

Diseño de fundaciones profundas



Mecánica de Suelos y Geología
Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

Índice



- Definición y tipos de fundación profunda
- Diseño para estado límite último (ULS)
- Diseño para estado límite de servicio (SLS)
- Aspectos del diseño de fundaciones profundas

virtualuniversity.issmge.org

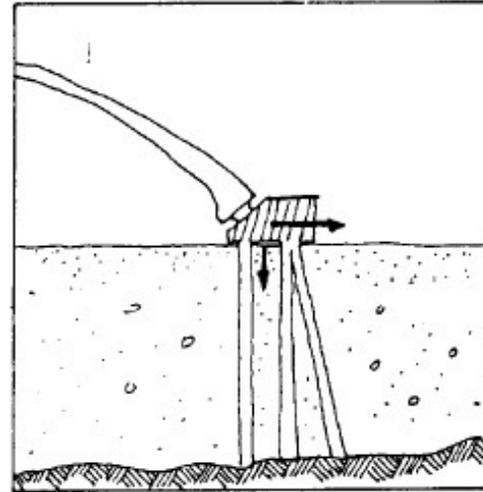


Fundaciones profundas: concepto

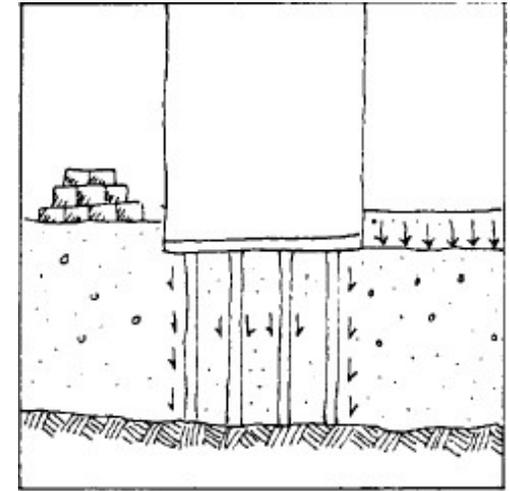


Las fundaciones profundas son elementos estructurales que transmiten cargas a terrenos profundos más competentes

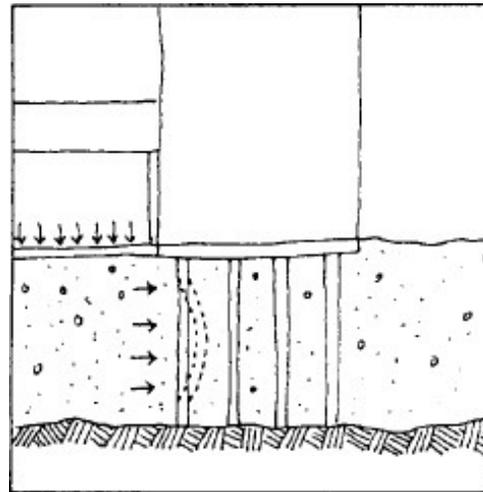
- Pueden ser
 - Pilotes (excavados o hincados)
 - Pilas (excavadas a mano)
- Pueden trabajar en grupo
- Pueden tomar cargas de diferentes tipos



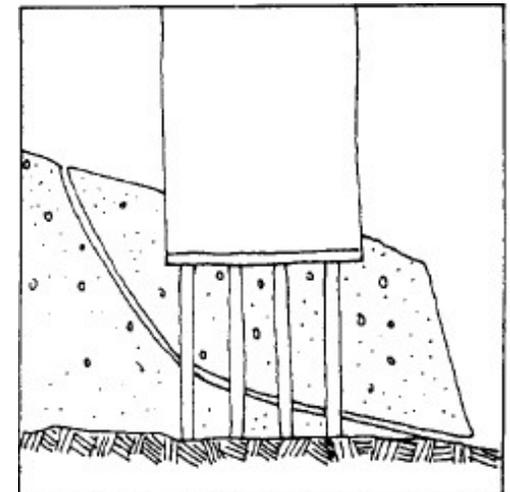
Cargas horizontales



Fricción negativa



Empujes laterales

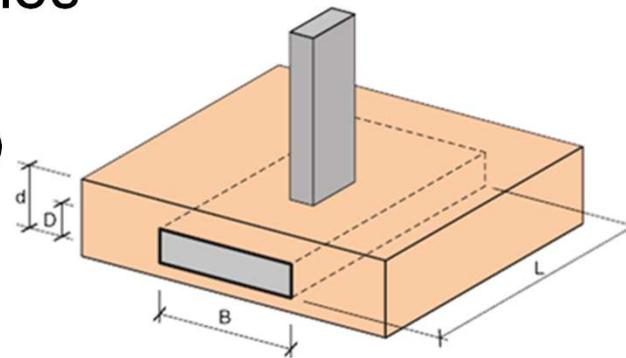


Esfuerzos de corte

Diferencia entre fundaciones superficiales y profundas

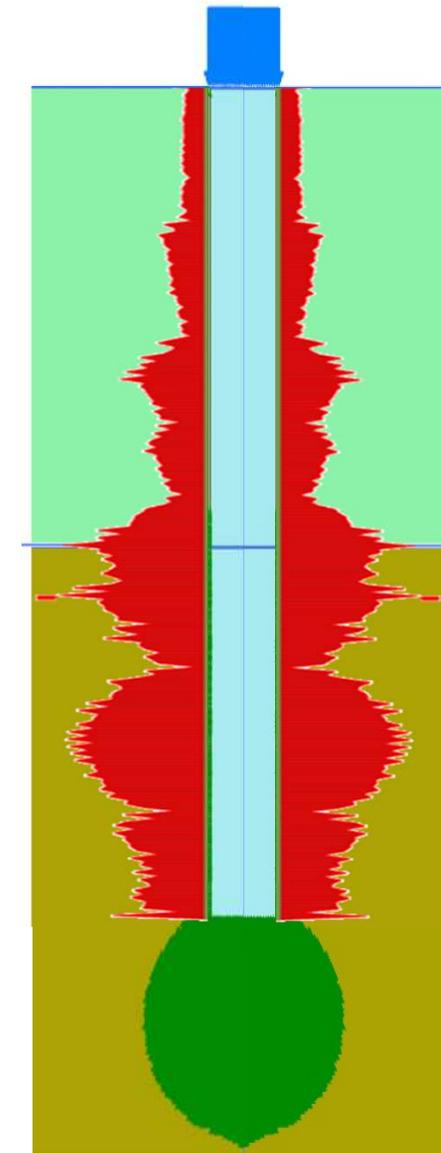


Las fundaciones superficiales (zapatas, vigas, plateas) transmiten carga al terreno por su plano inferior



superficial

Las fundaciones profundas transmiten carga al terreno por su plano inferior (la punta) y por la superficie lateral (el fuste)



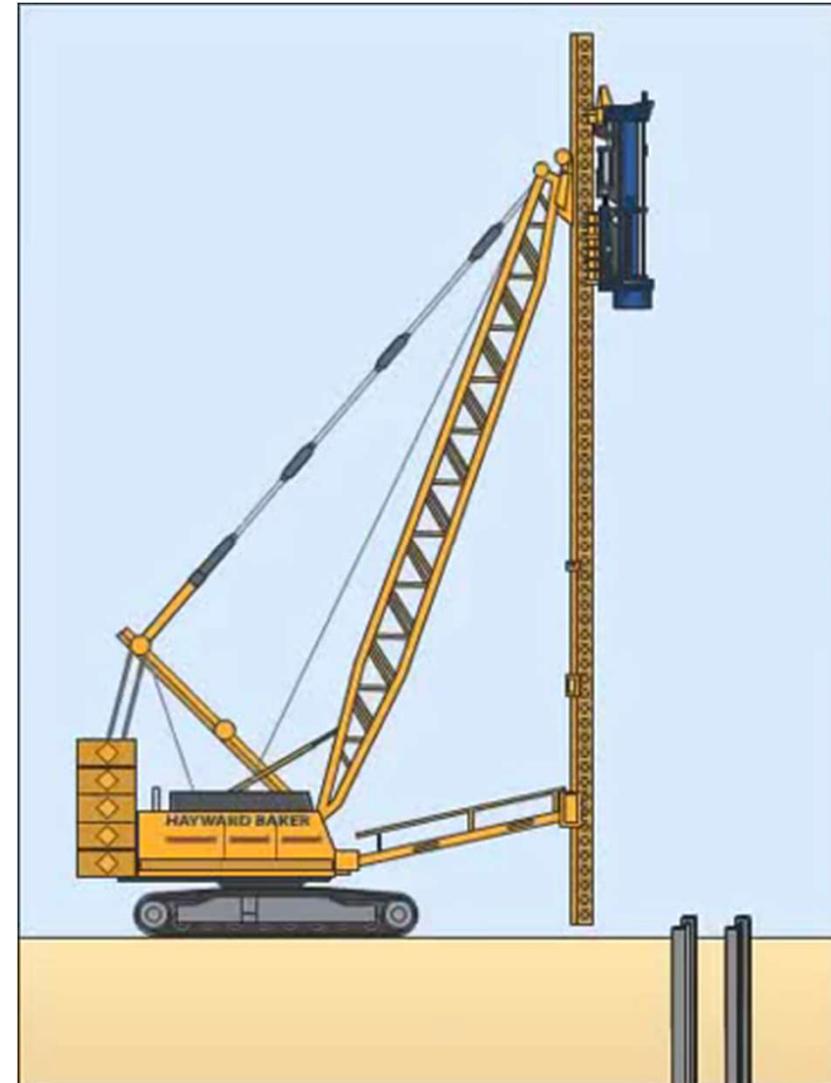
profunda

Métodos de instalación de pilotes: pilotes hincados



Con desplazamiento total de suelo

- **Hincado**
- Muy eficaces si el terreno superficial es blando y las cargas están distribuidas
- Profundidad “limitada”



Método de instalación de pilotes: pilotes perforados



Sin desplazamiento de suelo

- **Perforados con balde**, cuchara o mecha helicoidal corta
- Muy eficaces para cargas grandes y en ambiente urbano
- Profundidad “ilimitada”



Método de instalación de pilotes: pilotes perforados



Con desplazamiento parcial

- Hincado con punta abierta
- Preperforado e hincado
- **Hélice continua (CFA)**
- Muy eficaces para cargas medias y en ambiente urbano
- Profundidad “limitada”

Índice



- Definición y tipos de fundación profunda
- **Diseño para estado límite último (ULS)**
 - Carga límite de diseño por la punta
 - Carga límite de diseño por fricción
- Diseño para estado límite de servicio (SLS)
- Aspectos del diseño de fundaciones profundas

