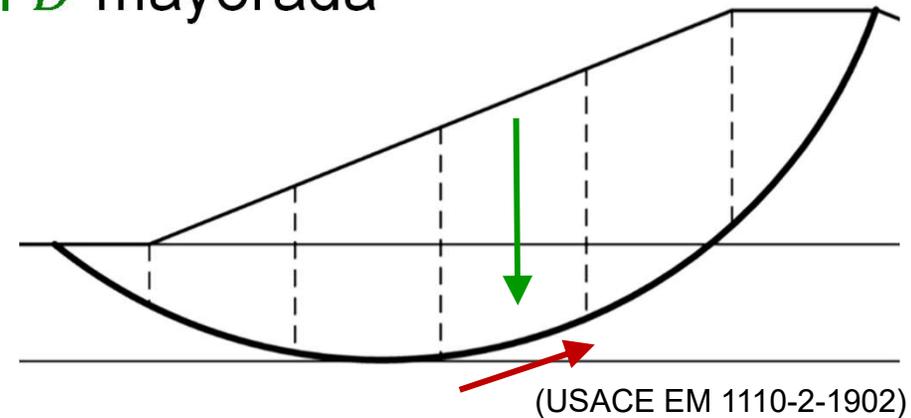
$$y = \mu_y + N_2^* \sigma_y$$

El concepto LRFD aplicado a taludes



Concepto de diseño LRFD: La **capacidad nominal C** minorada debe ser mayor a **demanda nominal D** mayorada

- $RF \cdot C \geq LF \cdot D$



Para taludes, $C = M_r$ y $D = M_d$

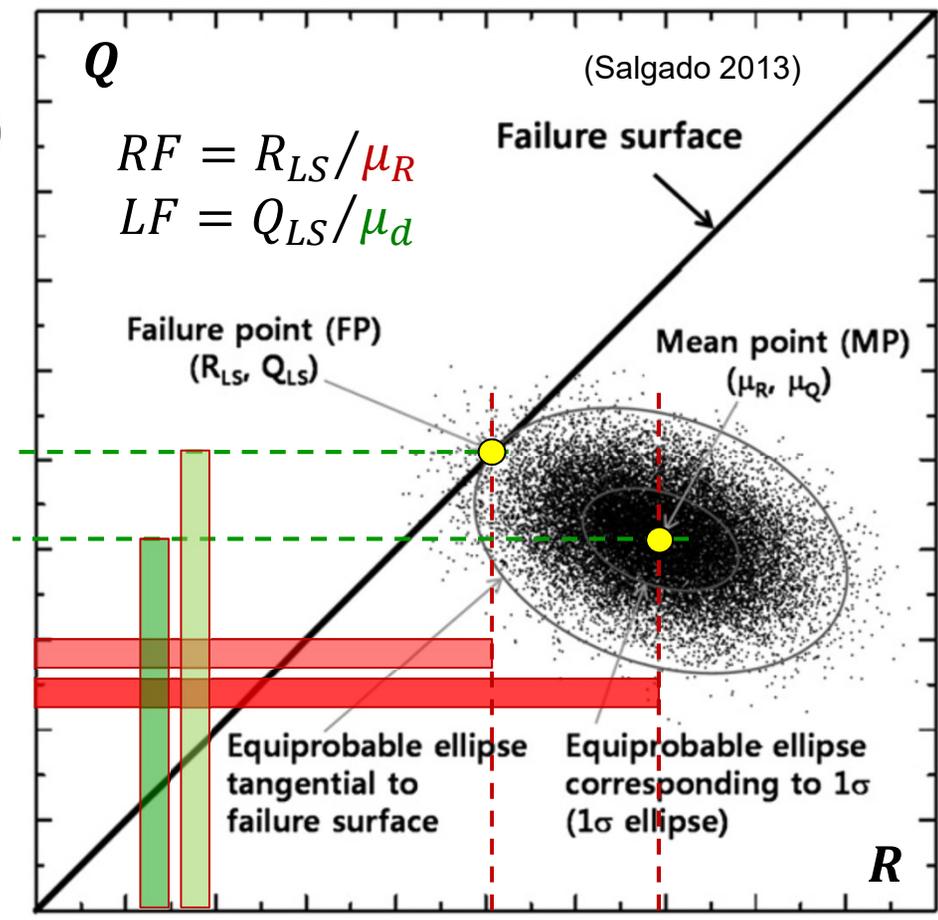
- $RF \cdot M_r \geq LF \cdot M_d$
 - $RF < 1$ depende de la incertidumbre de c , ϕ
 - $LF > 1$ depende de la incertidumbre de γ

Cálculo de RF y LF



Análisis de Monte Carlo para la función de falla $g = M_r - M_d$

- **Se elige P_f** (riesgo tolerado)
- Se elige geometría y $(\mu_c, \mu_\phi, \mu_\gamma)$
- Análisis Monte Carlo
 - μ_R : media de M_r
 - μ_d : media de M_d
- Se ajusta $(\mu_c, \mu_\phi, \mu_\gamma)$ hasta que $n/N \cong P_f$
- Donde toca g : (R_{LS}, Q_{LS})
- $RF = R_{LS}/\mu_R$
- $LF = Q_{LS}/\mu_d$

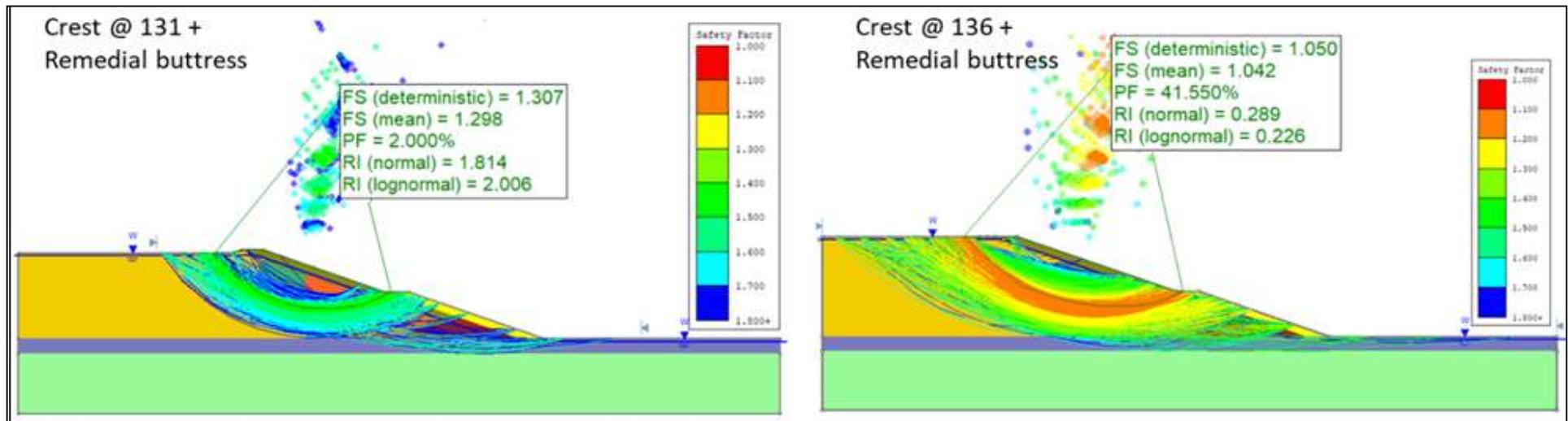




Taludes: La práctica de la industria es calcular P_f por Monte Carlo

Estabilidad de taludes: use Monte Carlo

- Establezca P_f objetivo en función del riesgo tolerado
- Ejecute análisis de Monte Carlo con Bishop | Spencer | Morgenstern-Price (hay software comercial que lo resuelve)



Índice



- Definición del problema de estabilidad de taludes
- Método de dovelas
- Selección de parámetros
- Análisis probabilístico y LRFD
- **Análisis sísmico de taludes**
- Taludes en macizos rocosos

