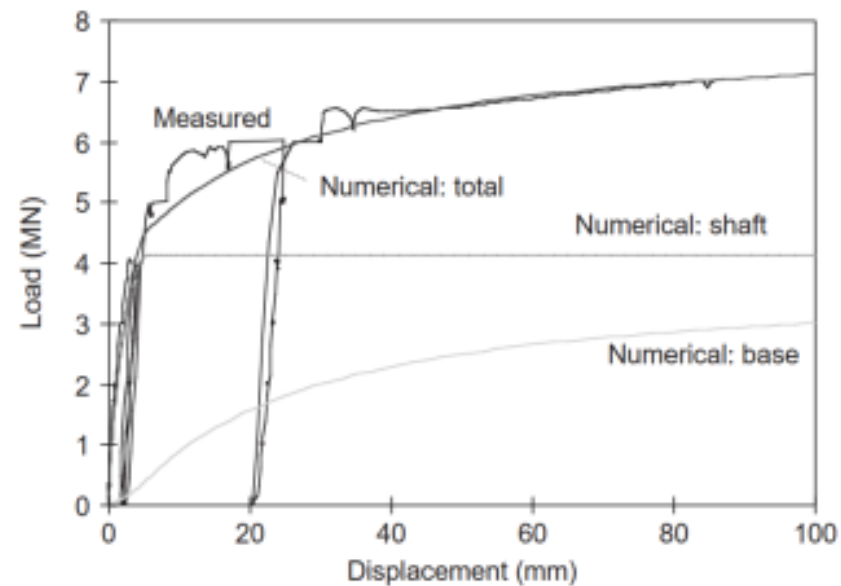
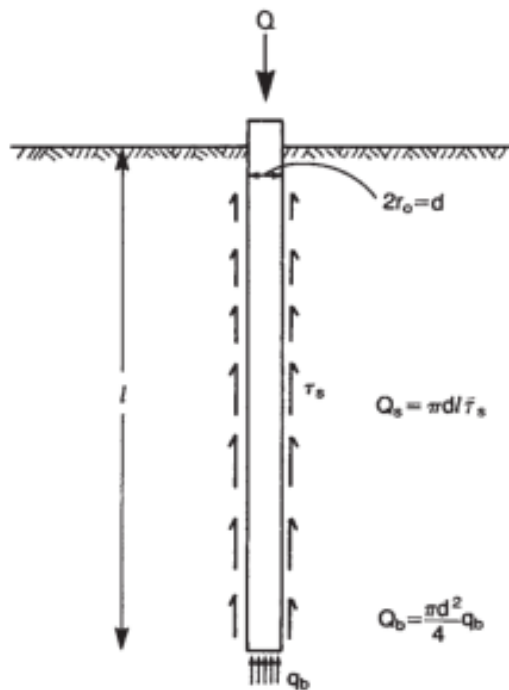


# Fundaciones profundas

## Estados límites últimos



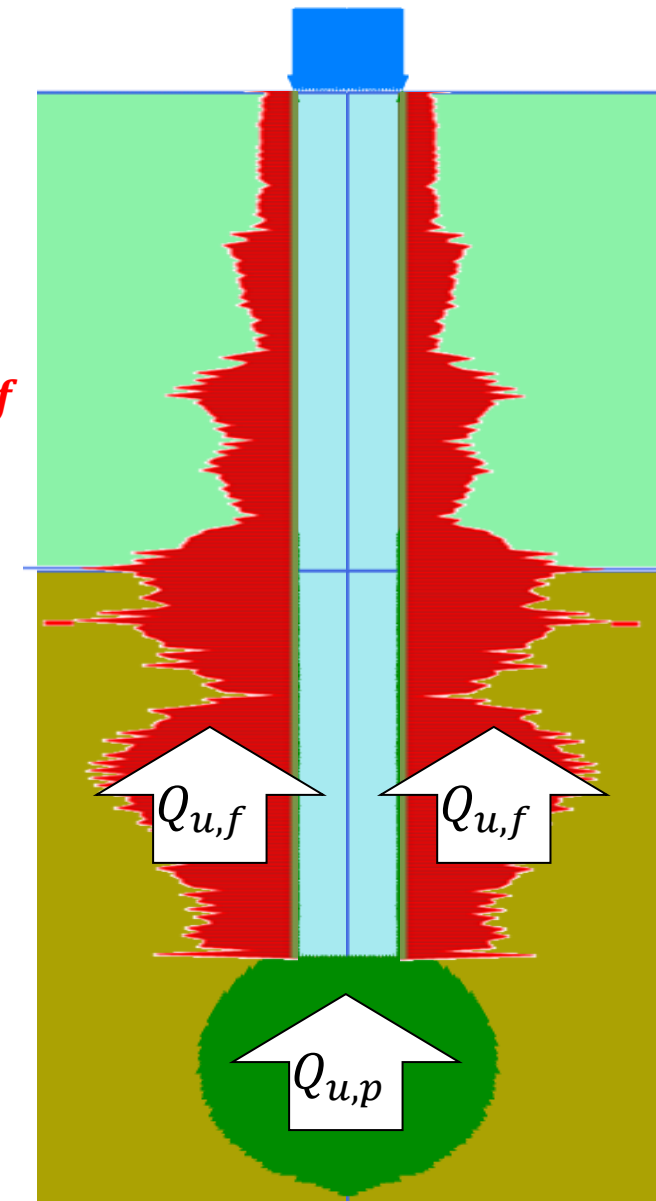
Interacción Terreno Estructura I  
Especialización en Ingeniería Geotécnica

# Carga última de un pilote

(Conceptualmente) la carga última es la suma de la carga última por la punta  $Q_{u,p}$  mas la carga última por fricción del fuste  $Q_{u,f}$

$$Q_{ult} = Q_{u,p} + Q_{u,f}$$

La contribución de cada término depende de la estratigrafía y de método constructivo



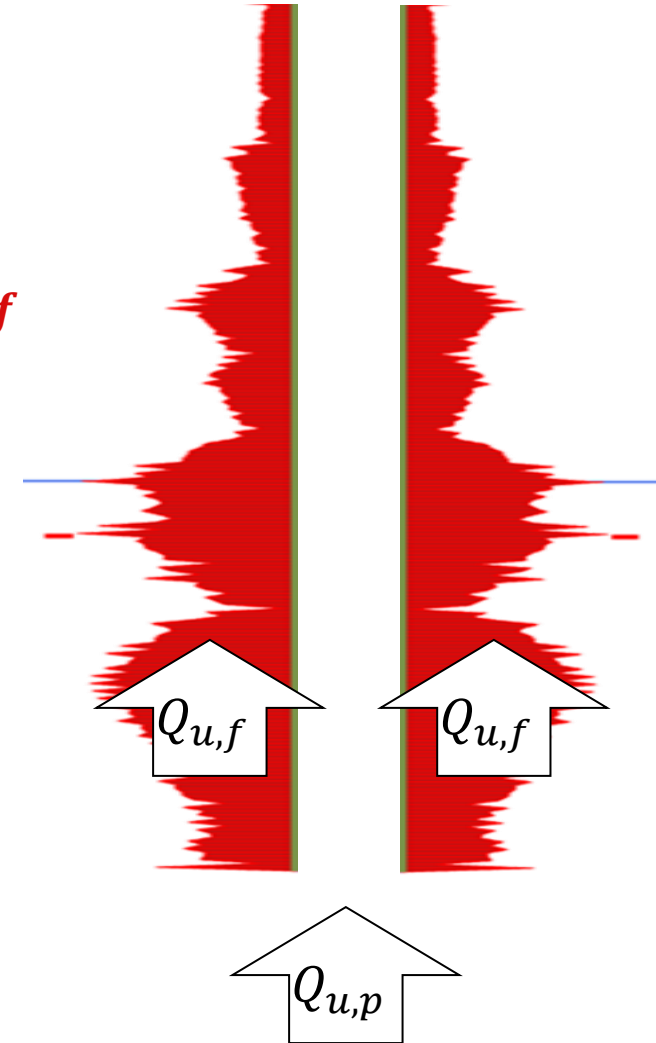
# Carga última de un pilote

(Conceptualmente) la carga última es la suma de la carga última por la punta  $Q_{u,p}$  mas la carga última por fricción del fuste  $Q_{u,f}$

$$Q_{ult} = Q_{u,p} + Q_{u,f}$$

¿Porqué “conceptualmente”?

- Porque la carga última sólo se desarrolla para deformaciones enormes que no son útiles en construcciones civiles



# Métodos para determinar la capacidad de carga

## Fórmulas estáticas

- Métodos directos (formulas analíticas y/o modelos numéricos)
- Métodos indirectos (correlaciones y formulas empíricas)

## Fórmulas dinámicas (Hincados)

- Fórmulas de hincado
- Ecuación de onda

## Ensayos de carga



# Carga última por la punta $Q_{u,p}$

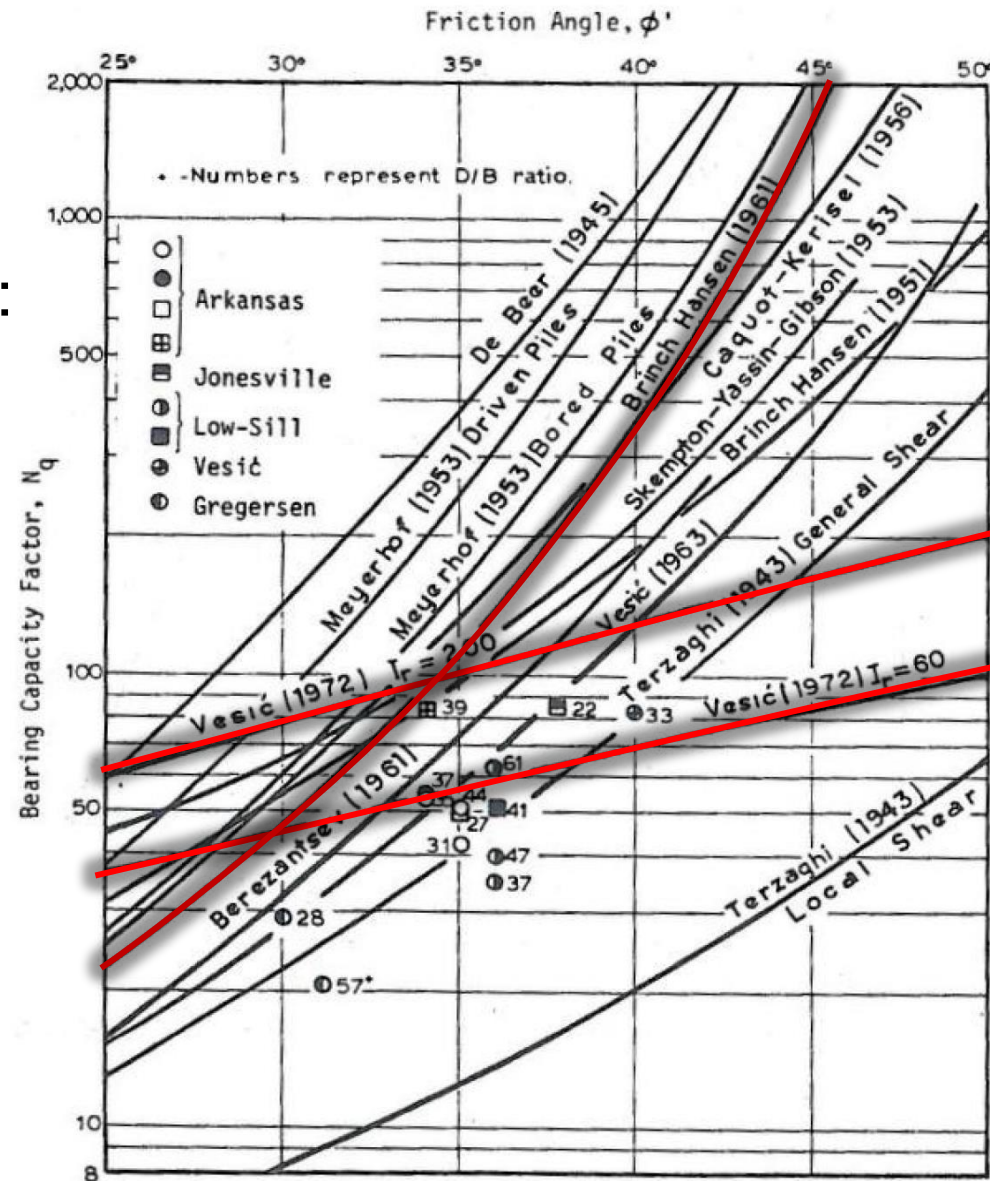
Hay dos mecanismos posibles

- **Mecanismo 1** (rígido-plástico): fórmula trinómica
- **Mecanismo 2** (elastoplástico): expansión de cavidad esférica

La carga última por la punta es la menor de ambas

$$Q_{u,p} = \min \left[ Q_{u,p}^{(1)}, Q_{u,p}^{(2)} \right]$$

- ¿Deformación enorme?



# Capacidad de carga por punta

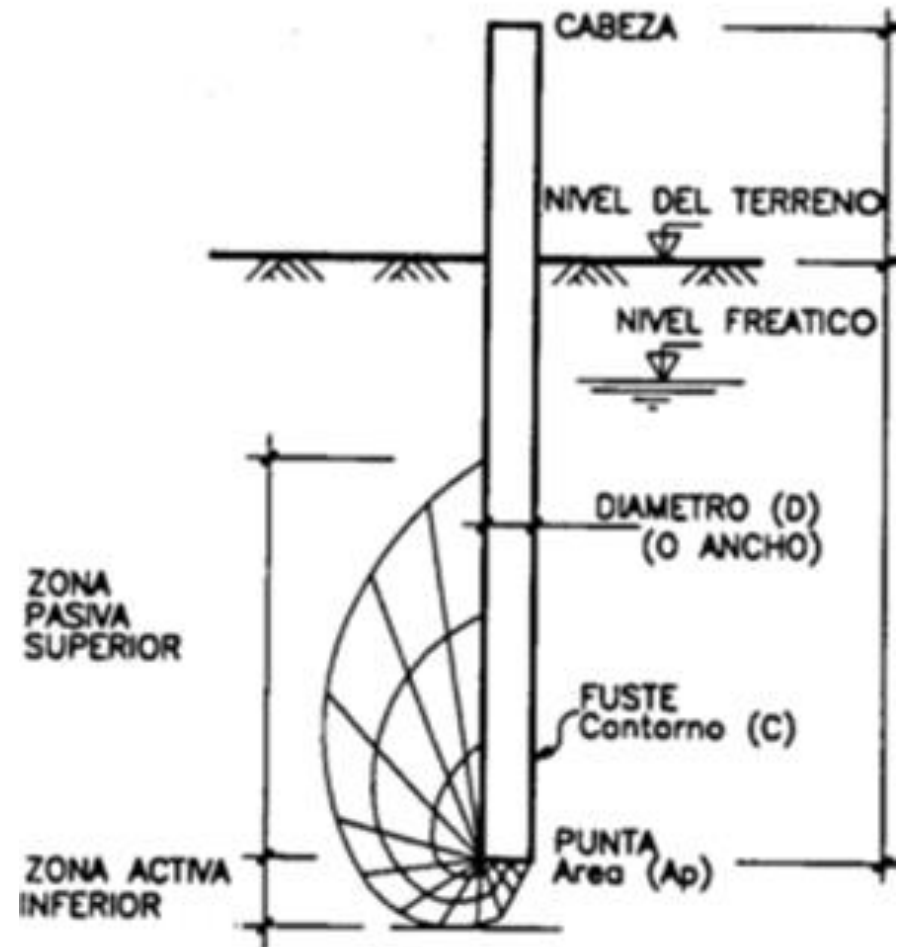
## Modelo rígido-plástico

La capacidad de carga por la punta depende de

- Ficha
- Parámetros resistentes del terreno
- Tapada y napa

$$q_u = (c N_c + \sigma'_v N_q) \cdot s_c d_c$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi$$





