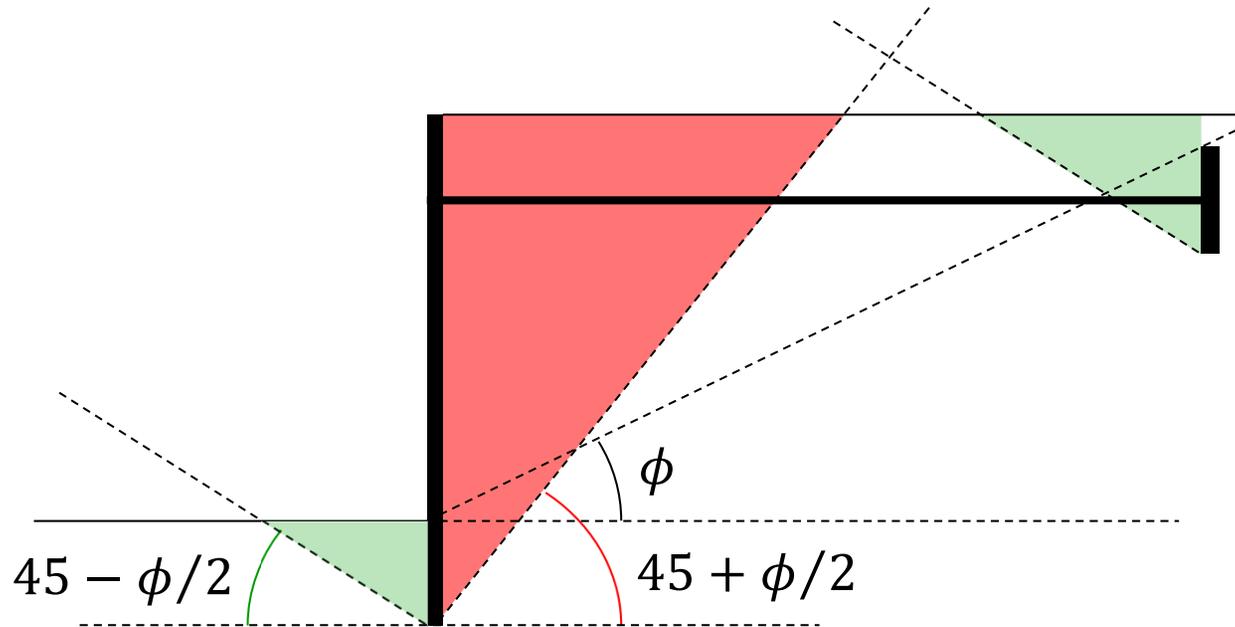


# Estructuras de contención



Mecánica de Suelos y Geología

Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

# Índice



- Estados de equilibrio plástico
- Método de Rankine (teorema estático)
- Método de Coulomb (teorema cinemático)
- Método de espiral logarítmica (teorema estático)
- Diseño de muros rígidos
- Diseño de tablestacas y muros colados
- Excavaciones



# Estados de equilibrio plástico (activo y pasivo) en las estructuras de contención

Mohr-Coulomb:  $\sigma'_1 = \sigma'_3 N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi}$

Si  $\sigma'_v$  es tensión principal

- **Estado activo:**  $\sigma'_v = \sigma'_1$

- $\sigma'_v = \sigma'_h N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi}$

- $\sigma'_h = \sigma'_v / N_\phi - 2c / \sqrt{N_\phi} = K_A \sigma'_v - 2c\sqrt{K_A}$

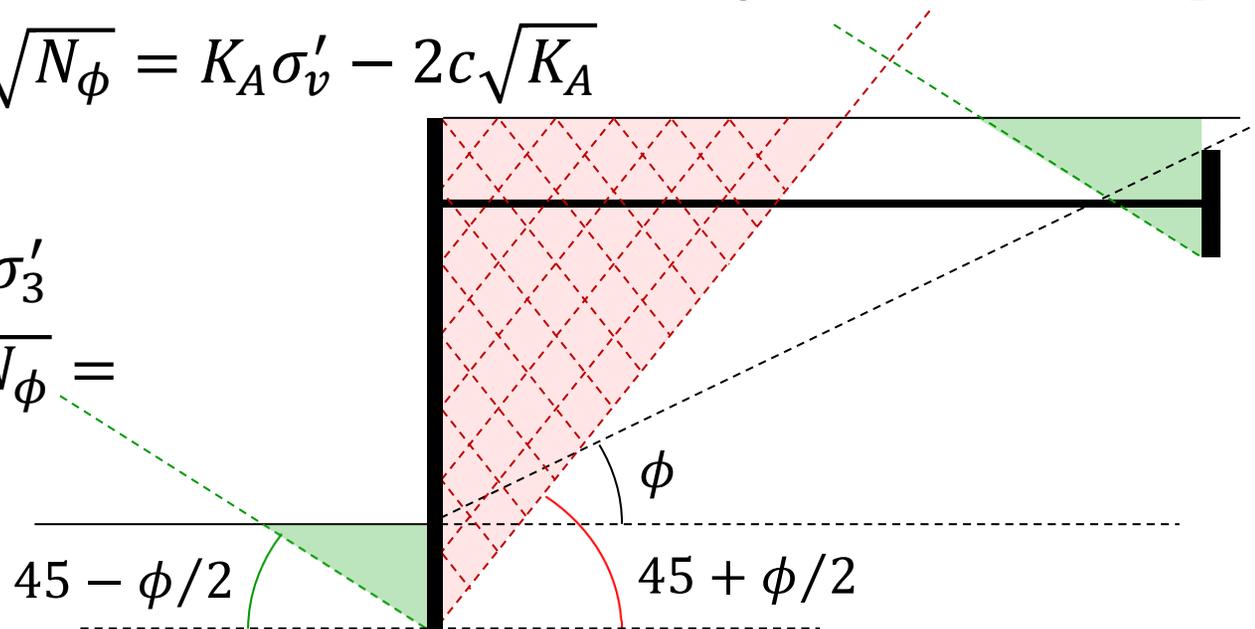
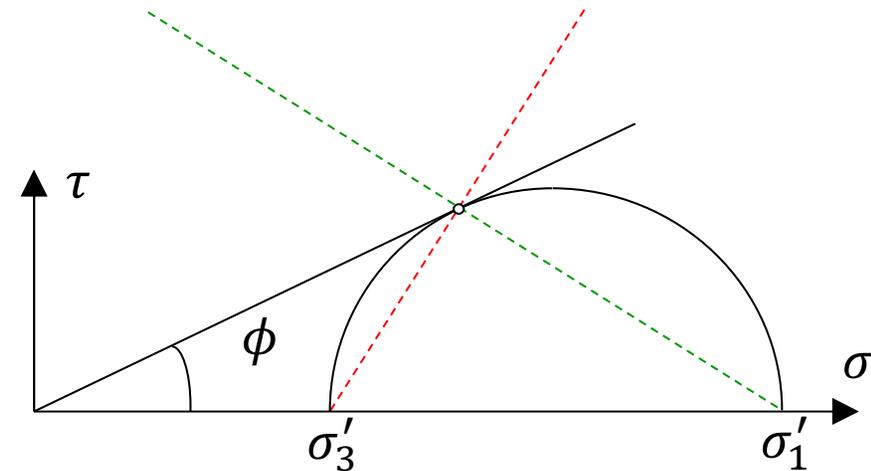
- $K_A = 1/N_\phi$

- **Estado pasivo:**  $\sigma'_v = \sigma'_3$

- $\sigma'_h = \sigma'_v N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi} =$

- $K_P \sigma'_v + 2c\sqrt{K_P}$

- $K_P = N_\phi$

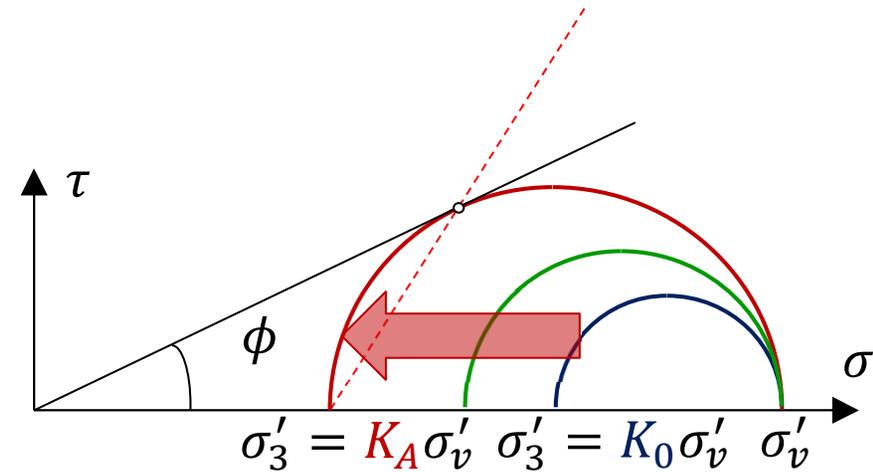


# Estado activo: extensión lateral

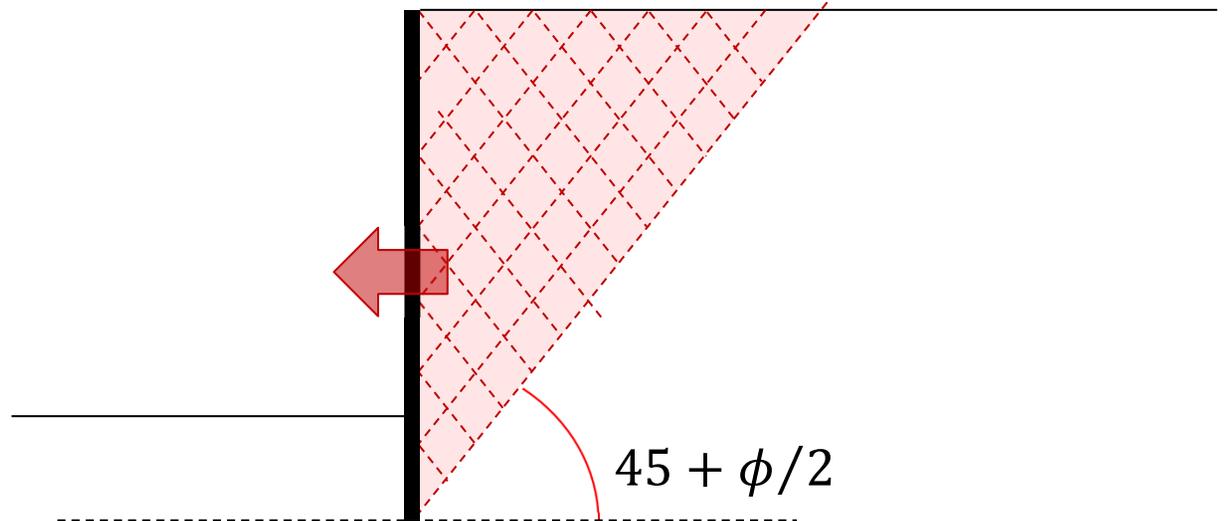


- Tensión vertical  $\sigma'_v$  se mantiene
- Tensión horizontal  $\sigma'_h$  **se reduce**
- Tensión horizontal mínima: estado de equilibrio plástico

$$\sigma'_h = K_A \sigma'_v - 2c\sqrt{K_A}$$



$\phi(^{\circ})$	$K_A$	$K_0^{NC}$
20	0.49	0.66
25	0.41	0.57
30	0.33	0.50
35	0.27	0.43
40	0.22	0.36
45	0.17	0.29



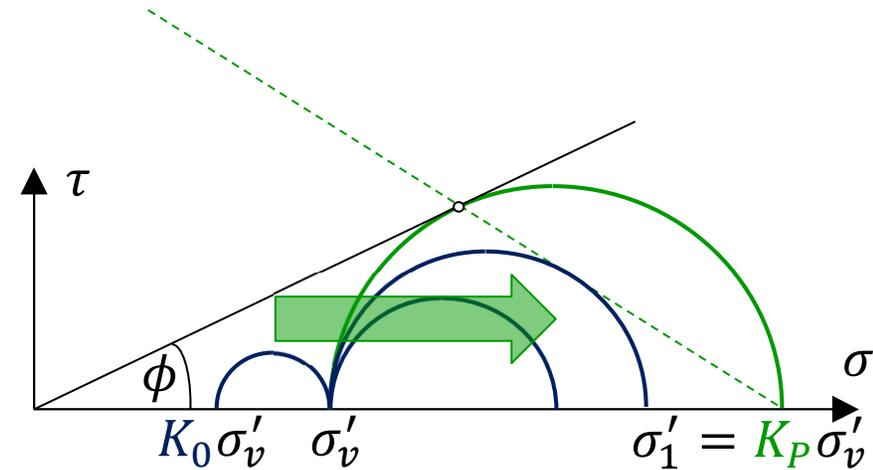
$45 + \phi/2$

# Estado pasivo: compresión lateral

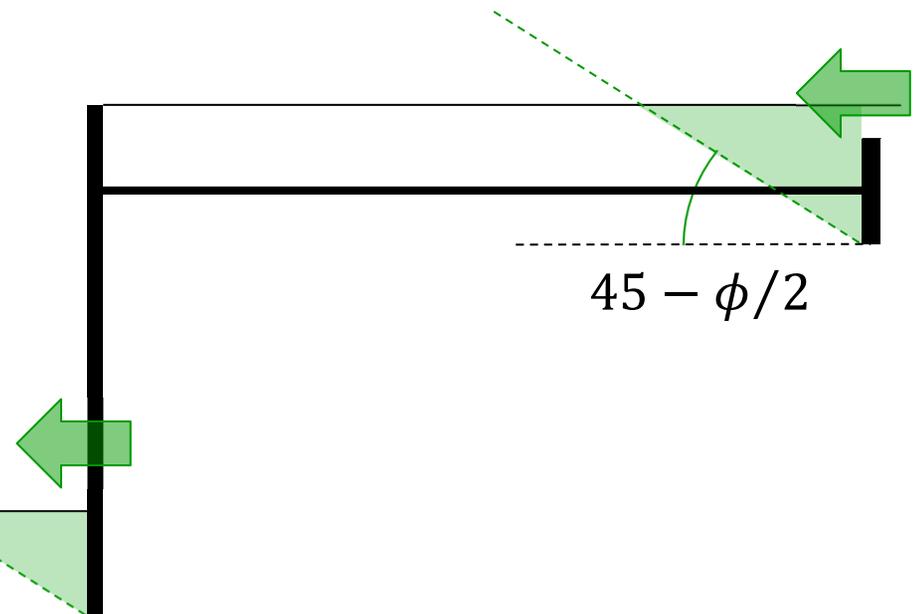


- Tensión vertical  $\sigma'_v$  se mantiene
- Tensión horizontal  $\sigma'_h$  **crece**
- Tensión horizontal mínima: estado de equilibrio plástico  

$$\sigma'_h = K_P \sigma'_v + 2c\sqrt{K_P}$$



$\phi(^{\circ})$	$K_A$	$K_0^{NC}$	$K_P$
20	0.49	0.66	2.04
25	0.41	0.57	2.46
30	0.33	0.50	3.00
35	0.27	0.43	3.66
40	0.22	0.36	4.60
45	0.17	0.29	5.83



# Índice



- Estados de equilibrio plástico
- **Método de Rankine (teorema estático)**
- Método de Coulomb (teorema cinemático)
- Método de espiral logarítmica (teorema estático)
- Diseño de muros rígidos
- Diseño de tablestacas y muros colados
- Excavaciones