El modelo de Newmark para un bloque rígido

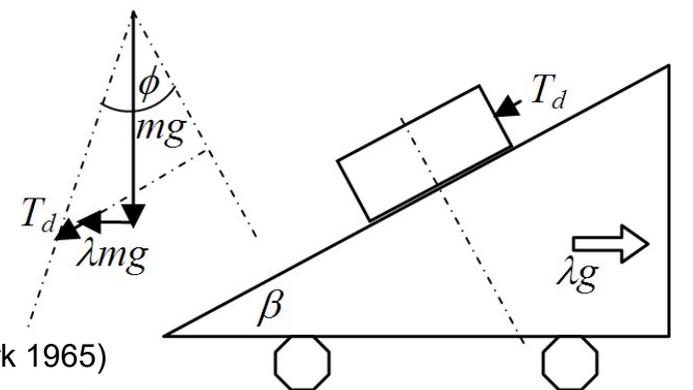
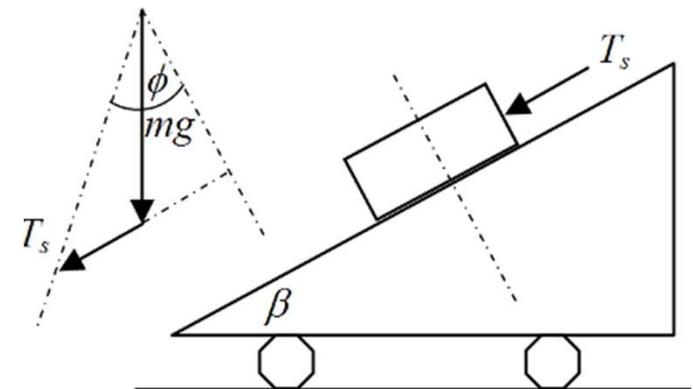
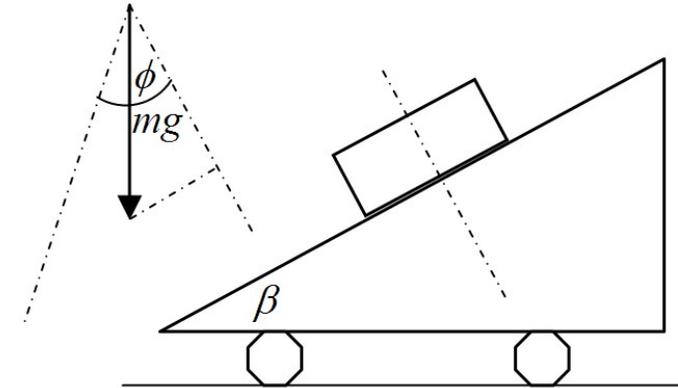
- Un bloque rígido en una sup. plana es estable si $\beta < \phi$

- La máxima fuerza T_s que resiste es

$$T_s = \frac{\sin[\phi - \beta]}{\cos[\phi]} mg$$

- Si se suma una aceleración basal $a = \lambda g$, la máxima fuerza ahora es

$$T_d = \frac{\sin[\phi - \beta] - \lambda \cdot \cos[\phi - \beta]}{\cos[\phi]} mg$$



(Newmark 1965)

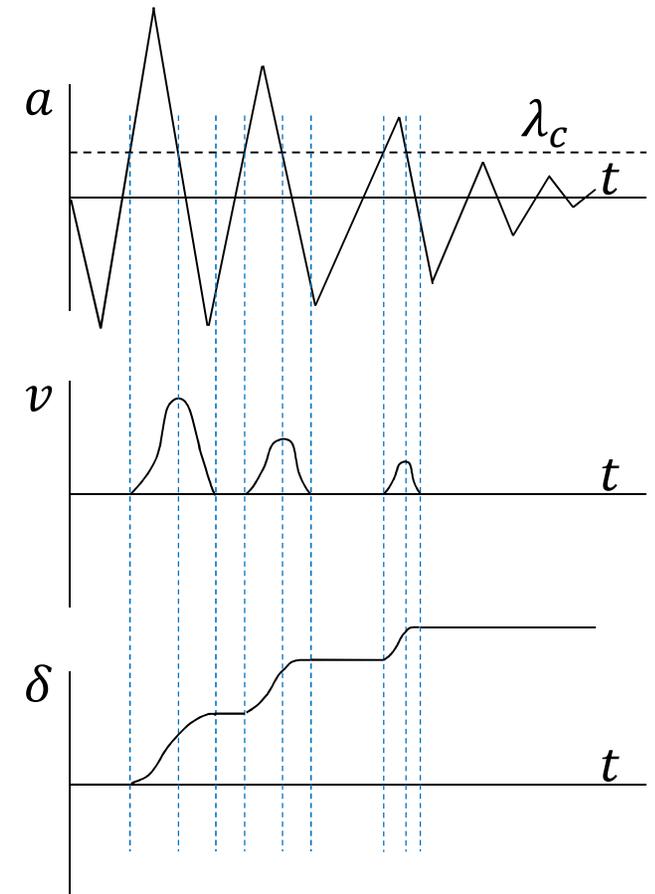
El modelo de Newmark para un bloque rígido



- El bloque se desliza si $\lambda > \lambda_c = \tan[\phi - \beta]$
- La integración en el tiempo de las fases de aceleración y frenado da el desplazamiento total

$$\delta = \left(\frac{g \cos[\phi - \beta]}{2\lambda_c \cos[\phi]} \right) \cdot \lambda (\lambda - \lambda_c) \Delta t^2$$

El bloque sólo se mueve hacia abajo cuando la fuerza de inercia supera la resistencia al corte en su apoyo



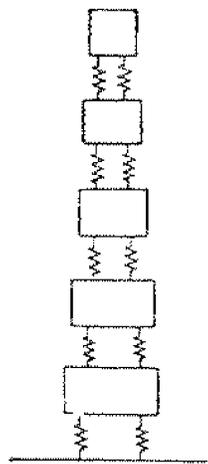
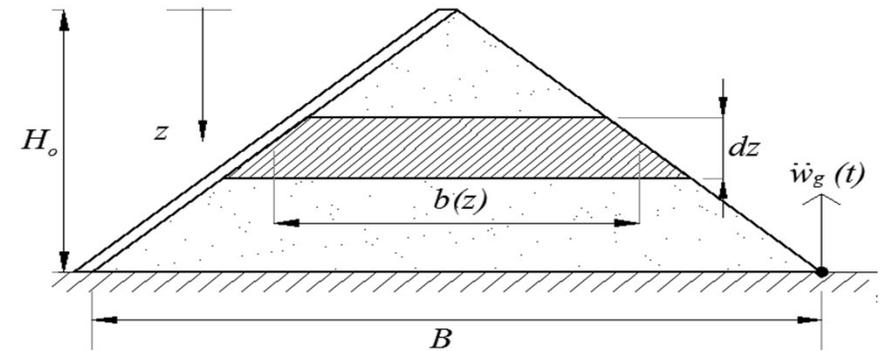
(Newmark 1965)

El modelo de Newmark para una viga de corte



Amplificación sísmica:

La aceleración que llega a cada "bloque" depende de la respuesta elástica de la presa



(a)
Multi-Degree-of-Freedom System



(b)
Fundamental Mode

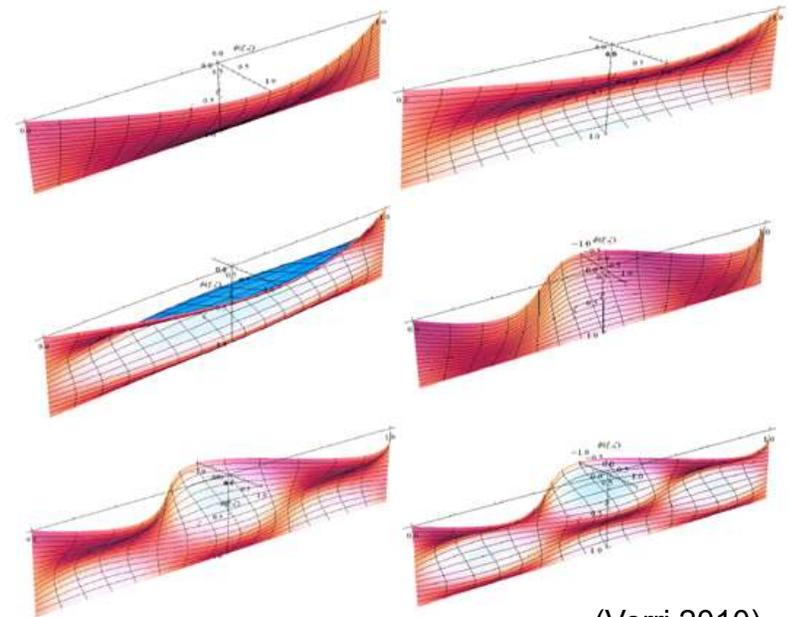


(c)
Second Mode



(d)
Third Mode

(Newmark 1965)