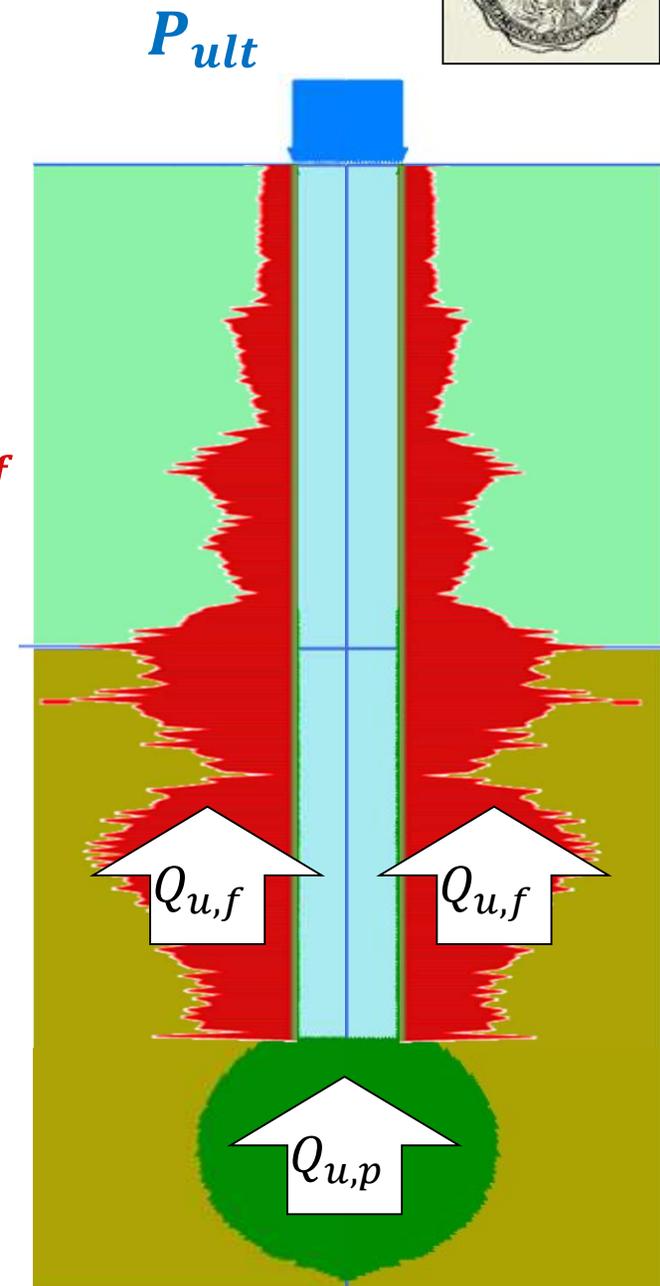
Carga última de un pilote



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

$$Q_{ult}[kN] = Q_{u,p} + Q_{u,f} = P_{ult}$$

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



Carga última de un pilote

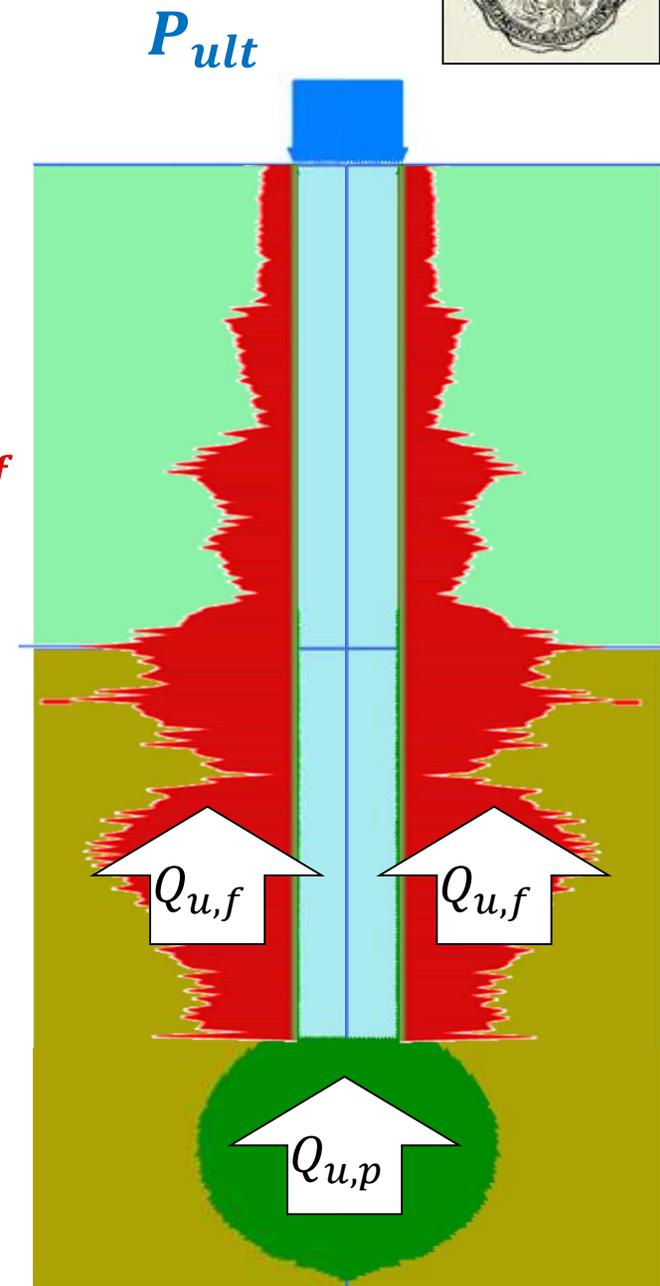


(Conceptualmente) la carga última es la suma de la carga última por la punta $Q_{u,p}$ más la carga última por fricción del fuste $Q_{u,f}$

$$Q_{ult}[kN] = Q_{u,p} + Q_{u,f} = P_{ult}$$

¿Porqué “conceptualmente”?

- Porque la carga última sólo se desarrolla para deformaciones enormes que dejan fuera de servicio a la estructura que hay que soportar



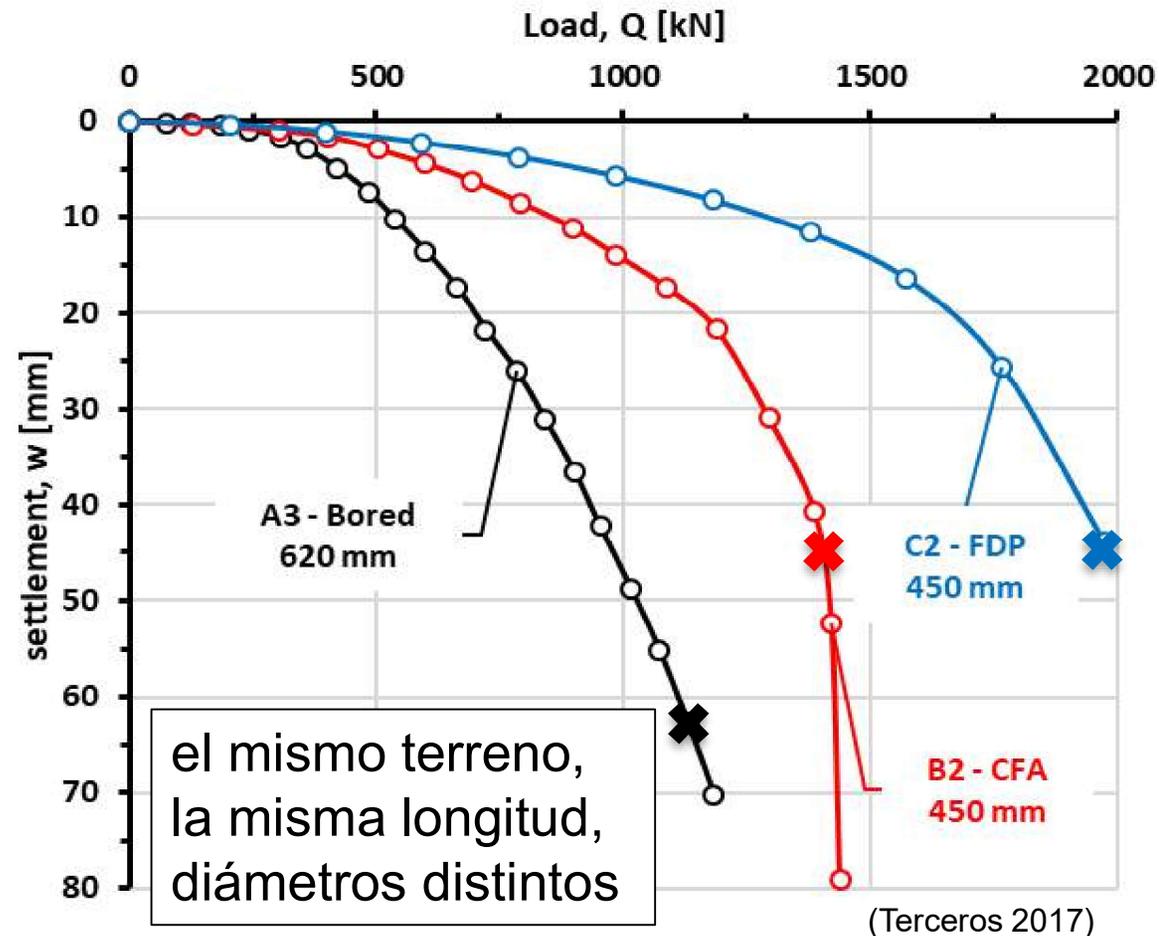
El método constructivo controla la respuesta



Pilote perforado $\Phi = 0.62 \text{ m}$: $Q_{ult} \cong 1.05 \text{ MN}$

- Al perforar, se relaja la tensión del terreno en el fuste y la punta
- Excavación disturba el terreno bajo la punta

El pilote perforado es ejecutado in situ y NO siempre son las mismas personas y mismos equipos de trabajo



El método constructivo controla la respuesta



Pilote perforado $\Phi = 0.62$ m: $Q_u \cong 1.05$ MN

- Los pilotes perforados se ejecutan con aporte de lodo de perforación (perforación “inundada”)
- Si la técnica de excavación es incorrecta, se depositan sedimentos en el fondo: la punta prácticamente no trabaja o tienen que deformarse muchísimo para tomar carga

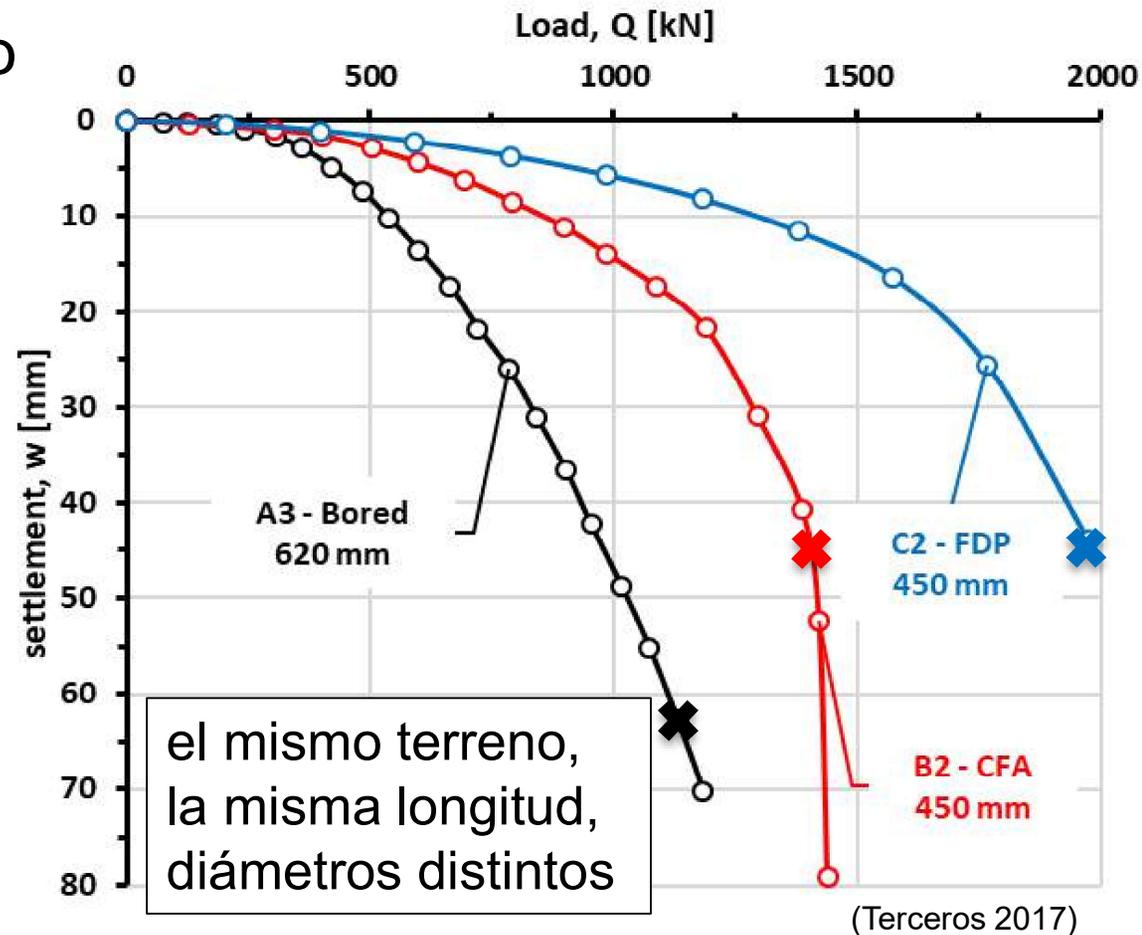


El método constructivo controla la respuesta



Pilote CFA $\Phi = 0.45$ m: $Q_u \cong 1.35$ MN

- No requiere aporte de lodo
- Hélice se mantiene rellena con suelo: menor relajación de tensiones
- Excavación no disturba el terreno bajo la punta
- Extracción parcial del terreno: las tensiones horizontales se reducen: reduce la resistencia por el fuste