# Método de Rankine (teorema estático)



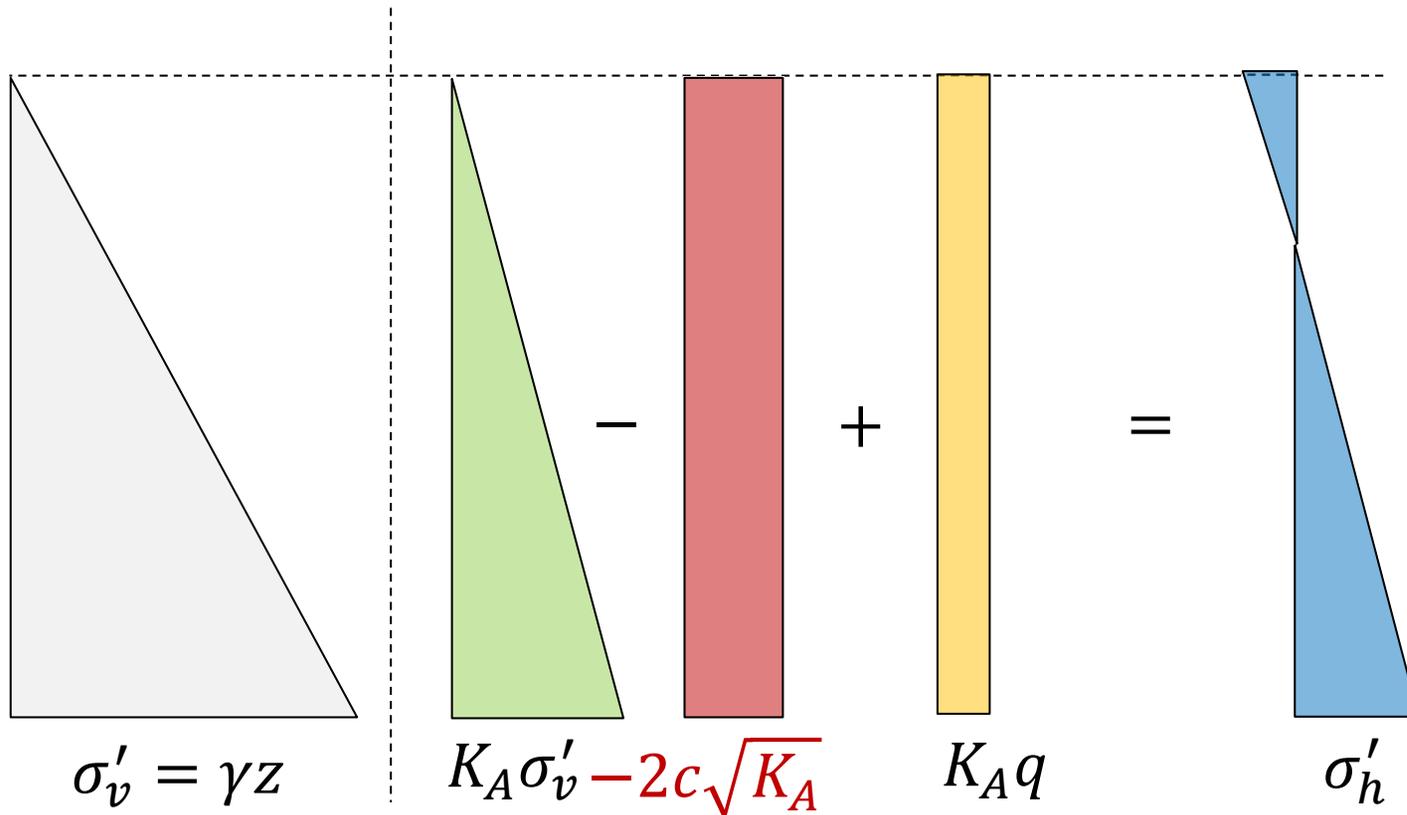
- Se efectúan hipótesis que permiten calcular el estado tensional del terreno
  - Superficie horizontal
  - Estructura vertical
  - Contacto suelo – estructura sin fricción
- Se integra la tensión horizontal

$$E_A = \int_0^h \sigma'_h[z] dz = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_A - 2c\sqrt{K_A}H$$

$$E_P = \int_0^h \sigma'_h[z] dz = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_P + 2c\sqrt{K_P}H$$



# Efecto del agua y sobrecarga



- Sobrecarga  $q$  en superficie  $\sigma'_v = \gamma z + q \rightarrow \Delta E_A = qK_A H$
- Si también hay agua freática:  $\sigma'_v = \gamma z_w + \gamma'(z - z_w) + q$
- El muro no se “pega” al suelo: si  $E_A < 0$  se informa  $E_A = 0$



# Ejercicio: Determinar el empuje activo por método de Rankine

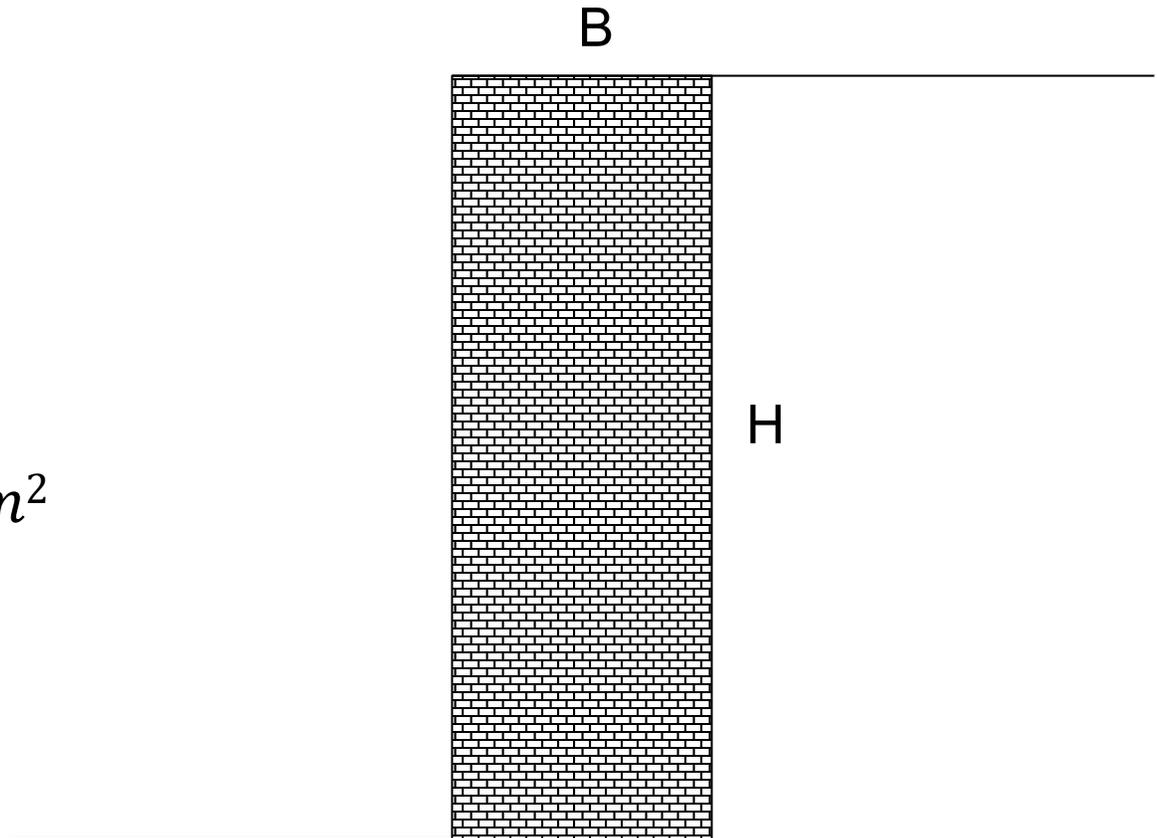
## Dimensiones

- $H = 5.5m$
- $B = 3m$

## Suelo

- $\gamma = 20kN/m^3$
- $c = 0kN/m^2$  y  $10kN/m^2$
- $\phi = 30^\circ$

Muro/suelo:  $\delta = 0^\circ$



# Índice

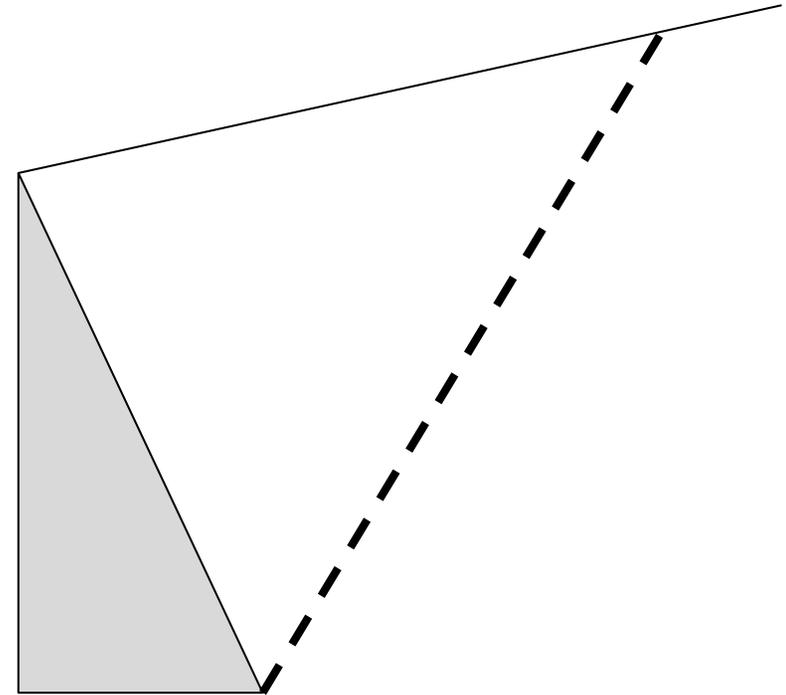


- Estados de equilibrio plástico
- Método de Rankine (teorema estático)
- **Método de Coulomb (teorema cinemático)**
- Método de espiral logarítmica (teorema estático)
- Diseño de muros rígidos
- Diseño de tablestacas y muros colados
- Excavaciones

# Método de Coulomb



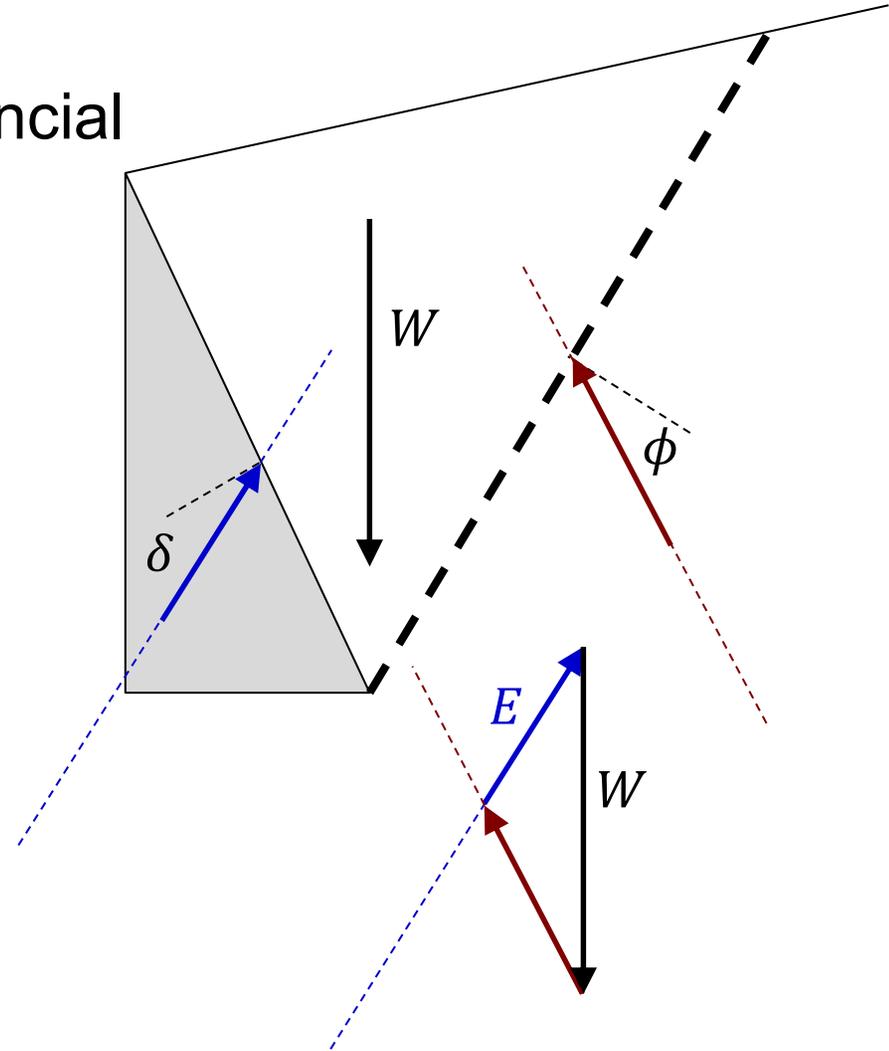
- Aplicación del teorema cinemático
- Hipótesis sobre la geometría de falla
  - Cuña rígida
  - Contacto suelo – estructura puede tener fricción
- Sólo se calculan fuerzas en los planos de potencial deslizamiento
- No se cumple con el equilibrio estático fuera de las superficies de potencial deslizamiento



# Método de Coulomb



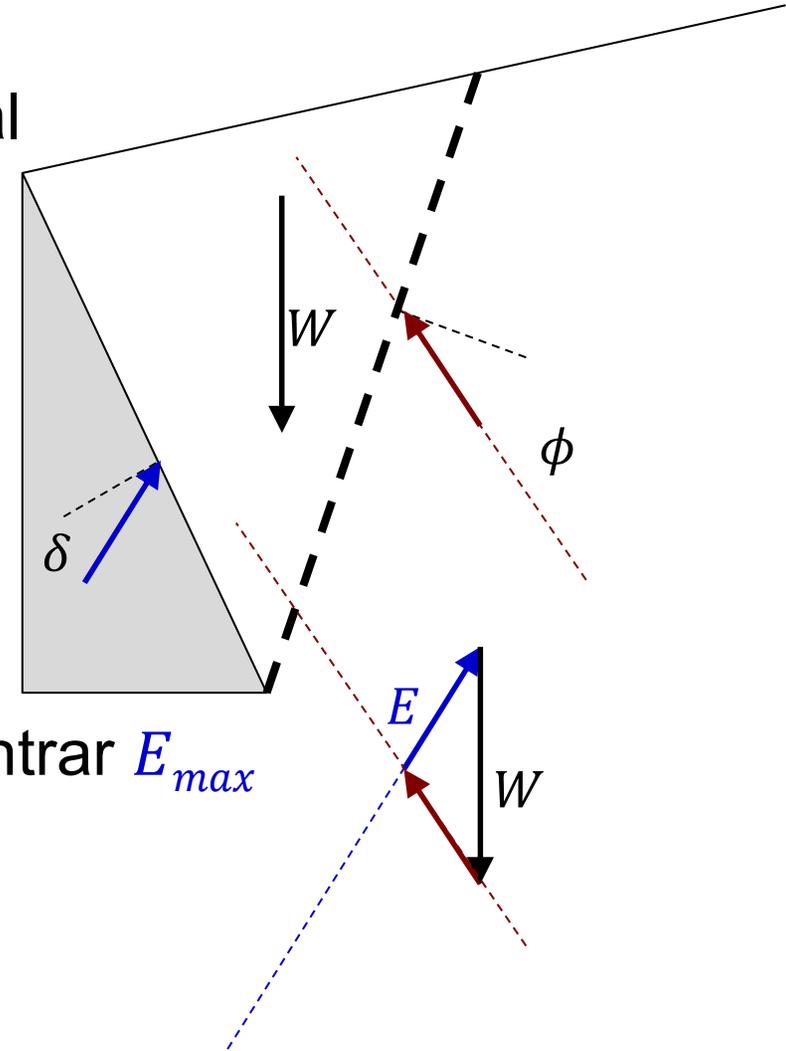
- Se plantea una superficie de potencial deslizamiento
- Se forma el polígono de fuerzas
  - Peso propio
  - Dirección de la fricción ( $\phi$ )
  - Dirección del empuje ( $\delta$ )
- Se determina el empuje  $E$



# Método de Coulomb



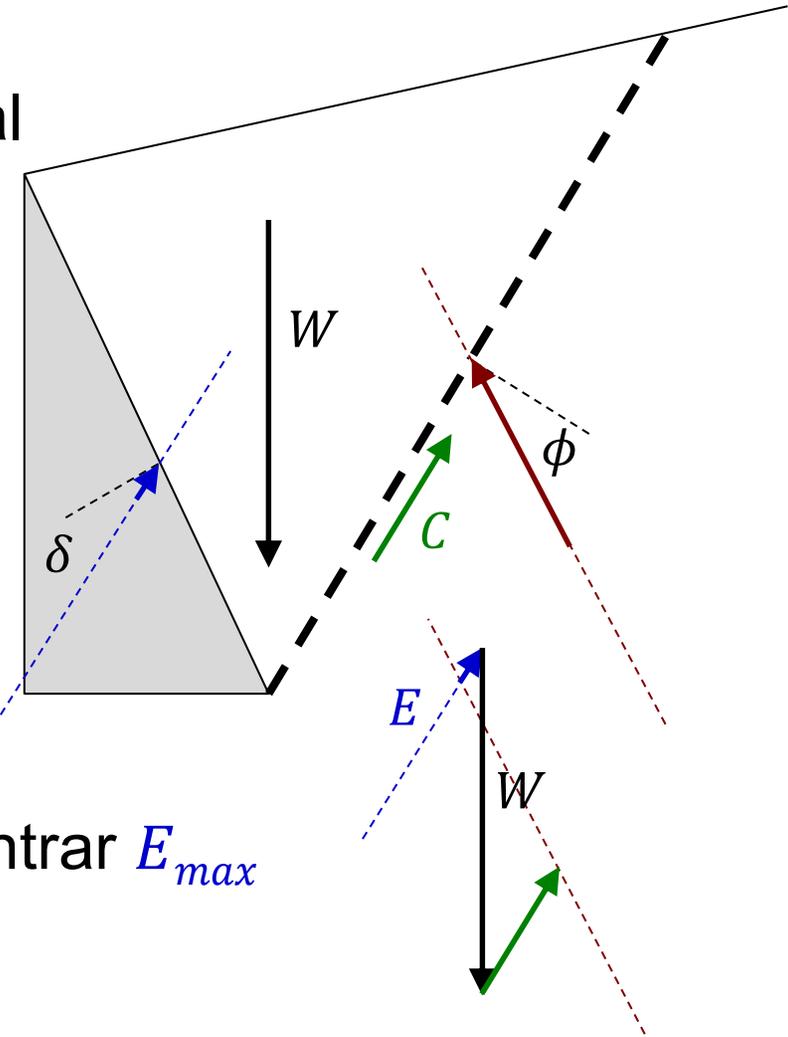
- Se plantea una superficie de potencial deslizamiento
- Se forma el polígono de fuerzas
  - Peso propio
  - Dirección de la fricción ( $\phi$ )
  - Dirección del empuje ( $\delta$ )
- Se determina el empuje  $E$
- Se prueba otra superficie hasta encontrar  $E_{max}$