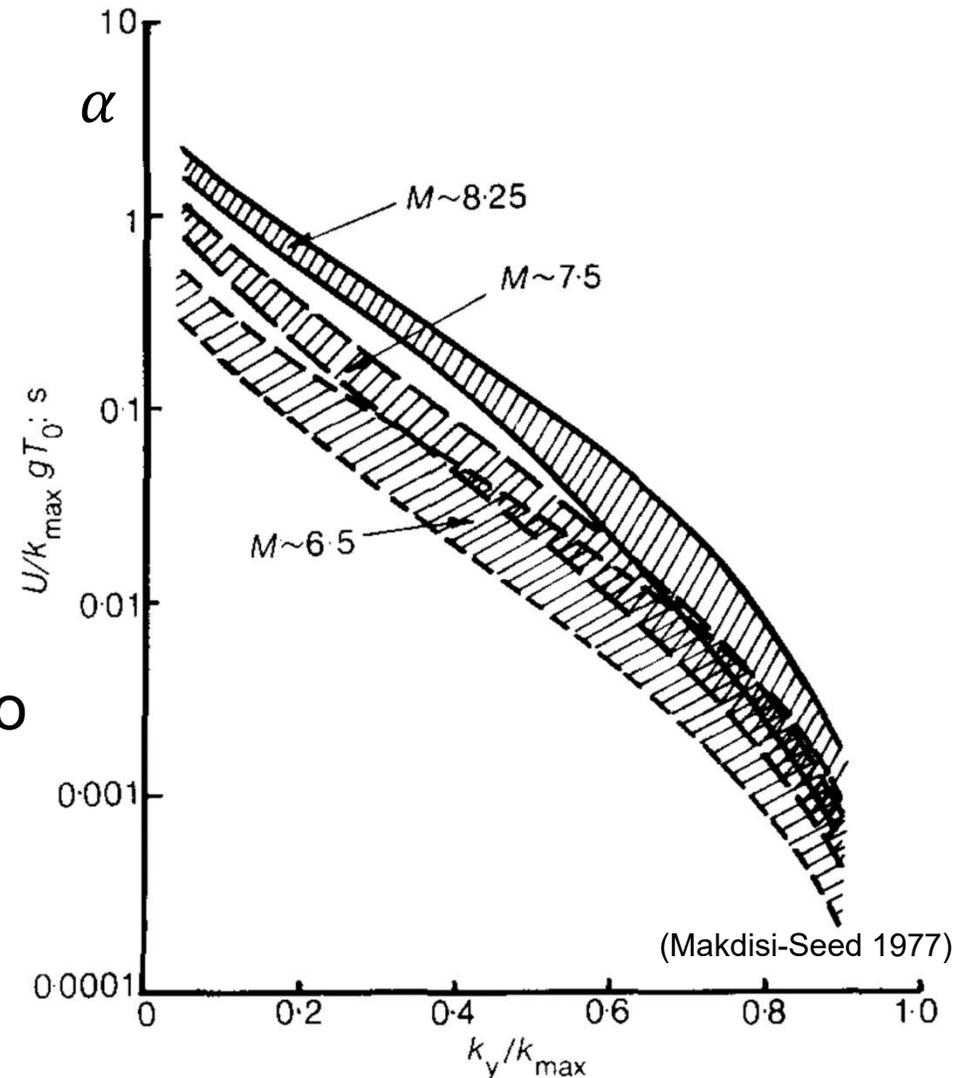


(Verri 2010)

Método de Makdisi-Seed



- Cálculo de la “aceleración de fluencia” k_y
- Cálculo de aceleración máxima k_{max} con viga de corte
- Cálculo del período propio fundamental de la presa T_0
- Corrección por forma de valle
- Determinación del asentamiento con nomograma
- $U = \alpha \cdot k_{max} \cdot g \cdot T_0 \cdot [s]$



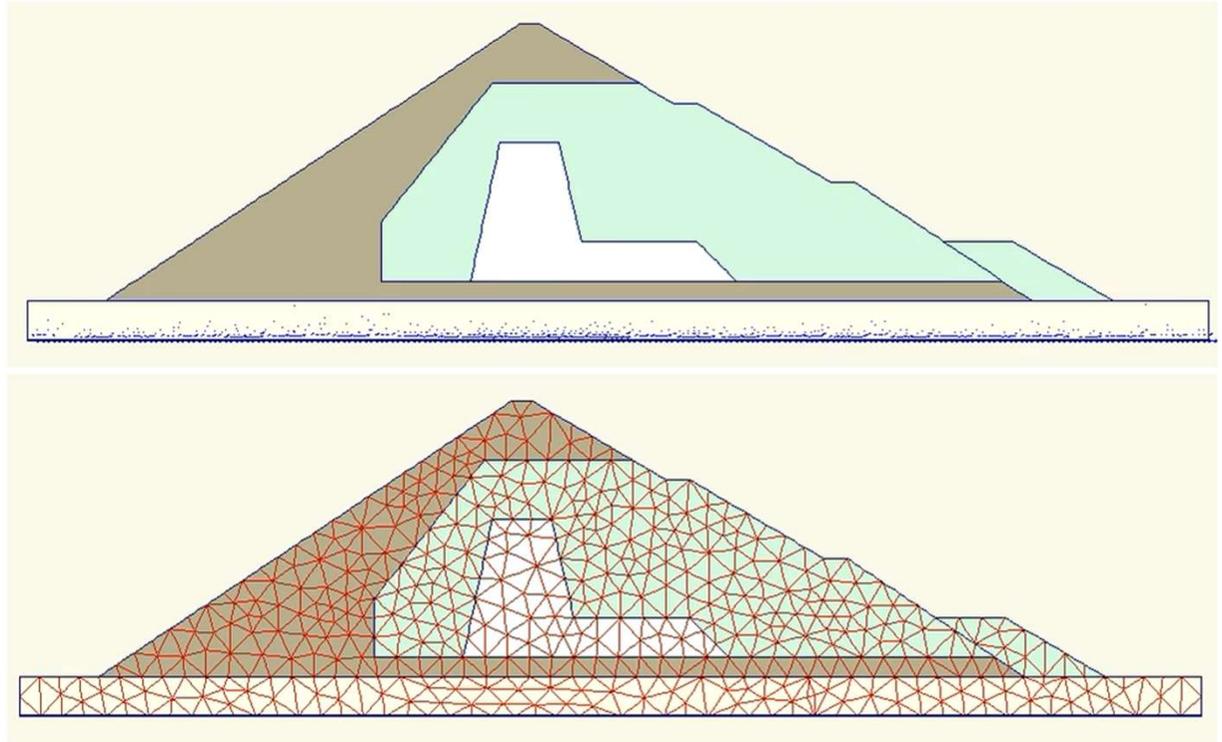
Modelo de Newmark vs métodos numéricos



En un modelo numérico

- No hay bloques: hay sólidos deformables
- La propagación de ondas genera amplificación y rebotes

La hipótesis de Newmark es razonable:
la presa sólo se deforma hacia abajo



Índice

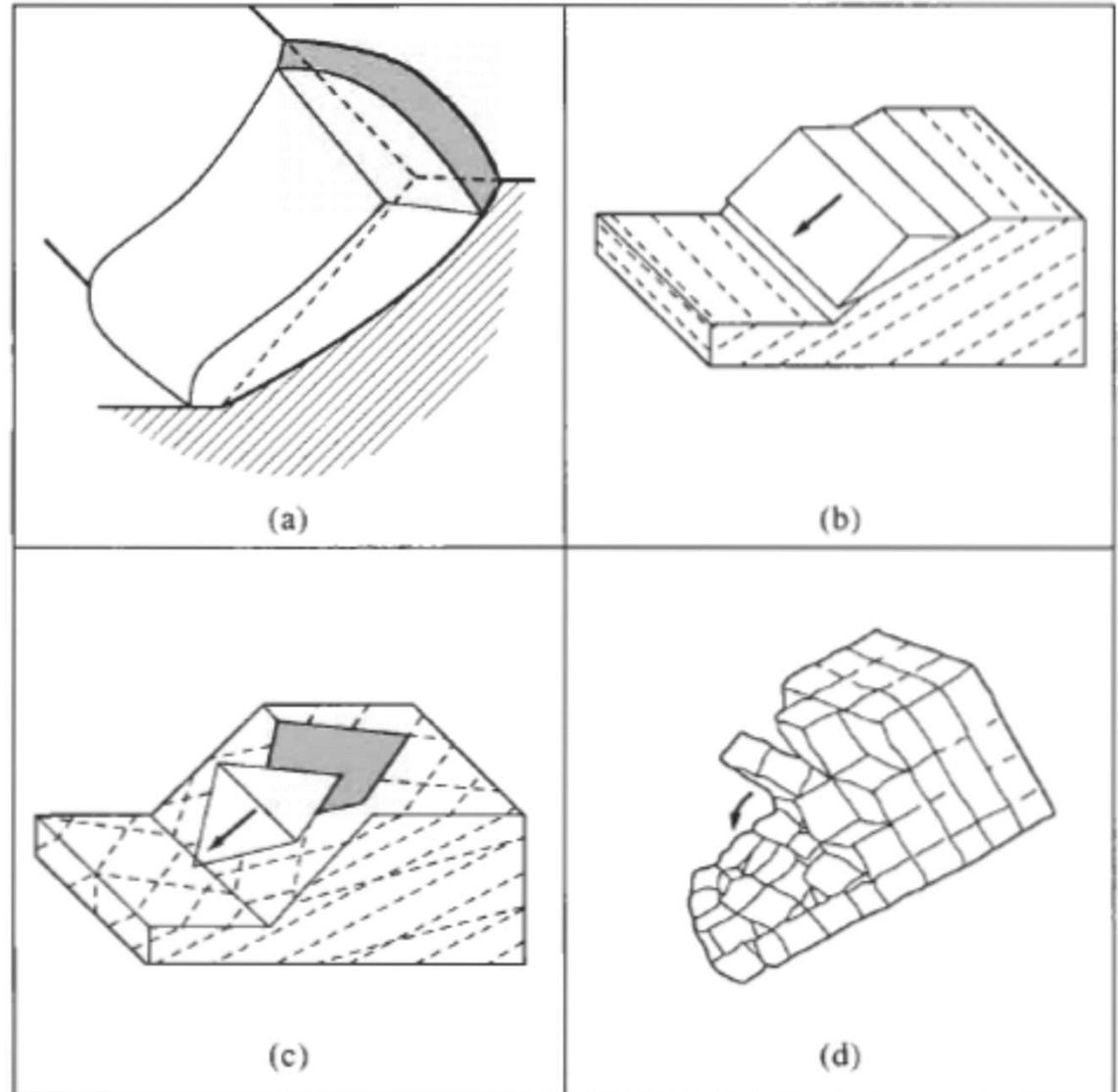


- Definición del problema de estabilidad de taludes
- Método de dovelas
- Selección de parámetros
- Análisis probabilístico y LRFD
- Análisis sísmico de taludes
- Taludes en macizos rocosos