# Capacidad de carga por pu $N_q^*$

## Modelo rígido-plástico

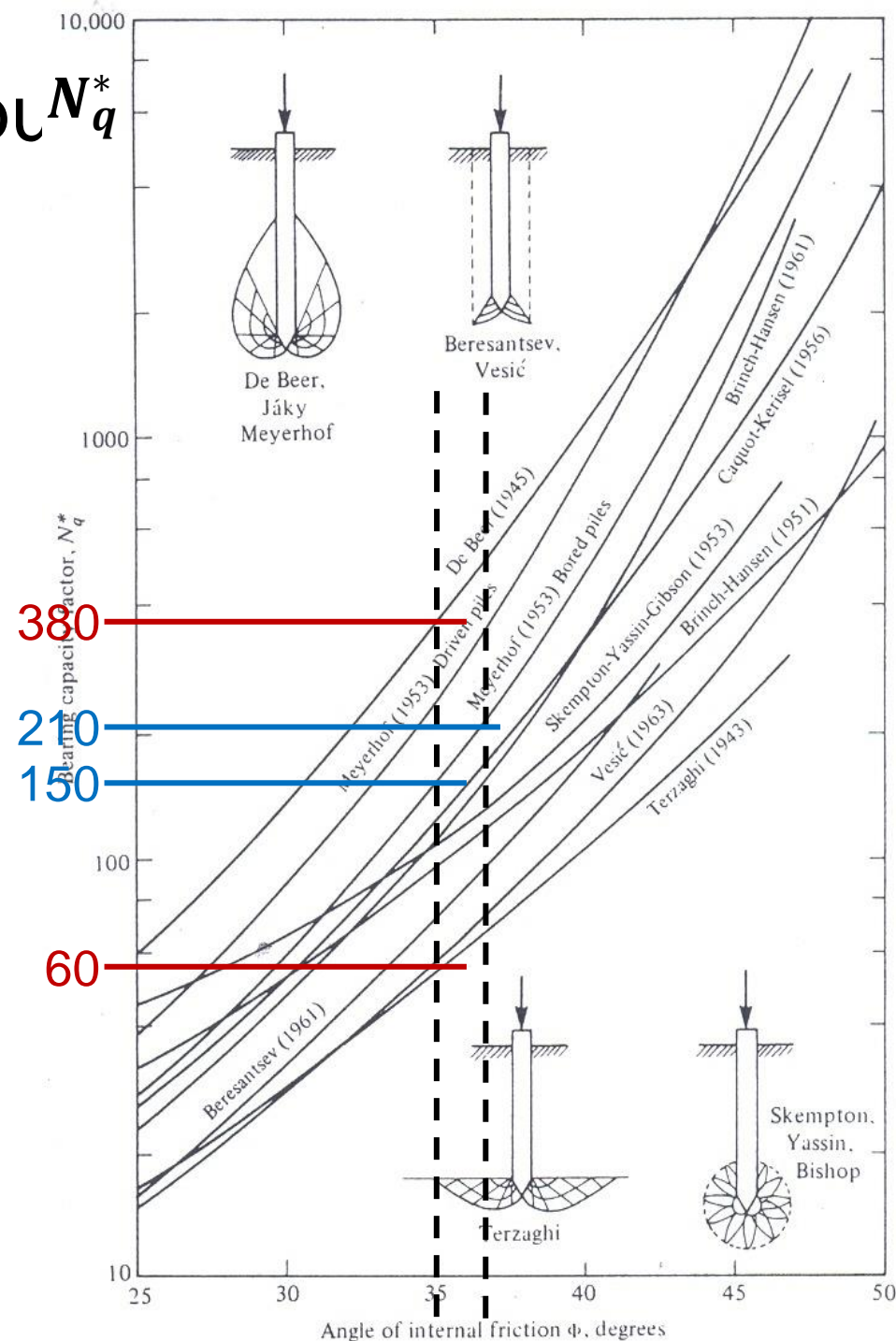
La capacidad de carga por la punta depende de

- Ficha
- Parámetros resistentes del terreno
- Tapada y napa

$$q_u = (c N_c + \sigma'_v N_q) \cdot s_c d_c$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi$$

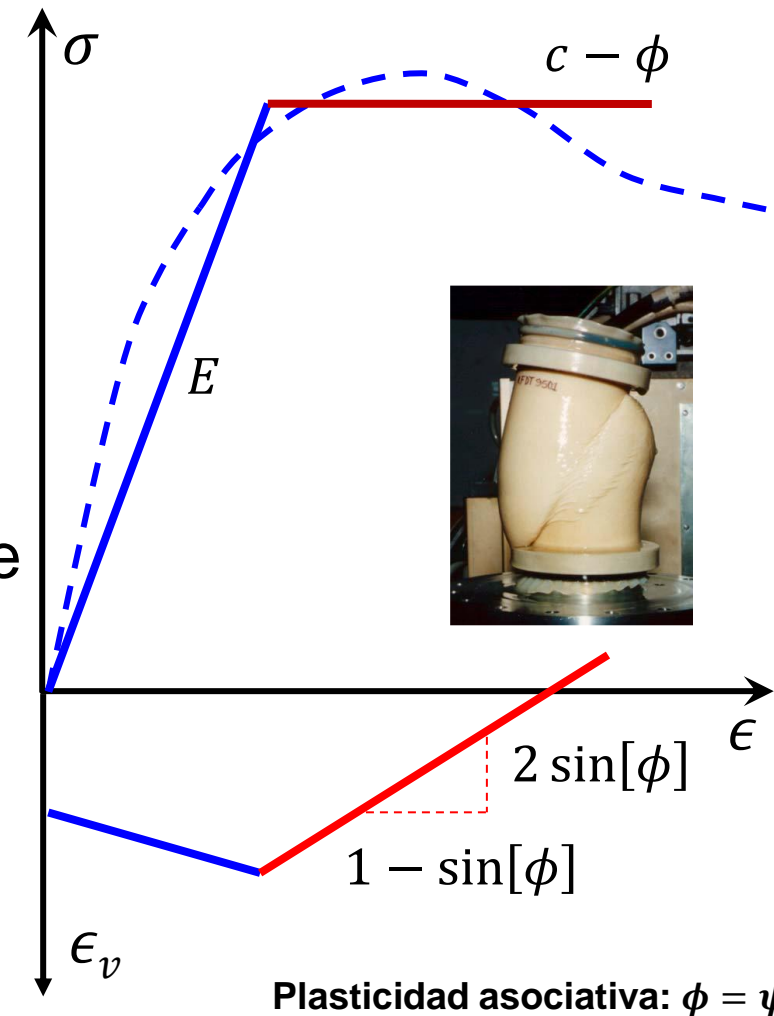
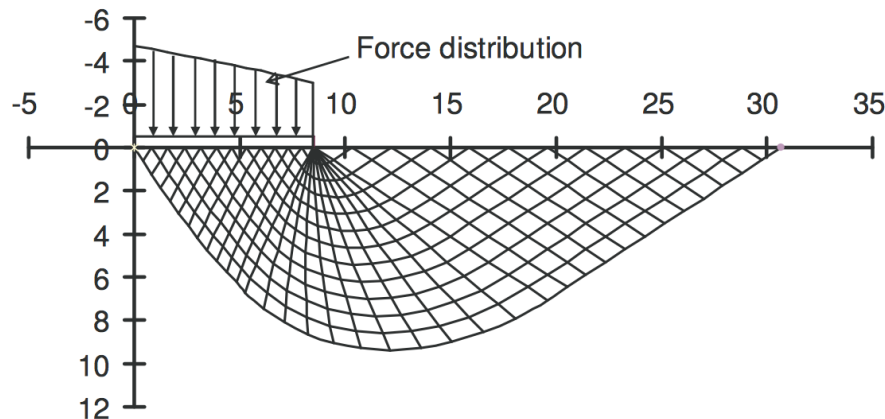
Diferentes coeficientes  $N_q$  según diferentes autores



# ¿Porqué andan mal las fórmulas de capacidad de carga?

## Hipótesis: Suelo elastoplástico perfecto con plasticidad asociativa

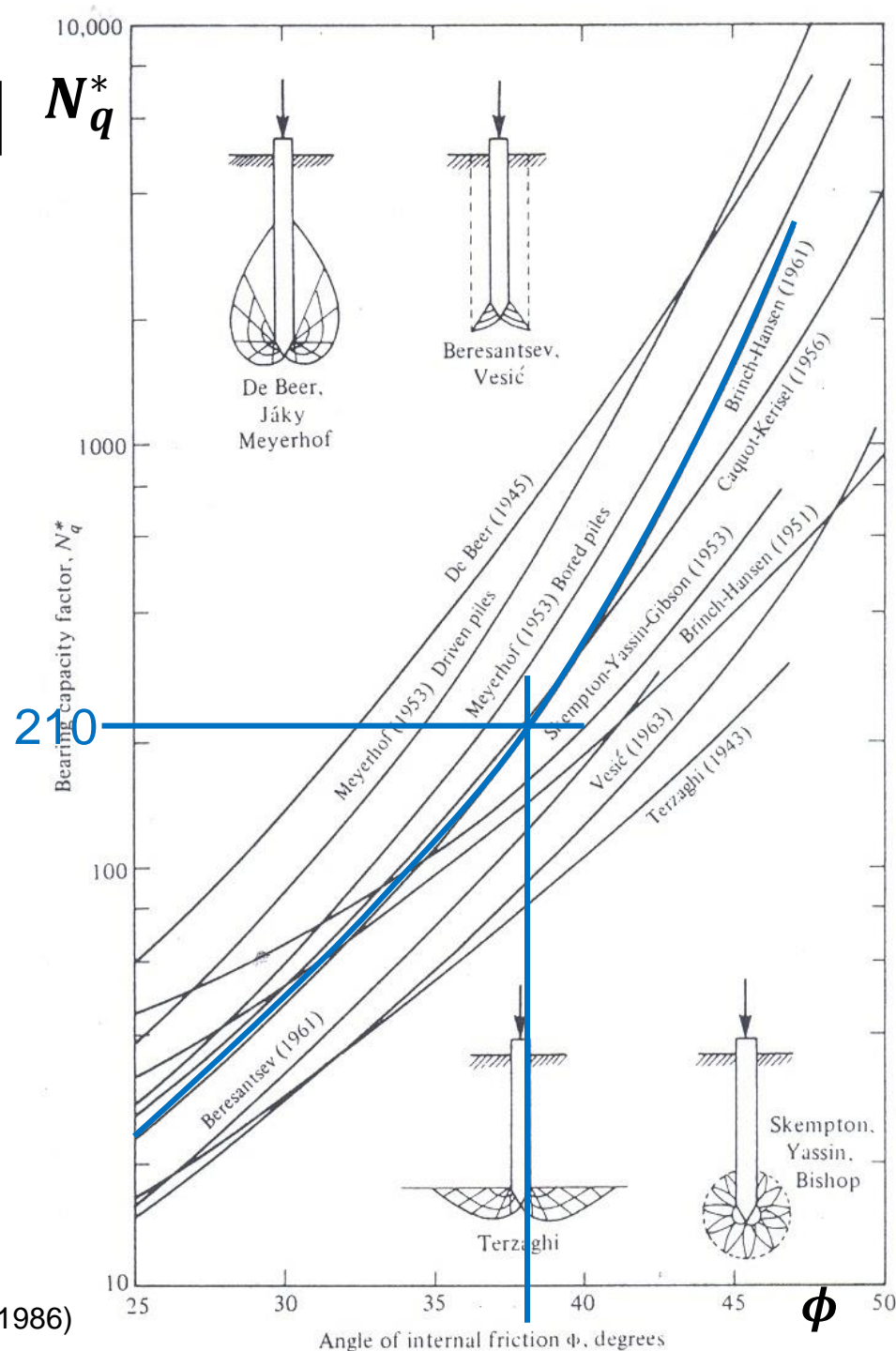
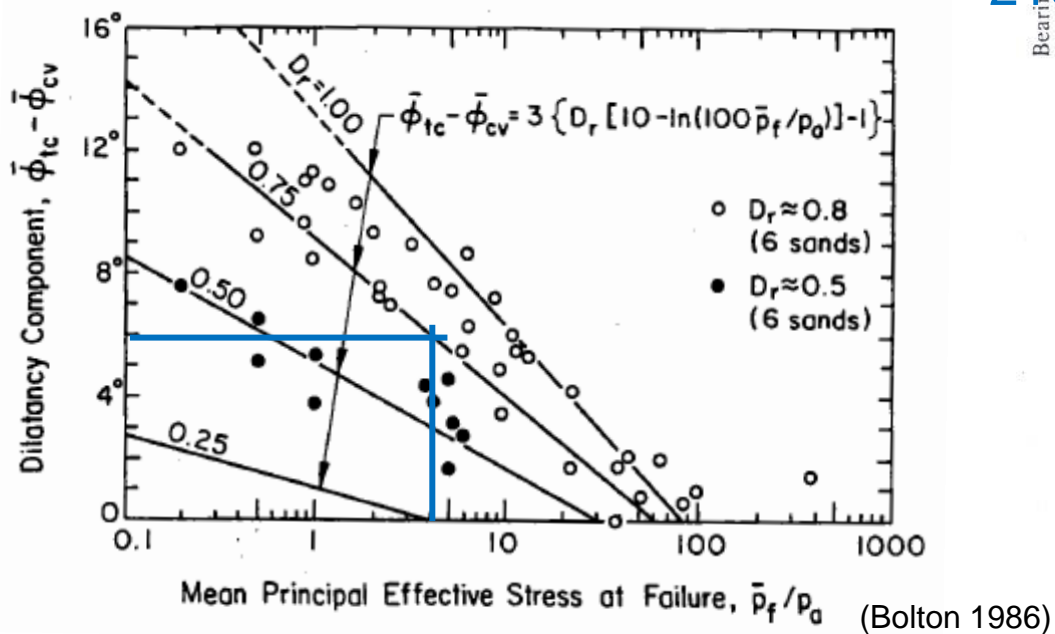
- Forma: espiral logarítmica
- El suelo dilata (muchísimo)
- Ignora compresión volumétrica por aumento de presión
- Ángulo de fricción interna constante