El método constructivo controla la respuesta

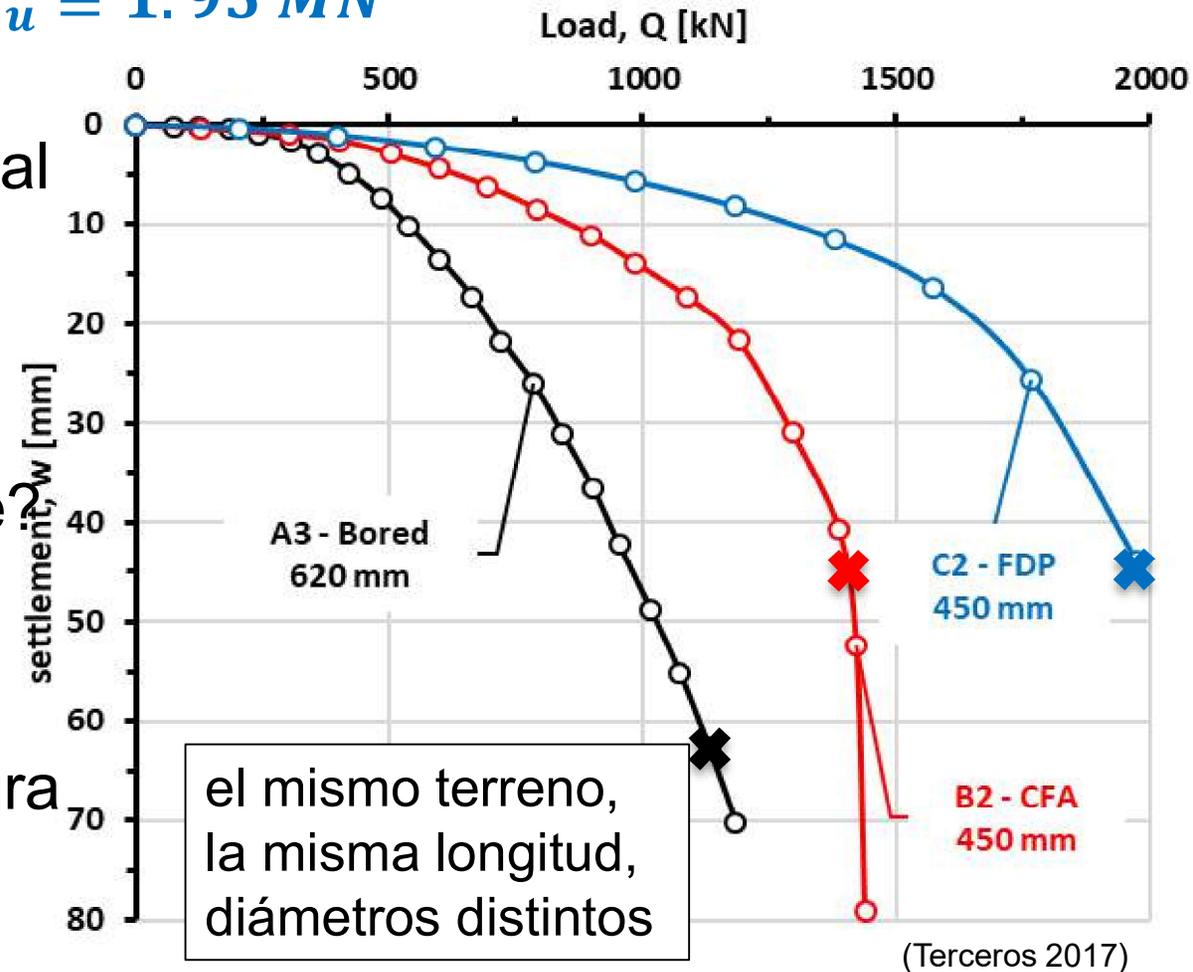


Pilote FDP $\Phi = 0.45$ m: $Q_u \cong 1.95$ MN

- No hay extracción: máxima tensión horizontal
- Excavación no disturba el terreno bajo la punta (punta queda cónica)

¿Porqué no usarlo siempre?

- Sólo pequeño diámetro
- Sólo suelo blando
- Hay que colocar armadura después de colocado el hormigón



¿Existe el estado límite último de un pilote?



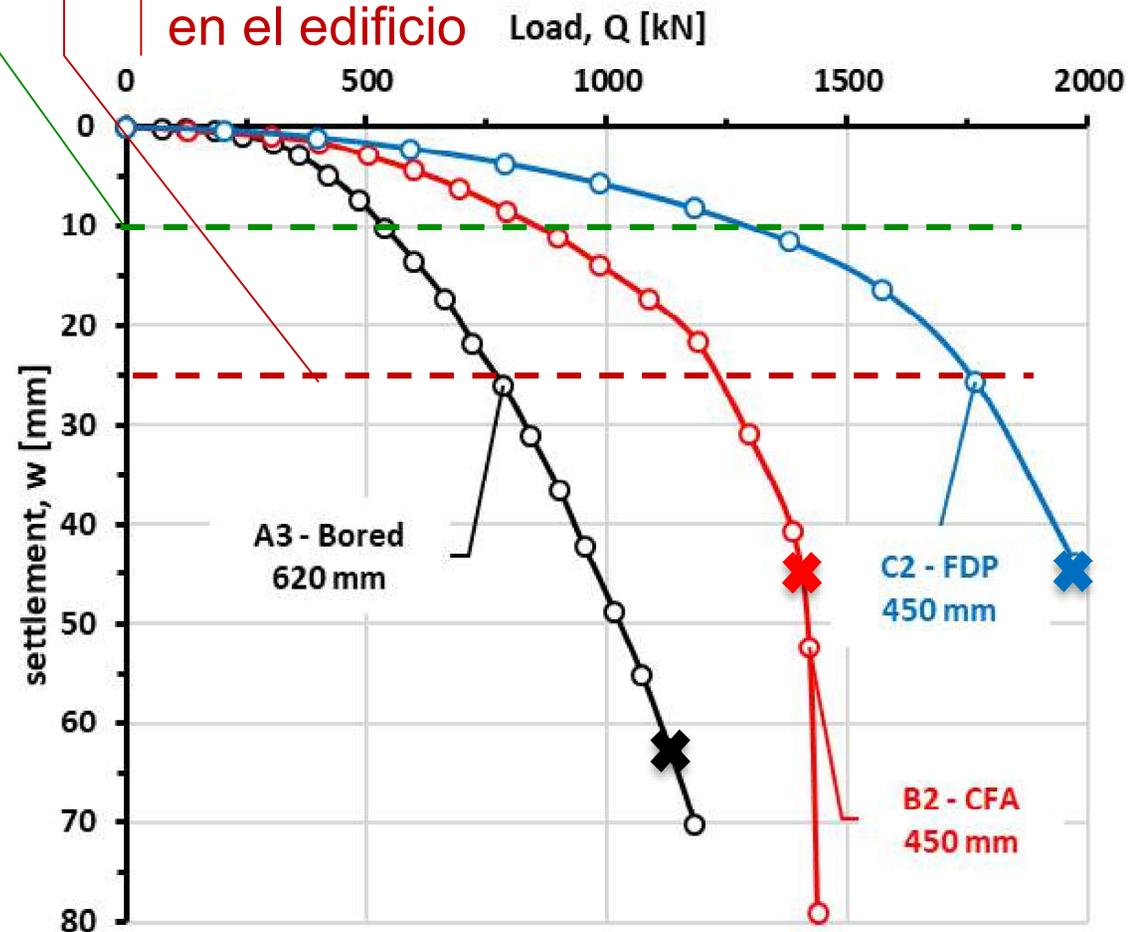
El estado límite último ¿es del pilote?, o ¿es de la superestructura?

- No hay deformación “catastrófica”
- Si el pilote se descarga recupera su “capacidad”

El “estado límite último” (ULS) es de la estructura que soporta (vivienda, galpón, puente, turbina)

Fisuras cosméticas en mampostería

Daño estructural en el edificio



(Terceros 2017)

Diseño de un pilote para ULS



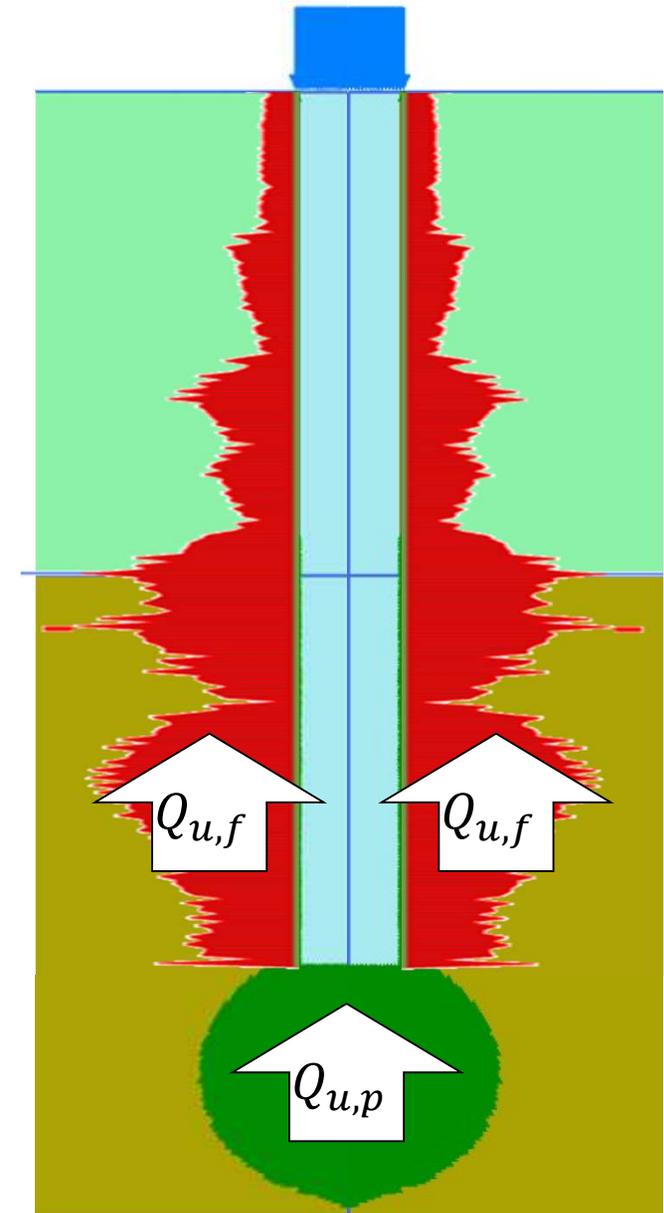
Análisis LRFD: resistencia minorada (RF) mayor que la suma de las cargas mayoradas (LF)

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

donde $Q_d[kN] = RF_p \cdot Q_{u,p}^* + RF_f \cdot Q_{u,f}$

RF_p y RF_f dependen de:

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



Algunos factores de resistencia **RF** para puentes (¡no los use sin pensar!)