# Método de Coulomb con cohesión



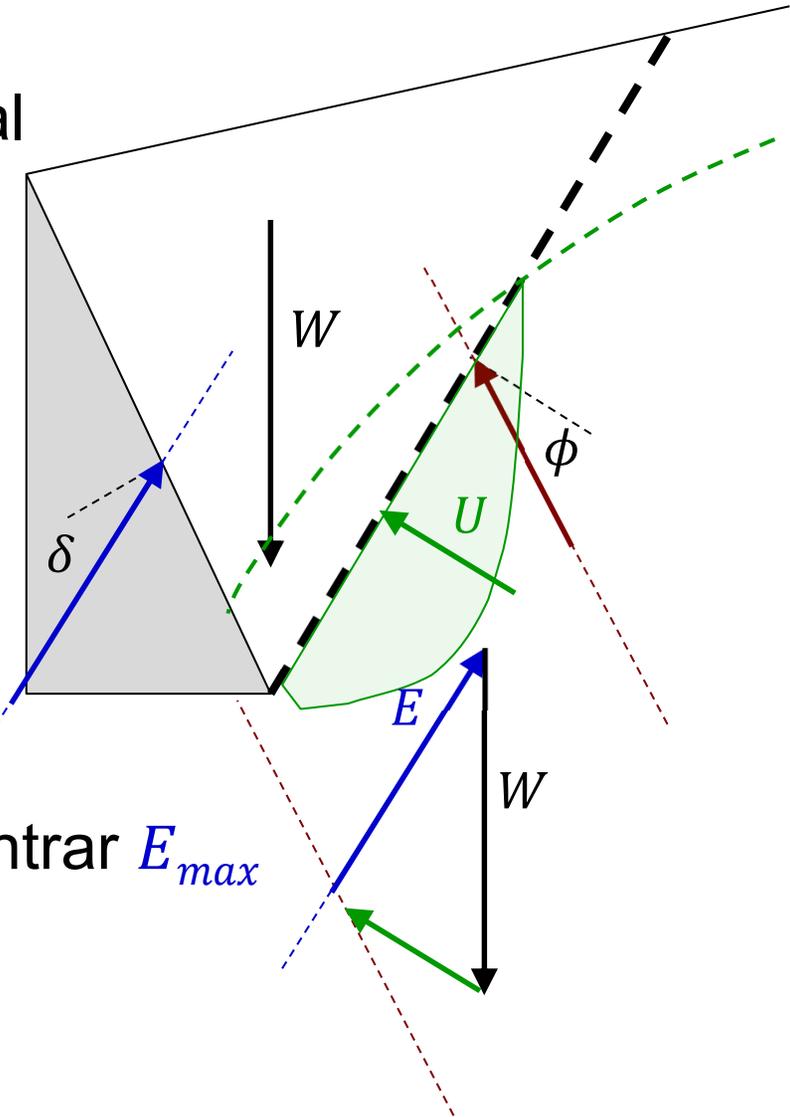
- Se plantea una superficie de potencial deslizamiento
- Se forma el polígono de fuerzas
  - Peso propio  $W$
  - Cohesión x longitud  $C$
  - Dirección de la fricción ( $\phi$ )
  - Dirección del empuje ( $\delta$ )
- Se determina el empuje  $E$
- Se prueba otra superficie hasta encontrar  $E_{max}$



# Método de Coulomb con agua



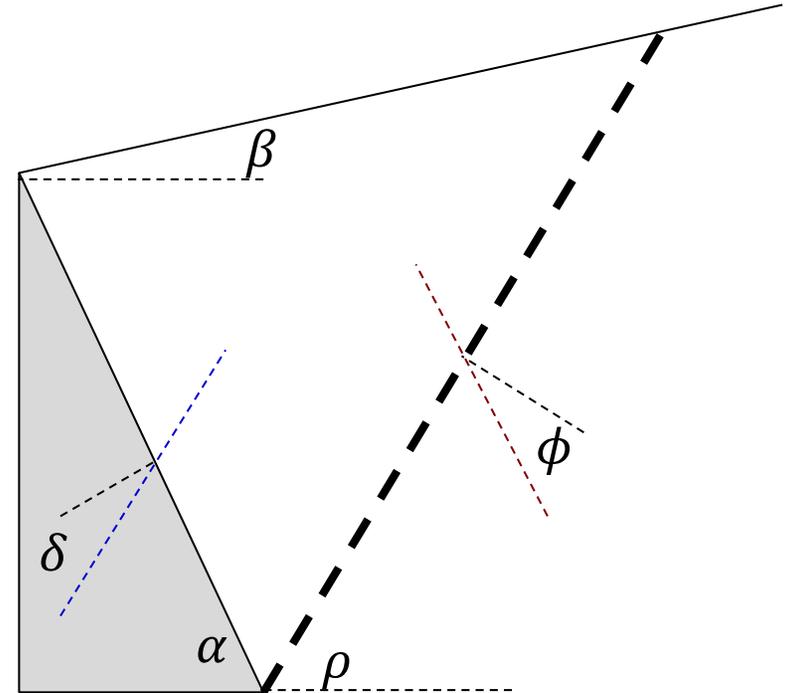
- Se plantea una superficie de potencial deslizamiento
- Se forma el polígono de fuerzas
  - Peso propio  $W$
  - Resultante presión de poros  $U$
  - Dirección de la fricción ( $\phi$ )
  - Dirección del empuje ( $\delta$ )
- Se determina el empuje  $E$
- Se prueba otra superficie hasta encontrar  $E_{max}$



# Método de Coulomb: solución analítica



- Se determina  $\rho$  tal que  $dE/d\rho = 0$
- Para suelo sin cohesión ni agua queda
- $E_A = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_A$



$$K_A = \frac{\sin^2[\phi + \alpha]}{\sin^2(\alpha) \sin(\alpha - \delta) \left( 1 + \sqrt{\frac{\sin[\phi + \delta] \sin[\phi - \beta]}{\sin[\alpha - \delta] \sin[\alpha + \beta]}} \right)^2}$$

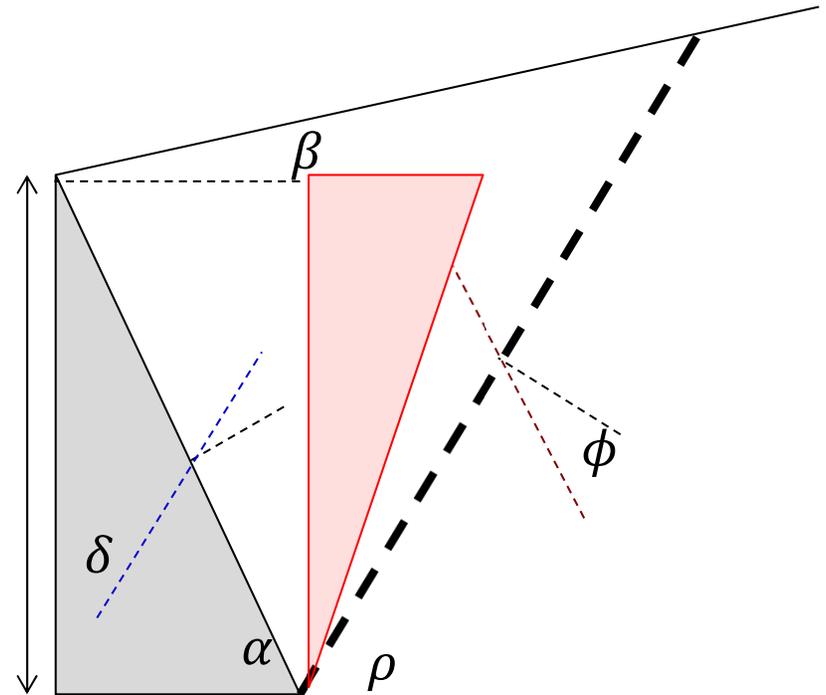
# Método de Coulomb: solución analítica caso sísmico



Es la misma solución que el caso estático cuando se agrega la fuerza de inercia

$$P_{AE} = \frac{1}{2} \gamma H^2 (1 - k_v) K_{AE}$$

$$\tan(\theta) = \frac{\lambda_h}{1 - \lambda_v}$$



$$K_{A,E} = \frac{\sin^2[\phi + \alpha - \theta]}{\cos[\theta] \sin^2[\alpha] \sin[\alpha - \delta - \theta] \left( 1 + \sqrt{\frac{\sin[\phi + \delta] \sin[\phi - \beta]}{\sin[\alpha - \delta - \theta] \sin[\alpha + \beta]}} \right)^2}$$

Se adopta una distribución de triángulo invertido  
(proporcional a la masa de la cuña)



# Ejercicio: Determinar el empuje activo por método de Coulomb

## Dimensiones

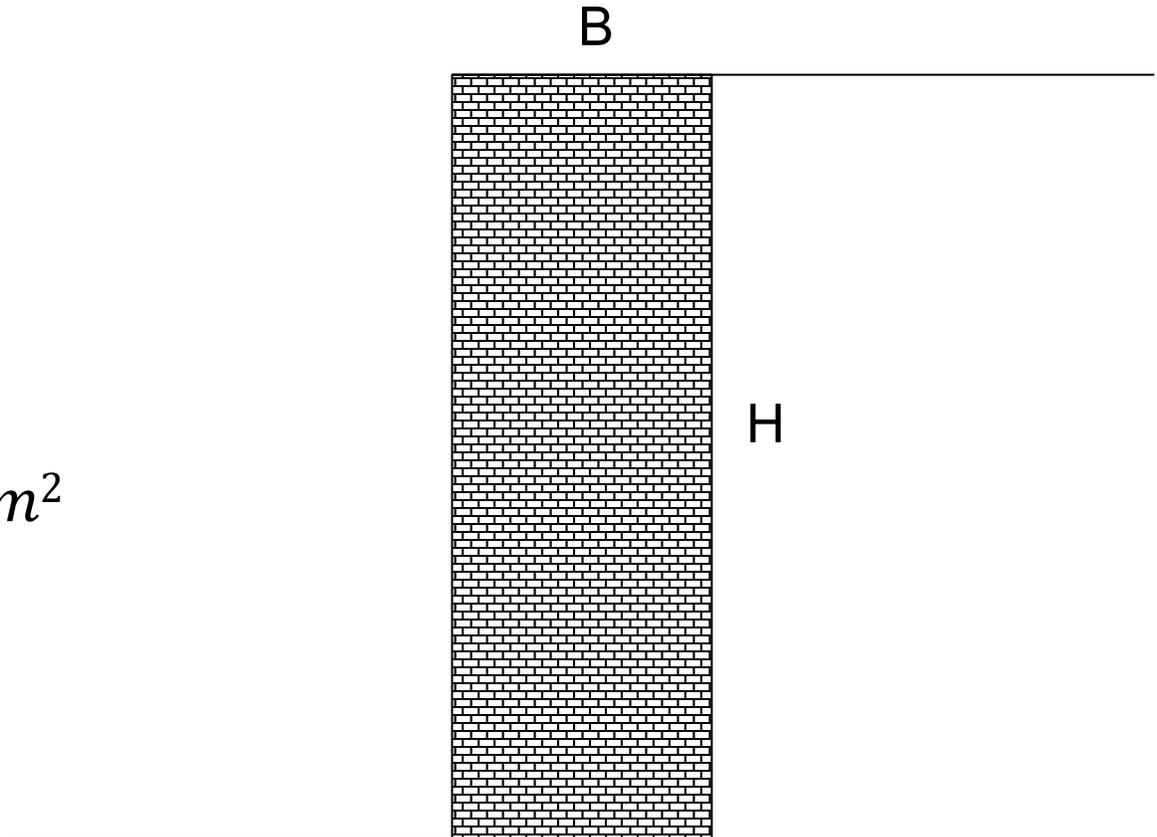
- $H = 5.5m$
- $B = 3.0m$

## Suelo

- $\gamma = 20kN/m^3$
- $c = 0 kN/m^2$  y  $10kN/m^2$
- $\phi = 30^\circ$

## Muro/suelo:

- $\delta = 0^\circ$  y  $10^\circ$



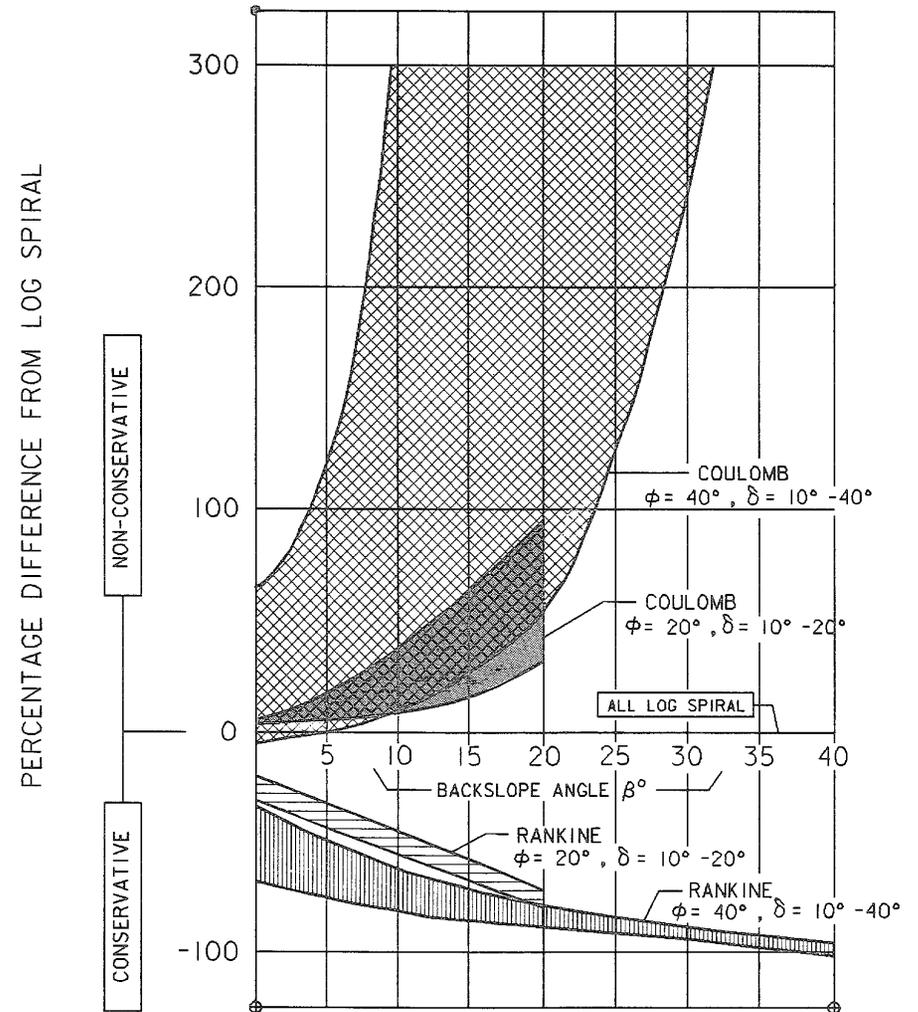
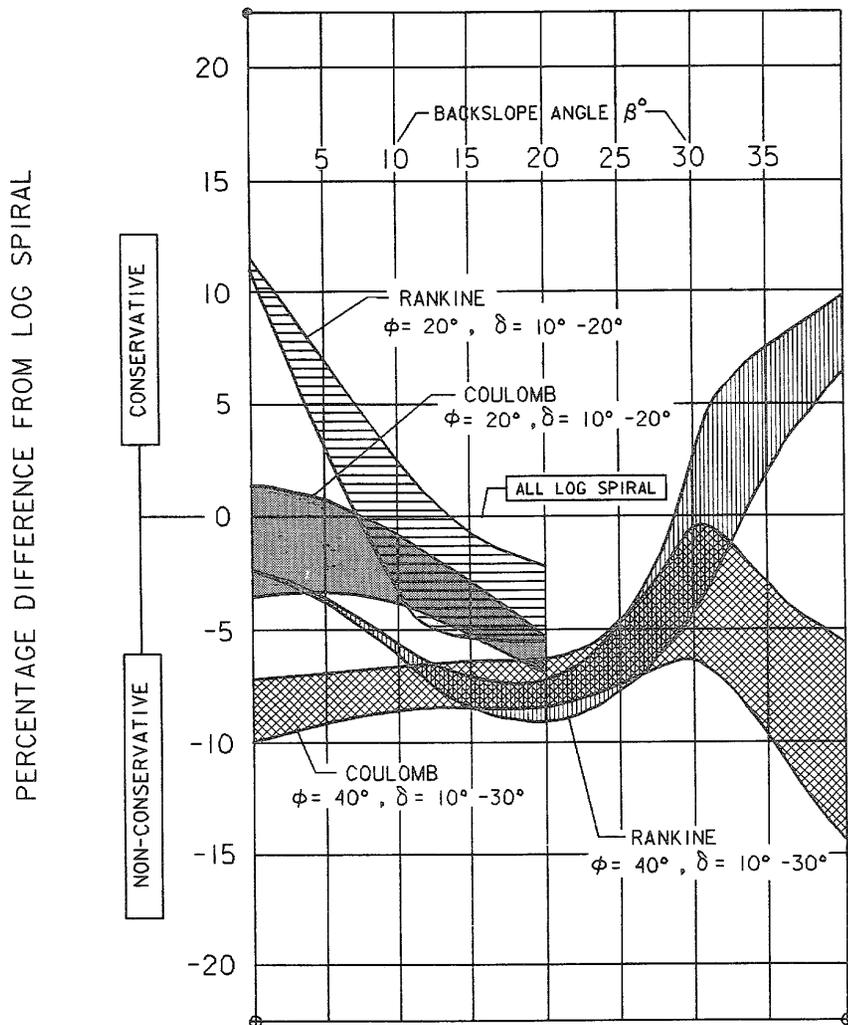
# Índice