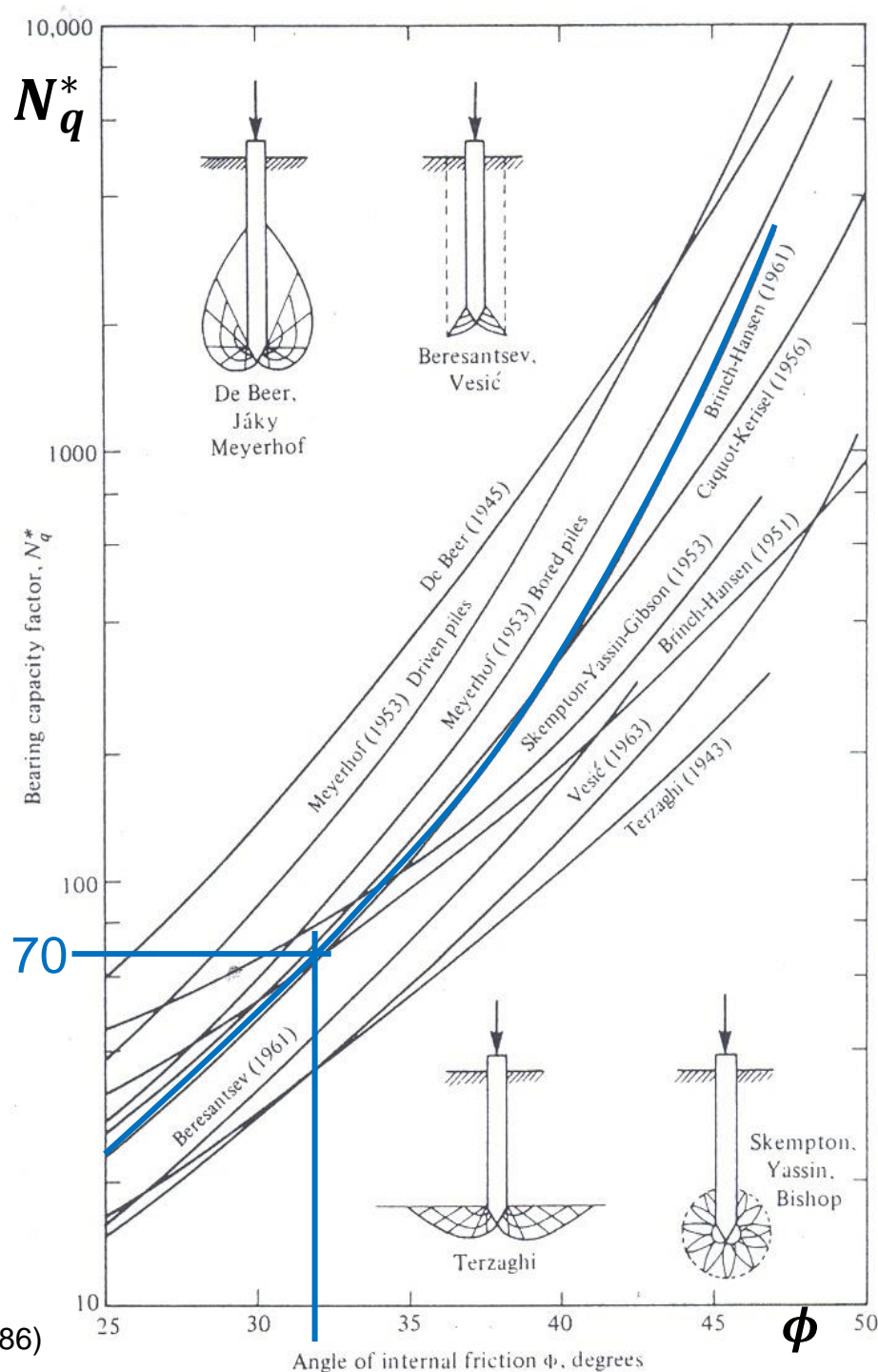
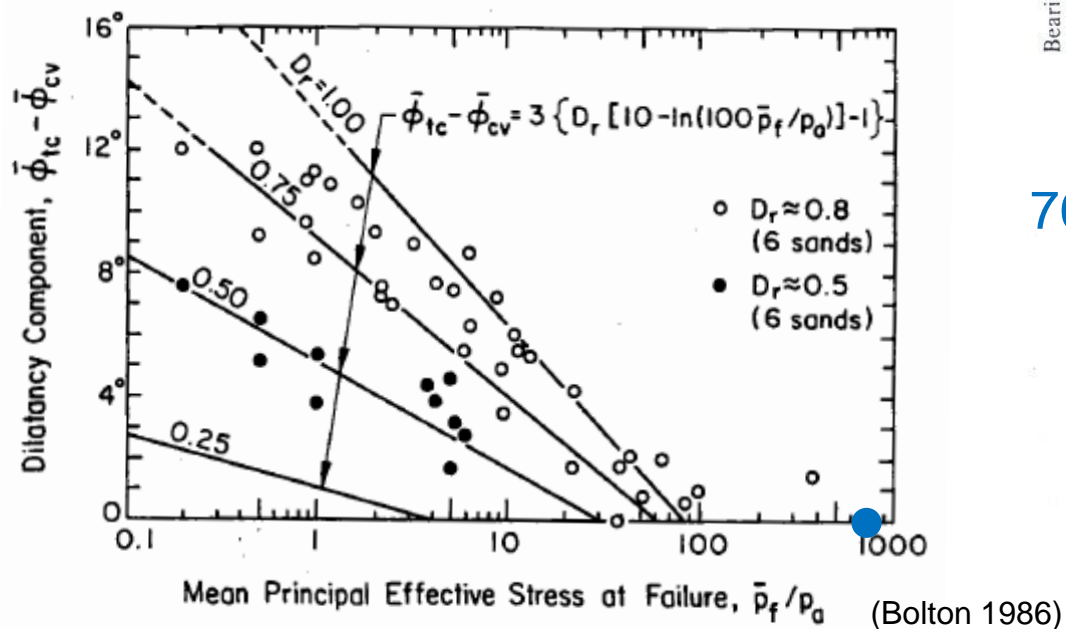
# La no linealidad de $\phi[p, e]$ $N_q^*$

- $D_f = 40m$  ( $\sigma'_v = 400 \text{ kPa}$ )
- $D_r \cong 75\%$
- $\phi = \phi_{cv} + \psi = 32^\circ + 6^\circ = 38^\circ$
- $q_{ult} = \sigma'_v \cdot N_q = 84 \text{ MPa}$



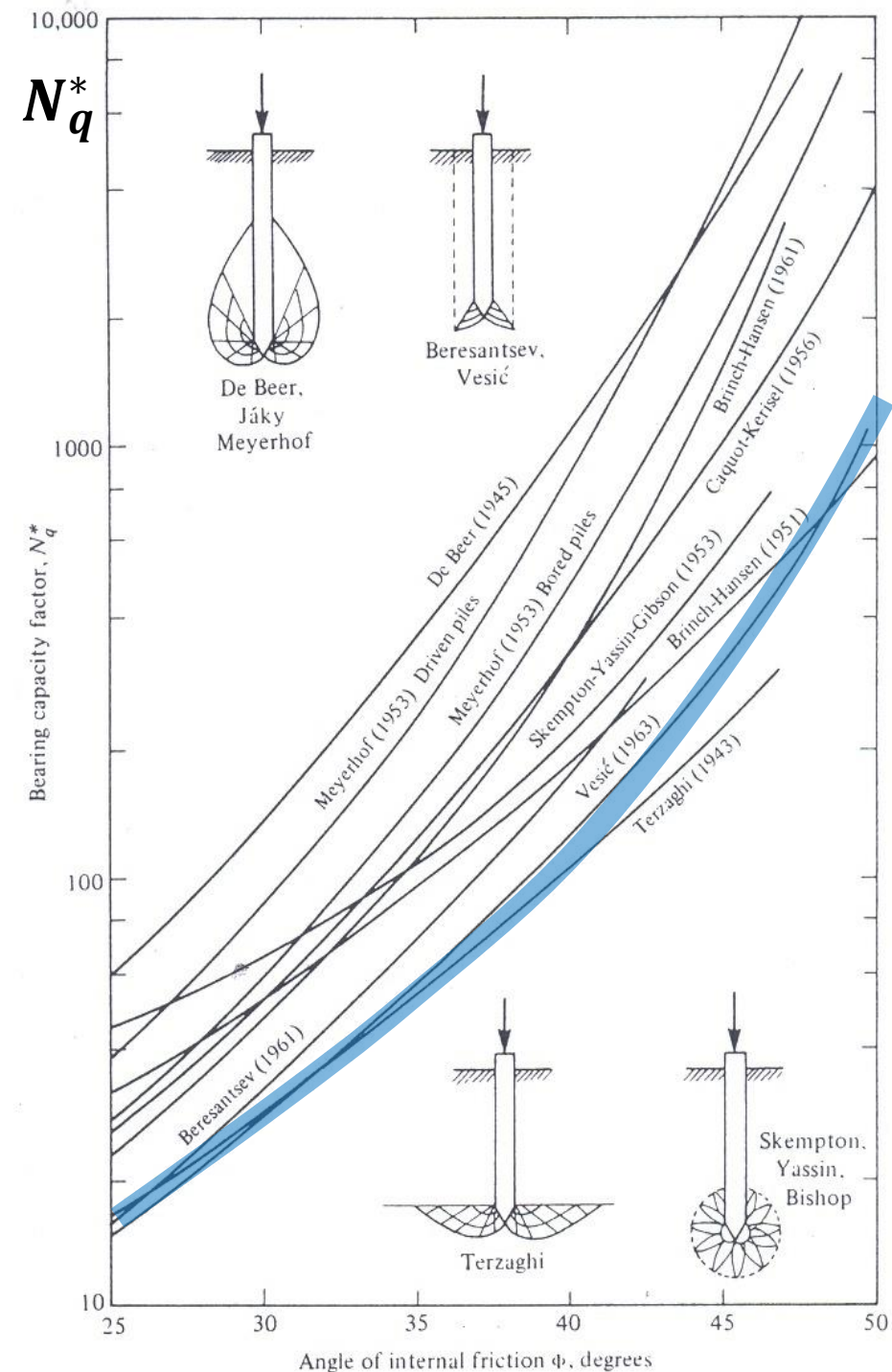
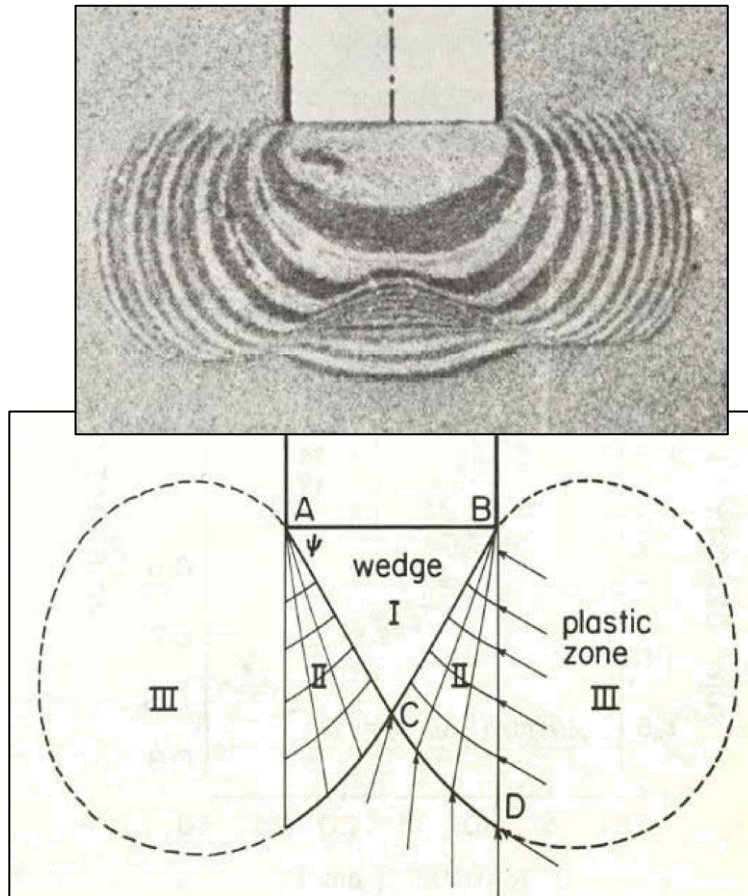
# La no linealidad de $\phi[p, e]$ $N_q^*$

- $q_{ult} = 84 \text{ MPa} \rightarrow \psi = 0$
- $\phi = \phi_{cv} = 32^\circ$
- $q_{ult} = \sigma'_v \cdot N_q = 28 \text{ MPa}$