Los factores **RF** dependen de

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

	Suelo	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
	Roca	Carter & Kulhawy (1988) O'Neill & Reese (1999)	Encamisado	0.50
				Todos
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

(Pailowsky 2002, 2004)

Índice



- Definición y tipos de fundación profunda
- Diseño para estado límite último (ULS)
 - Carga límite de diseño por la punta
 - Carga límite de diseño por fricción
- Diseño para estado límite de servicio (SLS)
- Aspectos del diseño de fundaciones profundas

Carga última por la punta

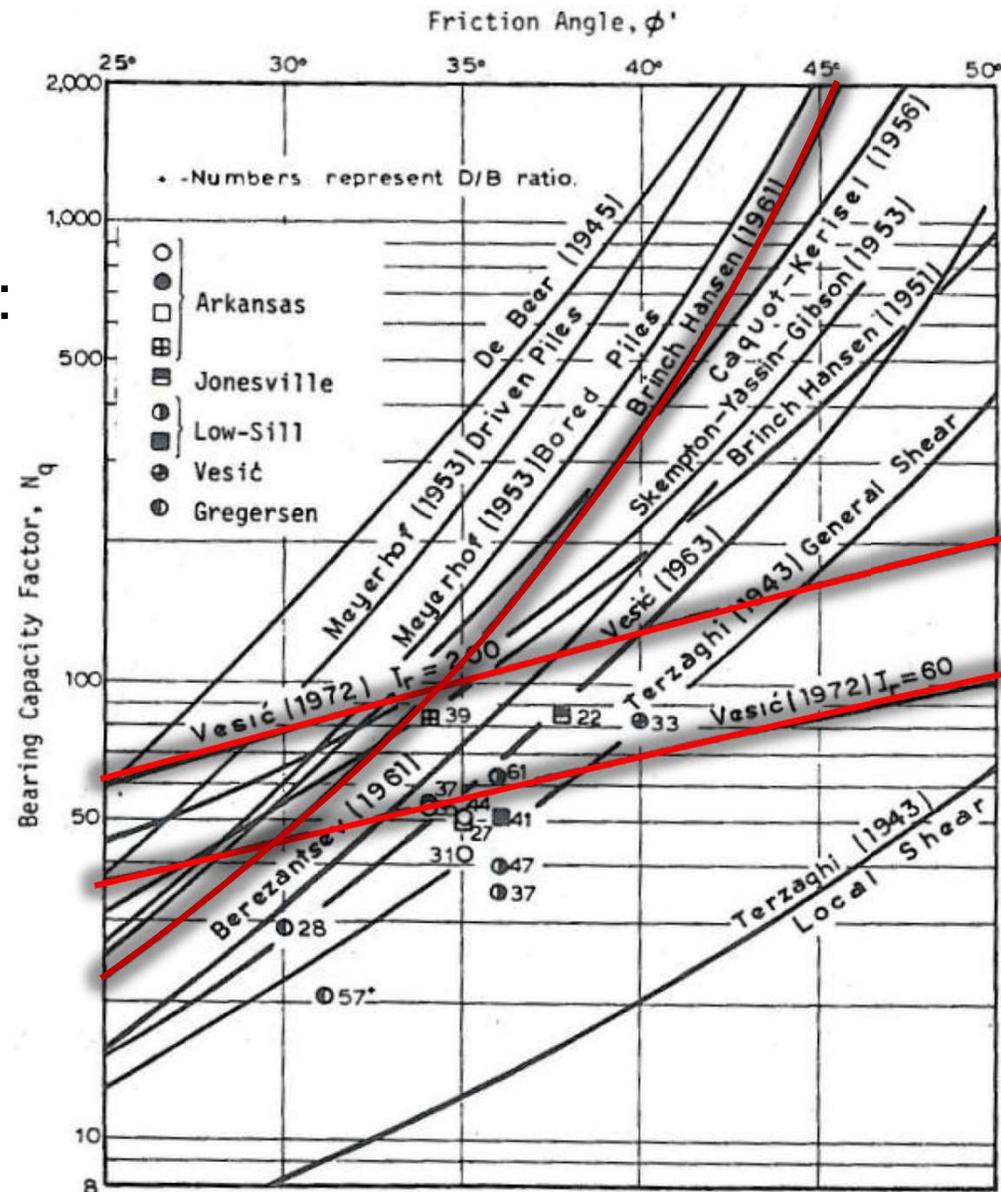
$Q_{u,p}$

Hay dos mecanismos posibles

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

La carga última por la punta es la menor de ambas

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





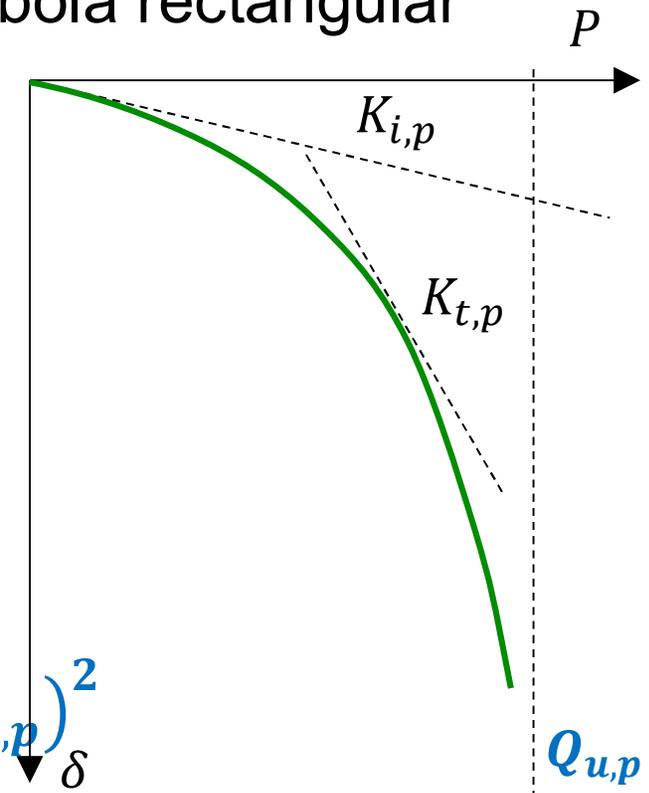
Carga última nominal por la punta $Q_{u,p}^*$ de pilotes perforados

Punta de pilotes perforados: Deformaciones enormes para alcanzar la carga última $\rightarrow Q_{u,p}^* < Q_{u,p}$

- Curva $P - \delta$ puede modelarse como hipérbola rectangular

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

- 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: $K_{t,p}[\delta] = K_{i,p} (1 - P/Q_{u,p})^2$





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

Criterio 1: Asentamiento total de la punta δ_t

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

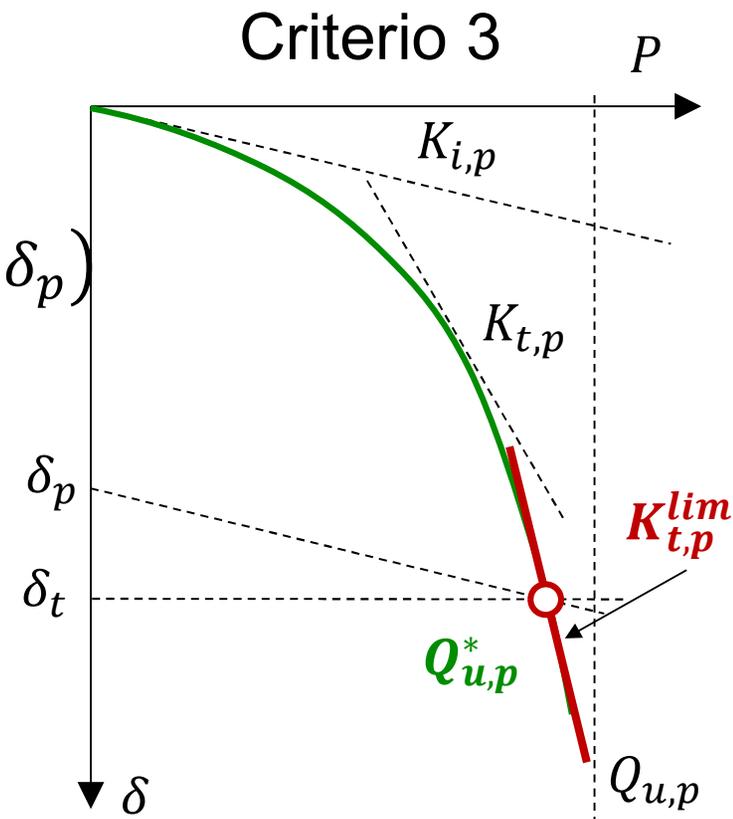
Criterio 2: Asentamiento permanente δ_p

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

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 límite de diseño por la punta

$$Q_{d,p}$$



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 ¿ $RF_p \cong 0.8$?
 - Pilote perforado con lodo, (puede tener) punta sucia, el terreno debe deformarse para desarrollar carga, ¿ $RF_p \cong 0.5$?

Índice



- Definición y tipos de fundación profunda
- **Diseño para estado límite último (ULS)**
 - Carga límite de diseño por la punta
 - Carga límite de diseño por fricción
- Diseño para estado límite de servicio (SLS)
- Aspectos del diseño de fundaciones profundas

Carga última por fricción lateral

$Q_{u,f}$



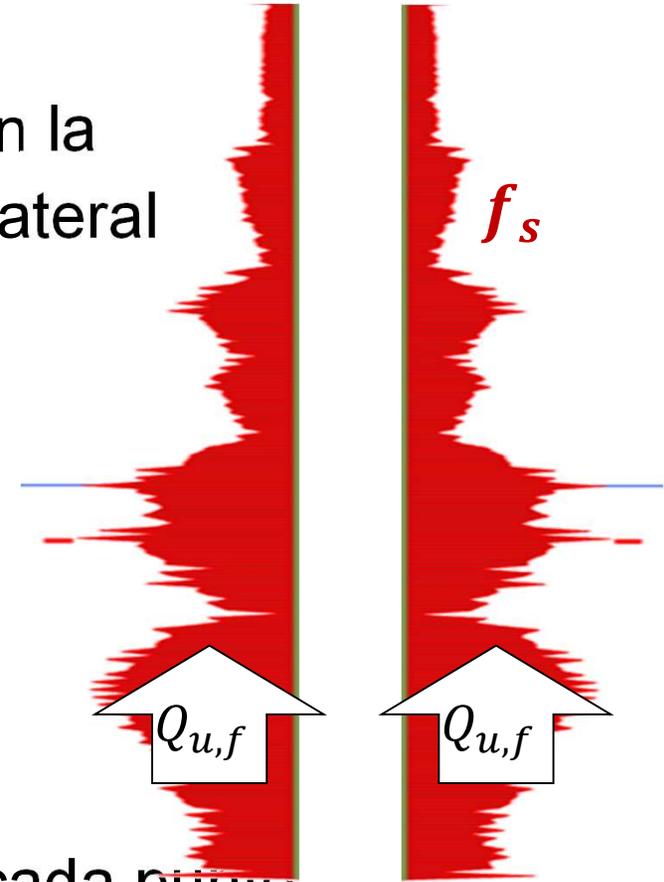
$Q_{u,f}$ es la integral de la resistencia al corte en la interfaz suelo-pilote f_s en toda la superficie lateral

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

f_s depende

- De la resistencia al corte del terreno
- Del método constructivo
 - Tensión horizontal σ'_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, condición drenada



- Resistencia al corte del suelo: $s = \tau = \sigma'_h \tan[\phi]$
- 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: $K_0 < K < 1.0$
 - δ : acero: $\delta = 20^\circ$ | madera: $\delta = 2/3 \phi$ | hormigón: $\delta = 3/4 \phi$
- **Método simplificado:** $f_s = \beta \cdot \sigma'_v$
 - 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: $\beta = 2.0 - 0.15z^{0.75[m]}$

Predimensionamiento de fricción lateral, condición no drenada



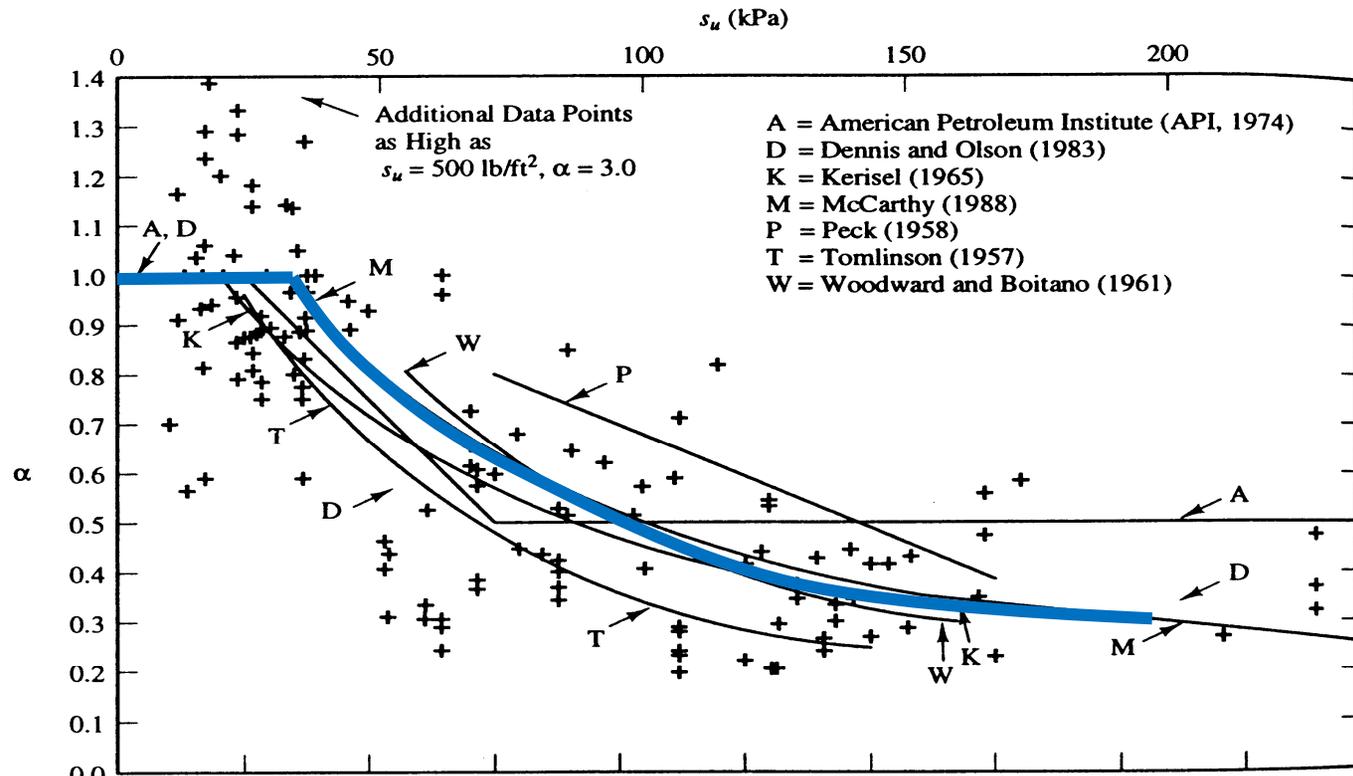
- Resistencia al corte del suelo:
- Método simplificado:**
 - $\alpha = 0.21 + 26kPa/s_u \leq 1.0$

$$s = \tau = s_u$$

$$f_s = \alpha \cdot s_u$$

Dispersión grande:

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



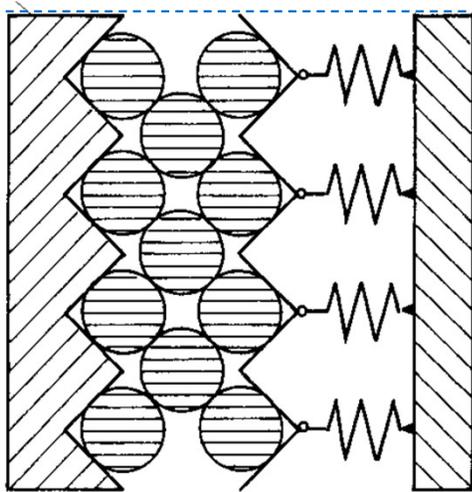


Mecanismo de resistencia por el fuste (drenada): fricción y dilatancia

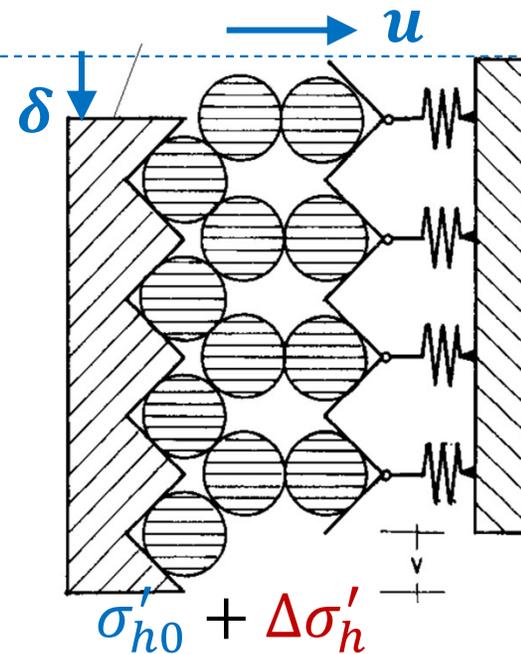
Resistencia al corte de la interfaz: $f_s = \sigma'_h \tan[\delta]$

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

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



σ'_{h0}



$\sigma'_{h0} + \Delta\sigma'_h$

Tensión horizontal antes de la carga σ'_{ho} : comportamiento de la interfaz pilote-terreno

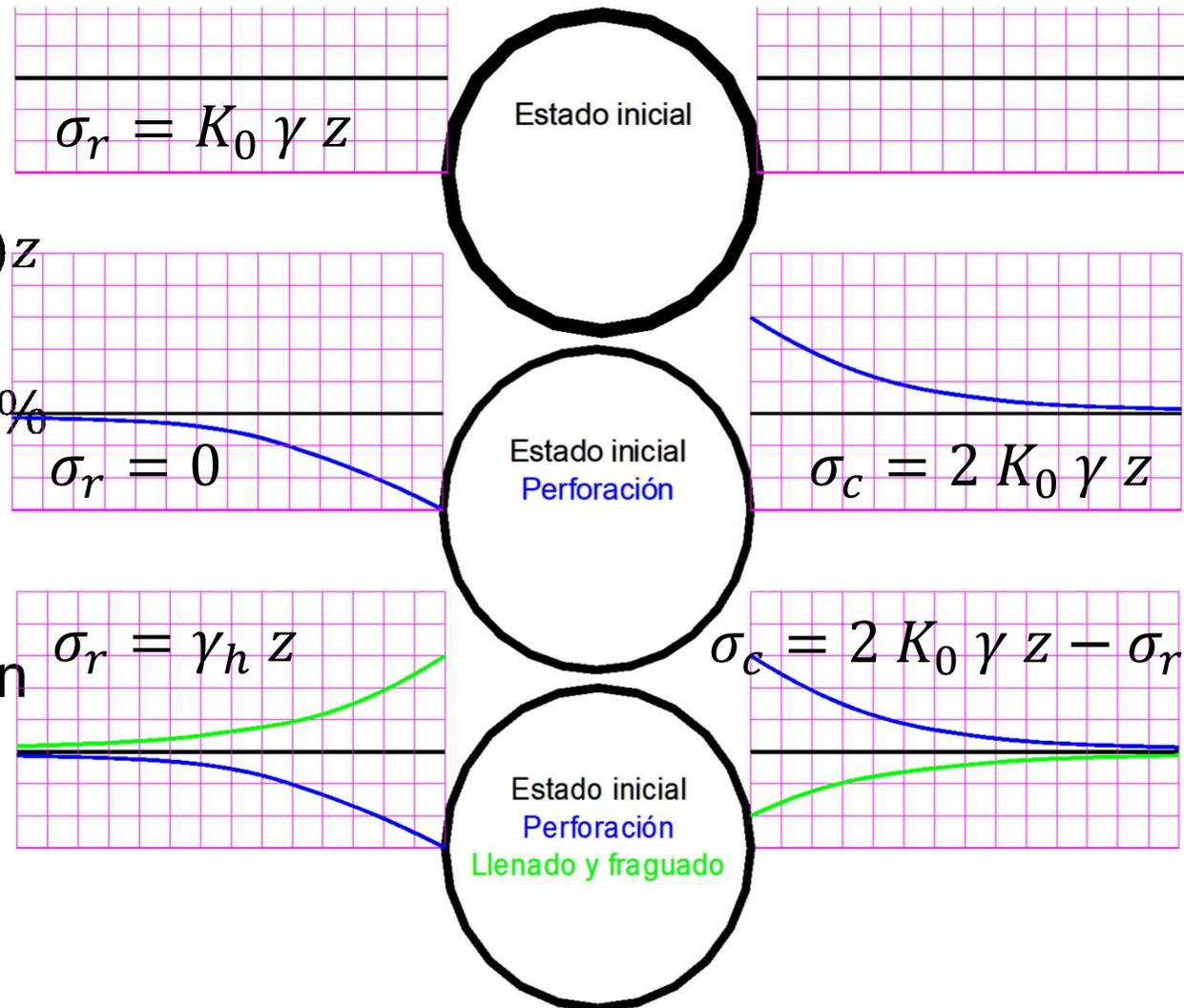


Pilote perforado

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

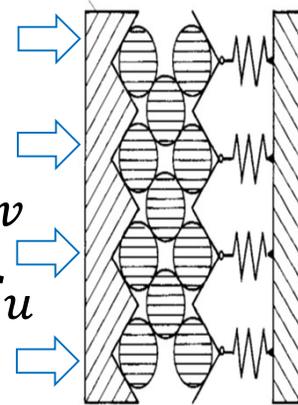


Parámetros para el cálculo de la resistencia por el fuste - resumen



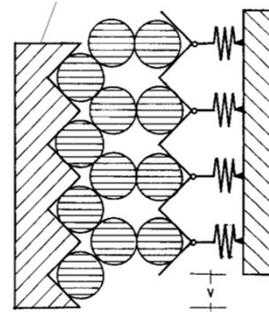
Pilotes hincados (con desplazamiento)

- Desplazamiento lateral de suelo grande: $\sigma'_h \gg \sigma'_v$
- Arenas: distorsión enorme en superficie lateral: $\phi = \phi_{cv}$
- Arcillas blandas: σ'_h induce consolidación radial: $f_s > s_u$
- Arcillas duras: se rompe estructura: $f_s < s_u$



Pilotes perforados (sin desplazamiento)

- Desplazamiento lateral de suelo sólo por dilatación
- 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 dilatación $\sigma'_h \gg \sigma'_v$ (mejora resistencia drenada)



Índice



- Definición y tipos de fundación profunda
- **Diseño para estado límite último (ULS)**
 - Carga límite de diseño por la punta
 - Carga límite de diseño por fricción
 - **Carga límite de diseño de pilotes hincados**
- Diseño para estado límite de servicio (SLS)
- Aspectos del diseño de fundaciones profundas

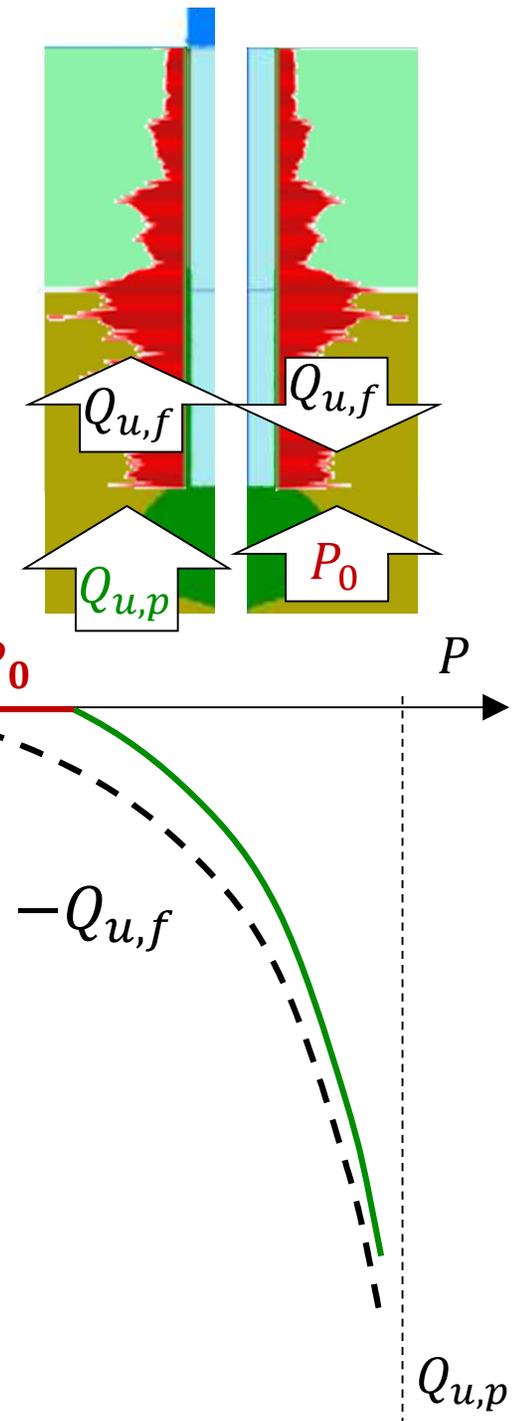
Carga última nominal por la punta $Q_{u,p}^*$ de pilotes hincados

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 movilizada
 - 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 $Q_{u,p}$



Resumen de funcionamiento de pilotes hincados – fórmulas analíticas



Un pilote se hinca hasta “rechazo”

Llega a su posición de servicio “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 muy significativo
 - Arcillas compactas pueden sufrir ablandamiento
- Carga última por la punta: terreno pre-deformado
 - $Q_{u,p}$ es confiable, pero debe calcularse con ϕ_{cv}