Mecanismos de falla de taludes en rocas



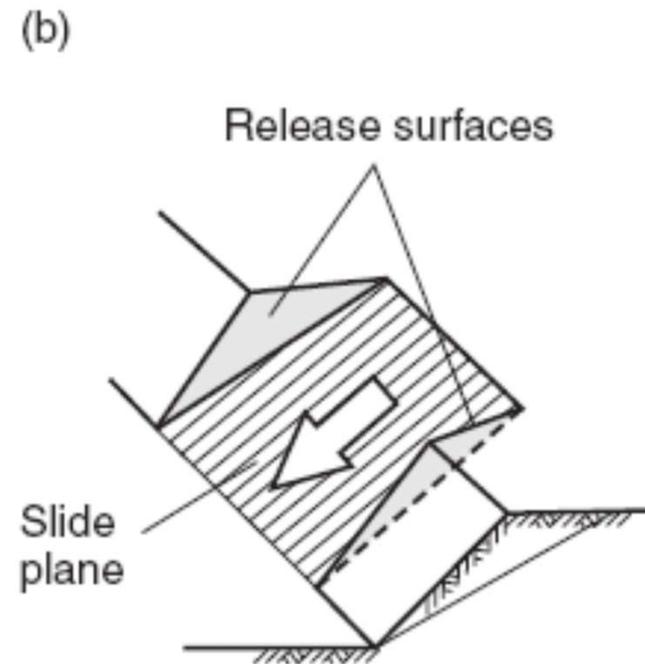
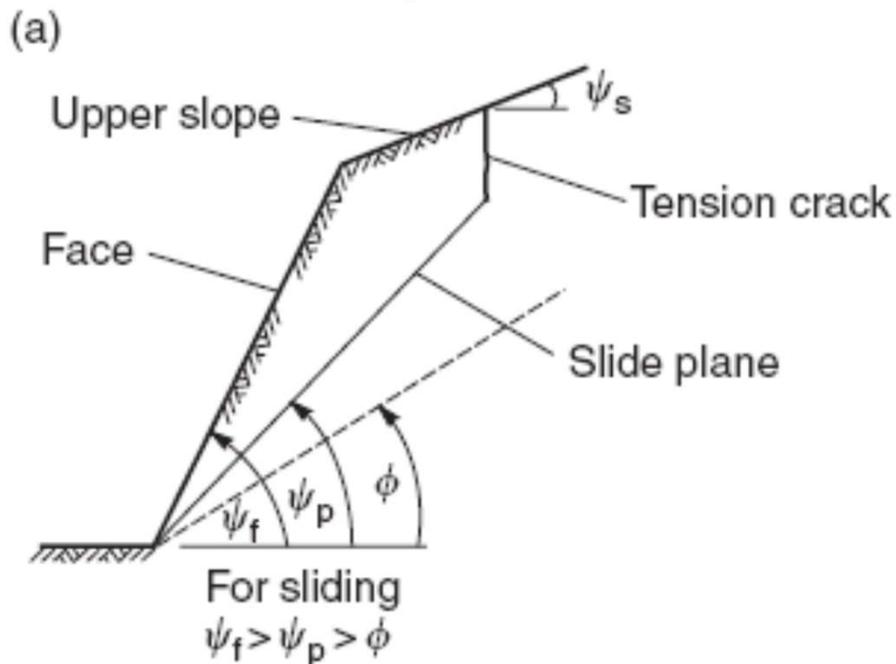
- a. Macizo rocoso (como suelos)
- b. Falla plana
- c. Falla en cuña
- d. Vuelco





Falla plana: condiciones

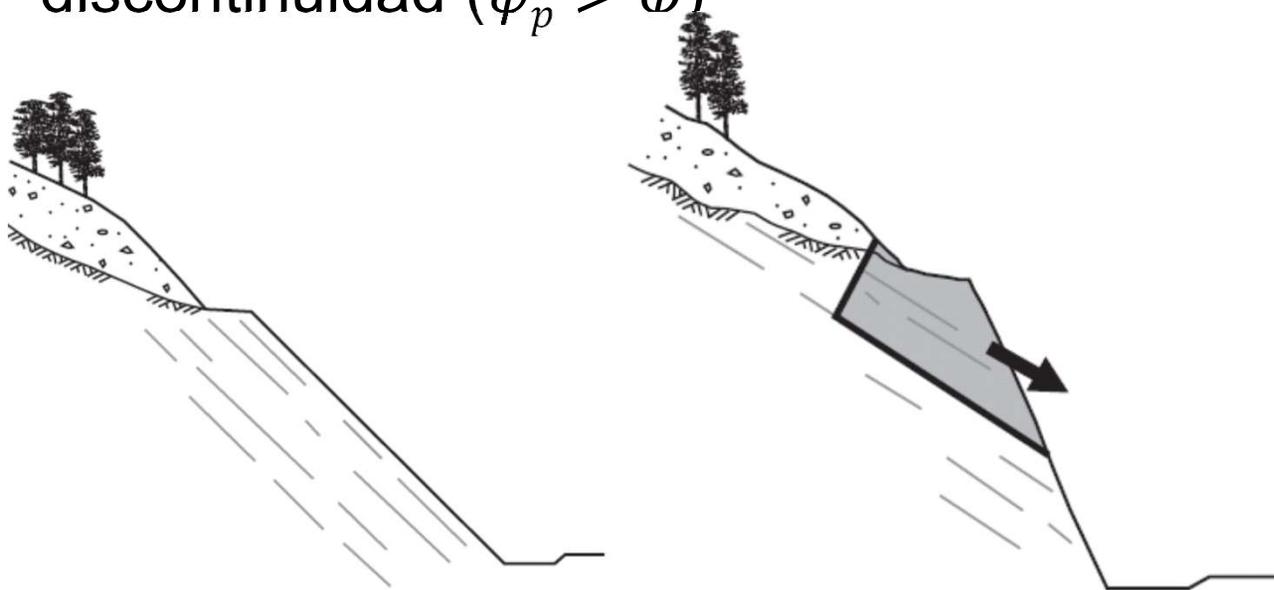
- Discontinuidad subparalela al talud ($DR < 20^\circ$)
- Buzamiento disc. menor que talud ($\psi_p < \psi_f$)
- Buzamiento disc. mayor que ángulo de fricción de la discontinuidad ($\psi_p > \phi$)





Falla plana: condiciones

- Discontinuidad subparalela al talud ($DR < 20^\circ$)
- Buzamiento disc. menor que talud ($\psi_p < \psi_f$)
- Buzamiento disc. mayor que ángulo de fricción de la discontinuidad ($\psi_p > \phi$)

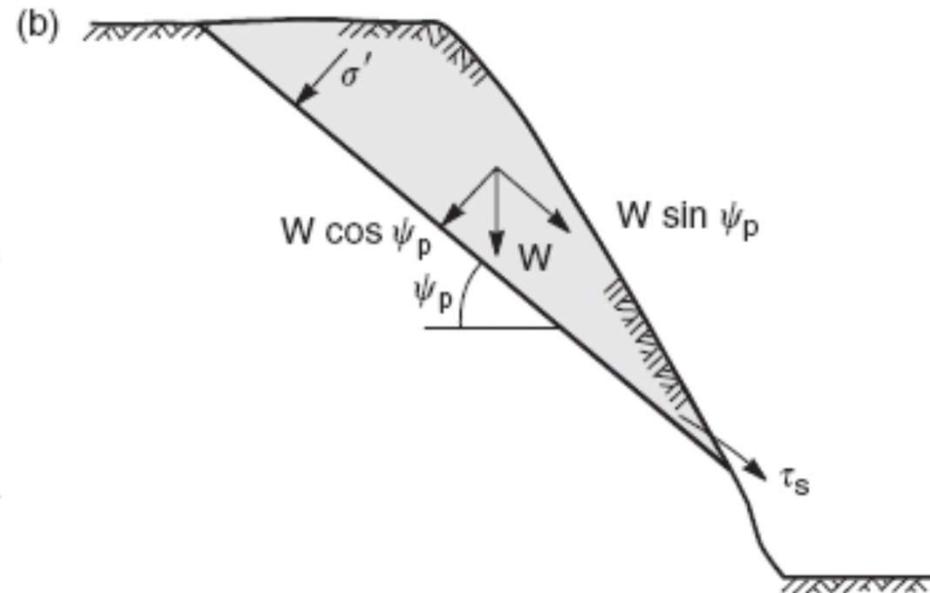
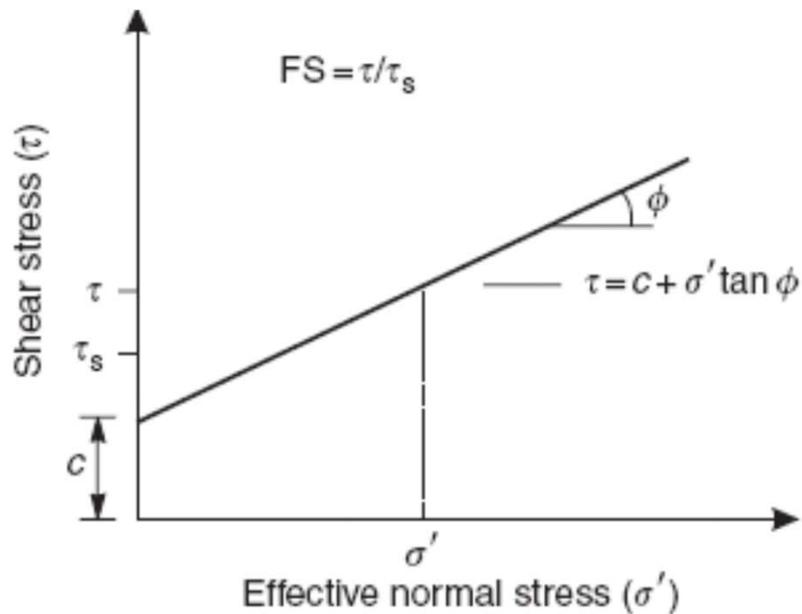