- Estados de equilibrio plástico
- Método de Rankine (teorema estático)
- Método de Coulomb (teorema cinemático)
- **Método de espiral logarítmica (teorema estático)**
- Diseño de muros rígidos
- Diseño de tablestacas y muros colados
- Excavaciones



# Comparación entre espiral logarítmica, Coulomb y Rankine



# Ejercicio: determinar los empujes a corto y largo plazo



Dimensiones:  $H = 8.0m$ ,  $h = b = 1.5m$ ,  $B = 5.5m$

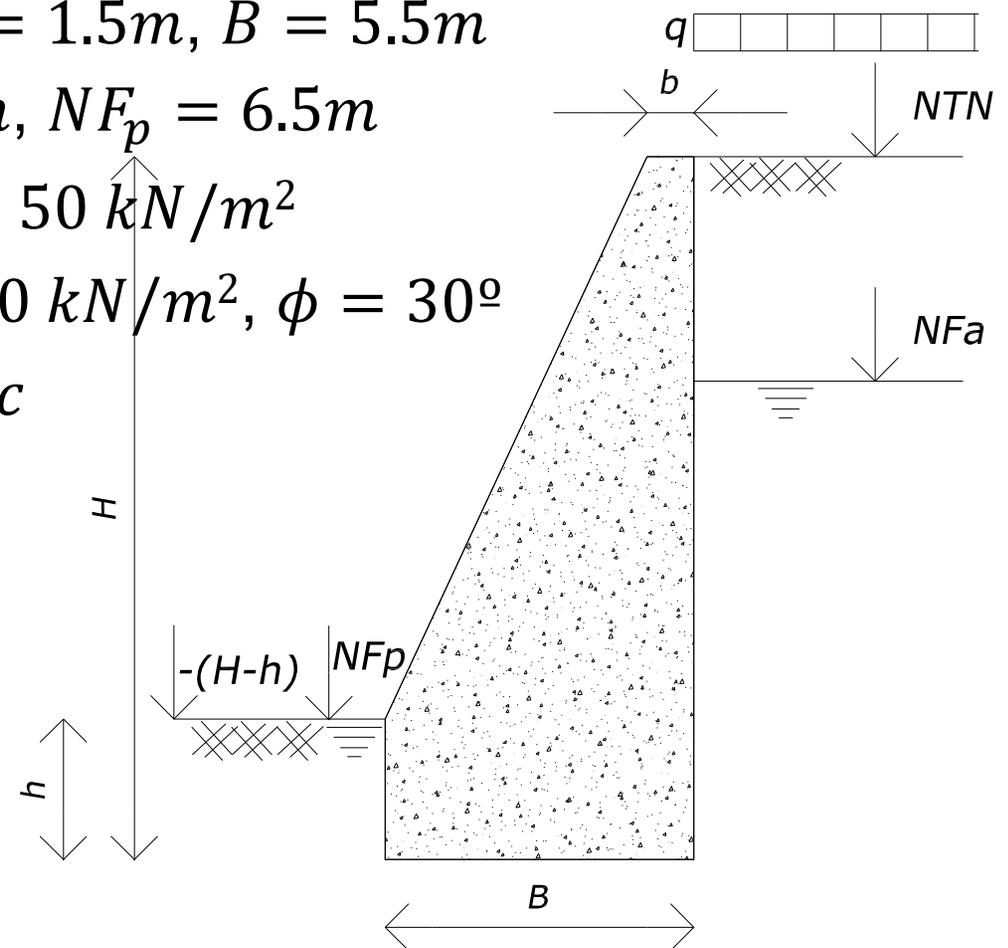
Niveles:  $NTN = 0m$ ,  $NF_a = 3.0m$ ,  $NF_p = 6.5m$

Corto plazo:  $\gamma = 20kN/m^3$ ,  $s_u = 50 kN/m^2$

Largo plazo:  $\gamma = 20kN/m^3$ ,  $c = 0 kN/m^2$ ,  $\phi = 30^\circ$

Muro/suelo:  $\delta = 2/3\phi$ ,  $c_a = 2/3c$

Sobrecarga:  $q = 20kPa$

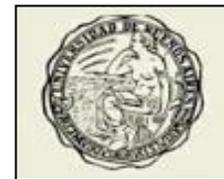


# Índice



- Estados de equilibrio plástico
- Método de Rankine (teorema estático)
- Método de Coulomb (teorema cinemático)
- Método de espiral logarítmica (teorema estático)
- **Diseño de muros rígidos**
- Diseño de tablestacas y muros colados
- Excavaciones

# Modos de falla como cuerpo rígido y medidas de diseño



Siempre

- Reducir las fuerzas desestabilizadoras
- Drenar, drenar, drenar

Falla por vuelco

- Aumentar momento estabilizante

Falla por deslizamiento

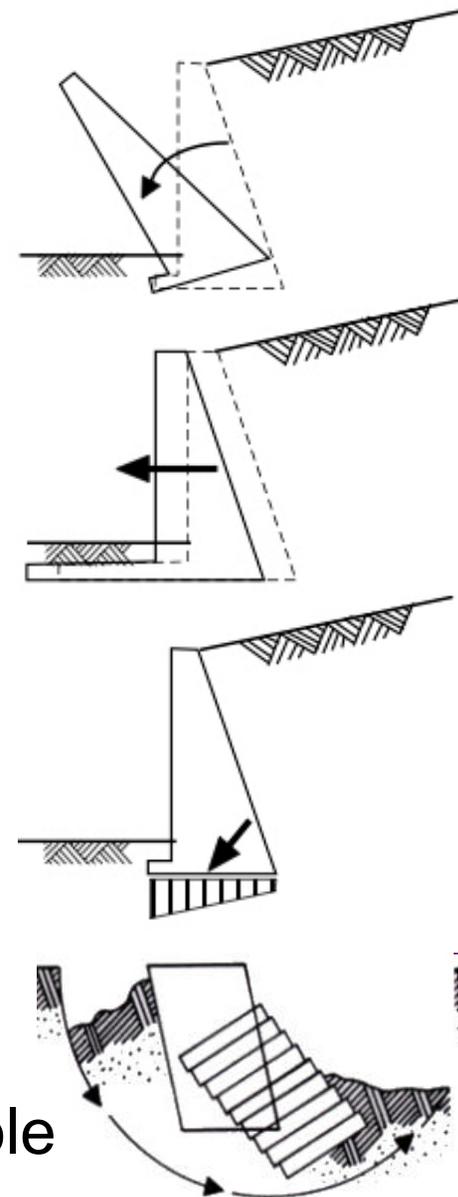
- Enterrar el muro

Falla por capacidad de carga

- Aumentar ancho y profundidad de base

Falla global

- Cambiar pendientes del terreno o solución inviable



# Método del factor de seguridad:

$$C/D \geq FoS$$

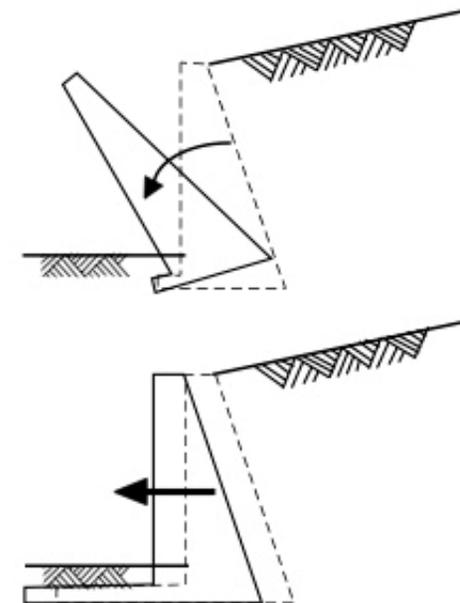
- Volcamiento:  $M_C/M_D \geq FoS_V$
- Deslizamiento:  $H_C/H_D \geq FoS_D$

## Ventajas

- Método muy simple e intuitivo
- Se ha usado por décadas en geotecnia
- Hay consenso en los factores de seguridad de cada problema

## Desventajas

- Produce estructuras con probabilidades de falla muy variables
- Cumplir con el reglamento no implica una estructura segura
- Es decididamente obsoleto y está condenado a morir



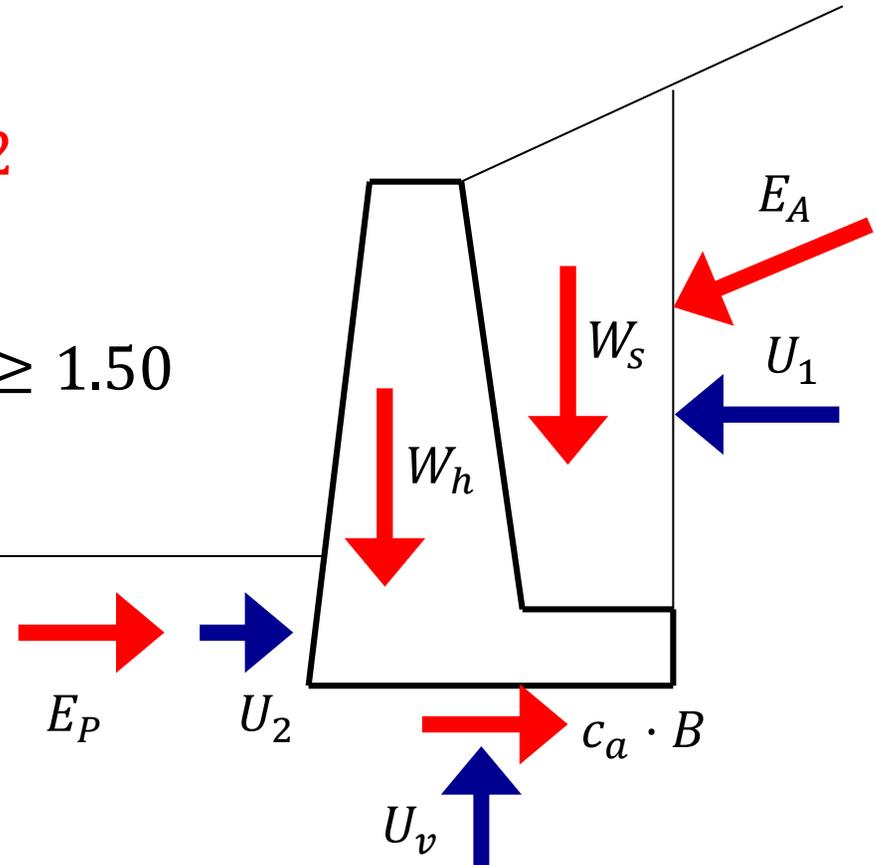
# Verificación al deslizamiento



Se calcula el cociente entre las fuerzas horizontales resistentes y las desestabilizantes

- $\sum A = E_{Ah} + (U_1 - U_2)$
- $\sum R = \sum F_v \tan[\delta] + c_a \cdot B + E_p/2$
- $\sum F_v = W_h + W_s + E_{Av} - U_v$
- Factor de seguridad:  $\frac{\sum R}{\sum A} = FOS \geq 1.50$

Se toma la mitad de  $E_p$  porque  $E_p$  requiere deformaciones mucho mayores que  $F_v$



# ¿Porqué se minorra el empuje pasivo?

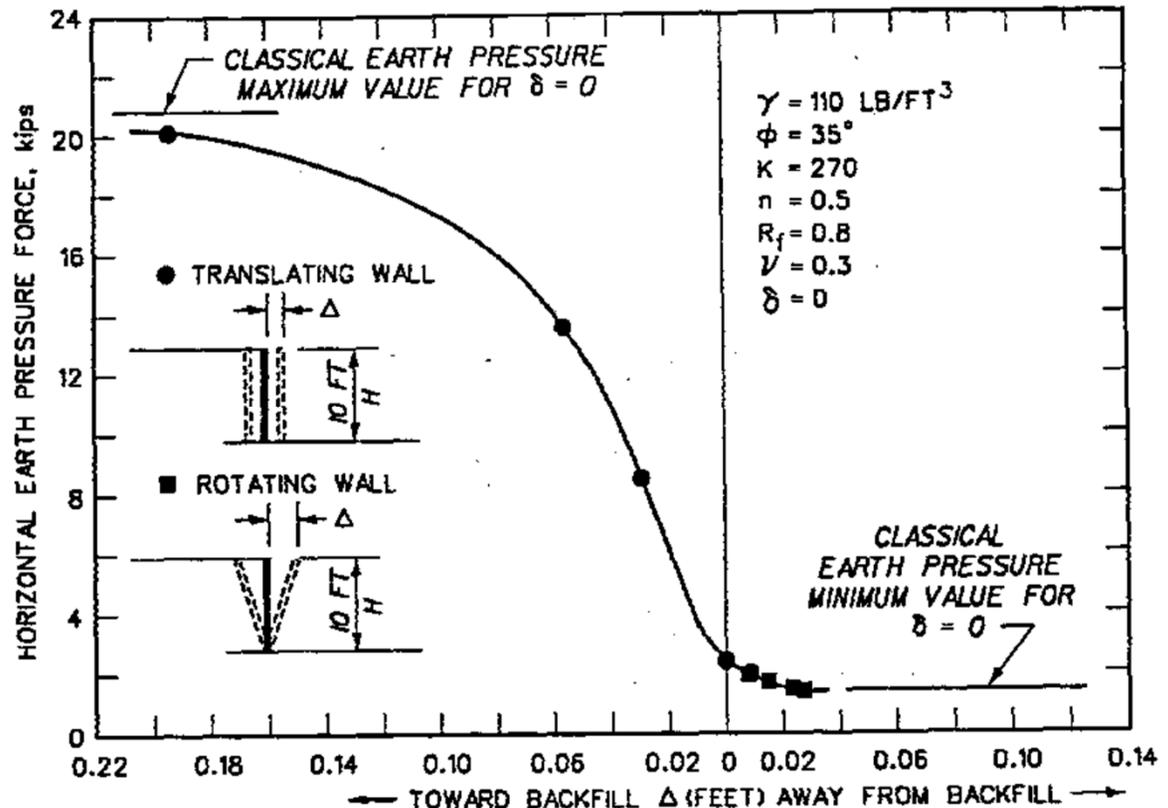
No es por seguridad



La deformación necesaria para que el empuje pasivo alcance su máximo valor es demasiado grande