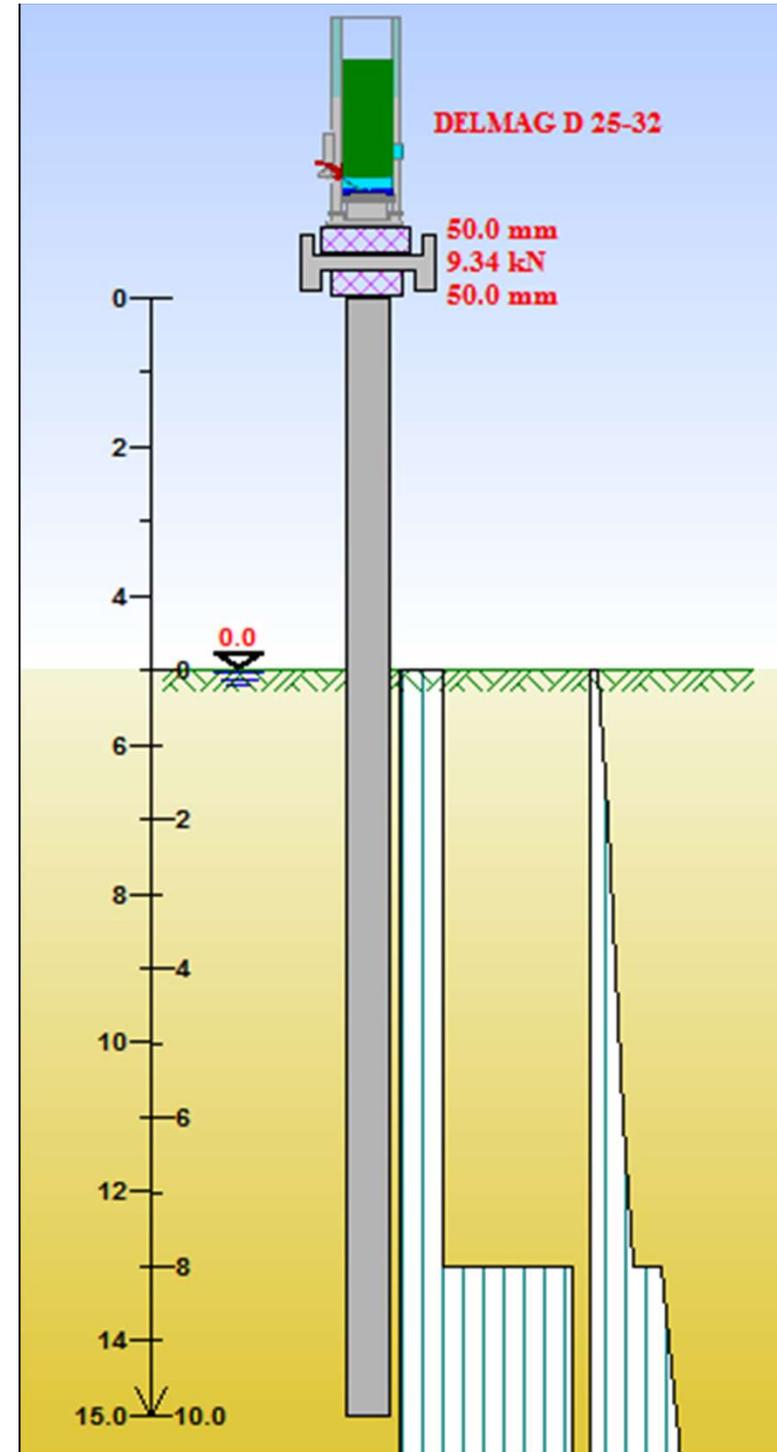
Diseño de pilotes hincados mediante fórmula de hinca

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



Fórmula de hinca WSDOT

<https://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/610.1.pdf>

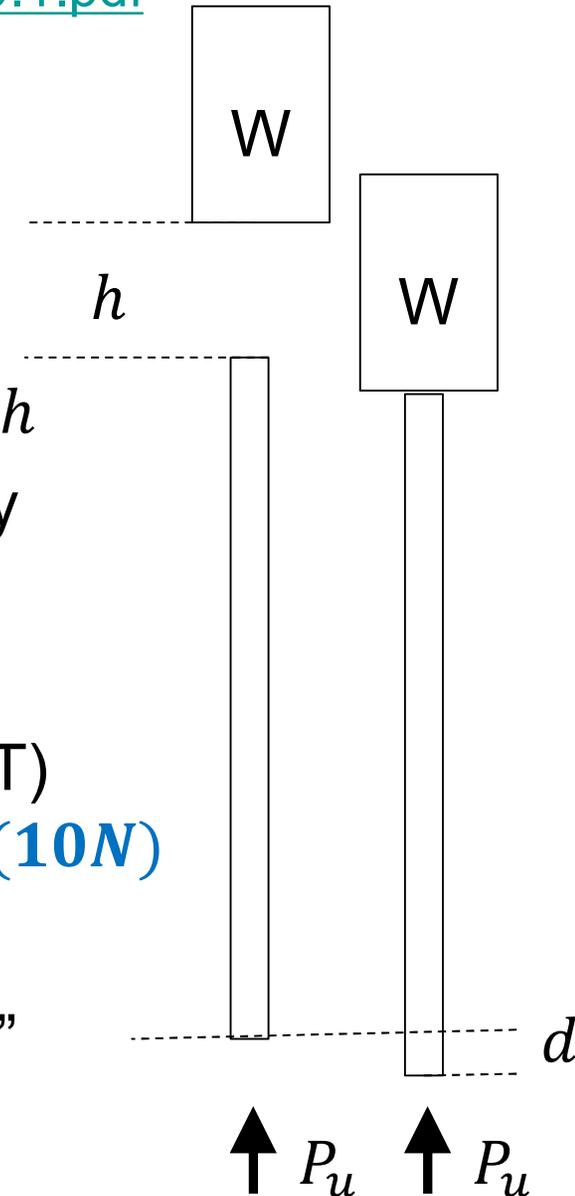


- En un choque rígido ideal: $P_u \cdot d = W \cdot h$
- En un choque elástico: $P_u \cdot (d + d_e) = W \cdot h$
- El martillo es un motor: $P_u \cdot (d + d_e) = \eta \cdot W \cdot h$
 - Se pierde energía en el motor, el impacto y la compresión elástica de pilote y terreno

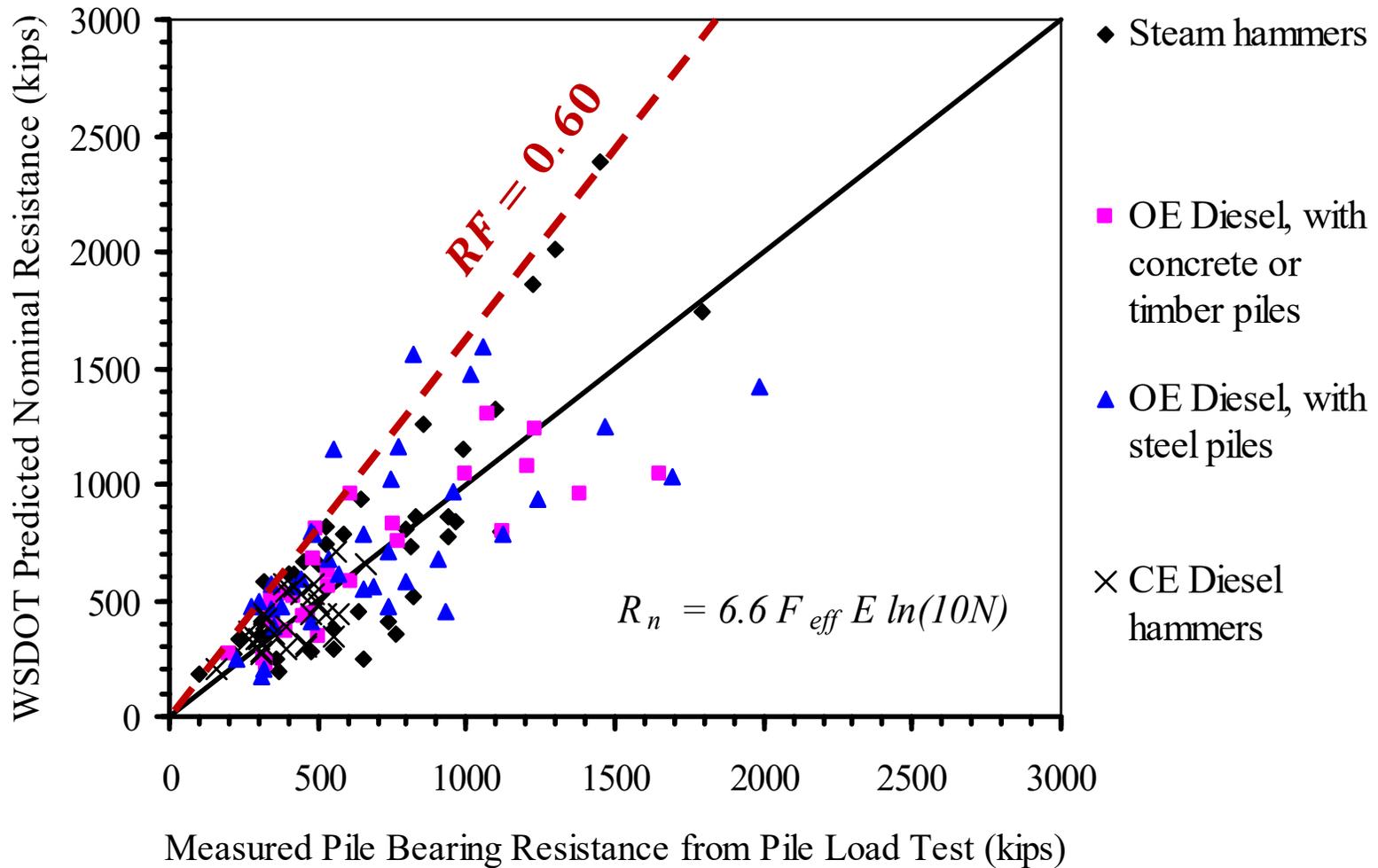
- El criterio de rechazo es (por ejemplo WSDOT)

$$R_n[kN] = 21.6 \cdot F_{eff} \cdot E[kNm] \cdot \ln(10N)$$

- E : energía de hinca
- N : prom golpes/pulgada para las últimas 4"
- F_{eff} : factor eficiencia (0.35|0.55)



Validación de fórmula de hinca WSDOT



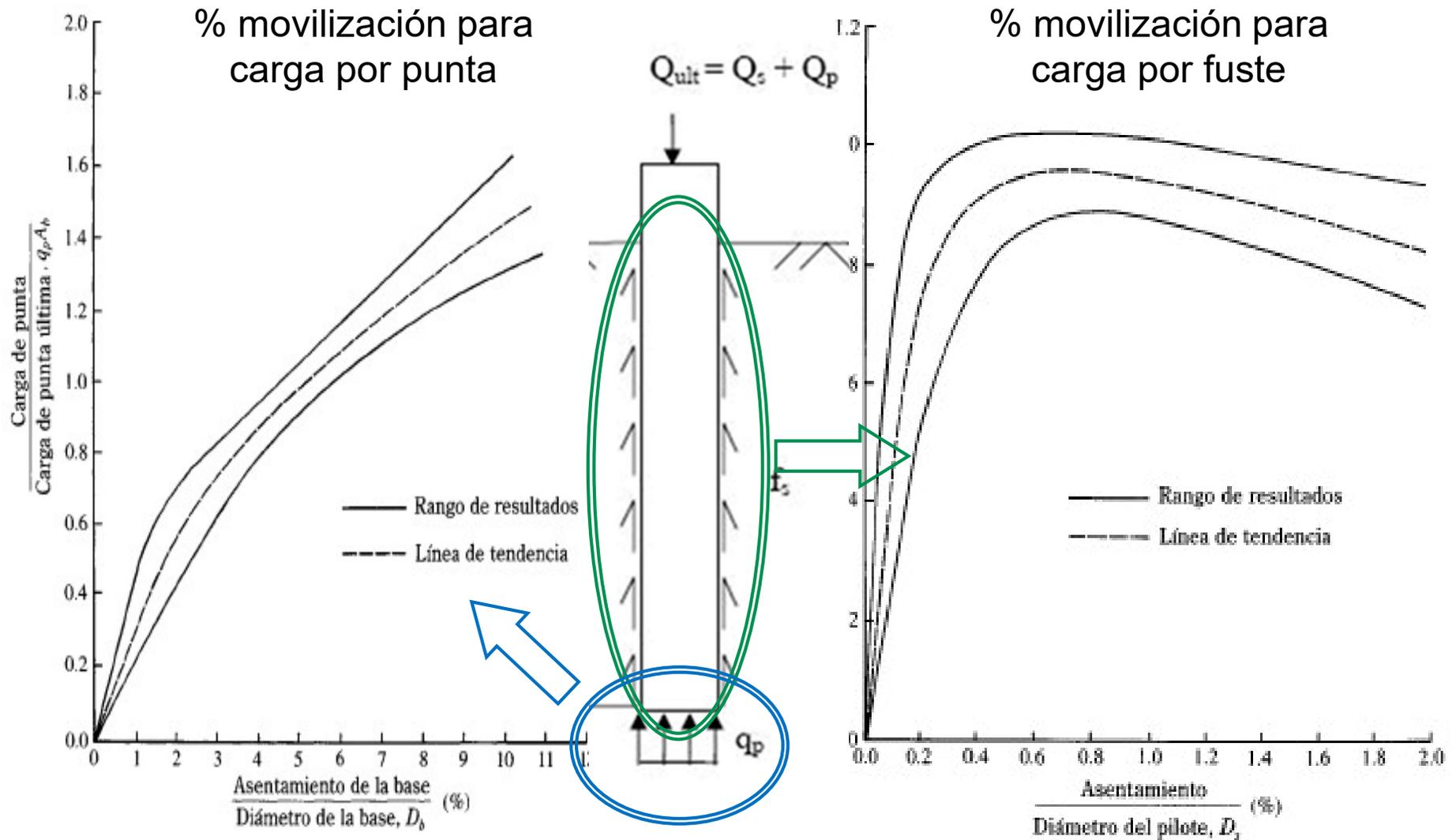
(WSDOT)