# Carga última por punta: mecanismo más realista

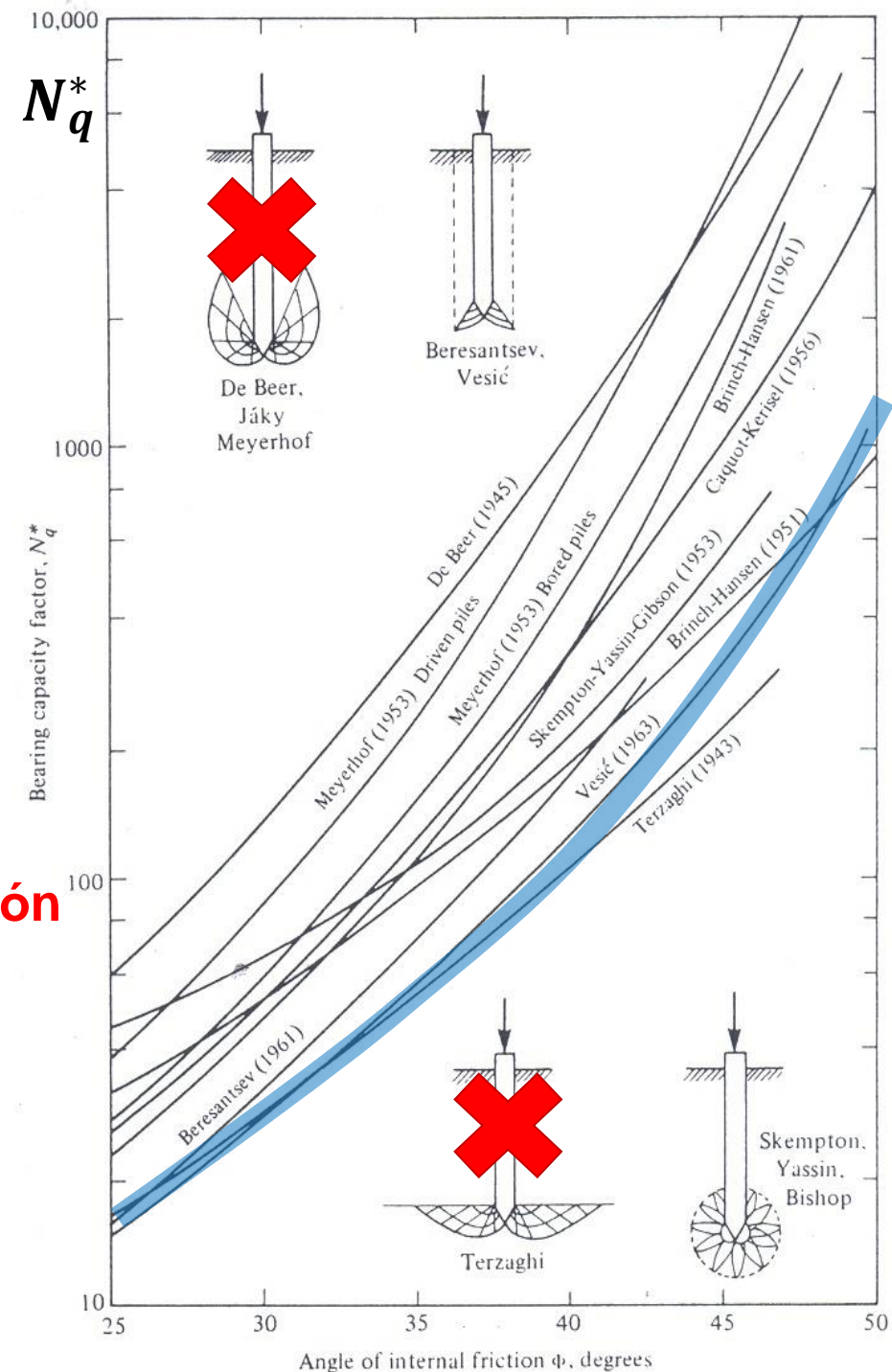
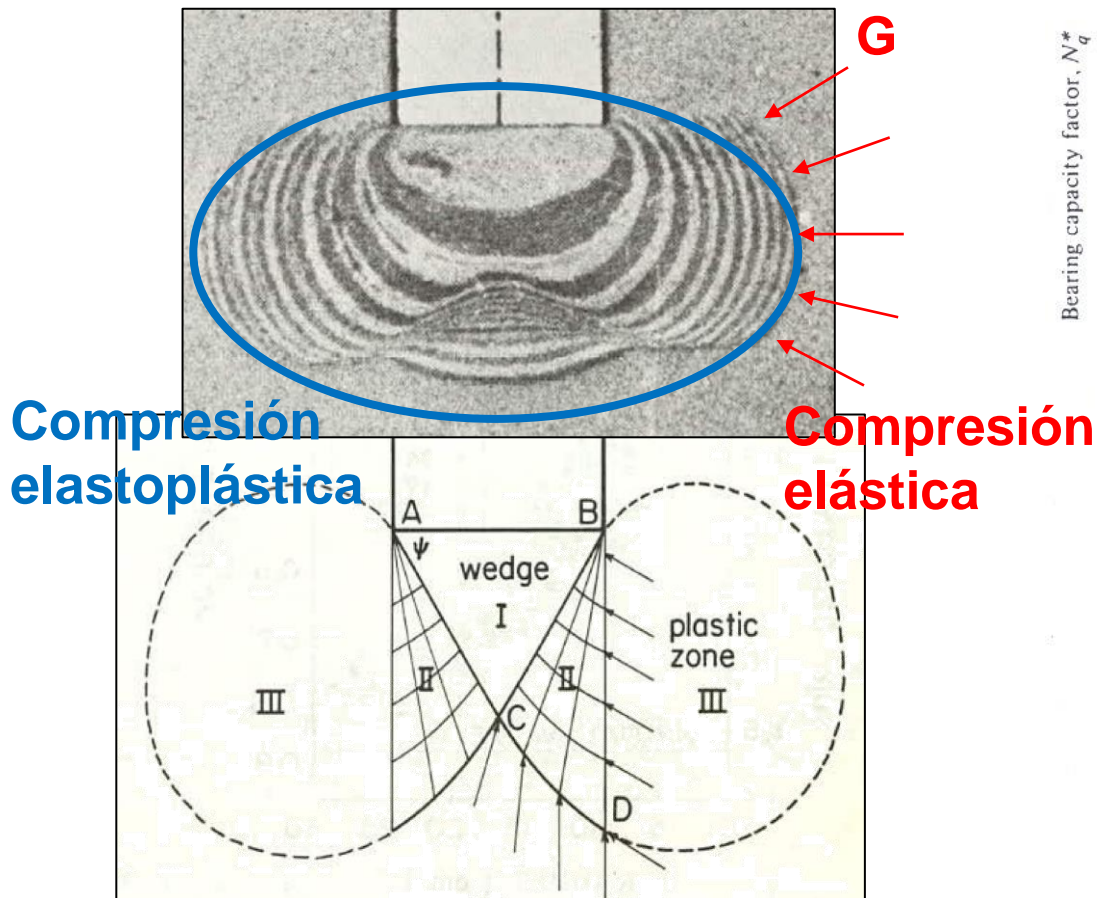
## Expansión de cavidad esférica (Vesic 1977)





# Carga última por punta: mecanismo más realista

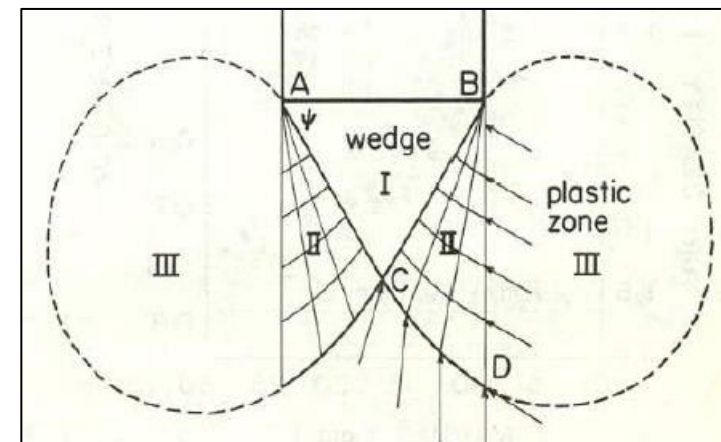
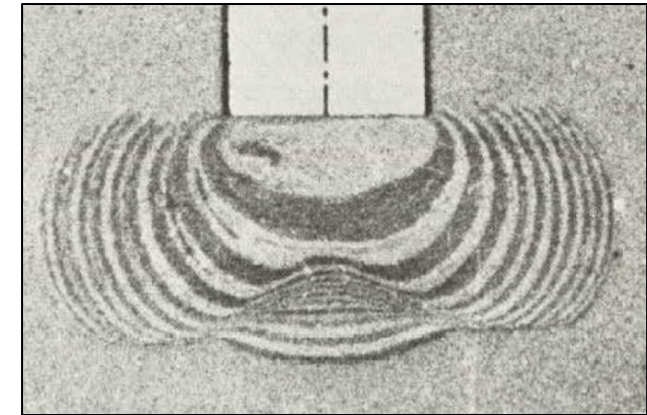
## Expansión de cavidad esférica (Vesic 1977)



# Formulas de Vesic

## Mecanismo de falla basado en expansión de cavidad esférica

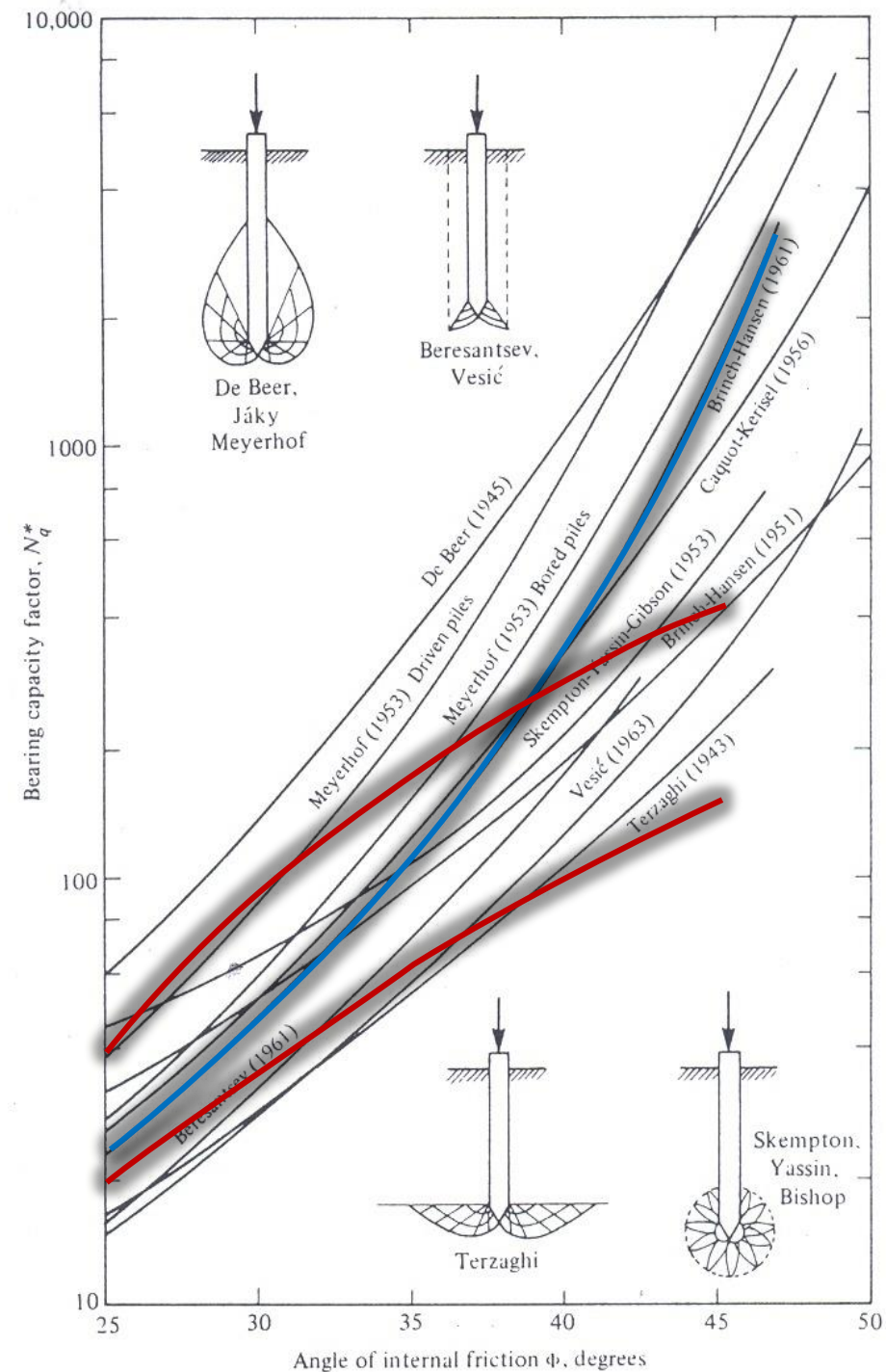
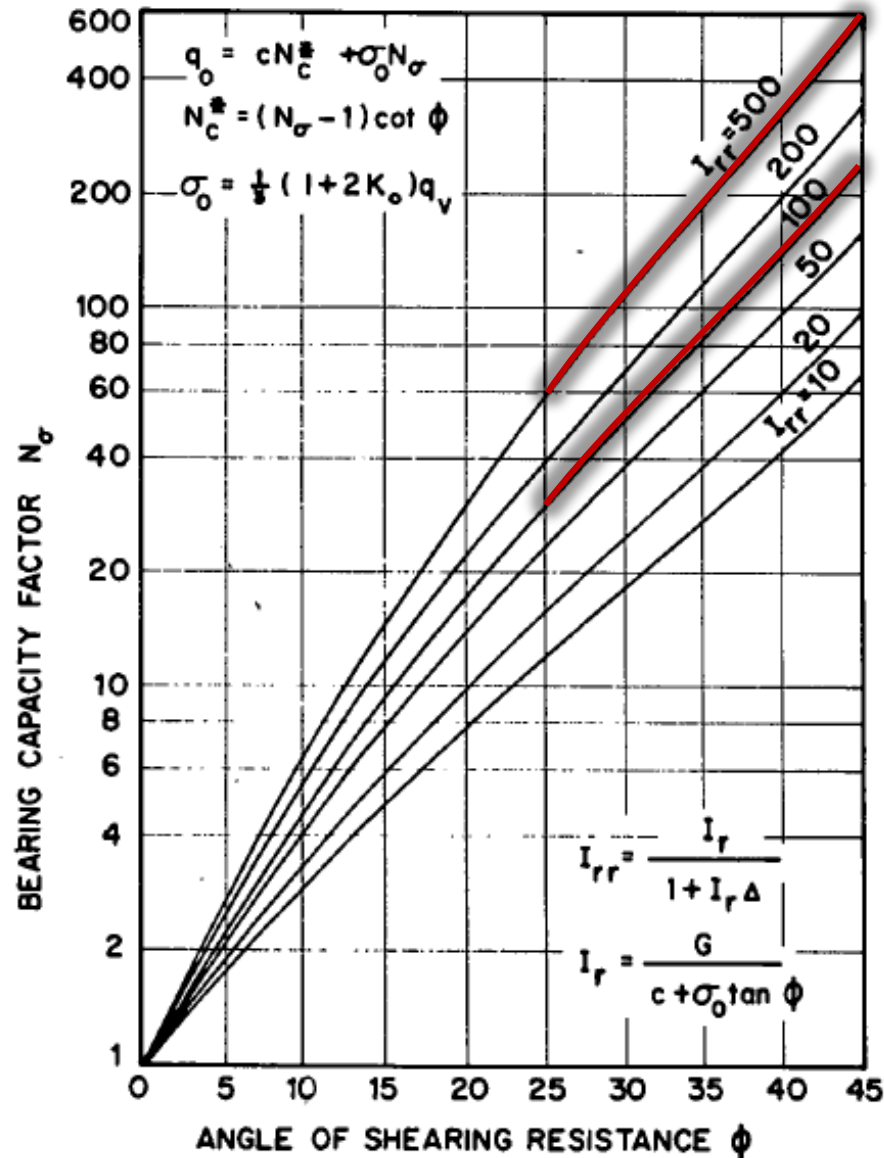
- $q_{ult} = cN_c[\phi] + pN_\sigma[\phi]$
- $N_\sigma = c_1 \tan^2 \left[ \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right] I_{rr}^{c_3}$
- $c_1 = \frac{3}{3 - \sin[\phi]} e^{\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \tan[\phi]} \quad / \quad c_3 = \frac{4}{3} \frac{\sin[\phi]}{1 + \sin[\phi]}$
- $N_c = \cot[\phi] \cdot \left( \frac{1 + 2K_0}{3} N_\sigma - 1 \right)$
- $p = \frac{1 + 2K_0}{3} \sigma'_0$
- $I_{rr} = \frac{I_r}{1 + \epsilon_v I_r} ; I_r = \frac{G}{c + p \tan(\phi)}$
- $\epsilon_v = 50 I_r^{-1.8}$  (Yasufuku 2001)



(Vesic 1977)