- Asentamientos en el coronamiento
- Fisuras
- Riesgo de falla progresiva

La minoración de  $E_p$  no se aplica a estructuras de contención flexibles



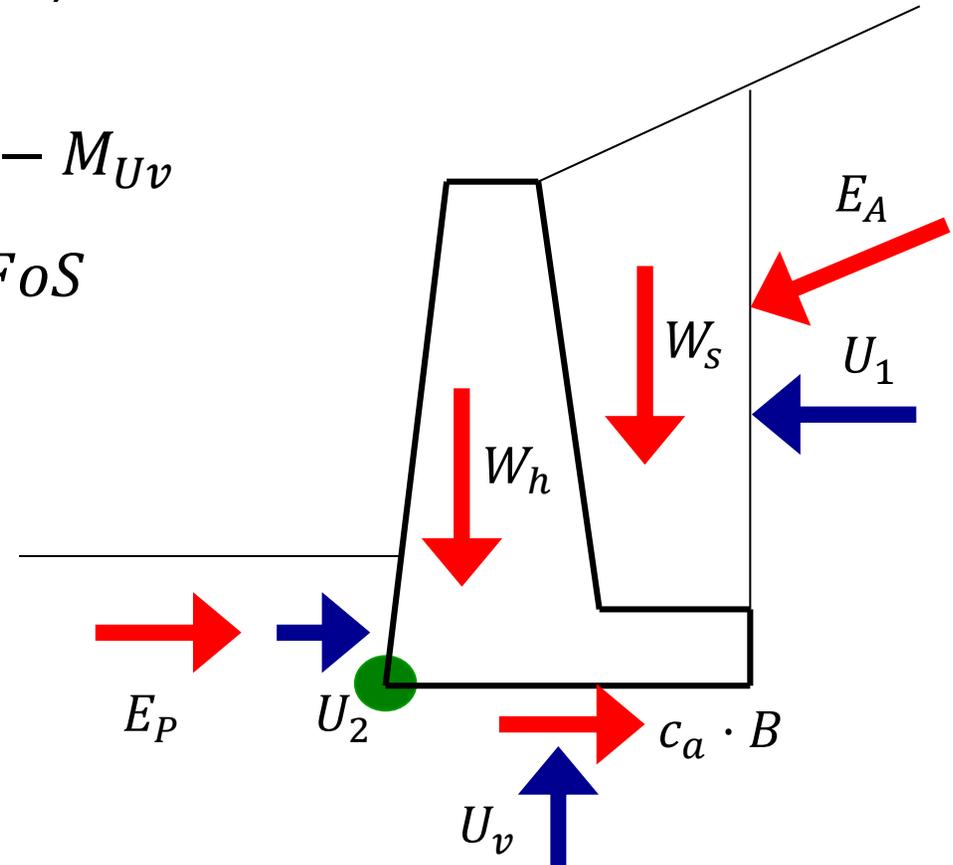
# Verificación al volcamiento



Se calcula el cociente entre los momentos resistentes y los desestabilizantes (respecto al pie)

- $\sum M_A = M_{EA} + M_{U1} - M_{U2}$
- $\sum M_R = M_{W1} + M_{W2} + M_{EP}/2 - M_{Uv}$
- Factor de seguridad:  $\frac{\sum M_R}{\sum M_A} \geq FOS$

- El empuje del agua del lado pasivo resta en  $M_A$
- La subpresión resta en  $M_R$



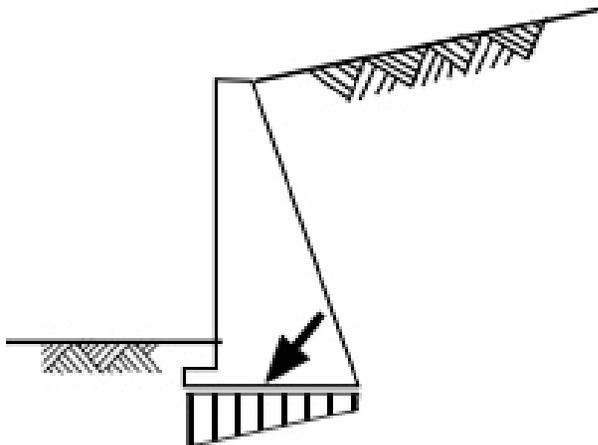


# Verificación de capacidad de carga y global

Las verificaciones de capacidad de carga de la fundación y de estabilidad global se estudian en otros capítulos del curso

## Cálculo de tensiones de contacto

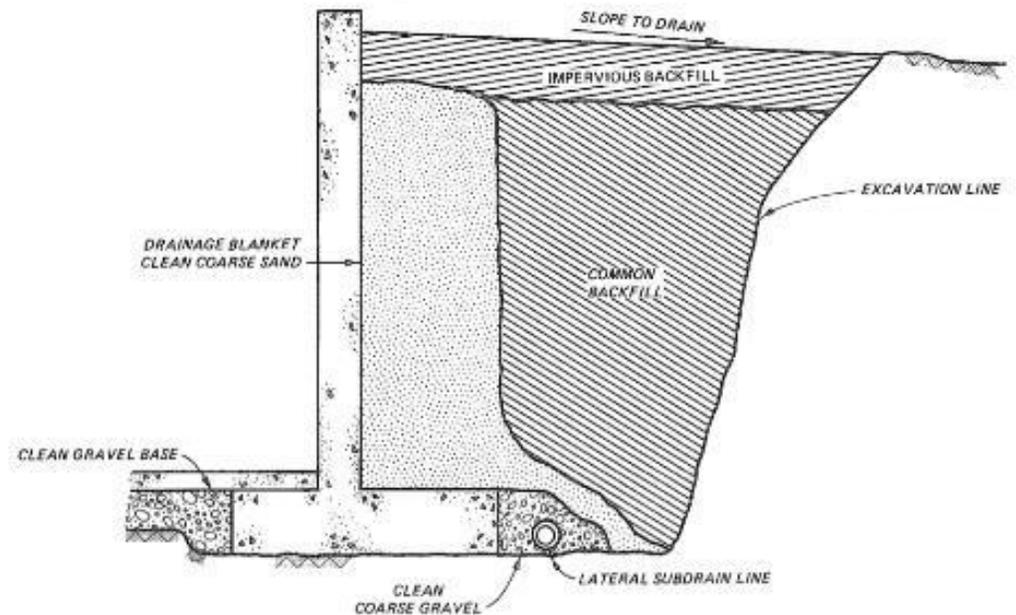
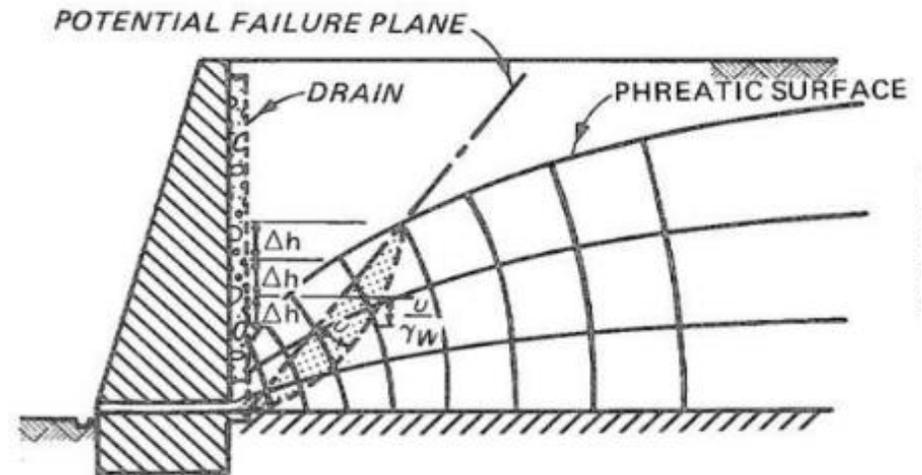
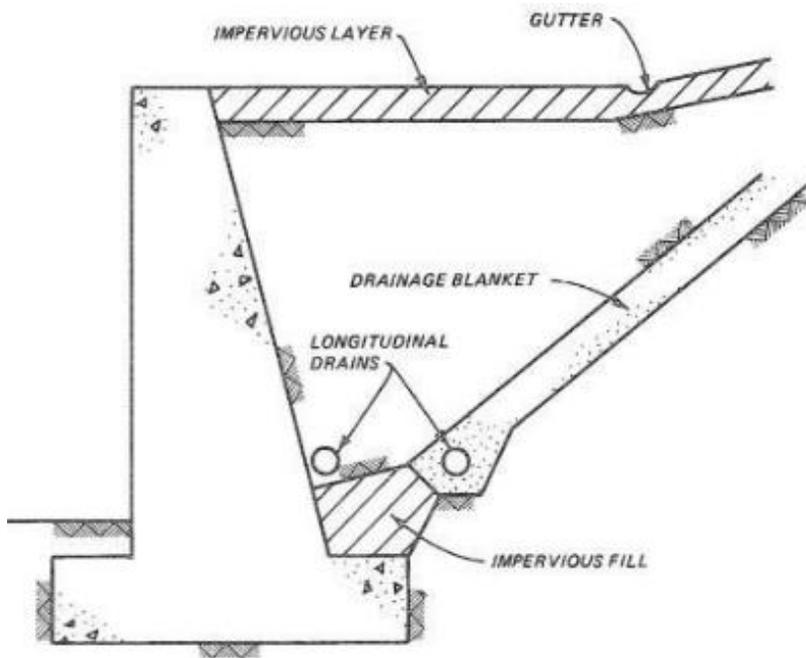
- Base sin despegue:  $\sigma_{max} = \frac{N}{F} + \frac{M}{W}$
- Base con despegue:  $\sigma_{max} = \frac{2N}{3\left(\frac{B}{2} - \frac{M}{N}\right)}$



# Drenajes



Las fuerzas producidas por el flujo de agua es una fuerza efectiva (actúa en la masa de suelo): el drenaje las elimina



# Ejercicio: ¿Cómo fallaron?



# Ejercicio: ¿Cómo fallaron?





# Ejercicio: Calcular estabilidad al volcamiento y deslizamiento

## Dimensiones

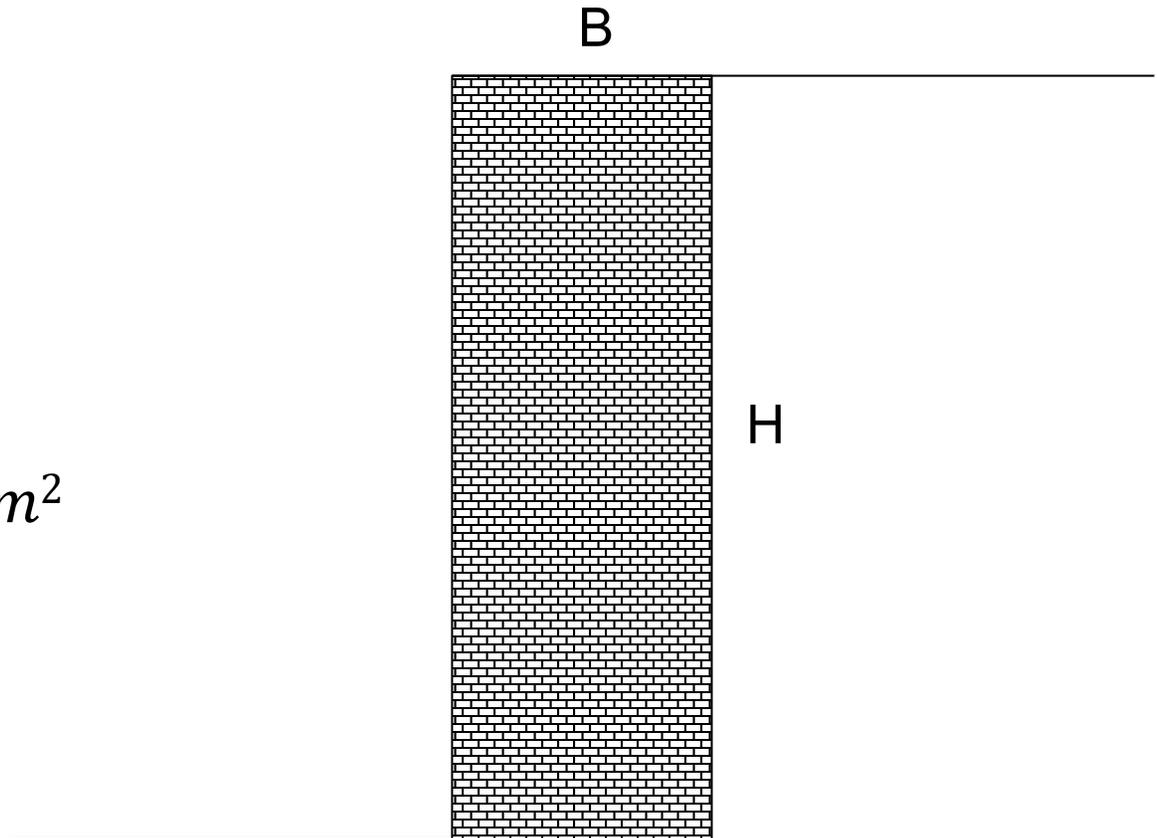
- $H = 5.5m$
- $B = 3.0m$

## Suelo

- $\gamma = 20kN/m^3$
- $c = 0 kN/m^2$  y  $10kN/m^2$
- $\phi = 30^\circ$

## Muro/suelo:

- $\delta = 0^\circ$  y  $10^\circ$



# Índice



- Estados de equilibrio plástico
- Método de Rankine (teorema estático)
- Método de Coulomb (teorema cinemático)
- Método de espiral logarítmica (teorema estático)
- Diseño de muros rígidos
- **Diseño de tablestacas y muros colados**
- Excavaciones

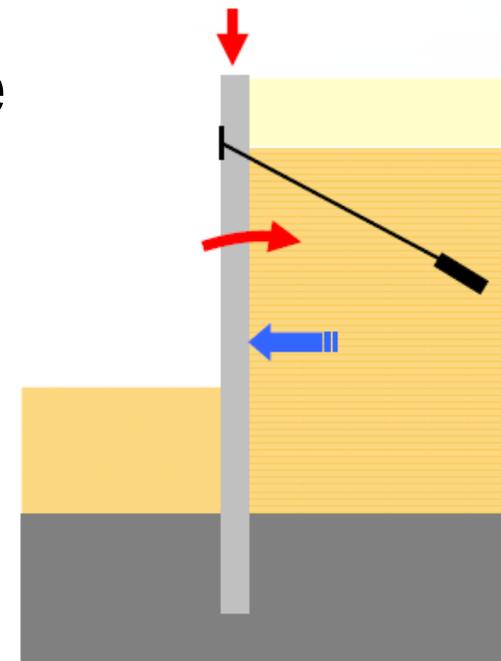
# Funcionamiento de las estructuras de contención flexibles

Las estructuras de contención flexibles son las que no emplean

- Fricción en la base
- Peso propio

Los mecanismos resistentes son

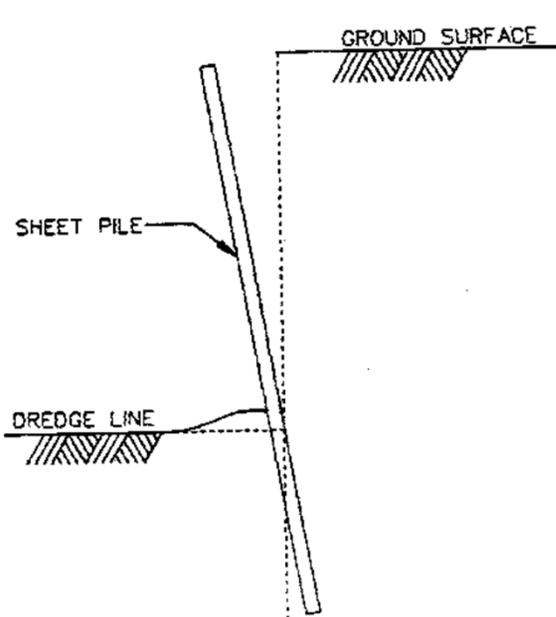
- Empuje pasivo
- Puntales
- Anclajes



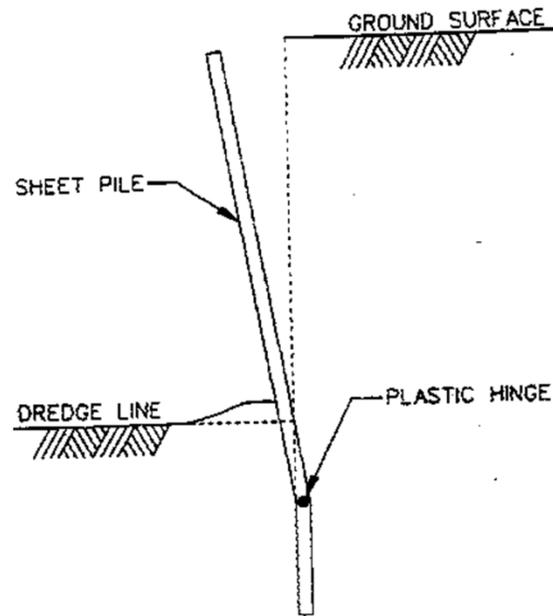
# Tablestacas empotradas



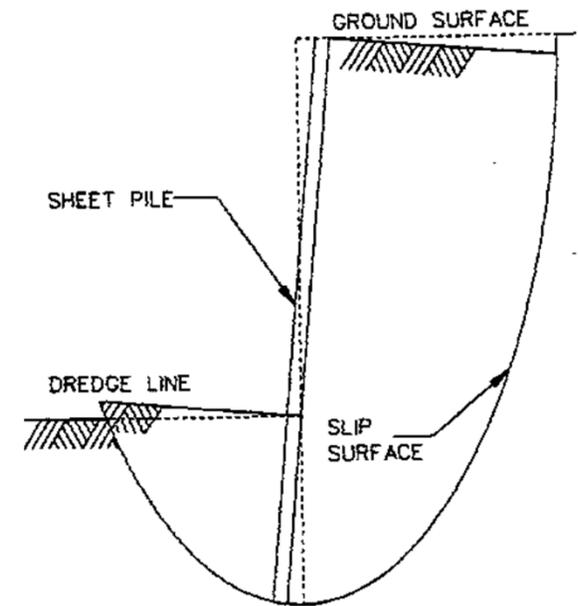
Las tablestacas empotradas sostienen el empuje por acción exclusiva del terreno de fundación



