

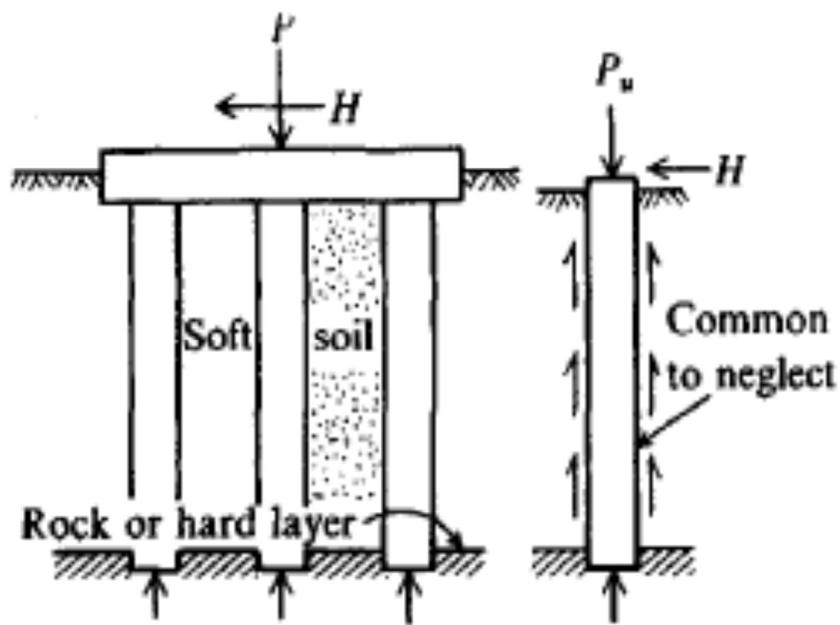
**TEMA V: CIMENTACIONES PROFUNDAS**

- V.a** Tipologías más características.
- V.b** Objetivos de las cimentaciones profundas.
- V.c** Capacidad de carga estática vertical de un pilote individual. Capacidad de carga por la punta y por el fuste, expresiones propuestas por distintos autores reconocidos.
- V.d** Asientos en pilotes individuales.
- V.e** Ensayos de carga.
- V.f** Pilotes individuales sometidos a tracción.
- V.g** Grupos de Pilotes.
- V.h** Pilotes con cargas laterales. Análisis elástico continuo y discreto. Análisis para la situación de rotura mediante los métodos de Blum y Broms.
- V.i** Factores de seguridad.

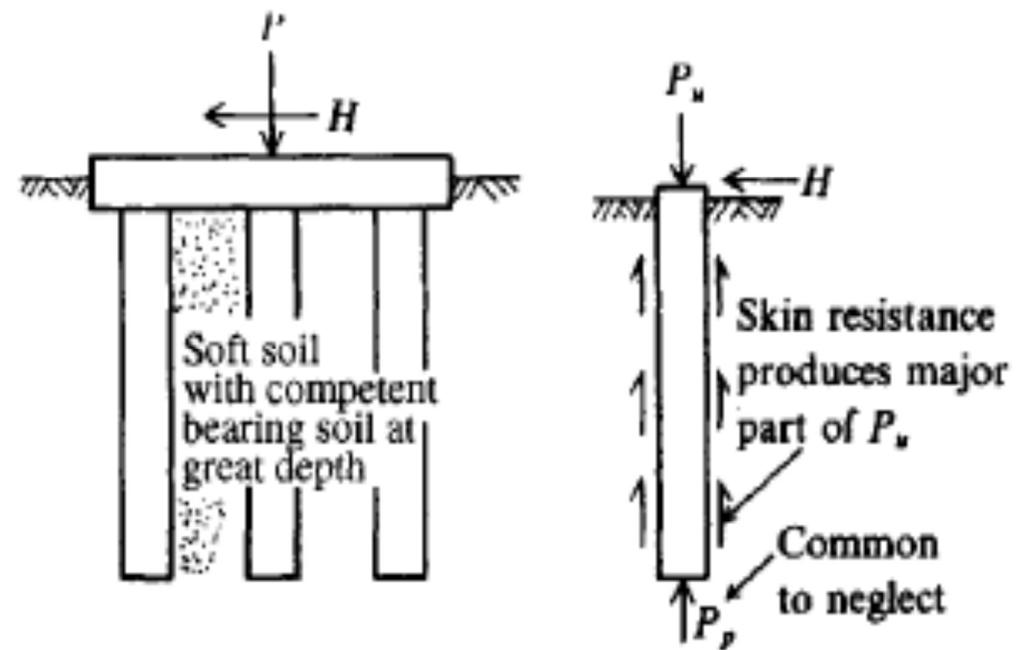
- **Trabajo Práctico N°6: Cimentaciones Profundas con Acciones Verticales y Horizontales para Estructura de Cartel**