# Vesic vs Brinch-Hansen



# Diseño ULS de un pilote

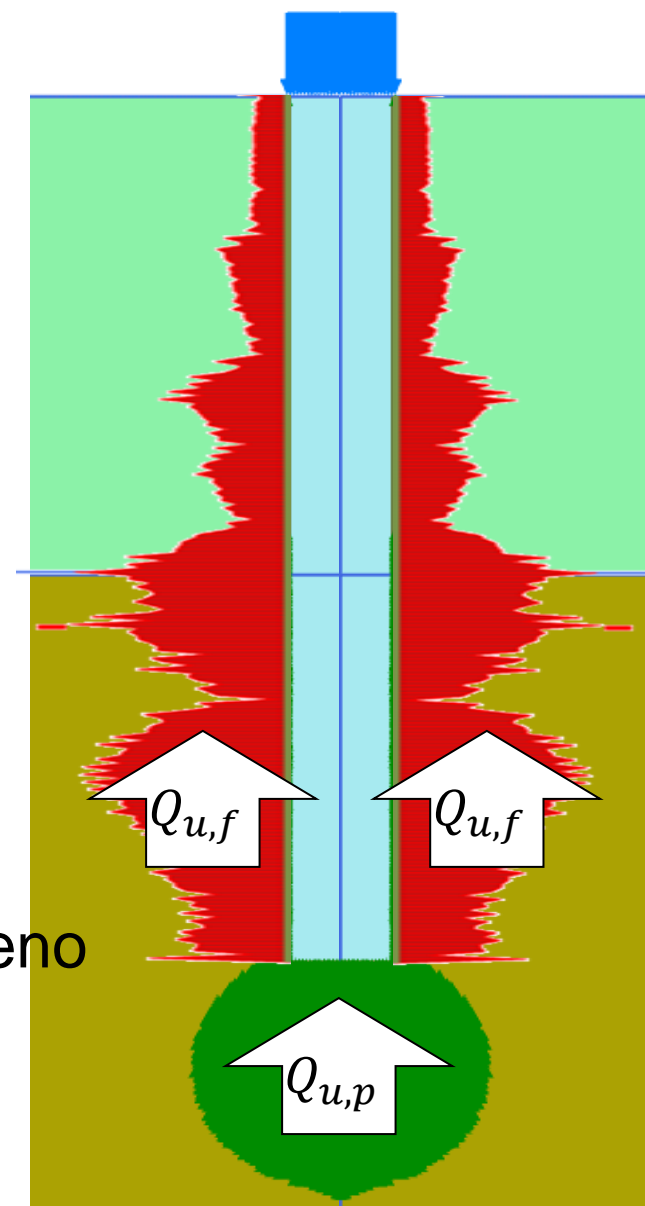
Análisis LRFD: resistencia minorada mayor que la suma de las cargas mayoradas

$$Q_d \geq \Sigma LF_i \cdot P_i$$

donde  $Q_d = RF_p \cdot Q_{u,p} + RF_f \cdot Q_{u,f}$

$RF_p$  y  $RF_f$  dependen de

- Incertidumbre en comportamiento del terreno
- Procedimiento constructivo
- Precisión del modelo de cálculo



# Algunos factores de resistencia *RF* (para puentes)

Los factores *RF* dependen de

- Modelo
- Terreno
- Proc. const.
- Factores *LF*
- Parámetros medios vs característicos ( $\phi_{80}$ )

	Terreno	Método de diseño	Método constructivo	RF
Resistencia total	Arena	Reese & Wright (1977)	Todos	0.50
	Arcilla	Reese & O'Neill (1988)	Todos	0.40
	Arcilla y arena		Seco/lodos	0.85
		Encamisado	0.65	
		Reese & Wright (1977)	Seco y lodos	0.75
			Encamisado	0.50
	Roca	Carter & Kulhawy (1988)	Todos	0.60
		O'Neill & Reese (1999)		0.75
Resistencia por el fuste	Todos	Reese & O'Neill (1988)	Todos	0.45
		Reese & Wright (1977)		
	Roca	Carter & Kulhawy (1988)	Todos	0.50
		O'Neill & Reese (1999)		0.65

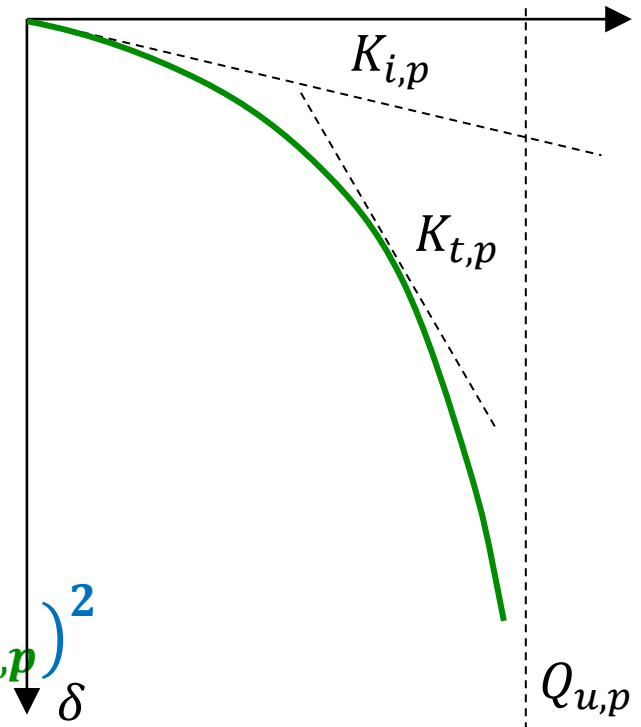
# Carga última nominal por la punta $Q_{u,p}^*$ de pilotes perforados (I/II)

## Punta de pilotes perforados: Deformaciones enormes para alcanzar la carga última

- Curva  $P - \delta$  puede modelarse como una hipérbola rectangular<sub>p</sub>

$$P_p[\delta] = \delta / \left( 1/K_{i,p} + \delta/Q_{u,p} \right)$$

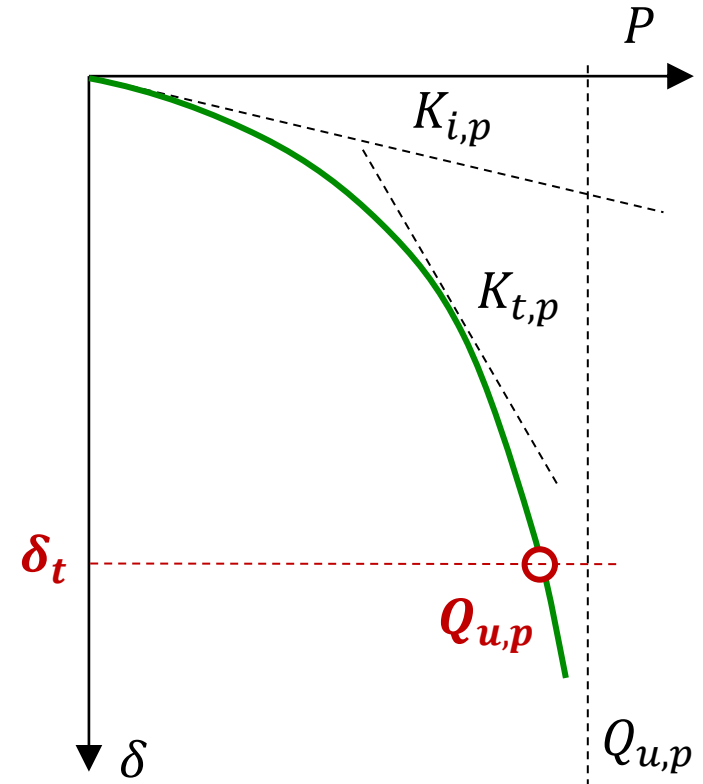
- Rigidez inicial:  $K_{i,p} = 2\pi G_0 R / (1 - \nu)$ 
  - Parámetros del suelo bajo la punta
- Asíntota final = carga última:  $Q_{u,p}$
- Rigidez tangente:  $K_{t,p}[\delta] = K_{i,p} \left( 1 - P/Q_{u,p} \right)^2$



# Carga última nominal por la punta $Q_{u,p}^*$ de pilotes perforados (II/II)

Criterio 1: Asentamiento total de la punta  $\delta_t$

- $Q_{u,p}^* = \delta_t / (1/K_{i,p} + \delta_t/Q_{u,p})$





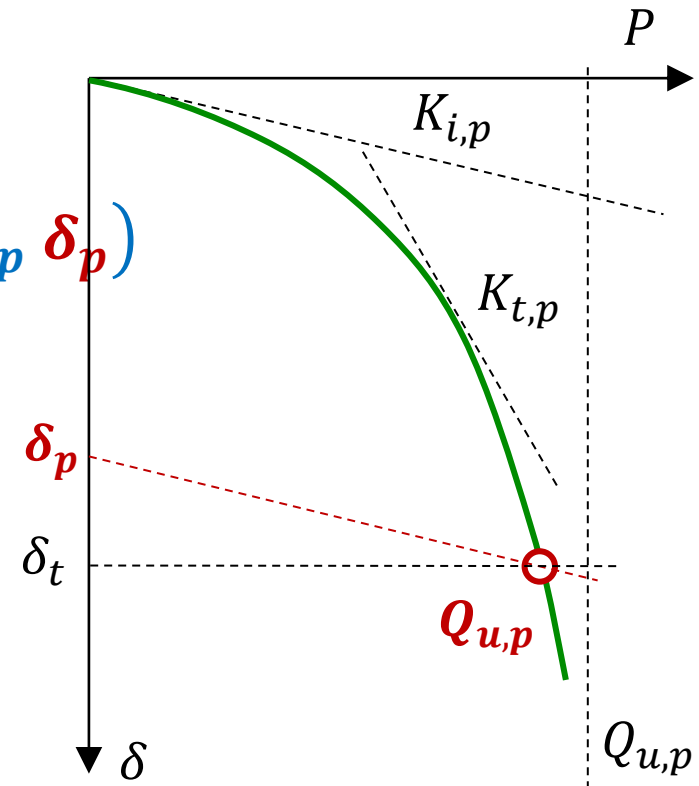
# Carga última nominal por la punta $Q_{u,p}^*$ de pilotes perforados (II/II)

Criterio 1: Asentamiento total de la punta  $\delta_t$

- $Q_{u,p}^* = \delta_t / (1/K_{i,p} + \delta_t/Q_{u,p})$

Criterio 2: Asentamiento permanente  $\delta_p$

- $Q_{u,p}^* = \frac{1}{2} (\sqrt{K_{i,p} \delta_p \sqrt{K_{i,p} \delta_p + 4Q_{u,p}}} - K_{i,p} \delta_p)$



# Carga última nominal por la punta $Q_{u,p}^*$ de pilotes perforados (II/II)

Criterio 1: Asentamiento total de la punta  $\delta_t$

- $Q_{u,p}^* = \delta_t / (1/K_{i,p} + \delta_t/Q_{u,p})$

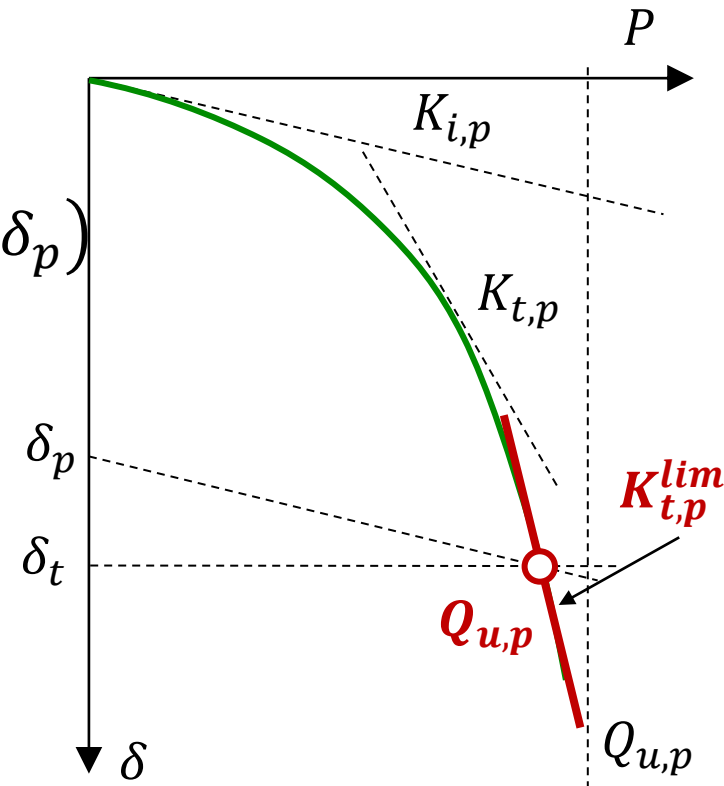
Criterio 2: Asentamiento permanente  $\delta_p$

- $Q_{u,p}^* = \frac{1}{2} (\sqrt{K_{i,p} \delta_p \sqrt{K_{i,p} \delta_p + 4Q_{u,p}}} - K_{i,p} \delta_p)$

Criterio 3: rigidez límite  $K_{t,p}^{lim} = 10\% \cdot K_{i,p}$

- $K_t[\delta]/K_{i,p} = (1 - Q_{u,p}^*/Q_{u,p})^2 = 10\% \rightarrow$

- $Q_{u,p}^* = 0.69 \cdot Q_{u,p}$



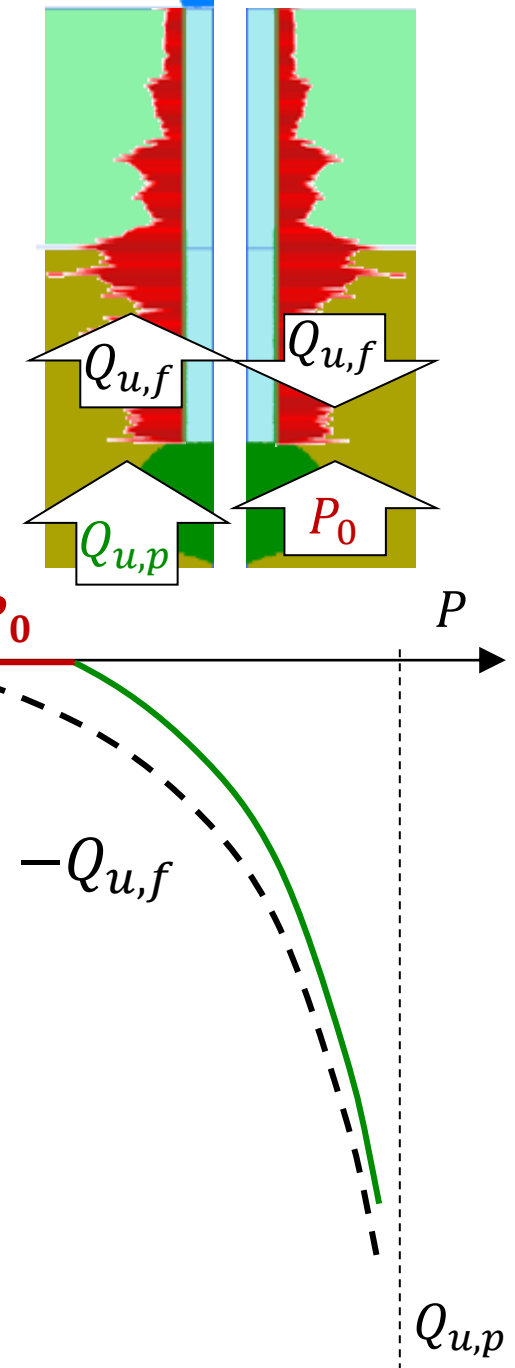
# Carga última nominal por la punta $Q_{u,p}^*$ de pilotes hincados

## Punta de pilotes hincados: precarga $P_0$ inducida por hinca

- Durante hinca: martillo vence punta y fricción
- Al fin de la hinca
  - Fricción lateral  $Q_{u,f}$  está movilizadada
  - No hay carga exterior:  $P_0 + Q_{u,f} = 0 \rightarrow P_0 = -Q_{u,f}$
- Curva carga-asentamiento

$$P_p[\delta] = \delta / \left( 1/K_{i,p} + \delta / (Q_{u,p} - P_0) \right) + P_0$$

- La carga última nominal  $Q_{u,p}^*$  puede ser del mismo orden que carga última  $Q_{u,p}$



# Carga límite de diseño por la punta

La carga límite de diseño por la punta es  $Q_{d,p} = RF_p \cdot Q_{u,p}^*$

- CIRSOC 402 está en redacción, no tenemos los  $RF_p$  todavía para este método de cálculo de la carga última
- Pero sabemos que  $RF_p$  depende del tipo de suelo
  - Arcillas compactas:  $Q_{u,p}^*$  se alcanza con baja deformación
  - Arenas densas:  $Q_{u,p}^*$  requiere una deformación enorme
- Y sabemos que  $RF_p$  depende del método constructivo
  - Pilote hincado, punta limpia ya predeformada  $\zeta RF_p \cong 0.8?$
  - Pilote perforado con lodo, (puede tener) punta sucia, el terreno debe deformarse para desarrollar carga,  $\zeta RF_p \cong 0.5?$