Volcamiento



Falla estructural



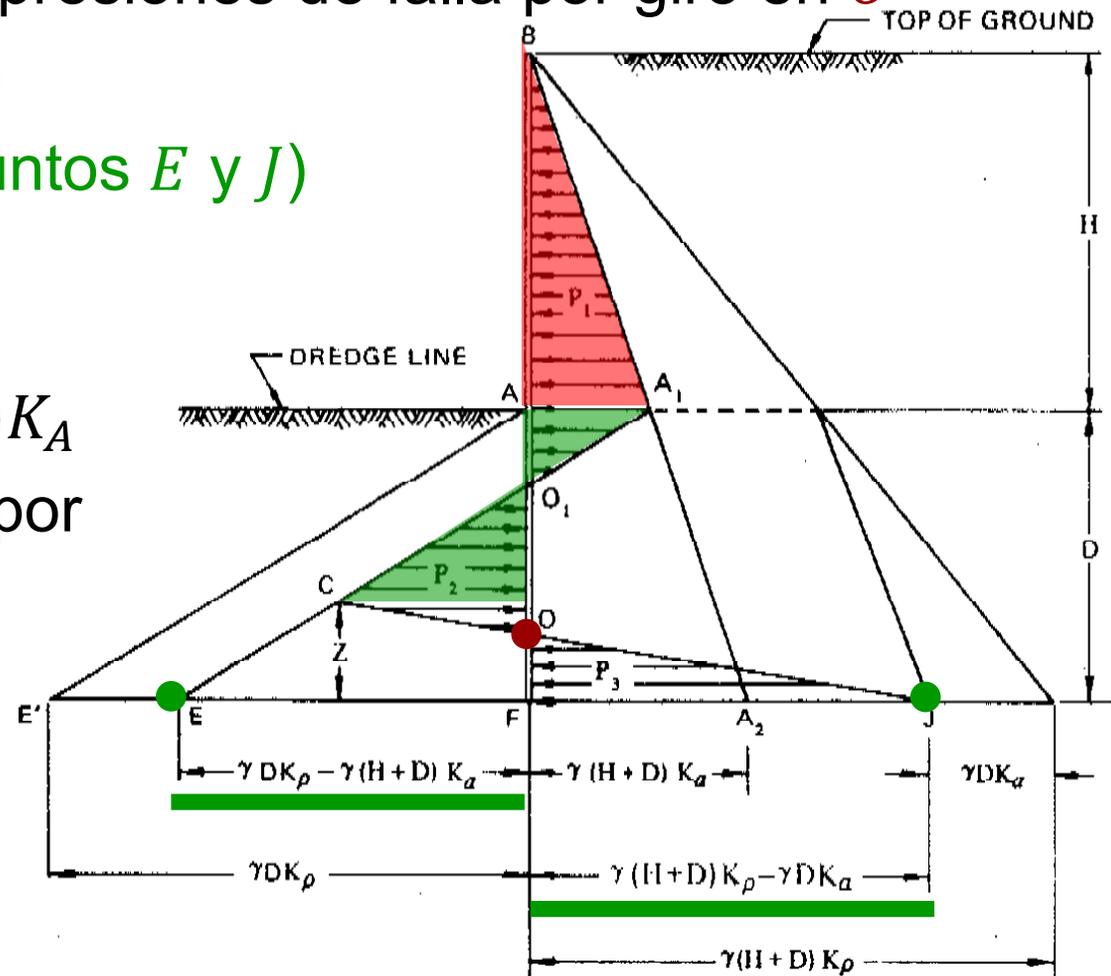
Estabilidad global

# Tablestacas empotradas: determinación de ficha



Se asume la distribución de presiones de falla por giro en  $O$

- **Altura libre: empuje activo**
- **Ficha: presión neta  $P_N$  (puntos  $E$  y  $J$ ) con  $P_p$  reducido por  $FoS$** 
  - $$P_N = P_p / Fos - P_A = (\gamma z K_p) / Fos - \gamma(z + H) K_a$$
- La cota de  $O$  se resuelve por equilibrio de momentos



# Tablestacas empotradas: determinación de ficha



- Método  $FoS$ : el factor de reducción se aplica al empuje pasivo: no se reduce  $(c, \phi)$  ni se mayor  $E_A$

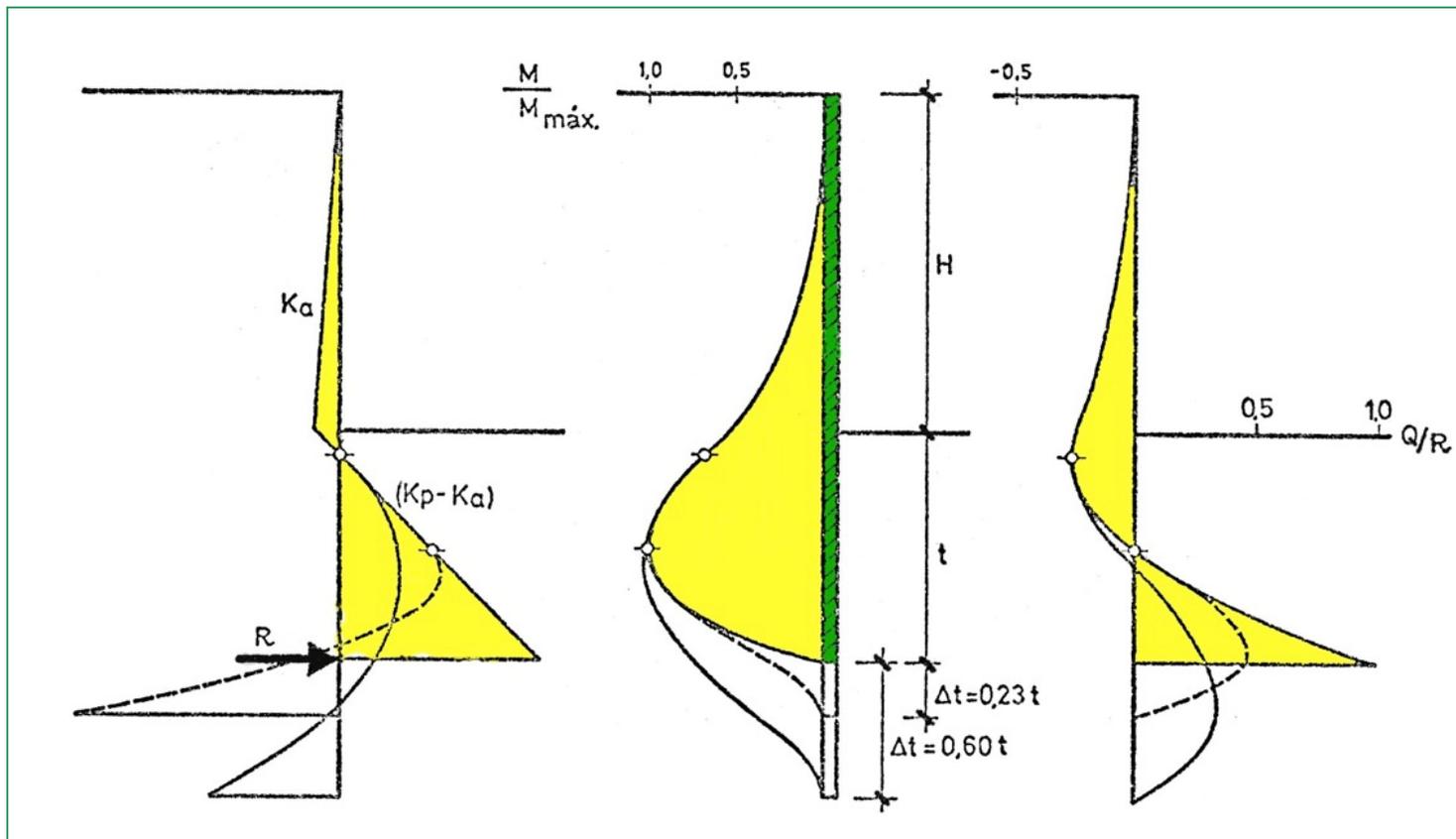
**Table 5-1**  
**Minimum Safety Factors for Determining the Depth of Penetration Applied to the Passive Pressures**

Loading Case	Fine-Grain Soils	Free-Draining Soils
<b>Floodwalls</b>		
Usual	1.50 Q-Case 1.10 S-Case	1.50 S-Case
Unusual	1.25 Q-Case 1.10 S-Case	1.25 S-Case
Extreme	1.10 Q-Case 1.10 S-Case	1.10 S-Case
<b>Retaining Walls</b>		
Usual	2.00 Q-Case 1.50 S-Case	1.50 S-Case
Unusual	1.75 Q-Case 1.25 S-Case	1.25 S-Case
Extreme	1.50 Q-Case 1.10 S-Case	1.10 S-Case

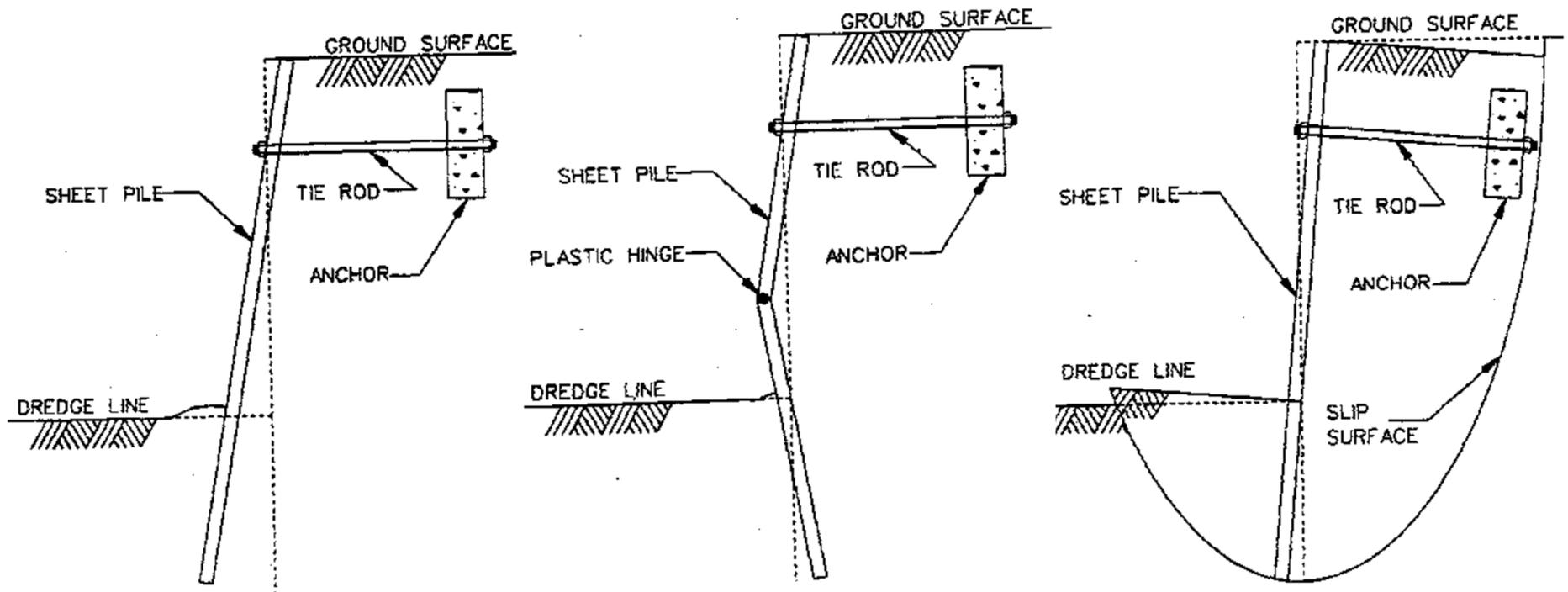


# Tablestacas empotradas: sollicitaciones estructurales

Las sollicitaciones estructurales se calculan con el empuje pasivo sin minorar



# Diseño de tablestacas ancladas y muros colados con tensores



Falla por el pie

Falla estructural

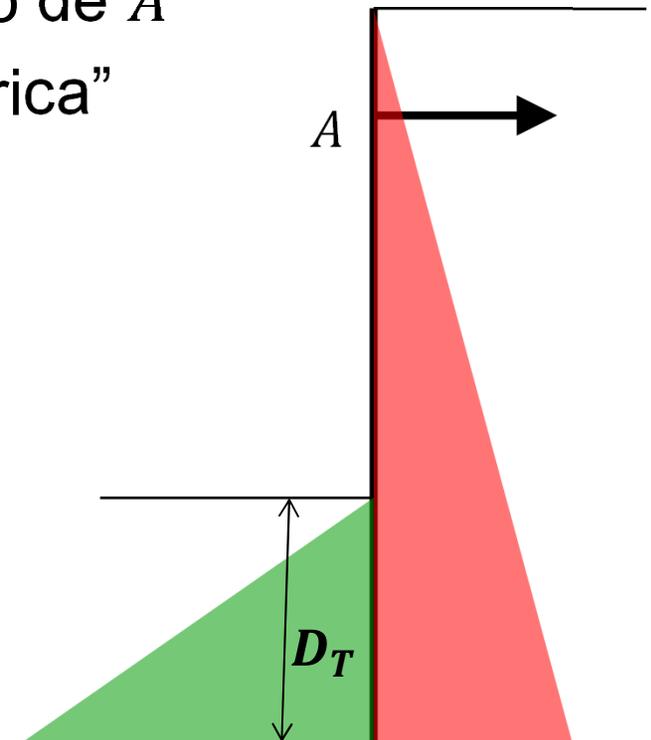
Estabilidad global

# Diseño de tablestacas ancladas y muros colados con tensores



## Pasos de análisis

- Se calcula la suma de momentos respecto de  $A$
- Se determina la profundidad de ficha “teórica”  $D_T$  para que  $M_A = 0$

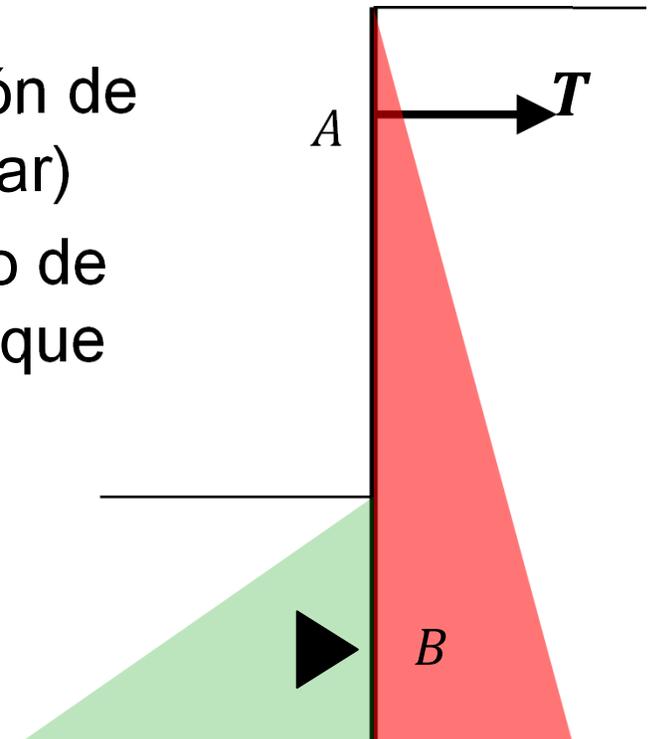


# Diseño de tablestacas ancladas y muros colados con tensores



## Pasos de análisis

- $M_A = 0$  con  $P_P \rightarrow$  Ficha “teórica”  $D_T$
- Se coloca un apoyo “teórico” en  $B$ , posición de la resultante del empuje pasivo (sin minorar)
- Se calcula la suma de momentos respecto de  $B$  (el empuje pasivo da momento nulo porque  $B$  está en su resultante)
- Tiro  $T$  en tensor:  $M_B = 0 \rightarrow T$

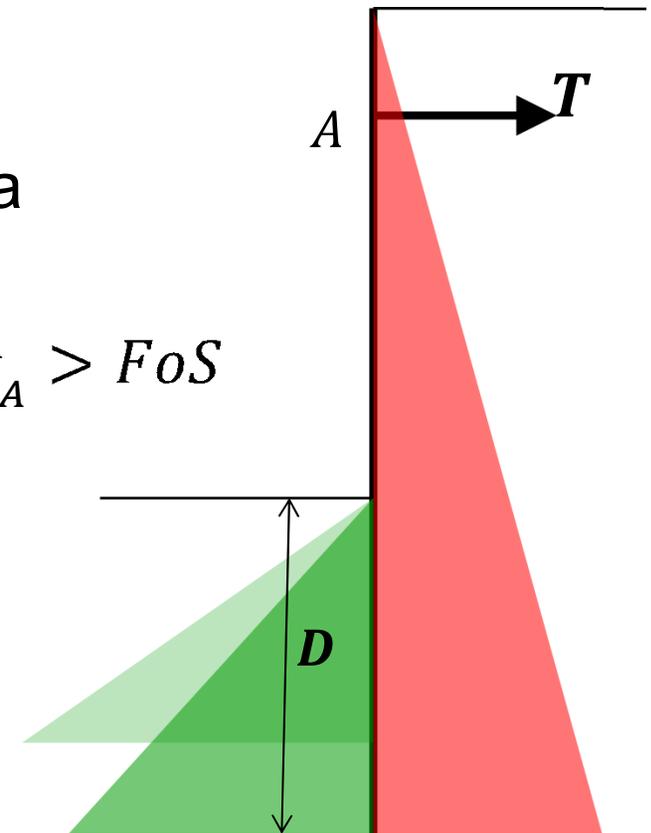


# Diseño de tablestacas ancladas y muros colados con tensores



## Pasos de análisis

- $M_A = 0$  con  $P_P \rightarrow$  Ficha “teórica”  $D_T$
- $M_B = 0 \rightarrow T \rightarrow$  Tiro  $T$  en tensor
- Se repite el proceso pero con un diagrama de presiones pasivas reducido
  - Factor de seguridad:  $D$  tal que  $M_{E_P}^A / M_{E_A}^A > FoS$