No falla

Falla

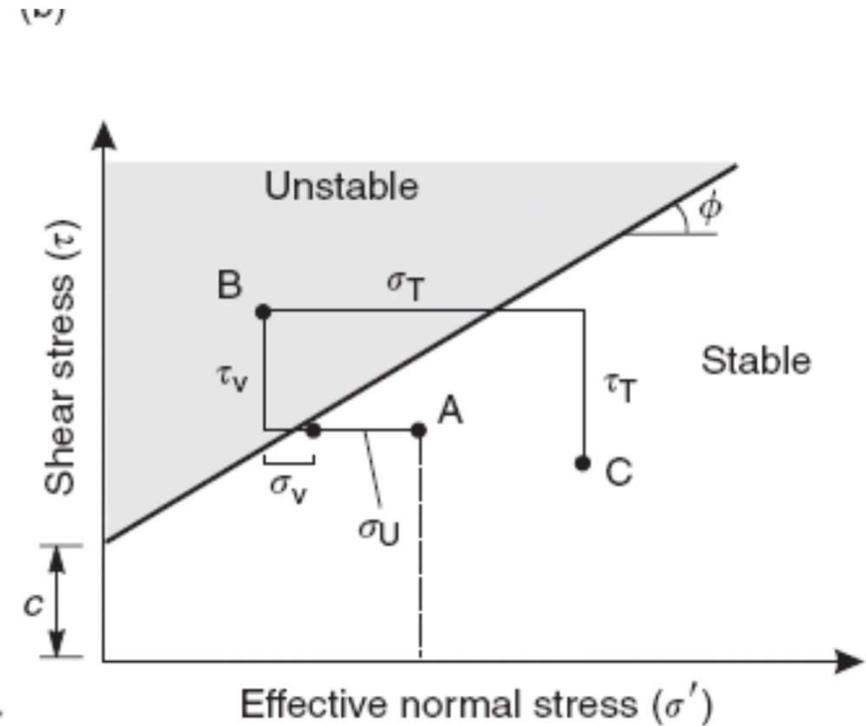
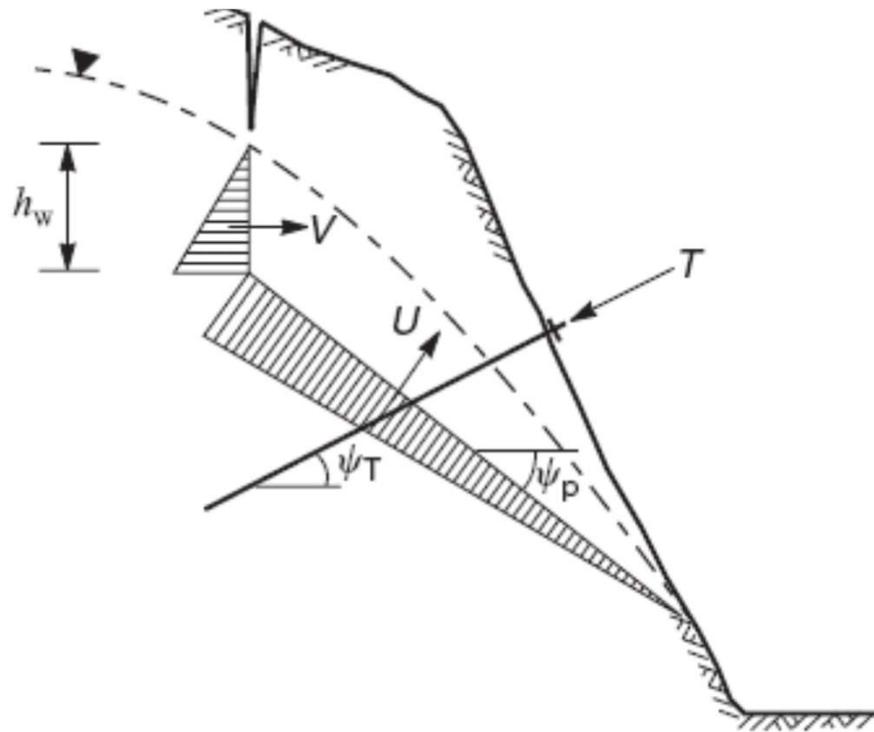


Falla plana: Factor de seguridad



$$FoS = \frac{c A + W \cos[\psi_p] \tan[\phi]}{W \sin[\psi_p]}$$

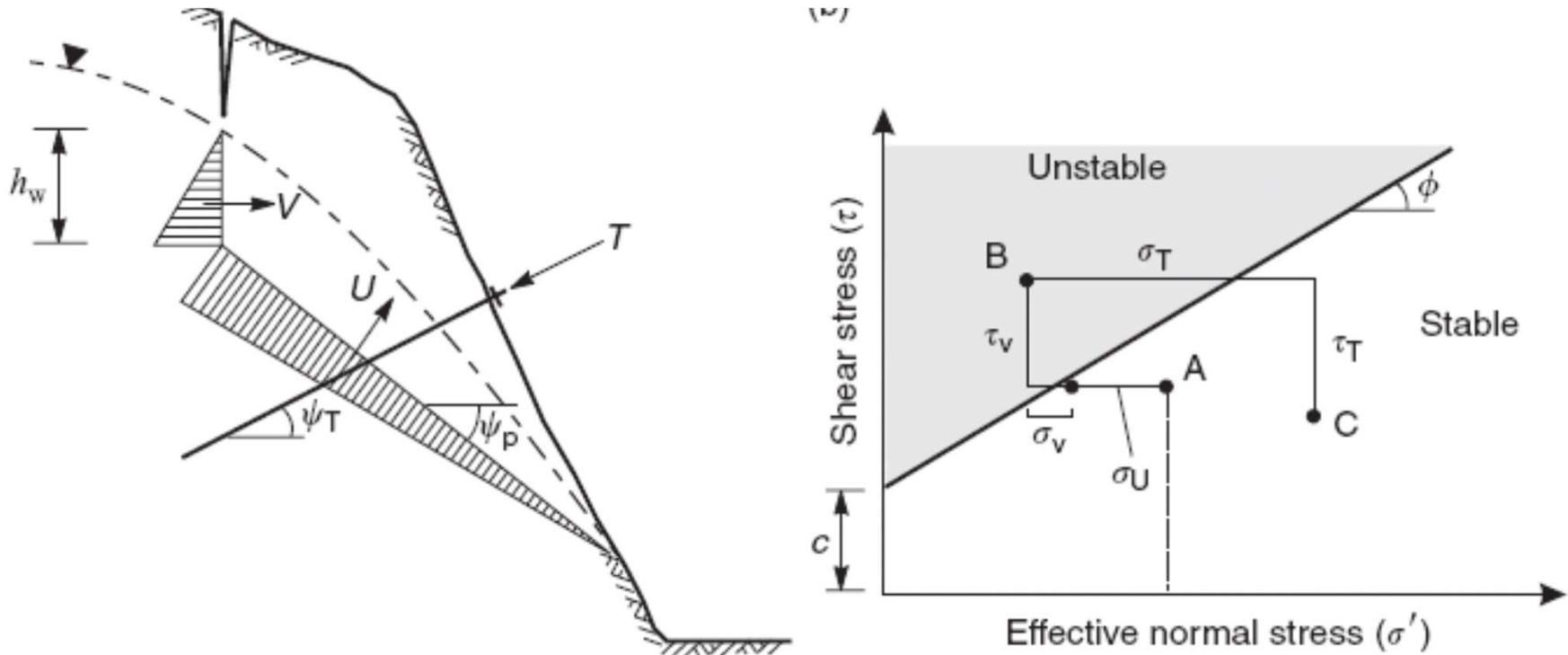
Falla plana: Efecto del agua



$$FoS = \frac{c A + (W \cos[\psi_p] - U - V \sin[\psi_p]) \tan[\phi]}{W \sin[\psi_p] + V \cos[\psi_p]}$$



Falla plana: Efecto del anclaje



$$FoS = \frac{c A + (W \cos[\psi_p] - U - V \sin[\psi_p]) \tan[\phi]}{W \sin[\psi_p] + V \cos[\psi_p]}$$

$$FoS = \frac{c A + (W \cos[\psi_p] - U - V \sin[\psi_p] + T \sin[\psi_p + \psi_T]) \tan[\phi]}{W \sin[\psi_p] + V \cos[\psi_p] - T \cos[\psi_p + \psi_T]}$$