# Contenido

- Definición y tipos de fundación profunda
- Métodos de instalación de pilotes
- **Diseño para estados límites últimos**
  - Carga límite de diseño por la punta
  - **Carga límite de diseño por fricción**
  - Carga límite de diseño para pilotes hincados
- Diseño para estados límites de servicio
- Aspectos de diseño



# Carga última por fricción lateral

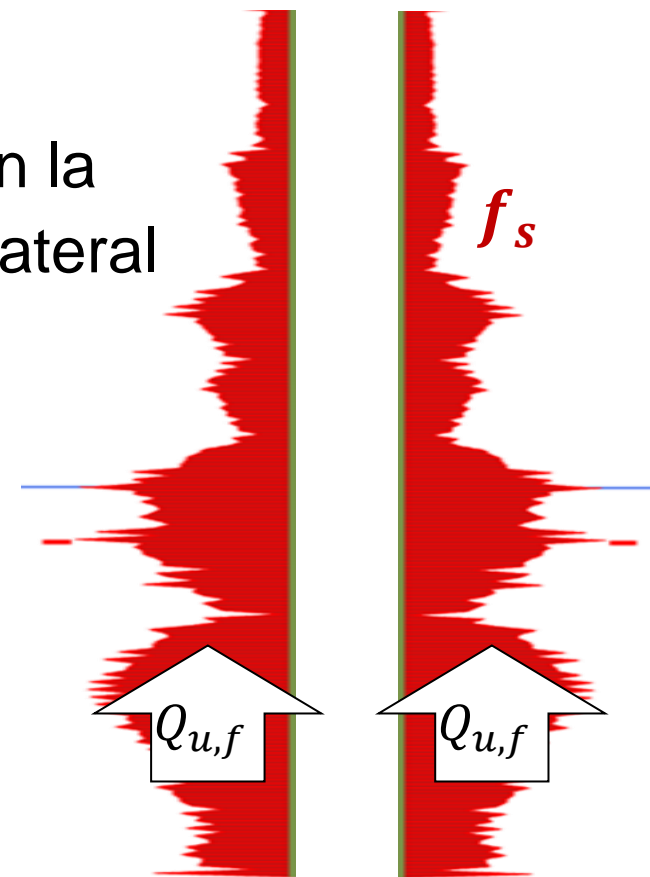
$Q_{u,f}$  es la integral de la resistencia al corte en la interfaz suelo-pilote  $f_s$  en toda la superficie lateral

- $Q_{u,f} = \int f_s \cdot dA$

$f_s$  depende

- De la resistencia al corte del terreno
- Del método constructivo
  - Tensión horizontal  $\sigma_h$  de contacto en cada punto
  - Disturbación del terreno | uso de lodos | contaminantes

$f_s$  se desarrolla plenamente con asentamiento limitado



# Predimensionamiento de fricción lateral en condición no drenada

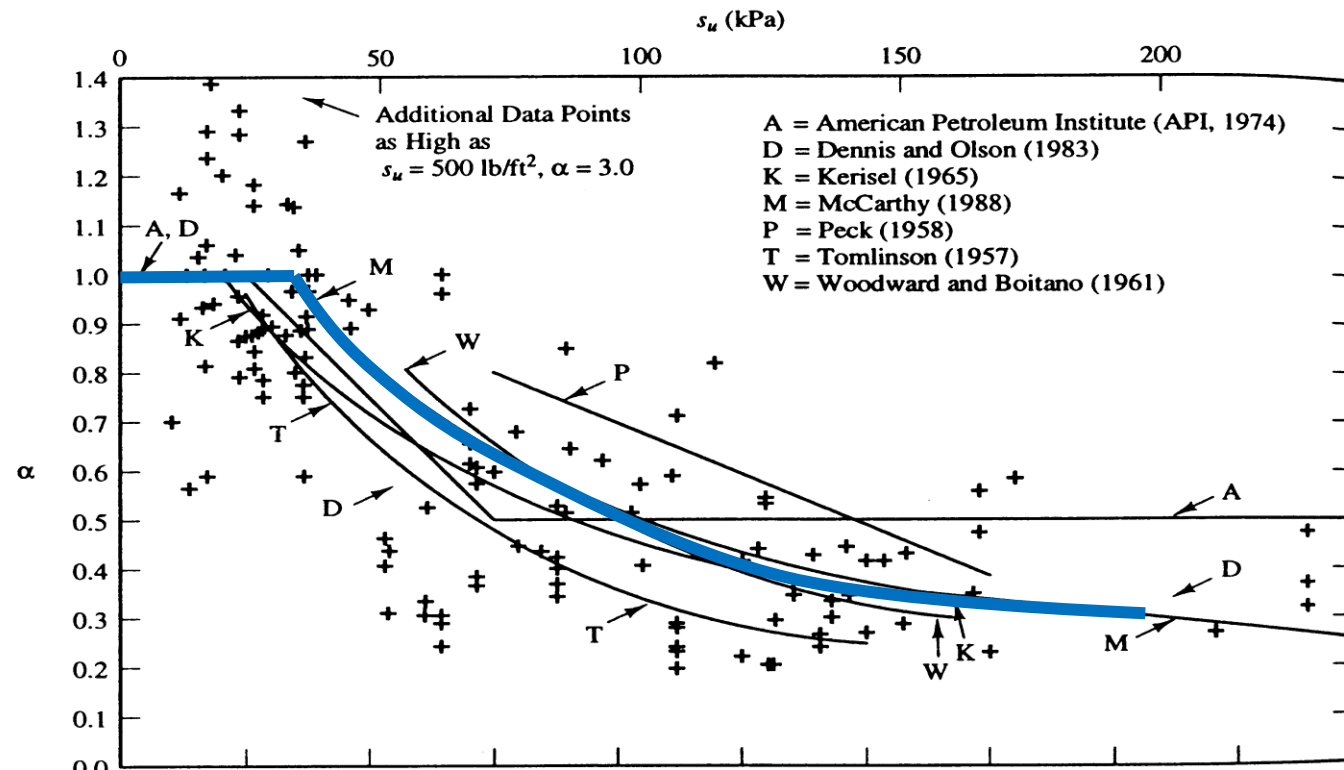
- Resistencia al corte del suelo:
- Método simplificado:**
  - $\alpha = 0.21 + 26kPa/s_u \leq 1.0$

$$S = S_u$$

$$f_s = \alpha \cdot s_u$$

Dispersión grande:

- Instalación puede mejorar arcillas muy blandas
- Gráfico incluye muchos métodos constructivos



# Predimensionamiento de fricción lateral en condición drenada

- Resistencia al corte del suelo:  $s = \sigma'_h \tan[\phi]$
- Resistencia al corte de la interfaz:  $f_s = \sigma'_h \tan[\delta]$
- Fórmula simplificada:  $f_s = K \sigma'_v \tan[\delta]$ 
  - $K$ : hincados:  $1.2 < K < 3.0$  | perforados:  $K_0 < K < 1.0$
  - $\delta$ : acero:  $\delta = 20^\circ$  | madera:  $\delta = 2/3 \phi$  | hormigón:  $\delta = 3/4 \phi$

Table 4-5

Common Values for Corrected K

Soil Type	Displacement Piles		Nondisplacement Piles	
	Compression	Tension	Compression	Tension
Sand	2.00	0.67	1.50	0.50
Silt	1.25	0.50	1.00	0.35
Clay	1.25	0.90	1.00	0.70

Values of  $\delta$

File Material	$\delta$
Steel	0.67 $\phi$ to 0.83 $\phi$
Concrete	0.90 $\phi$ to 1.0 $\phi$
Timber	0.80 $\phi$ to 1.0 $\phi$

(USACE)

# Predimensionamiento de fricción lateral en condición drenada

- **Método simplificado:**

- Arenas con desplazamiento:

$$\beta = 0.18 + 0.65D_r$$

- Arenas sin desplazamiento:

$$\beta = 1.5 - 0.245\sqrt{z[m]}$$

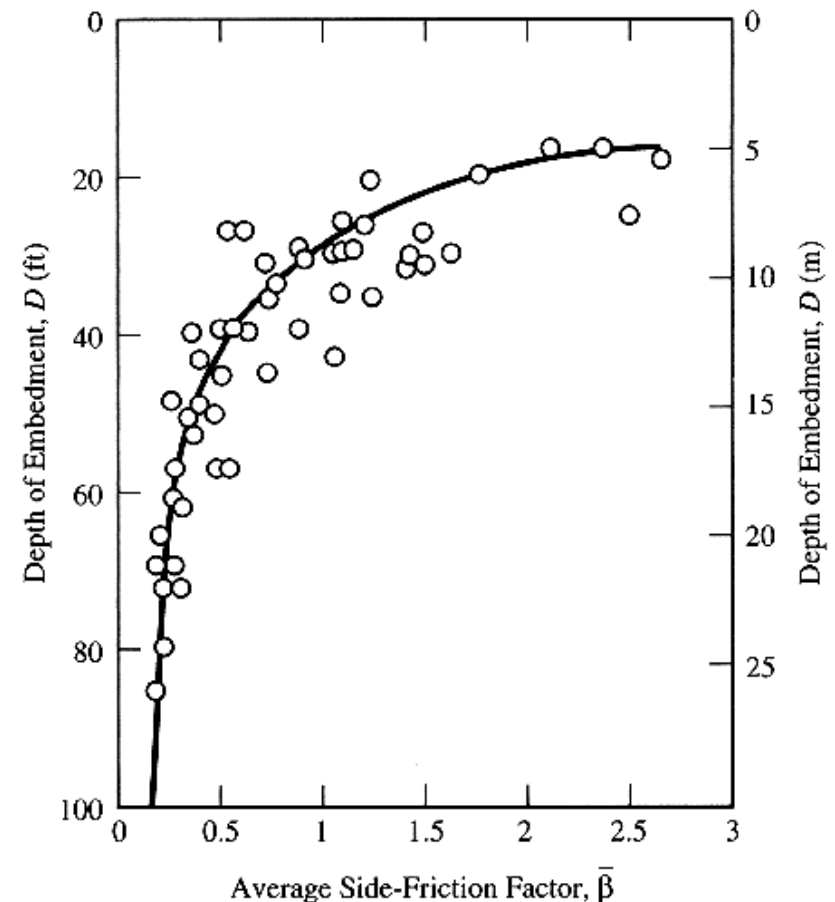
- Gravas gruesas:

$$\beta = 3.4e^{-0.085z[m]}$$

- Gravas finas:

$$\beta = 2.0 - 0.15z^{0.75}[m]$$

$$f_s = \beta \cdot \sigma'_v$$

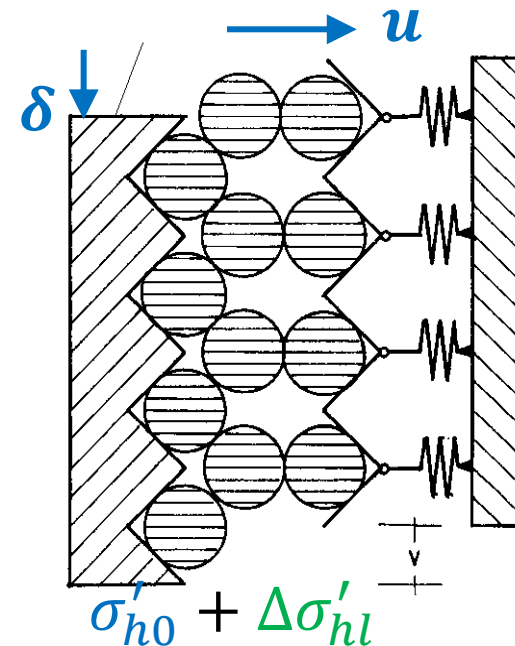
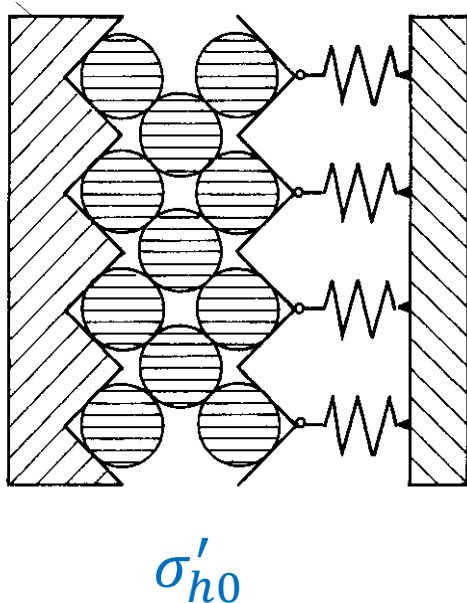


# Mecanismo de resistencia por el fuste (drenada): fricción y dilatancia

Resistencia al corte de la interfaz:  $f_s = \sigma'_h \tan[\delta]$

Componentes de la tensión horizontal:  $f_s = (\sigma'_{h0} + \Delta\sigma'_{hl}) \tan[\delta]$

- $\sigma'_{h0}$ : tensión horizontal antes de aplicación de carga vertical
- $\Delta\sigma'_{hl}$ : cambio de tensiones por distorsión del suelo en contacto