Índice



- Definición y tipos de fundación profunda
- Diseño para estado límite último (ULS)
- **Diseño para estado límite de servicio (SLS)**
- Aspectos del diseño de fundaciones profundas

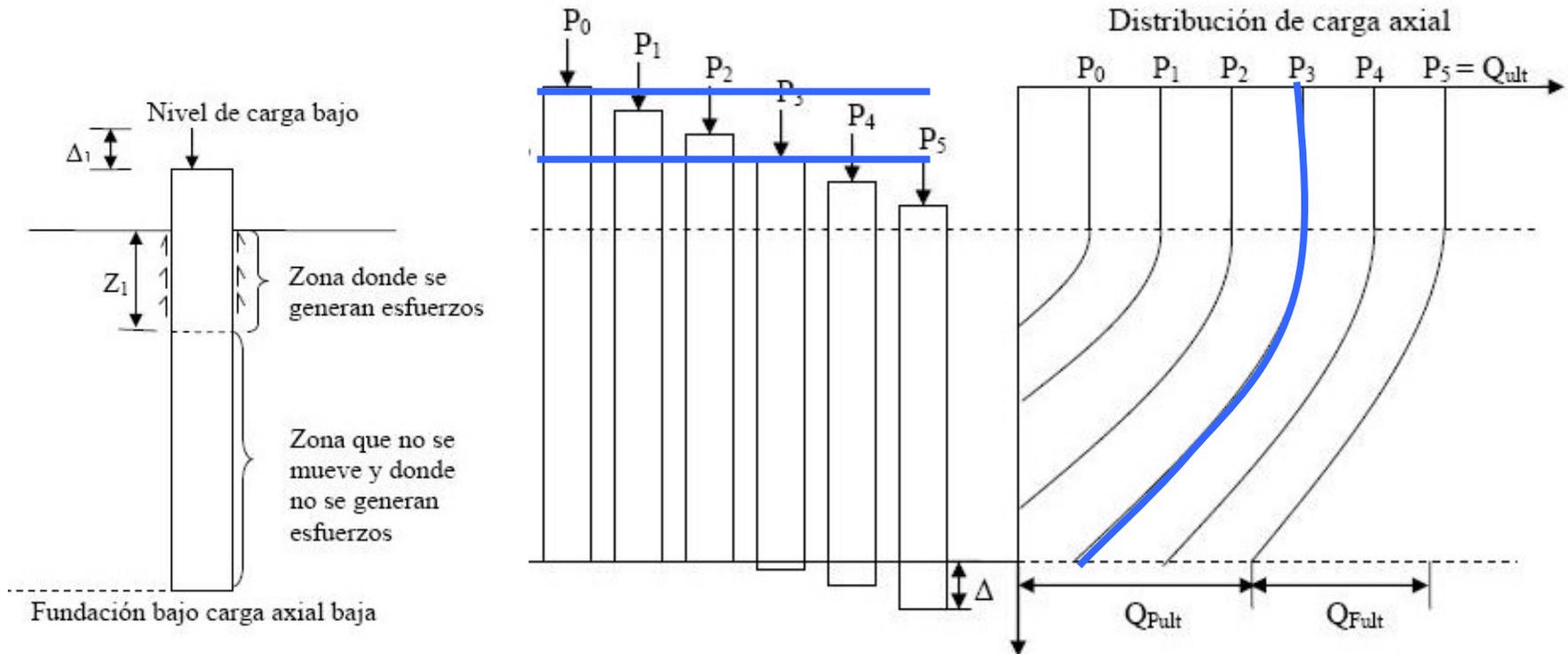
Mecanismos resistentes y deformación de pilotes



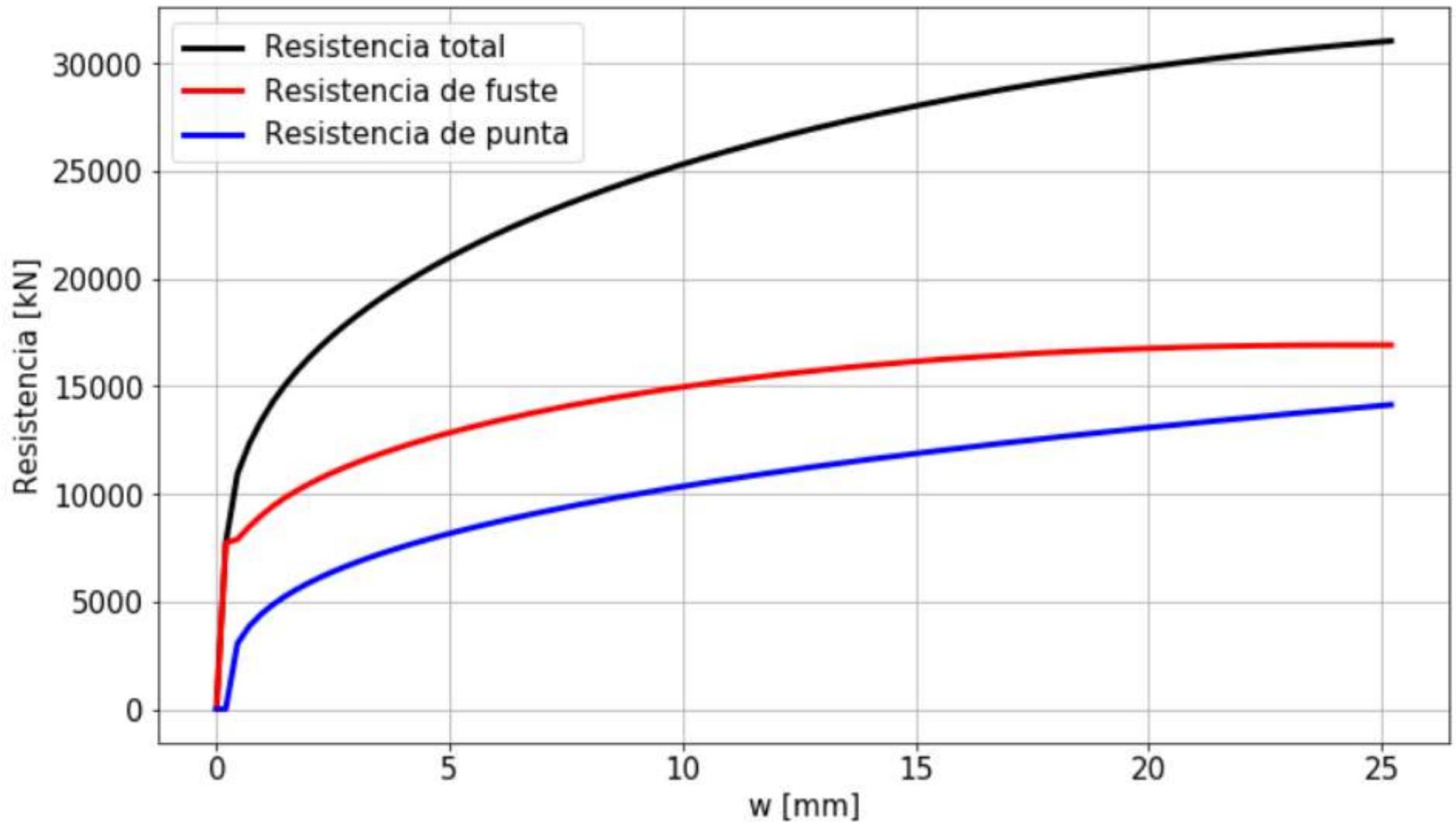
Mecanismos resistentes y deformación de pilotes



El pilote toma cargas permanentes por fricción = fuste
La reacción de la punta sólo ocurre para deformaciones grandes



Curva carga-asentamiento: ejemplo de respuesta global de un pilote aislado



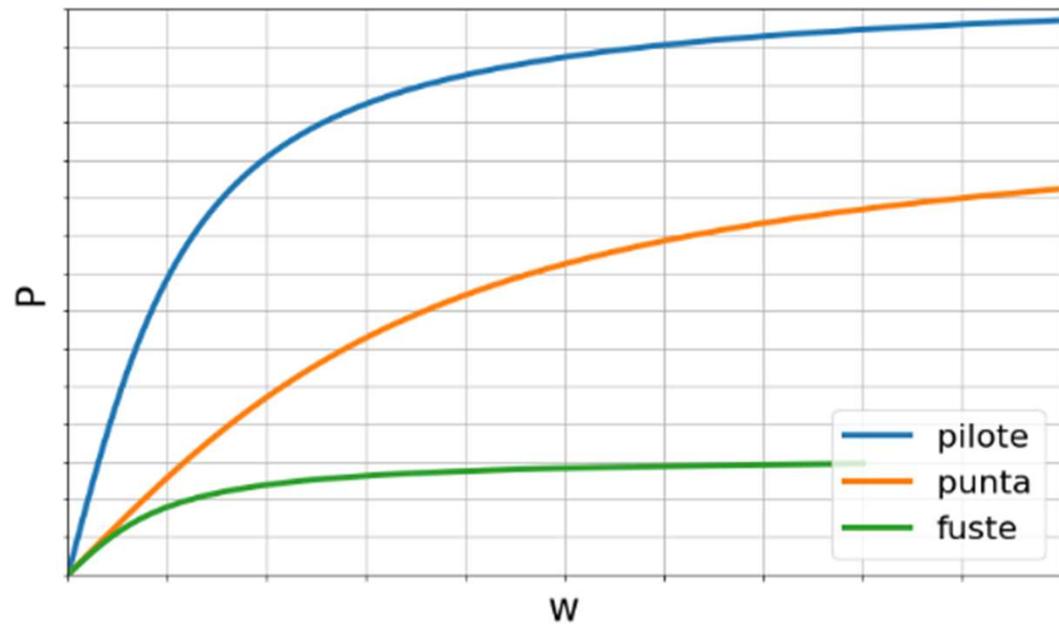
Curva carga-asentamiento: Proyecto CIRSOC 402 curva $P - \delta$ de diseño



Si ULS es de la superestructura y no del pilote:

Procedimiento para determinar la curva $P - \delta$

- Parámetros de rigidez medios
- Parámetros resistentes característicos
- ¿Es esta una buena curva para diseño?