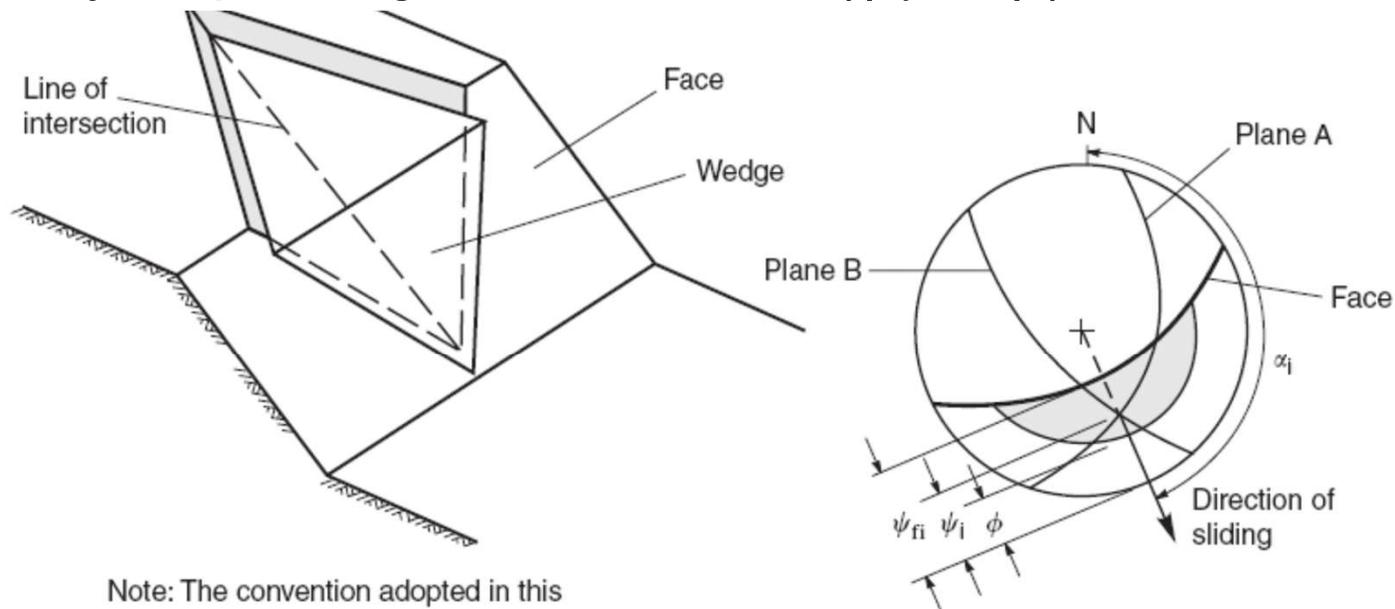
Ejemplo de falla plana





Falla en cuña: condiciones necesarias

- Dos discontinuidades que se intersecten
- Incl. línea intersección menor que el buzamiento aparente del talud ($\psi_i < \psi_{fi}$)
- Incl. mayor que ángulo de fricción ($\psi_i > \phi$)



Note: The convention adopted in this analysis is that the flatter plane is always referred to as Plane A.

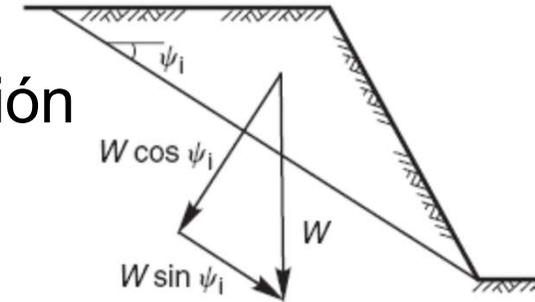
Falla en cuña: Factor de seguridad



1. Cálculo dirección e inclinación línea intersección

$$- \alpha_i = \tan^{-1} \left[\frac{\tan[\psi_A] \cos[\alpha_A] - \tan[\psi_B] \cos[\alpha_B]}{\tan[\psi_B] \sin[\alpha_B] - \tan[\psi_A] \sin[\alpha_A]} \right]$$

$$- \psi_i = \tan[\psi_A] \cos[\alpha_A - \alpha_i] - \tan[\psi_B] \cos[\alpha_B - \alpha_i]$$



2. Cálculo de las fuerzas R

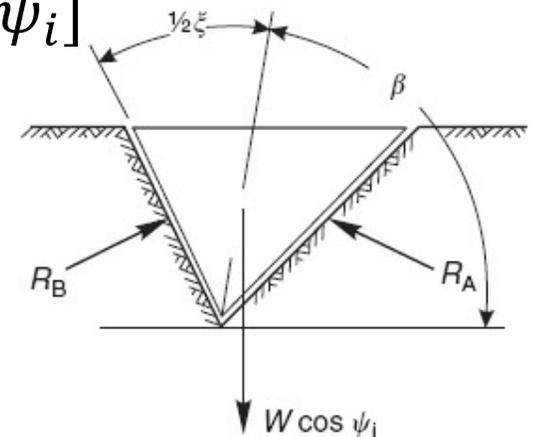
$$- R_A \sin[\beta - \xi/2] - R_B \sin[\beta + \xi/2] = 0$$

$$- R_A \cos[\beta - \xi/2] + R_B \cos[\beta + \xi/2] = W \cos[\psi_i]$$

3. Cálculo del factor de seguridad

$$- R_A + R_B = \frac{W \cos[\psi_i] \sin[\beta]}{\sin[\xi/2]}$$

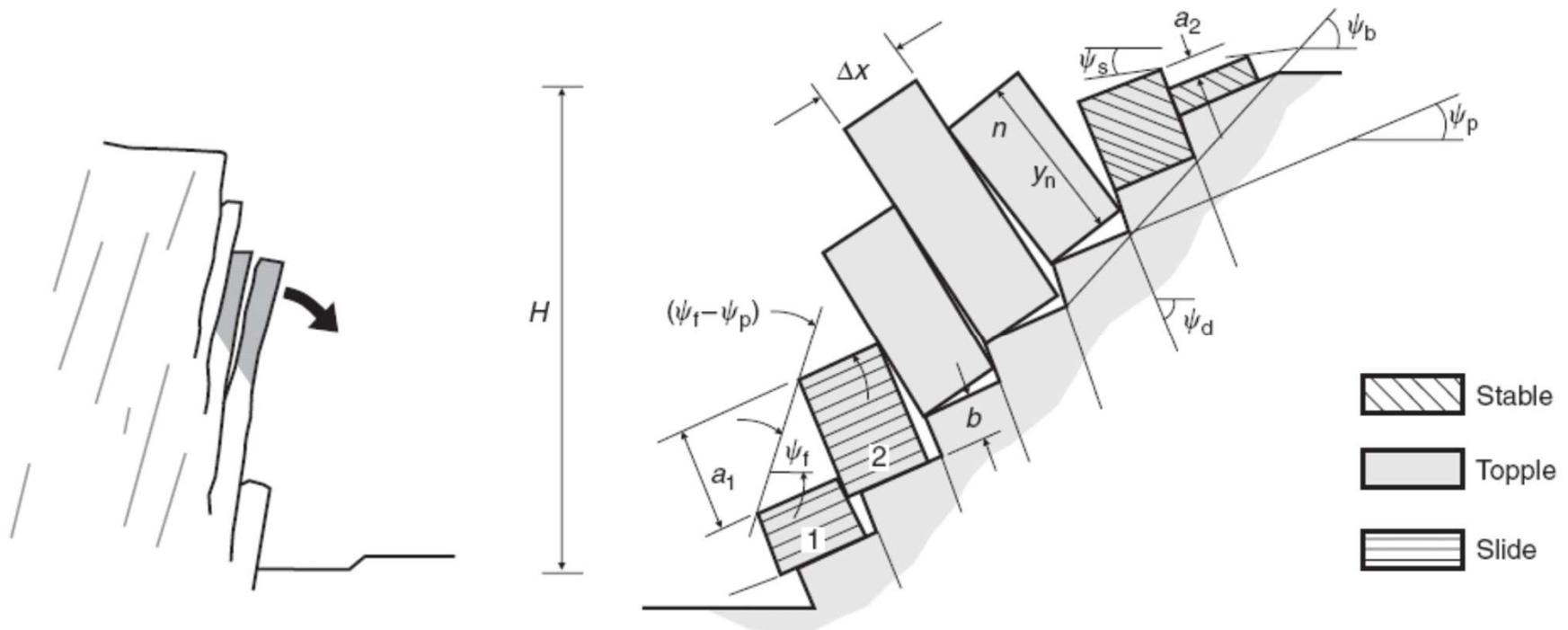
$$- FOS = \frac{(R_A + R_B) \tan[\phi]}{W \sin[\psi_i]} = \frac{\sin[\beta]}{\sin[\xi/2]} \frac{\tan[\phi]}{\tan[\psi_i]}$$