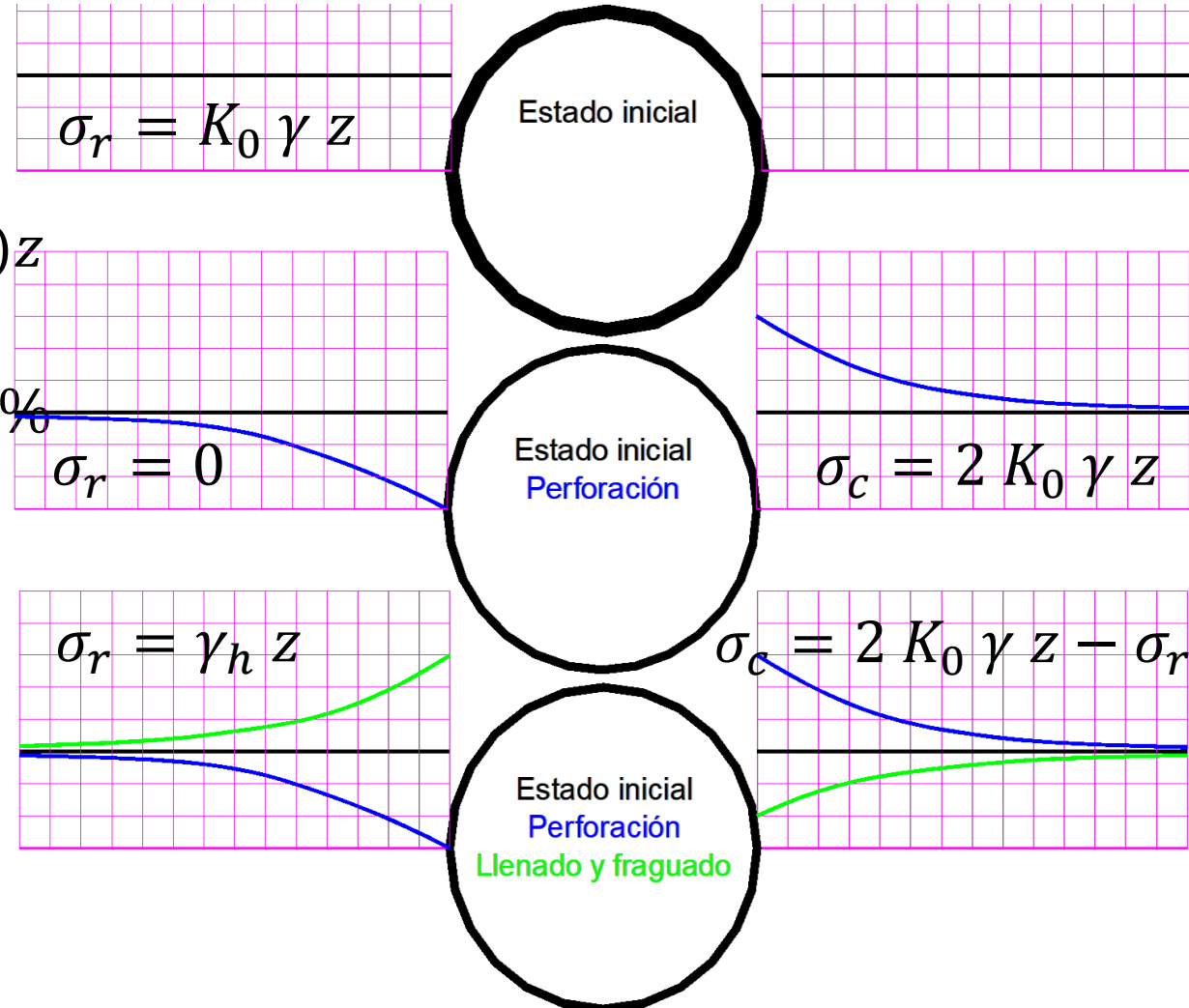




# Tensión horizontal antes de la carga $\sigma'_{ho}$

## Pilote perforado

- Perforación:  $\sigma'_r = 0$
- Llenado:  $\sigma'_r = (\gamma_H - \gamma_w)z$
- Contracción por endurecimiento:  $\Delta\sigma_r \cong -10\%$
- $\sigma'_{r0} \cong \sigma'_v$



# Tensión horizontal antes de la carga $\sigma'_{ho}$ . UBAfiuba

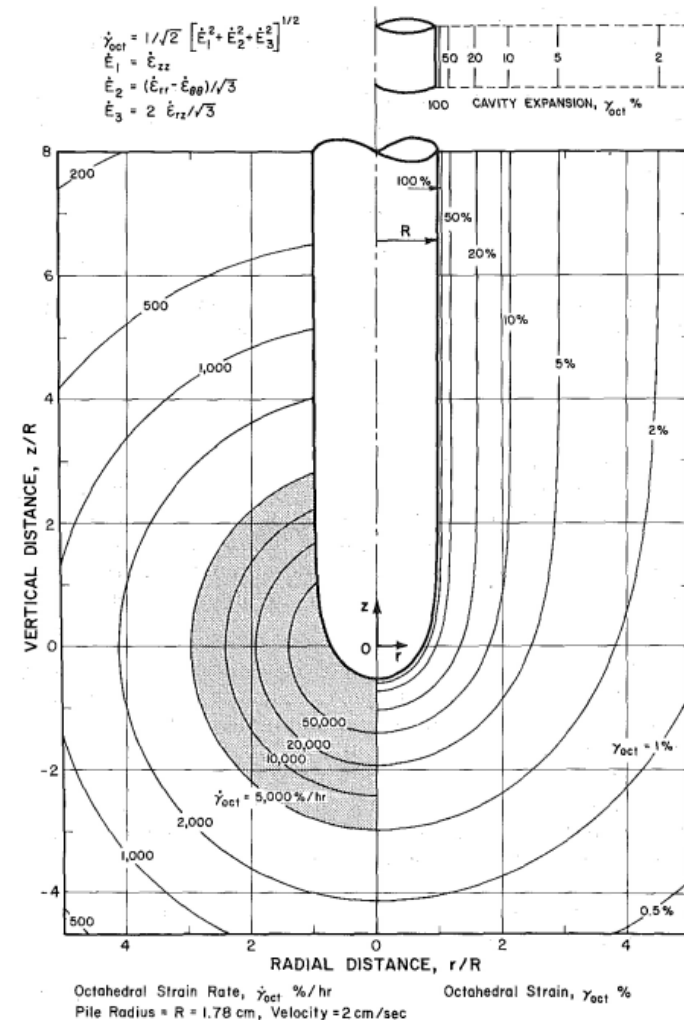
FACULTAD DE INGENIERÍA

## Pilote perforado

- Perforación:  $\sigma'_r = 0$
- Llenado:  $\sigma'_r = (\gamma_H - \gamma_w)z$
- Contracción por endurecimiento:  $\Delta\sigma_r \cong -10\%$
- $\sigma'_{r0} \cong \sigma'_v$

## Pilote hincado

- Penetración: expansión de cavidad plástica:  
 $\sigma_r \rightarrow f[G, \nu, c, \phi] \cdot \sigma_v$
- $\sigma'_{r0} \gg \sigma'_v$

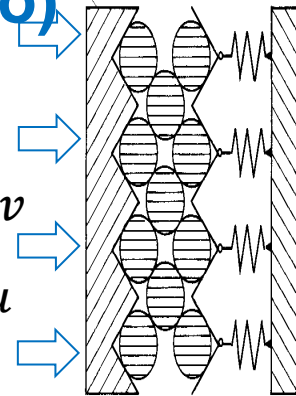


(Baligh, 1985)

# Parámetros para el cálculo de la resistencia por el fuste - Resumen

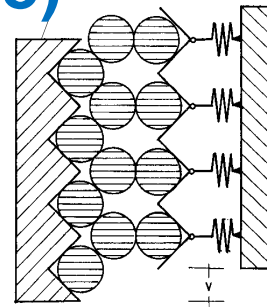
## Pilotes hincados (con desplazamiento lateral del suelo)

- Desplazamiento lateral de suelo grande:  $\sigma_h \gg \sigma_v$
- Arenas: distorsión enorme en superficie lateral:  $\phi = \phi_{cv}$
- Arcillas blandas:  $\sigma_h$  induce consolidación radial:  $f_s > s_u$
- Arcillas duras: se rompe estructura (del suelo):  $f_s < s_u$



## Pilotes perforados (sin desplazamiento lateral del suelo)

- Desplazamiento lateral de suelo sólo por dilatancia
- Arenas: distorsión lateral sólo por carga:  $\phi = \phi_{max}$
- Arcillas blandas: no hay mejora del terreno:  $f_s < s_u$
- Arcillas duras: expansión de suelo rompe estructura:  $f_s < s_u$  y dilatancia  $\sigma_h \gg \sigma_v$  (mejora resistencia drenada)



# Pilotes perforado en arenas

## Método 3M

- Método para determinar la fricción última en pilotes perforados en arena
- El método postula que, en la falla, la interfaz suelo – pilote sufre una distorsión tal que se alcanza el estado critico

$$c'_a \rightarrow 0, \psi \rightarrow 0, \phi' \rightarrow \phi_{cv}$$

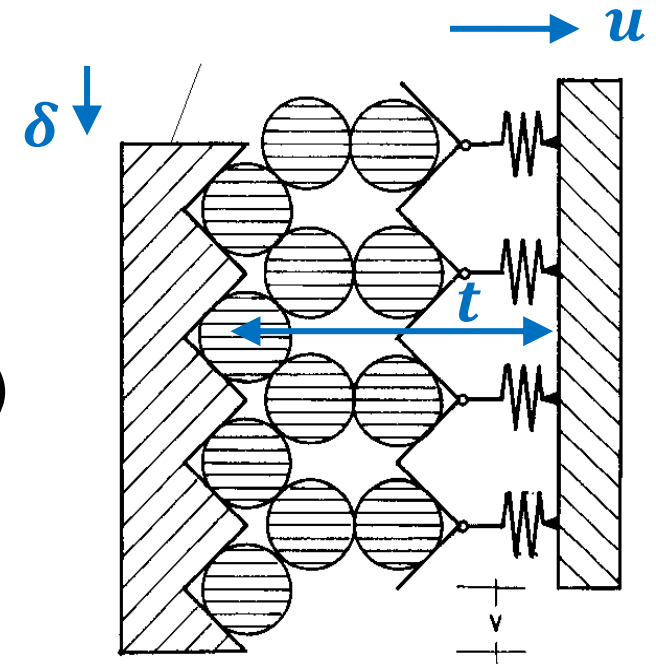
- La fricción puede calcularse como:

$$f_s = \sigma'_{hf} \cdot \tan \delta' = (\sigma'_{h0} + \Delta\sigma'_{hl}) \cdot \sin[\phi_{cv}]$$

# Ejemplo de cálculo de $\Delta\sigma'_{hl}$ : pilotes perforados en arena

## Banda de corte: suelo circundante adherido al pilote

- Espesor  $t_s$  depende de
  - Rugosidad del contacto
  - Tamaño de partícula del terreno ( $D_{50}$ )
- Aumento de espesor en banda de corte
  - Dilatancia:  $du = \tan[\psi] d\delta$
  - Reacción elástica:  
 $d\sigma'_h = 2G/R \cdot du$
  - Reacción elastoplástica:  
expansión cavidad cilíndrica

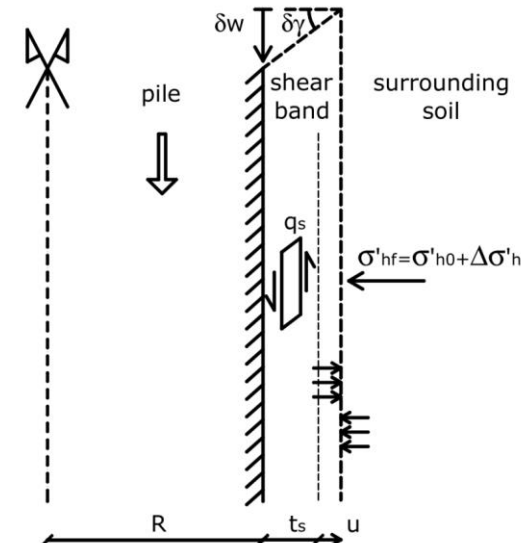
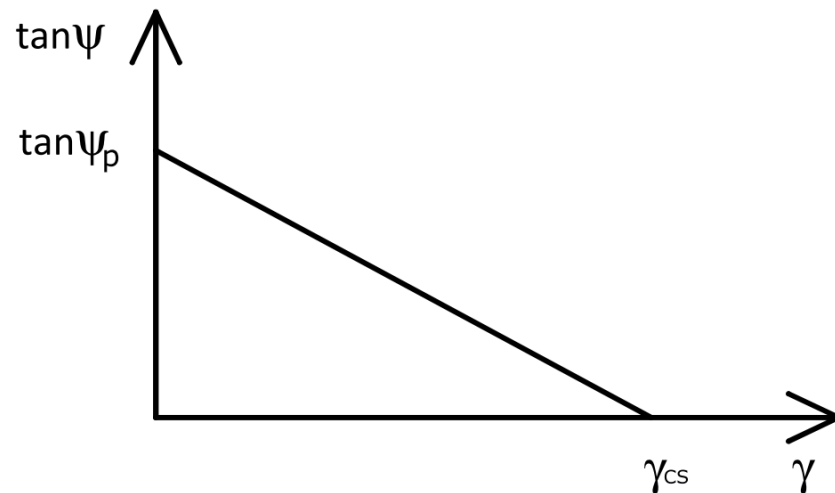




# Pilotes perforado en arenas (Método 3M)

Durante el corte, la distorsión disminuye debido al ablandamiento. Si consideramos una reducción lineal desde el valor pico ( $\psi_p$ ) al valor de estado critico ( $\psi_{cs} = 0$ )

$$du = \tan \psi \, dw ; d\gamma = dw/t_s \rightarrow u = \int_0^{\gamma_s} t_s \tan \psi \, d\gamma = t_s \tan \psi_p \frac{\gamma_{cs}}{2}$$

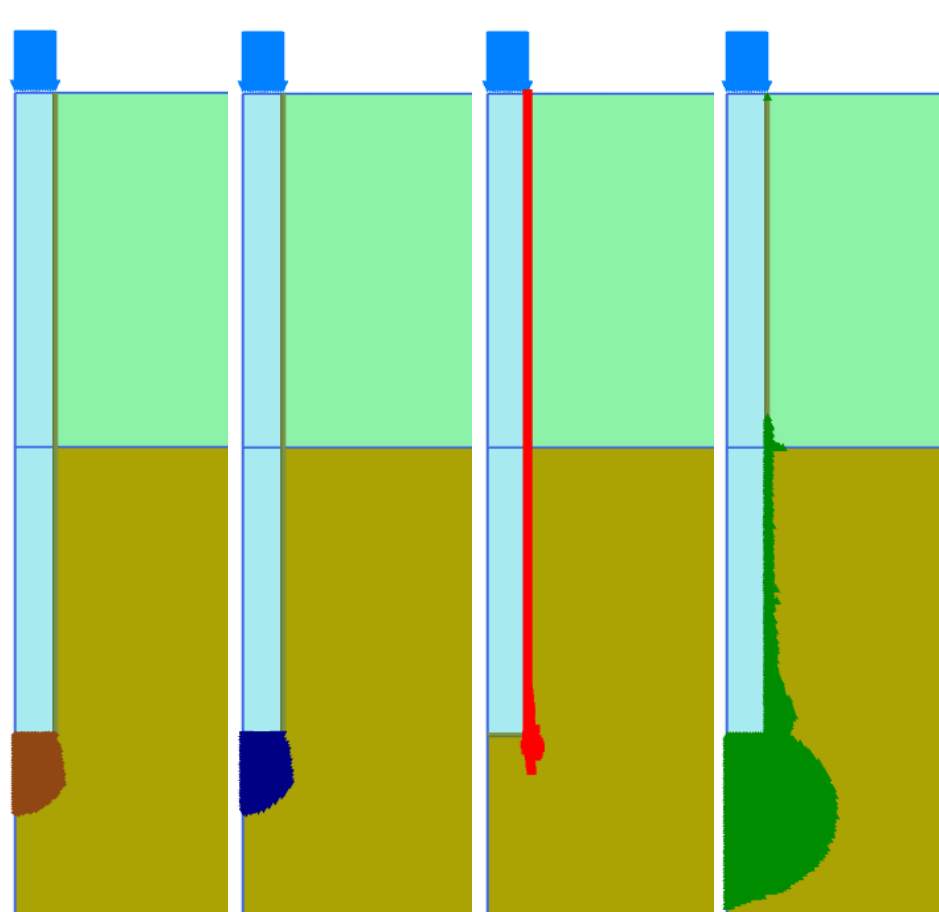


# Ejemplo: pilote axial simétrico sin dilatancia

$$\psi = 0^\circ \rightarrow \frac{\partial \delta_h}{\partial \delta_v} = 0$$

Pilote baja sin cambiar la tensión radial.