# Diseño de tablestacas ancladas y muros colados con tensores

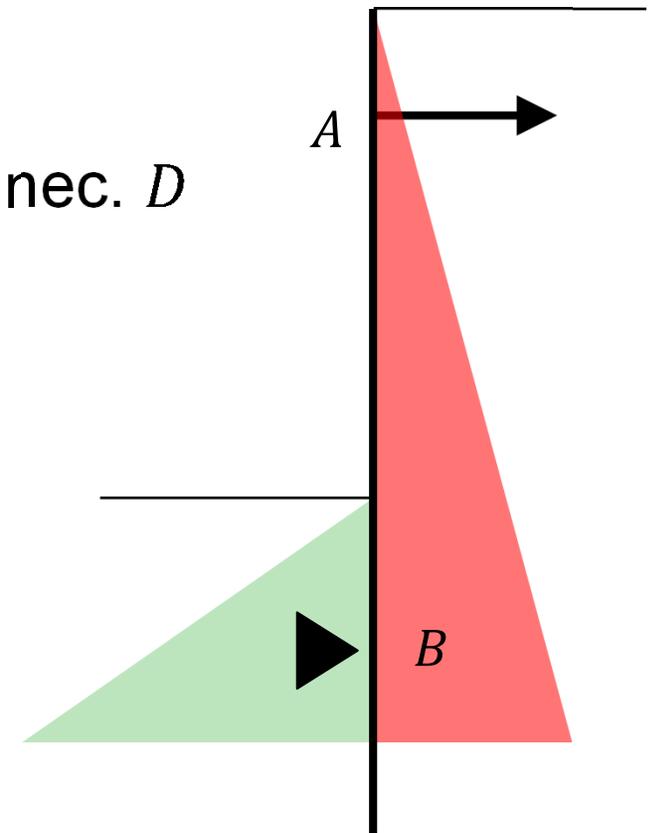


## Pasos de análisis

- $M_A = 0$  con  $P_P \rightarrow$  Ficha “teórica”  $D_T$
- $M_B = 0 \rightarrow T \rightarrow$  Tiro  $T$  en tensor
- $M_A = 0$  con criterio de seguridad  $\rightarrow$  Ficha nec.  $D$

## Solicitaciones estructurales

- Se calculan con la viga apoyada
- Se reducen los momentos por flexibilidad:  $M_d = M_{\max} \cdot R_M$
- Se aumenta 30% el tiro en el tensor

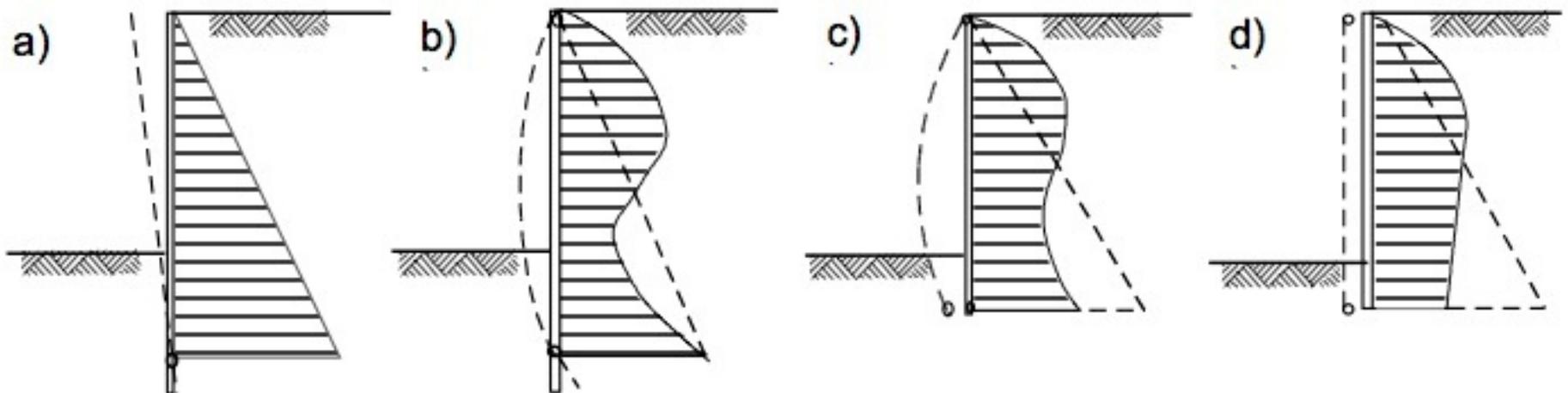




# ¿Porqué se reduce el momento y se aumenta el tiro en el tensor?

La distribución de presiones depende del procedimiento constructivo y de los puntos rígidos

- a: Rota: teorías de empuje
- b: Tiene cabeza y pie fijos: empuje en zonas rígidas
- c: Rota por su cabeza: empuje mas arriba
- d: Se traslada: empuje prácticamente rectangular

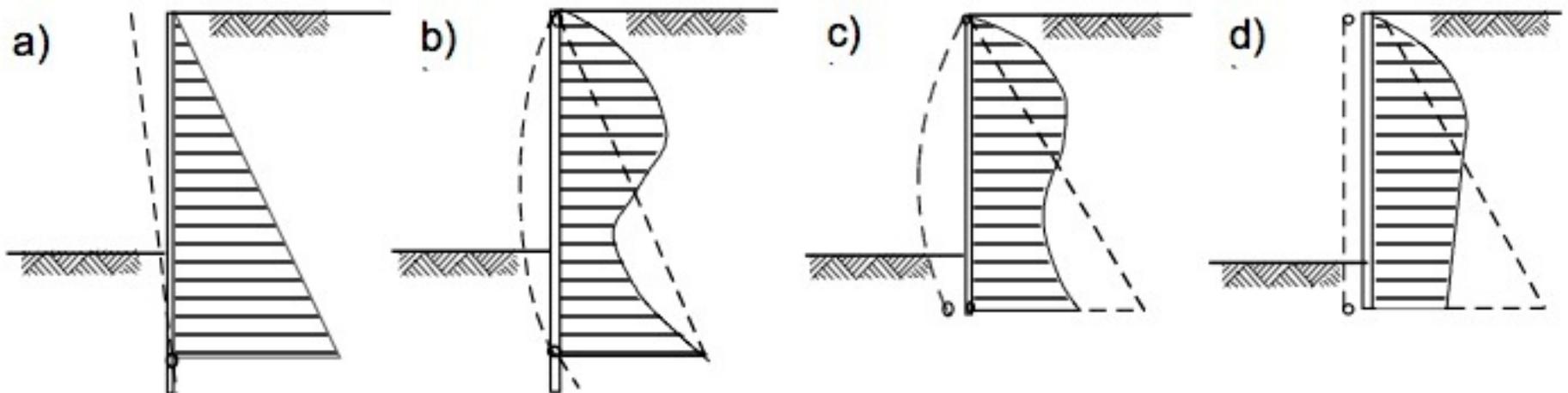




# ¿Porqué se reduce el momento y se aumenta el tiro en el tensor?

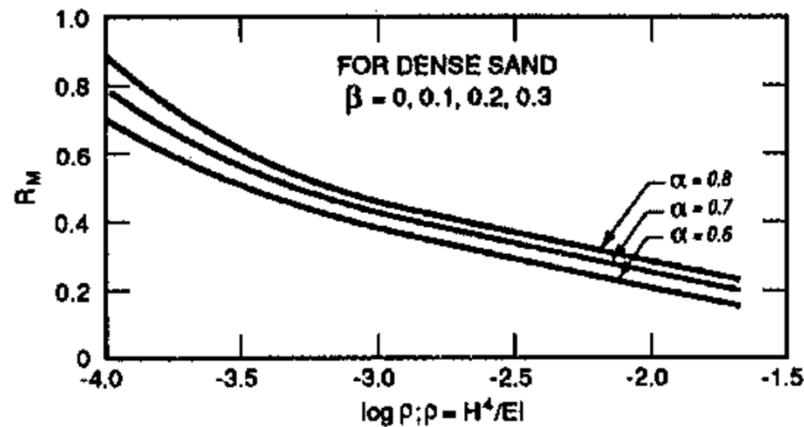
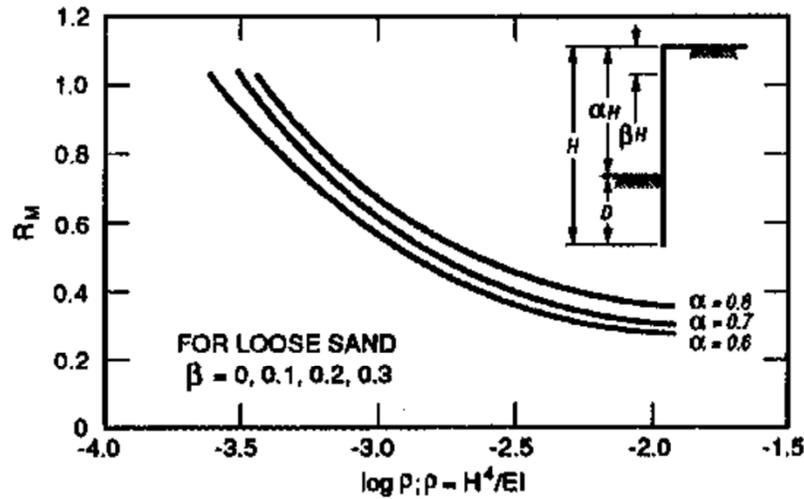
La distribución de presiones depende del procedimiento constructivo y de los puntos rígidos

Aunque la resultante del diagrama es siempre la misma, hay menor carga en el tramo y mayor carga en los apoyos

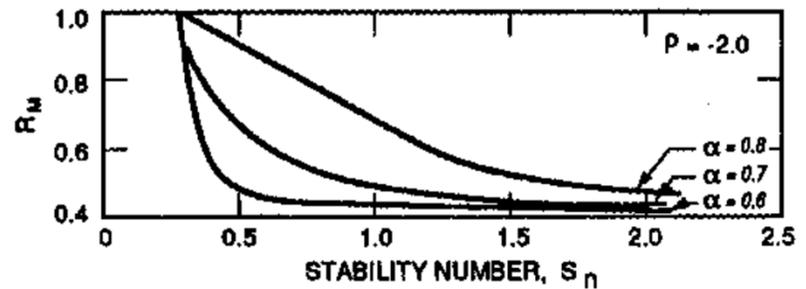
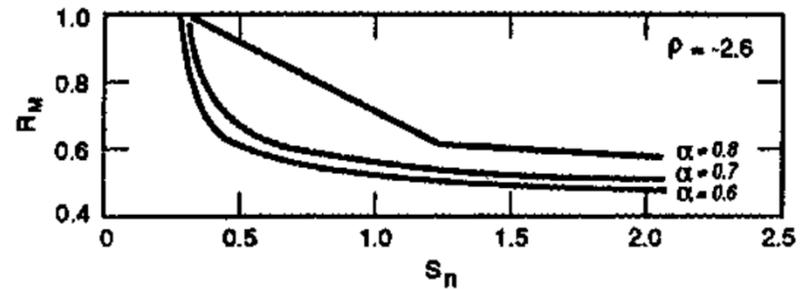
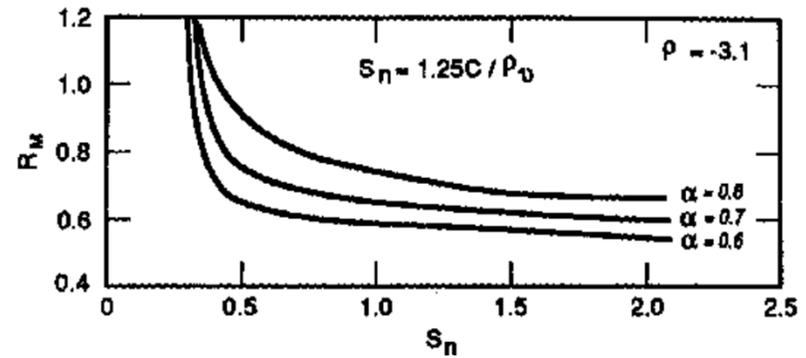




# Reducción de momentos por flexibilidad de tablestacado



a. Sand



b. Clay

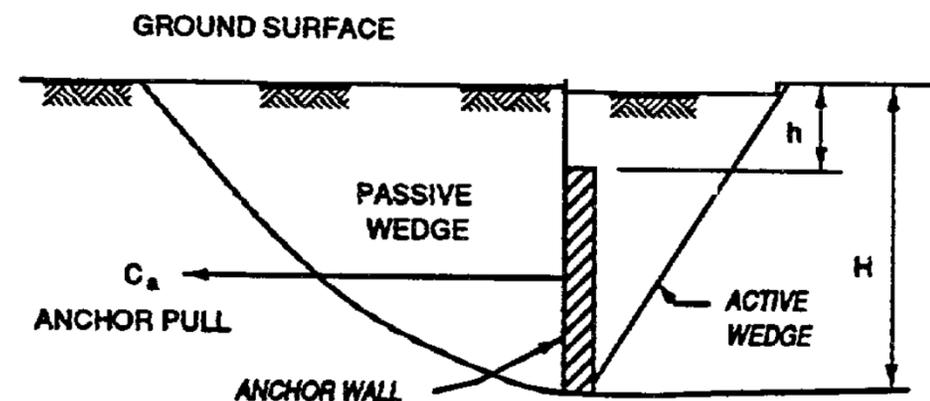
# Diseño de la placa de anclaje



La placa de anclaje es un elemento que resiste el tiro del tensor

- La forma de falla involucra todo el suelo desde la base de la placa y hasta la superficie del terreno
- El tiro teórico debe mayorarse un 30% por efecto de la redistribución de empujes

- Factor de seguridad:  $\frac{E_P - E_A}{1.3 \cdot T_{teo}} \geq FOS$

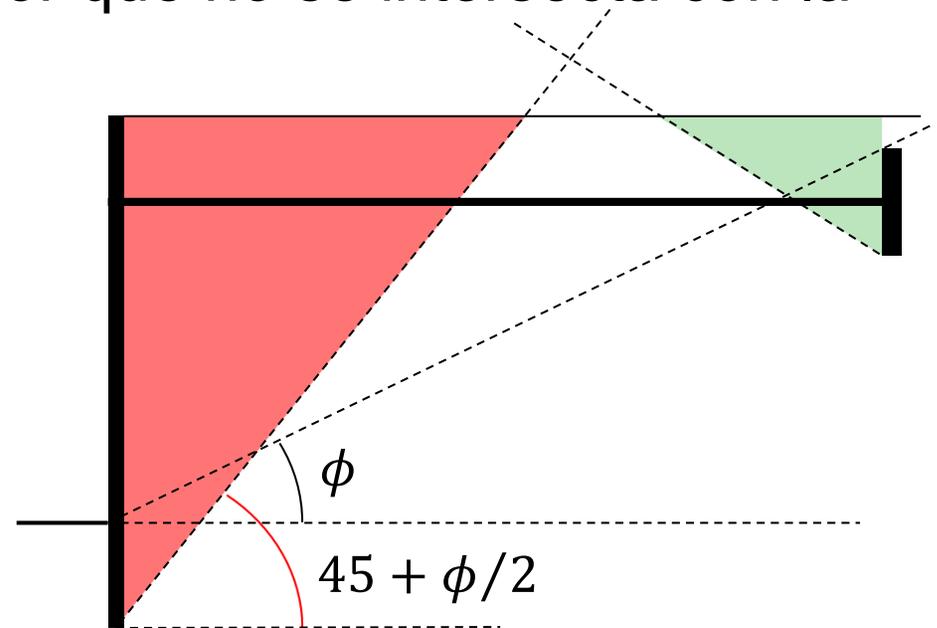


# Diseño de la placa de anclaje



Para aprovechar al máximo la resistencia de la placa de anclaje, su posición debe cumplir con

- Estar por debajo del talud natural (línea  $\phi$ )
- Tener una cuña **pasiva** posterior que no se intersecta con la cuña **activa** del frente