(Giurich 2020)

Esto permite que el estructuralista elija el asentamiento SLS y ULS de la superestructura y determine la carga de diseño

Índice



- Definición y tipos de fundación profunda
- Diseño para estado límite último (ULS)
- Diseño para estado límite de servicio (SLS)
- Aspectos del diseño de fundaciones profundas

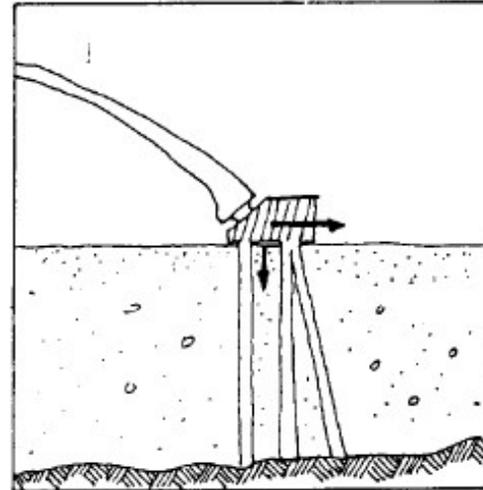
Diseño de fundaciones profundas



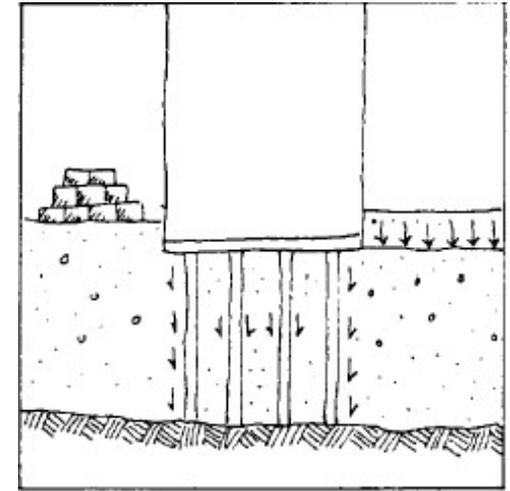
Los aspectos del diseño de fundaciones profundas incluyen

- Grupos de pilotes
- Fricción negativa
- Pilotes con cargas transversales
- Sistemas constructivos
- Diseño de cabezales
- Plateas sobre pilotes

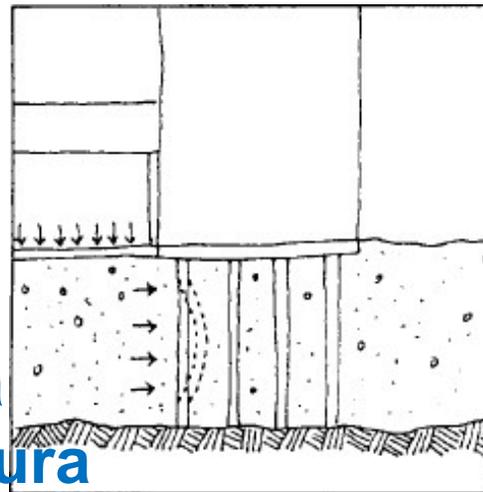
Temas de Geotecnia Aplicada e Interacción Terreno-Estructura



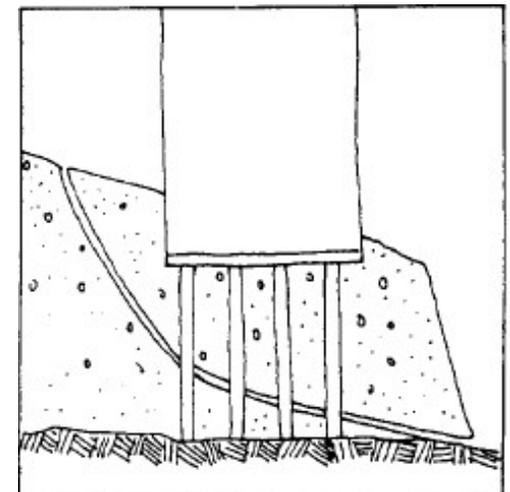
Cargas horizontales



Fricción negativa



Empujes laterales



Esfuerzos de corte

Diseño de fundaciones profundas: grupos de pilotes

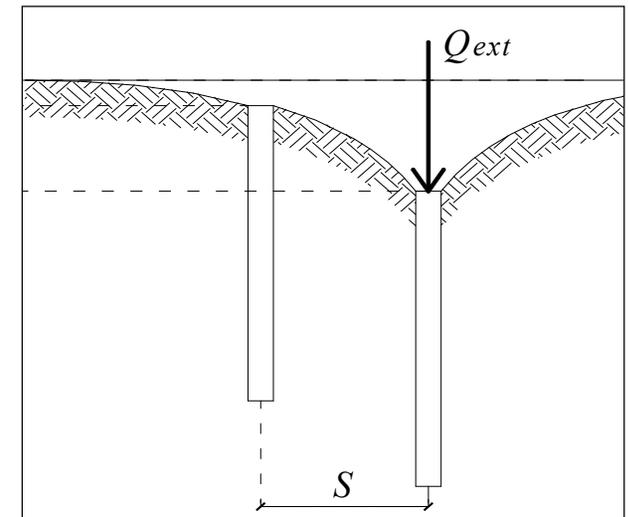
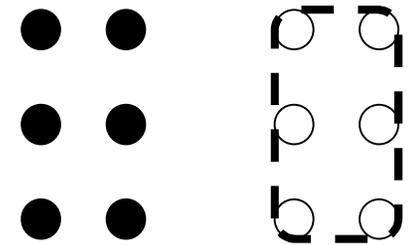


La carga última de un grupo de pilotes puede estimarse como la menor entre

- La suma de las cargas últimas individuales
- La carga última del contorno de pilotes como una pila única

La carga de servicio de un grupo de pilotes depende del asentamiento límite

- Suelos bajo la punta del grupo
- Interacción entre los diferentes pilotes



(Bertossa 2002)

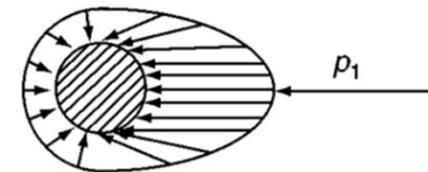
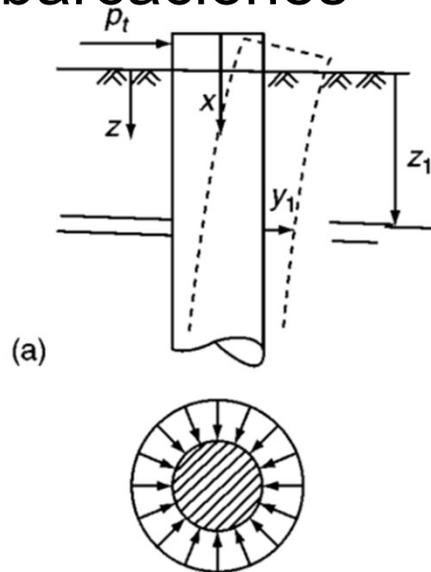


Diseño de fundaciones profundas: pilotes con cargas transversales

Cargas transversales al pilote

- Acciones estáticas
- Empuje de suelos
- Acciones dinámicas | Viento | Sismo
- Olas, Impacto de embarcaciones
- Fundaciones de máquinas

Existen métodos de
diseño para determinar
estados ULS y SLS



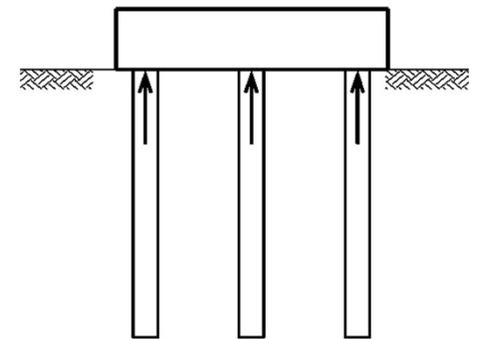
Diseño de fundaciones profundas: platea sobre pilotes



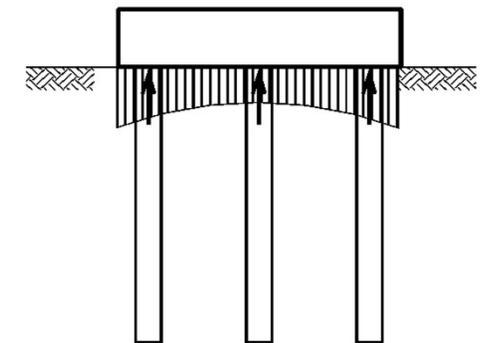
Estructura combinada cuya capacidad y rigidez es (casi) la suma de la contribución de platea y pilotes

Conveniente cuando

- Cargas importantes
- Todos los estratos son competentes
- No existe compresión primaria de ningún estrato
- Los asentamientos de la platea (sola) y de los pilotes (solos) son comparables



Cabezal con pilotes



Platea con pilotes

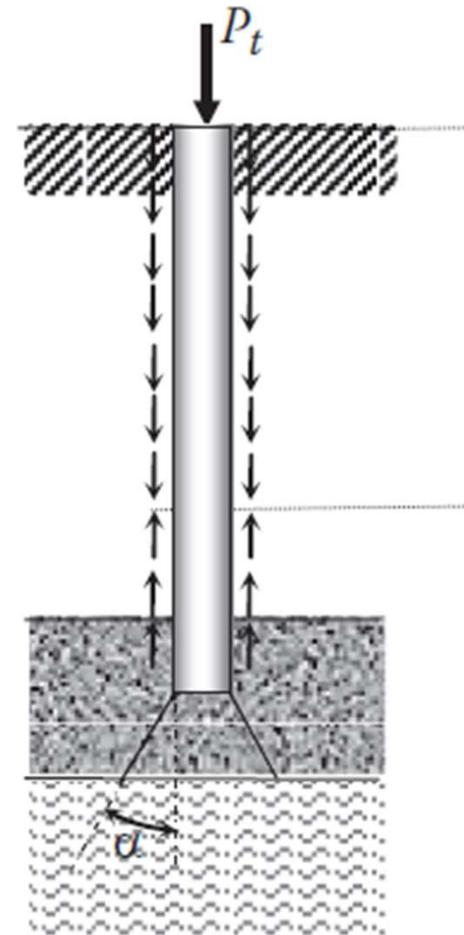
Diseño de fundaciones profundas: fricción negativa



Los asentamientos por consolidación del terreno se movilizan debido a:

- Colocación de rellenos superficiales sobre suelos blandos
- Abatimiento de nivel freático

Por consiguiente, **se desarrolla fricción negativa en el pilote** porque el terreno circundante del fuste (en su totalidad o una parte) se asienta más que el pilote (que se comprime por la carga aplicada)



(Guo 2013)



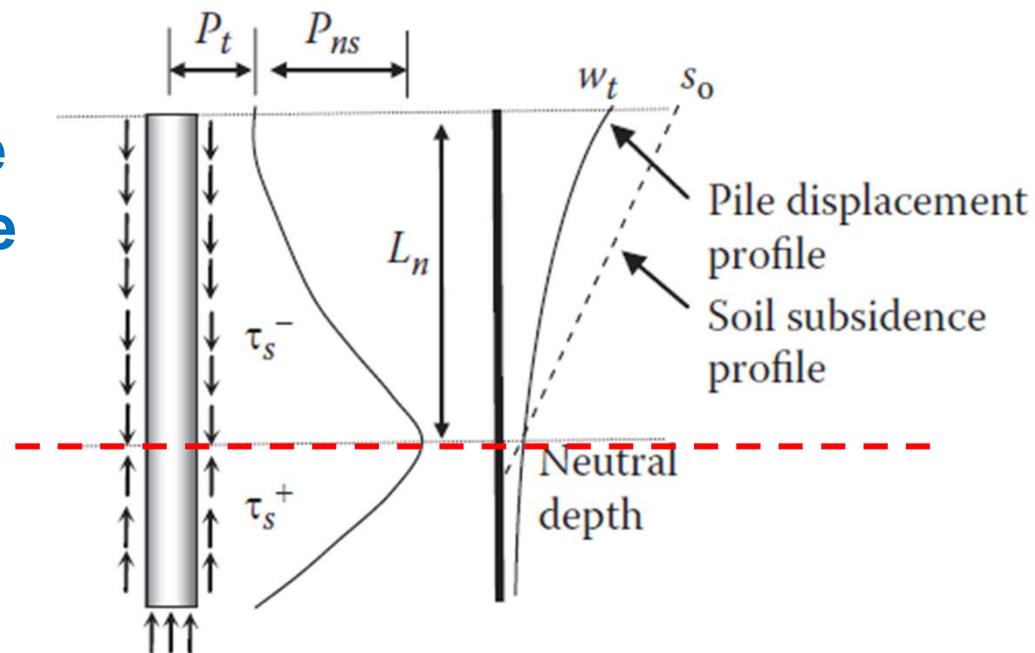
Diseño de fundaciones profundas: fricción negativa

Fricción negativa: terreno del fuste se asienta más que el pilote

La fricción negativa no reduce la carga última (ULS) del pilote

Produce

- Mayores asentamientos (modifica SLS)
- Mayor carga de compresión en el pilote



Bibliografía



Básica

- Fleming. Piling Engineering. Taylor & Francis.
- Guo. Theory and practice of pile foundations. CRC Press.

Complementaria

- USACE: Theoretical Manual for Pile Foundations
- USACE: Design of Pile Foundations DIN 4026: Driven Piles (Manufacture, dimensioning and permissible loading)
- UNE-EN 12699: Pilotes de desplazamiento