La fricción lateral depende de la tensión horizontal que había antes de la instalación del pilote



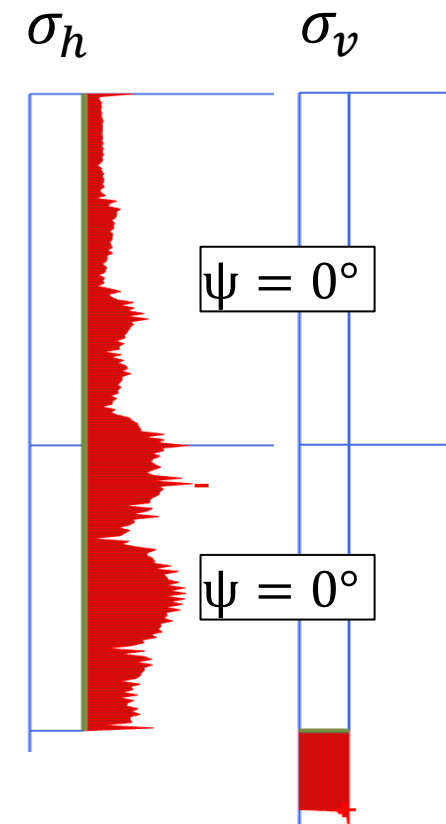
■ Failure point

▼ Cap point

▲ Hardening point

□ Tension cut-off point

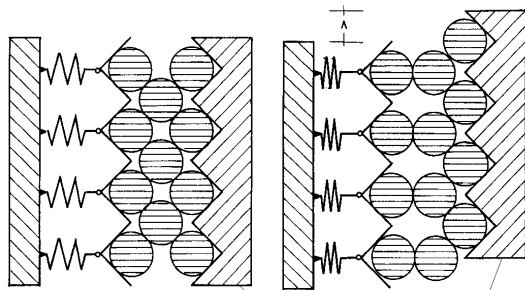
◆ Cap + hardening point



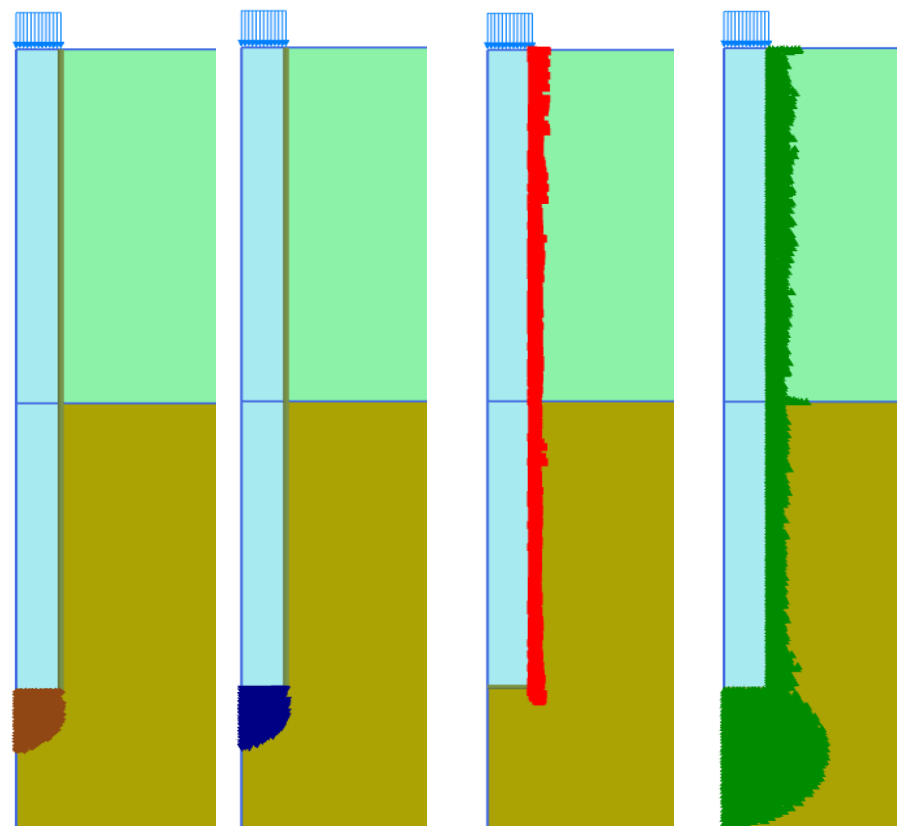
# Ejercicio: pilote axial simétrico con dilatancia

$$\psi > 0^\circ \rightarrow \frac{\partial \delta_h}{\partial \delta_v} > 0$$

$\delta_v$  produce  $\delta_h$

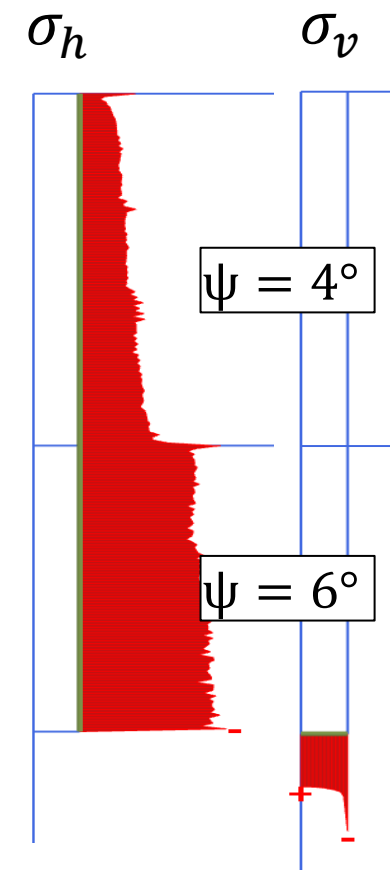


La fricción lateral depende de la tensión horizontal aumentada por la deformación



- Failure point
- ▼ Cap point
- ▲ Hardening point

- Tension cut-off point
- ◆ Cap + hardening point

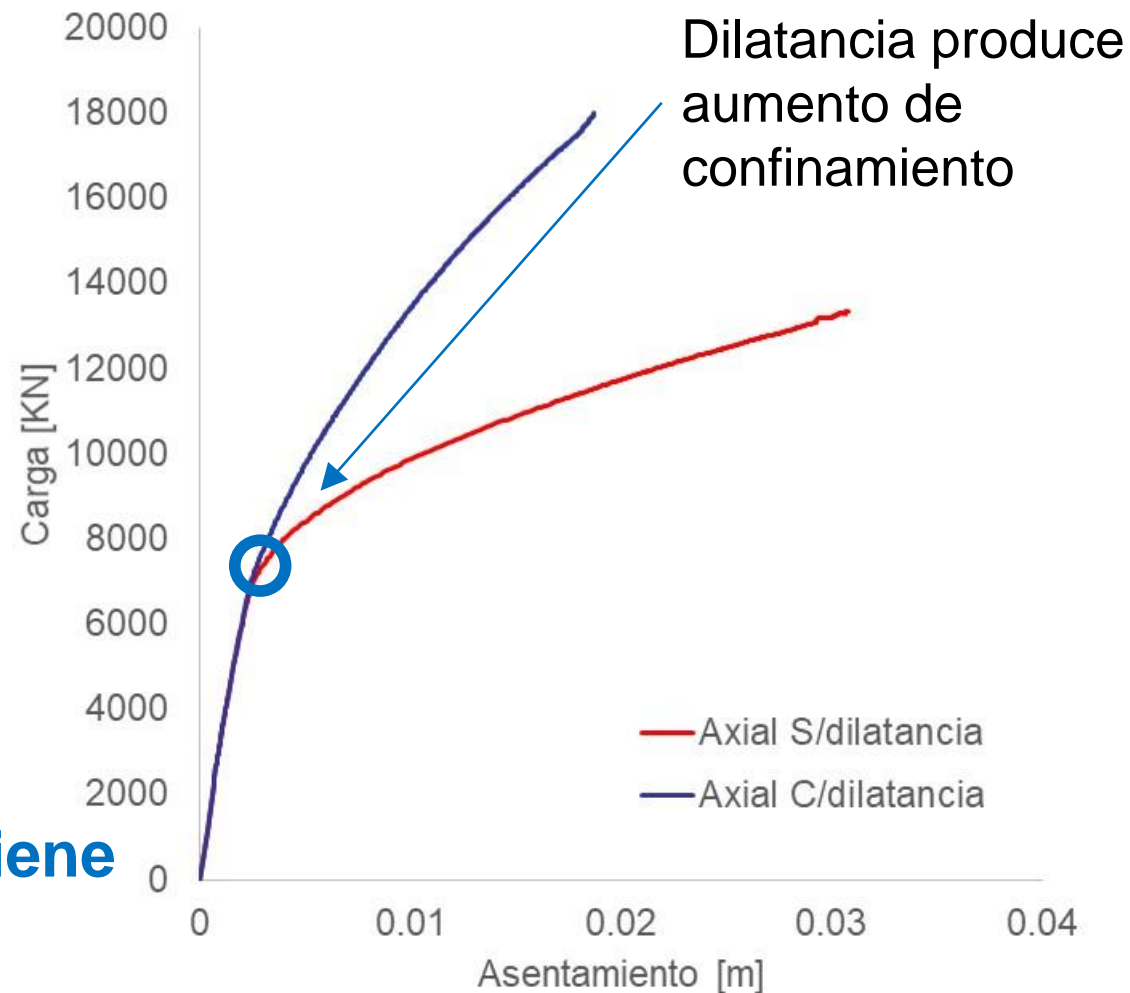


# Curvas $P - \delta$ : efecto de la dilatancia

Dilatancia más simetría de revolución:

- Aumento de la presión radial  $\sigma'_r = \text{horizontal } \sigma'_h$
- Aumento de resistencia por el fuste  $f_s$
- Esto no es un error, es real en suelos densos

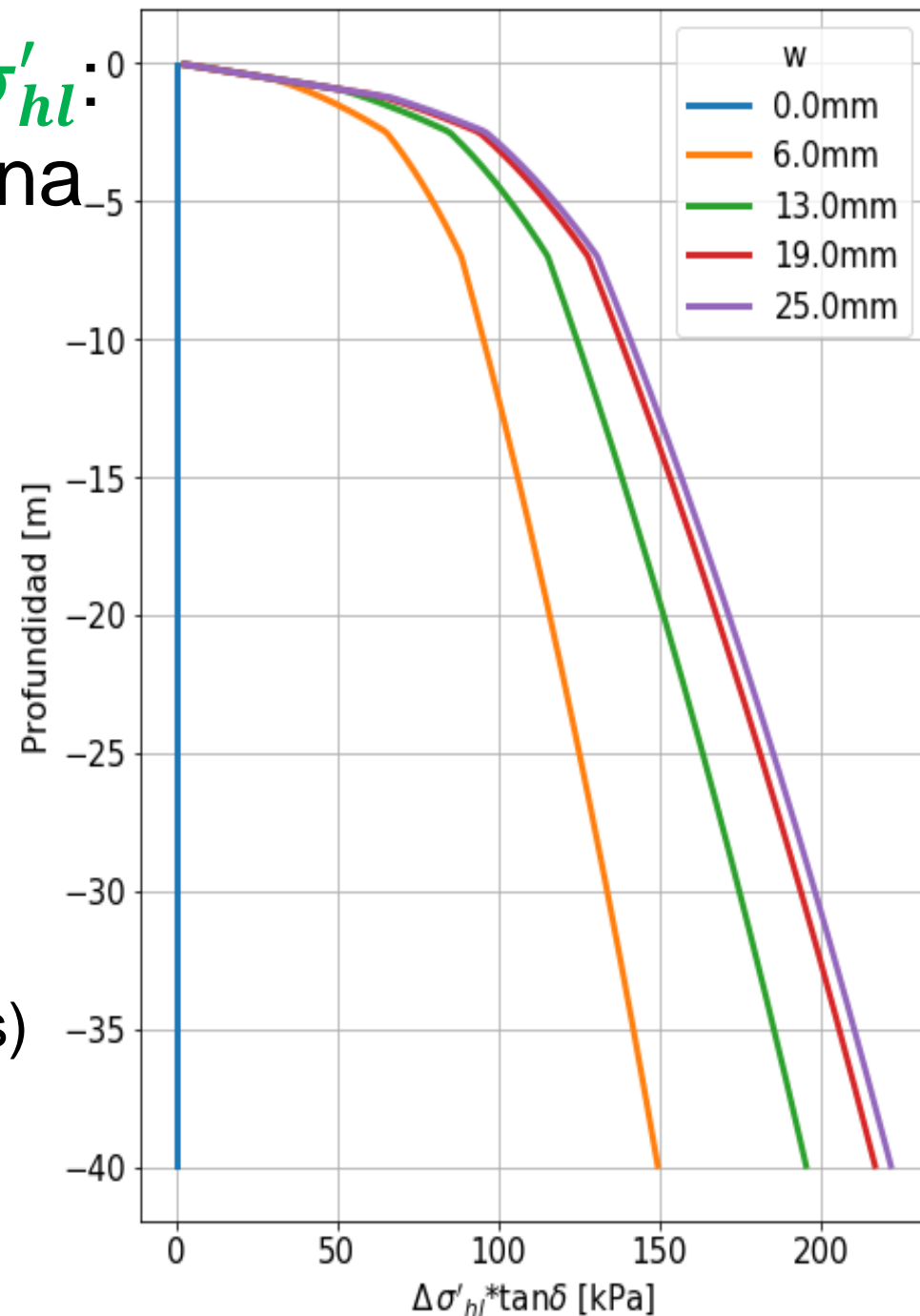
**Cuidado: la dilatancia no tiene límite en muchos modelos pero sí en la realidad.**



# Ejemplo de cálculo de $\Delta\sigma'_{hl}$ : pilotes perforados en arena

La resistencia al corte se agota rápidamente en los estratos superficiales

- Pilote elástico, mayor desplazamiento arriba que abajo
- Menor resistencia de fuste  $f_s$ 
  - Por menor confinamiento
  - Porque el suelo tiene peor calidad (o no habrían pilotes)
- Mayor “rigidez relativa”  $G/f_s$



# Contenido

- Definición y tipos de fundación profunda
- Métodos de instalación de pilotes
- **Diseño para estados límites últimos**
  - Carga límite de diseño por la punta
  - Carga límite de diseño por fricción
  - **Carga límite de diseño para pilotes hincados**
- Diseño para estados límites de servicio
- Aspectos de diseño



# Resumen de funcionamiento de pilotes hincados – fórmulas analíticas

Un pilote se hinca hasta “rechazo”. Llega a su posición “fallando” al terreno que lo rodea.

- Carga última por el fuste
  - Tensión horizontal  $\sigma'_{h0} \gg \sigma'_v$
  - Arenas: banda de corte en estado crítico:
    - $\Delta\sigma_h = 0$  y  $\delta = \phi_{cv}$
    - $f_s \cong K_p \cdot \sigma'_v \cdot \sin[\phi_{cv}] \cong 1.5 \cdot \sigma'_v$
  - Arcillas blandas consolidan luego de la hinca: incremento de resistencia
  - Arcillas compactas pueden sufrir ablandamientos.
- Punta: terreno pre-deformado por la hinca
  - $Q_{u,p}$  confiable pero se calcula con  $\phi_{cv}$

# Diseño de pilotes hincados mediante fórmula de hinca

La longitud de la ficha (y la carga última del pilote) queda controlada por:

- Capacidad y estado del martillo
- Estratigrafía del terreno
- Longitud, armadura y calidad de hormigón (para soportar tensiones durante la hinca)

En suelos densos es difícil superar una ficha de dos o tres diámetros

El pilote puede parar en lentes densas intermedias