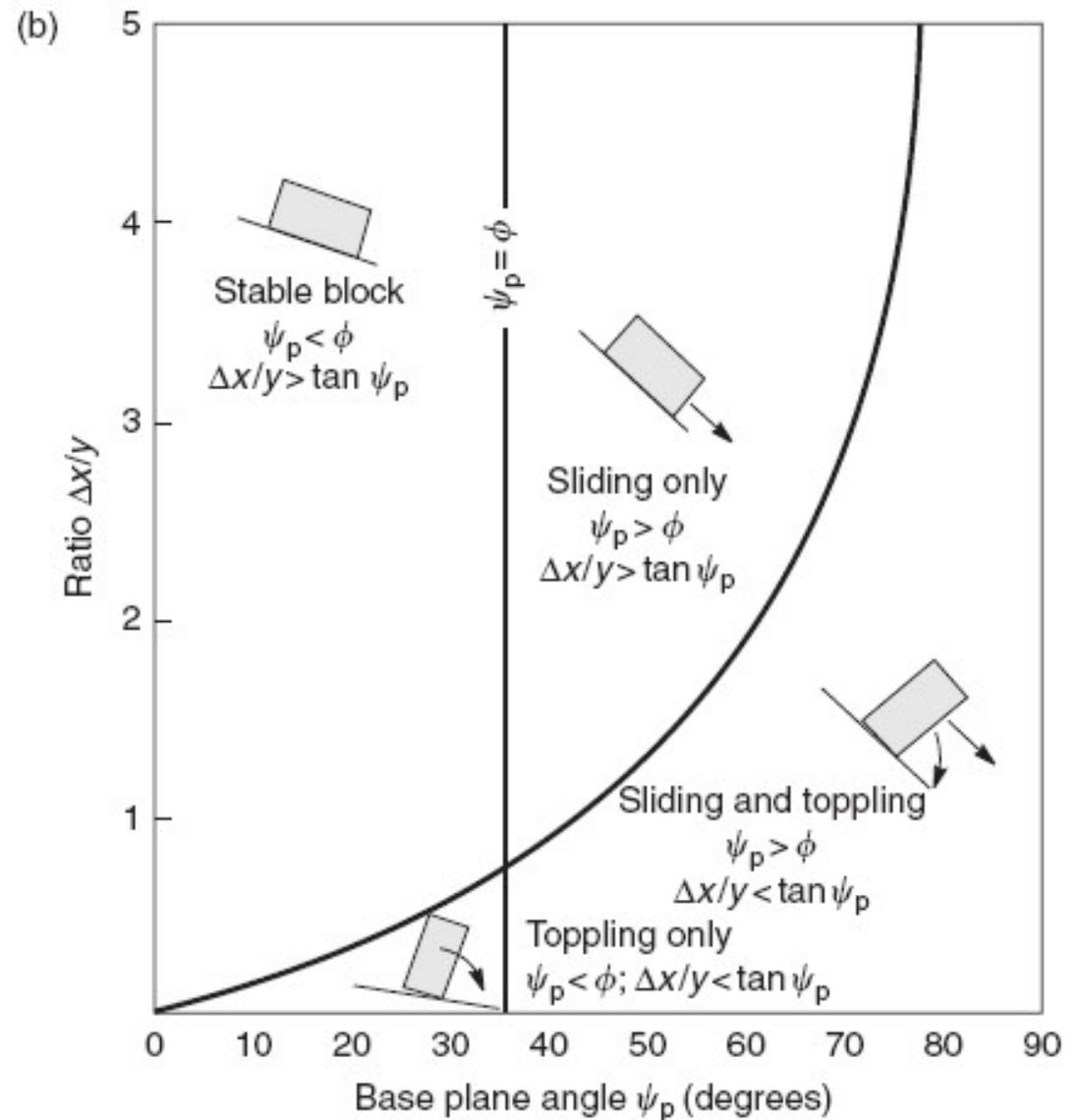
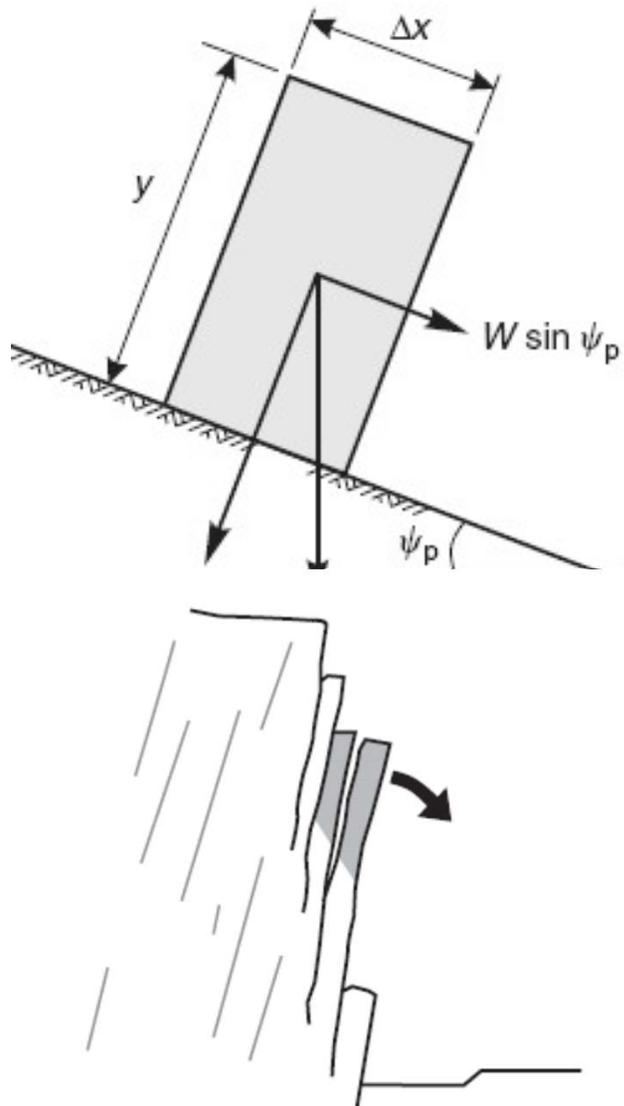
Falla por vuelco: Condiciones necesarias



- Buzamiento de discontinuidades opuesto al talud
- Relación de lados de los bloques desfavorable
- Cinemática posible (corte o falla al pie)



Falla por vuelco



Sector con riesgo de vuelco



Falla global



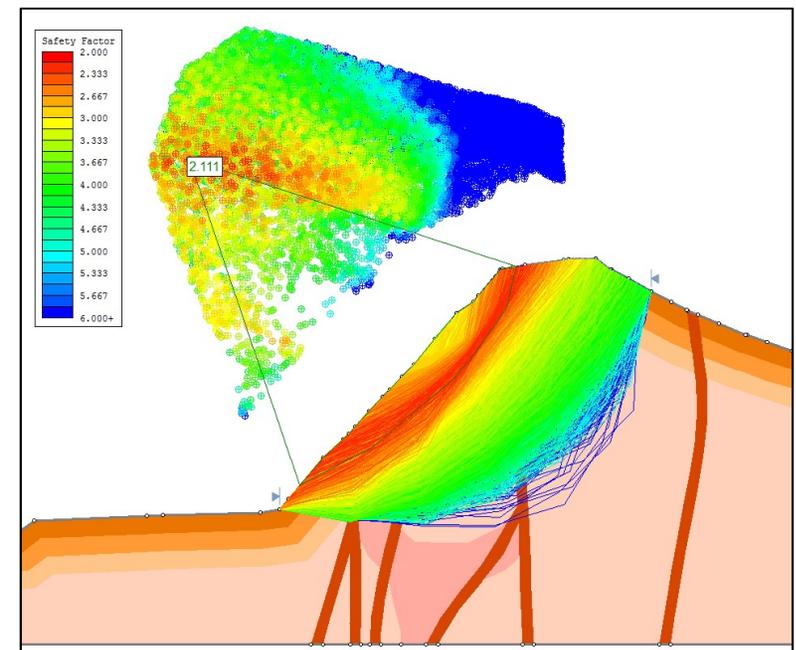
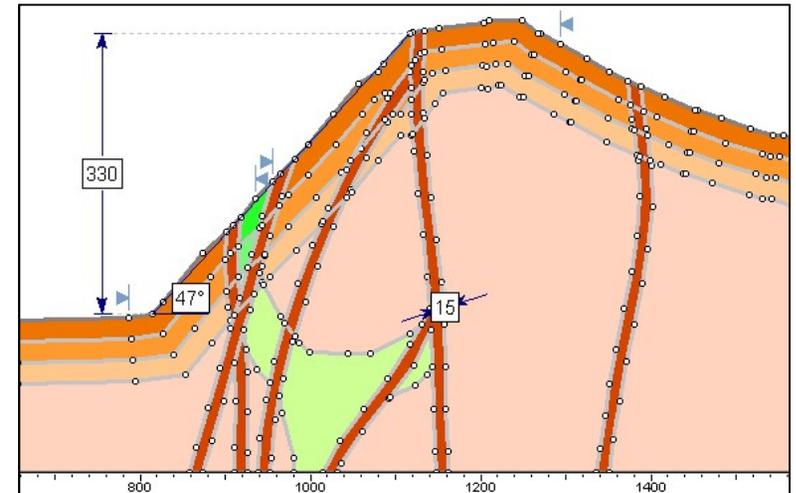
Falla global