# Índice

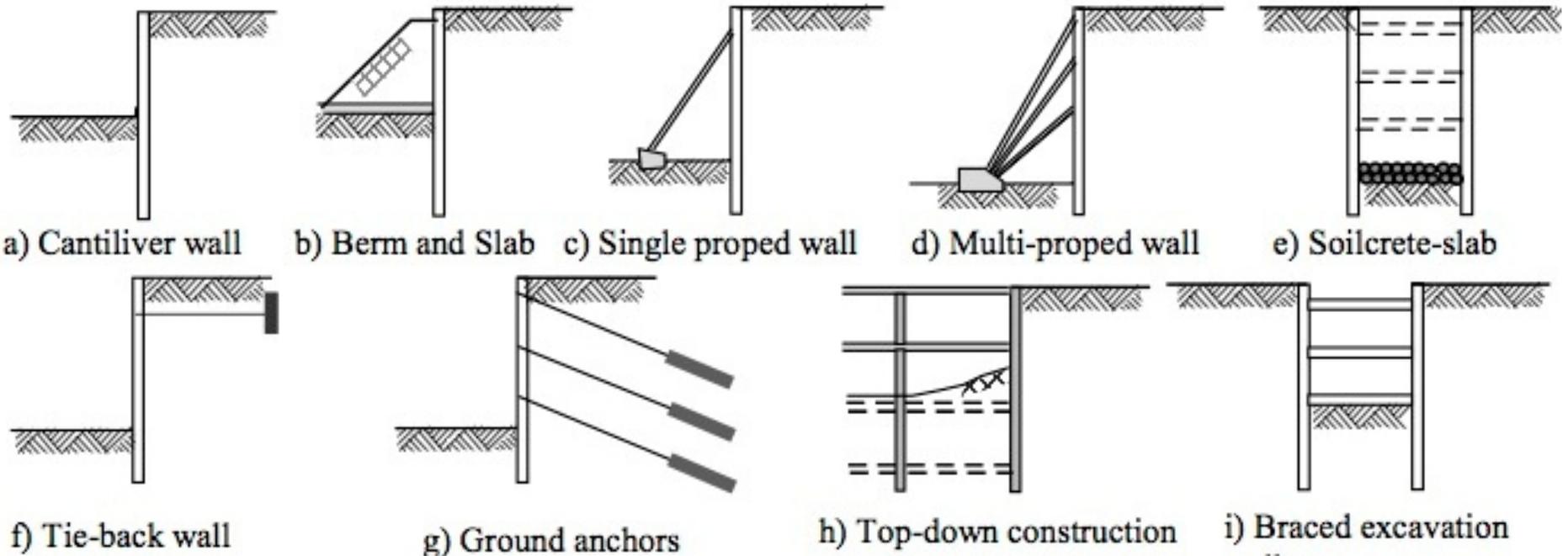


- Estados de equilibrio plástico
- Método de Rankine (teorema estático)
- Método de Coulomb (teorema cinemático)
- Método de espiral logarítmica (teorema estático)
- Diseño de muros rígidos
- Diseño de tablestacas y muros colados
- **Excavaciones**

# Definición conceptual de una excavación



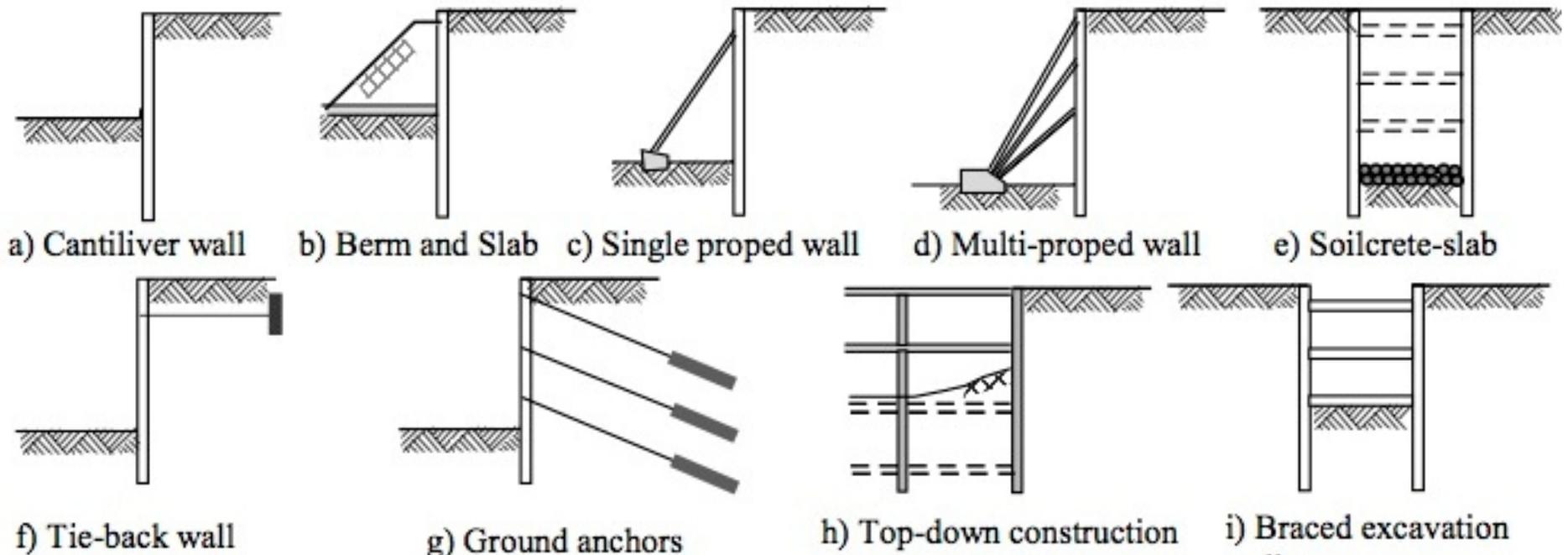
Cuando se dibujan excavaciones, siempre se dibujan sus estructuras de sostenimiento, aunque la estructura de contención (sólo) ayuda a que el terreno se sostenga a si mismo



# Sistemas de contención de excavaciones



- Ejecutados antes de la excavación: suelos poco competentes
  - Tablestacas, pantallas de pilotes
- Ejecutados durante la excavación: suelos competentes
  - Anclajes





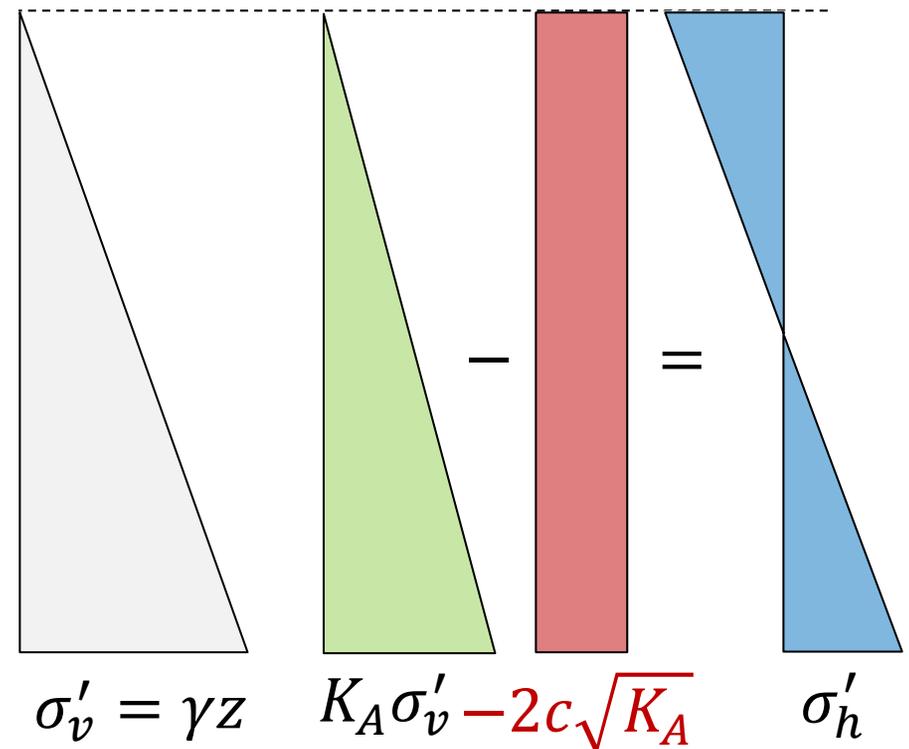
# Altura máxima de excavación sin sostenimiento

La altura crítica de una excavación sin sostenimiento (y sin cargas en superficie) queda determinada por  $E = 0$

$$H_c = \frac{4c}{\gamma} \tan \left[ 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right]$$

Si el terreno está fisurado se define altura “máxima”

$$H_{max} = \frac{8c}{3\gamma} \tan \left[ 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right]$$

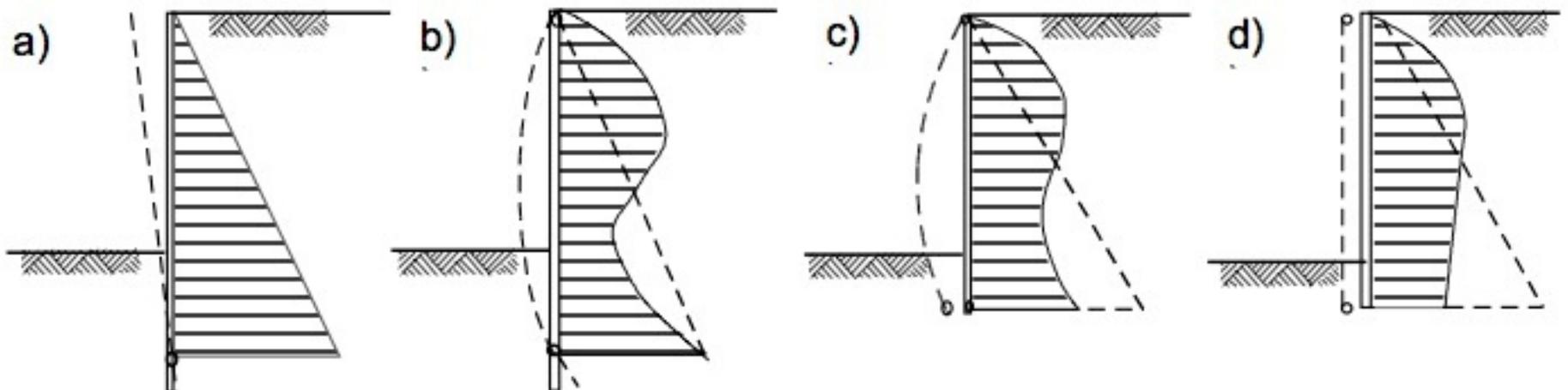


# ¿Qué es un diagrama de empuje?



Solución simplificada del problema de interacción suelo-estructura

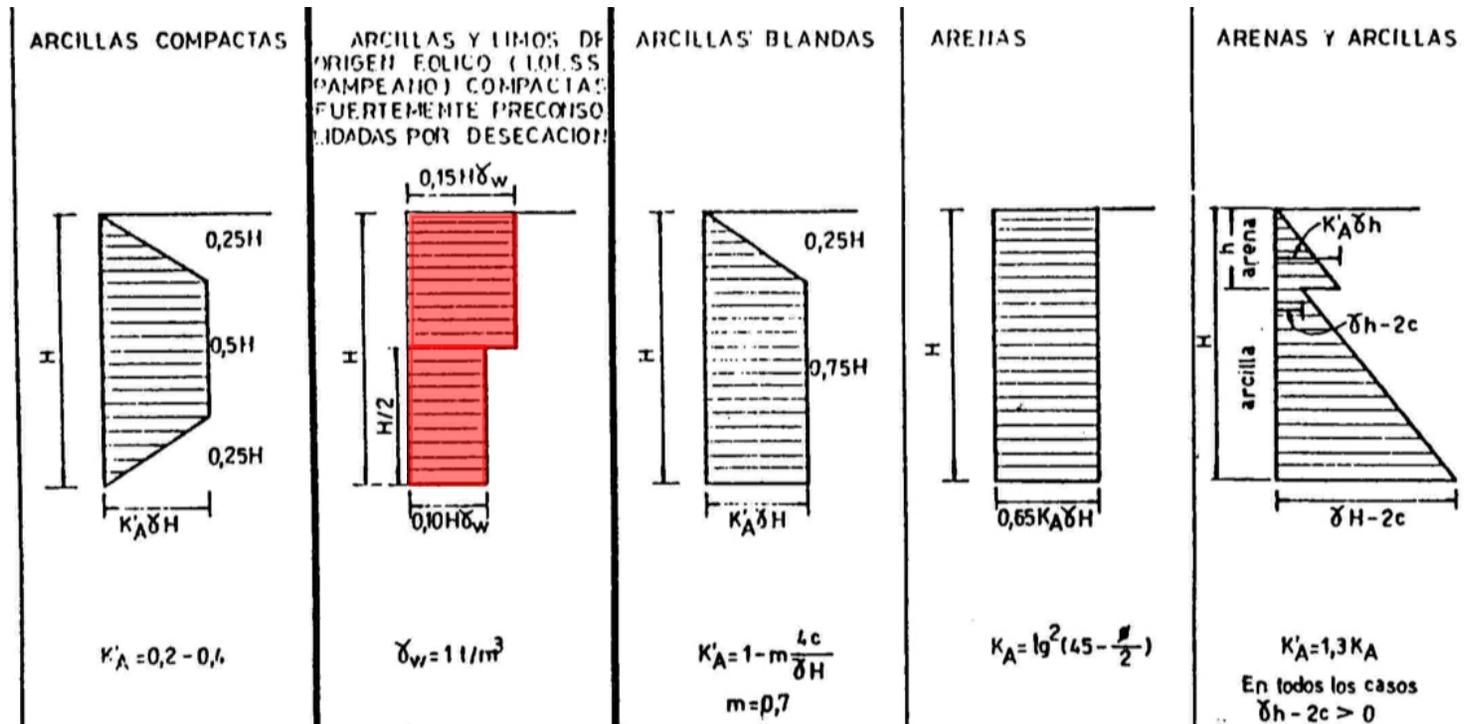
- Depende del procedimiento constructivo y de los puntos rígidos
  - a: Rota: teorías de empuje
  - b: Tiene cabeza y pie fijos: empuje en zonas rígidas
  - c: Rota por su base: empuje mas arriba
  - d: Se traslada: empuje prácticamente rectangular



# Diagramas de empuje del Código de la Edificación: empujes mínimos



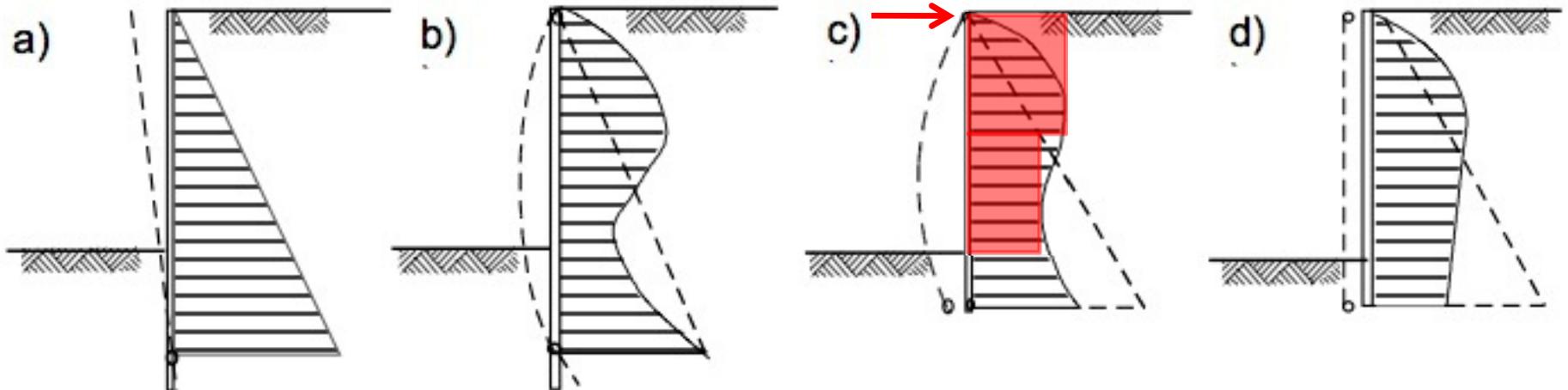
Los diagramas reglamentarios son empujes mínimos que hay que usar en el diseño





# Los diagramas reglamentarios no eximen del cálculo de empujes

- Se **debe calcular el empuje** en función del procedimiento constructivo
- Se compara con el empuje mínimo reglamentario
- Se diseña con el mayor de ambos
- Los diagramas reglamentarios ¡no se mezclan!



# Bibliografía



## Básica

- USACE. Retaining and flood walls.
- Jiménez Salas. Geotecnia y Cimientos. Ed. Rueda.

## Complementaria

- Terzaghi, Peck, Mesri. Soil Mechanics in Engineering Practice. Wiley.
- Bowles. Foundation analysis and design. McGraw-Hill.