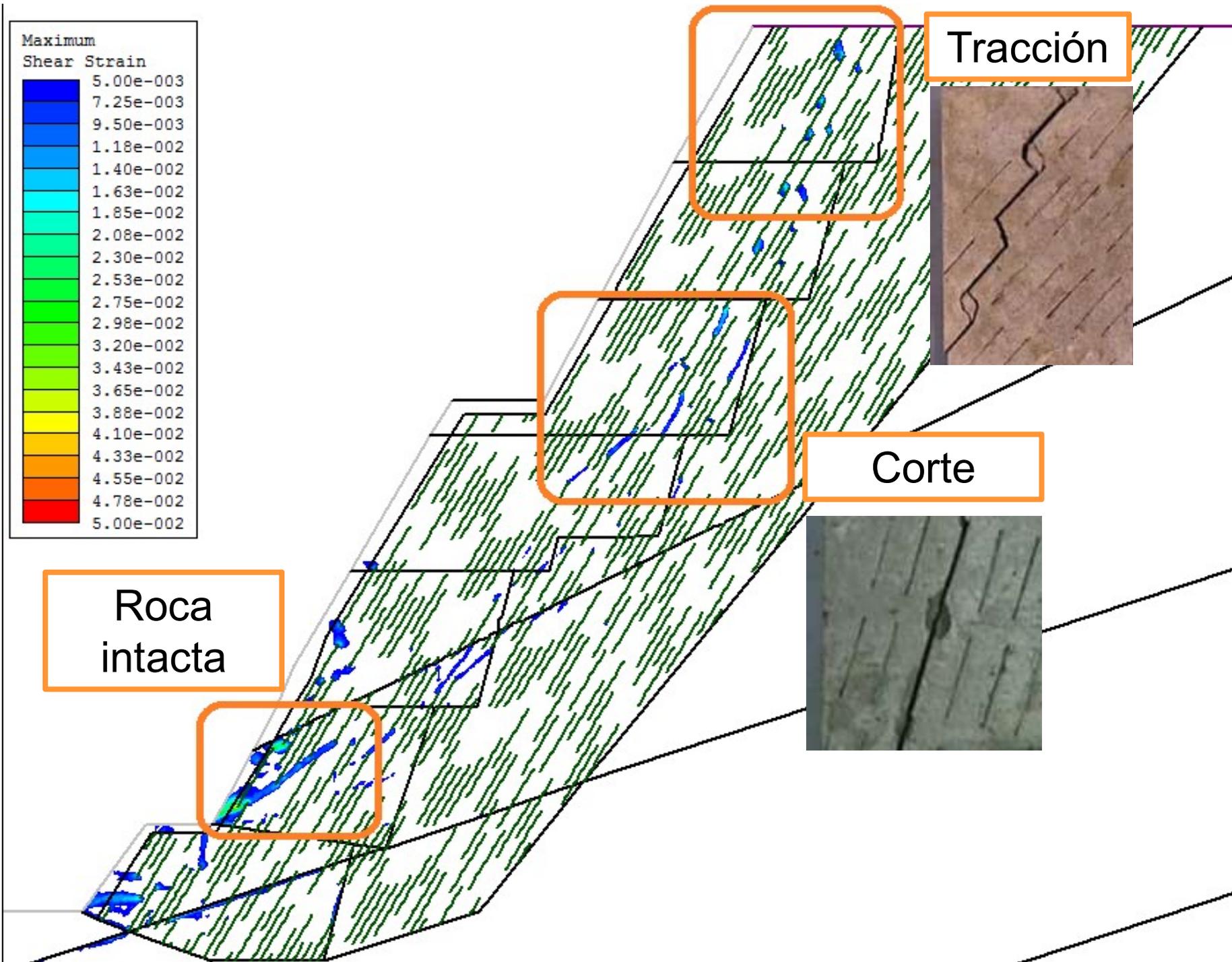


La falla global es similar a la falla en suelos

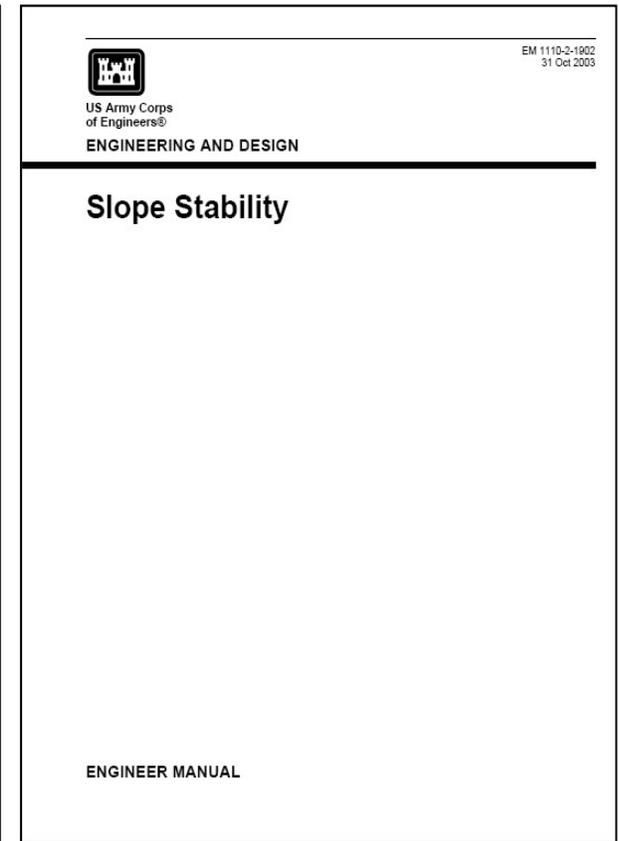
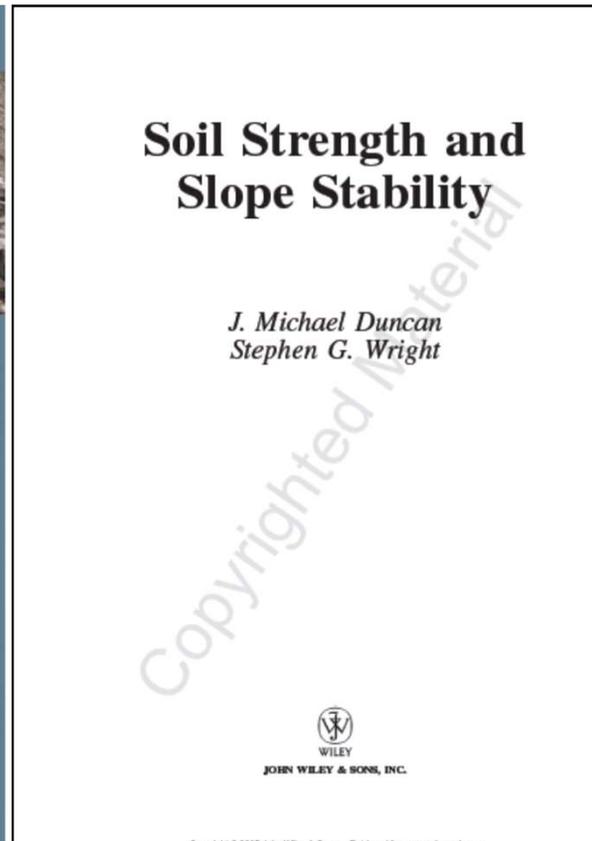
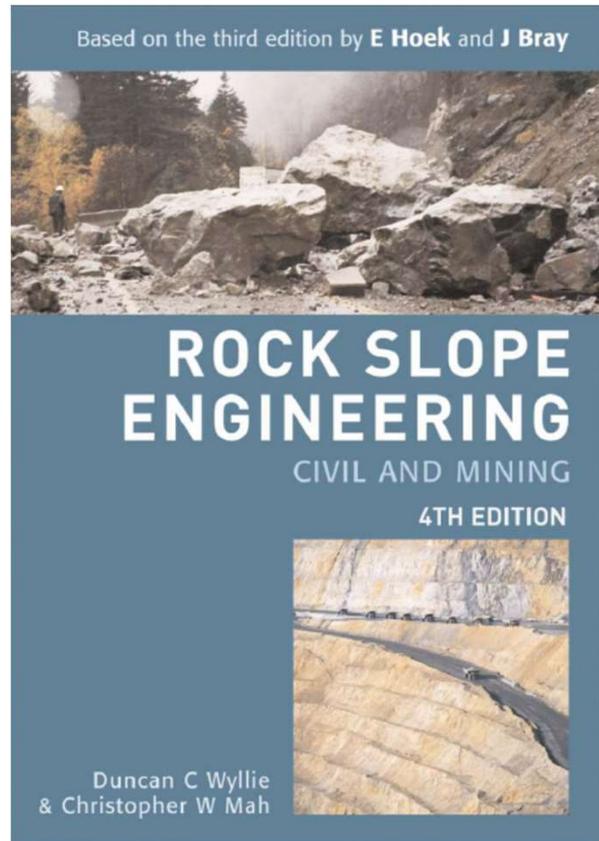
Está controlada por

- Resistencia de la roca intacta incluyendo sus micro-defectos
- En rocas duras
 - Ruptura de puentes de roca
 - Coalescencia de discontinuidades
- En rocas blandas
 - Componentes viscoplásticas
 - Cambios de humedad





Bibliografía básica



El laboratorio tiene los tres libros