TEMA V: CIMENTACIONES PROFUNDAS

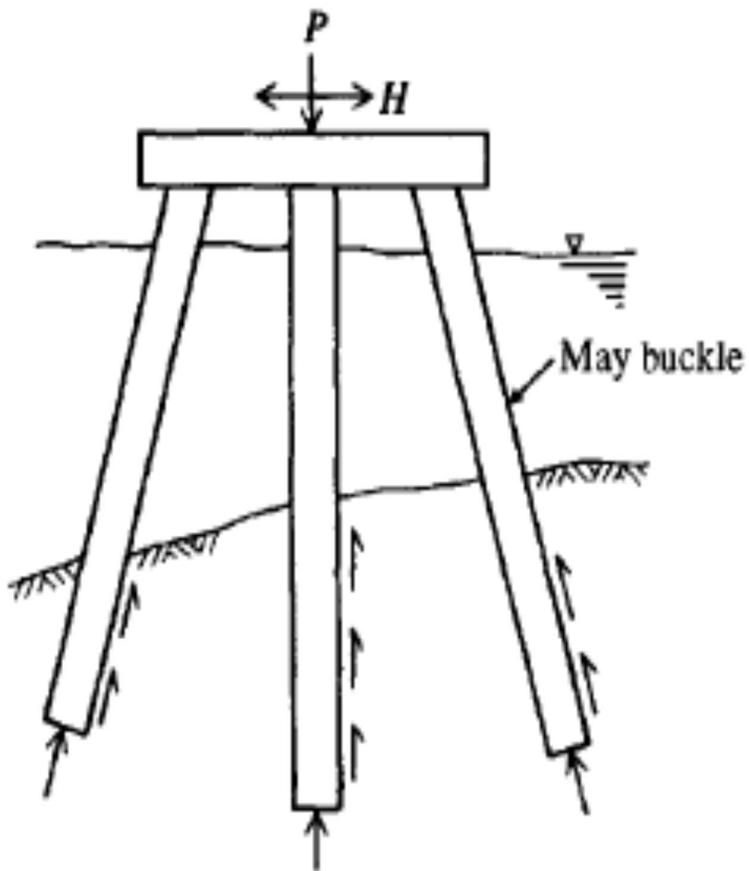
Tipologías:



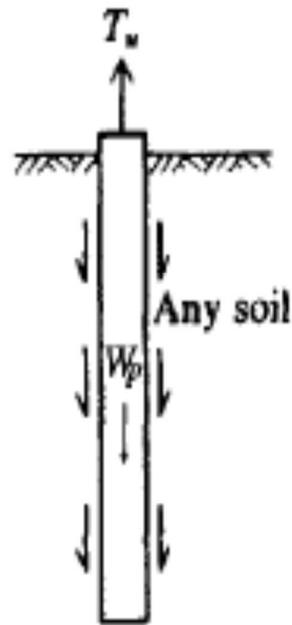
(a) Group and single pile on rock or very firm soil stratum.



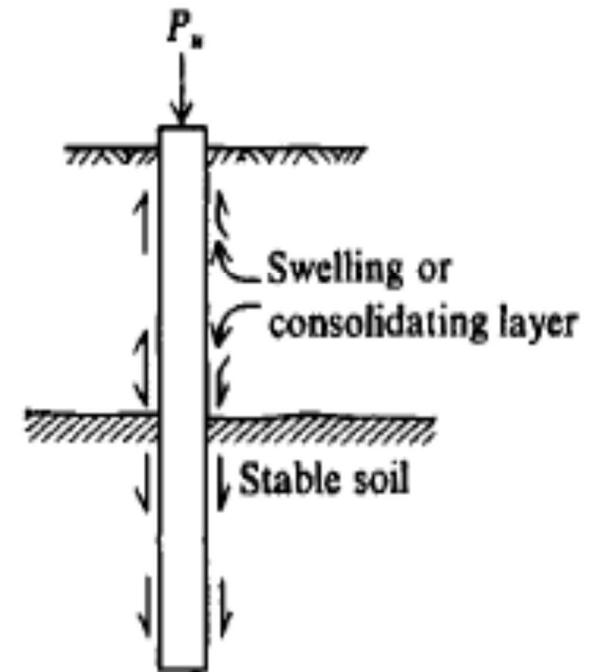
(b) Group or single pile "floating" in soil mass.



(c) Offshore pile group.



(d) Tension pile.



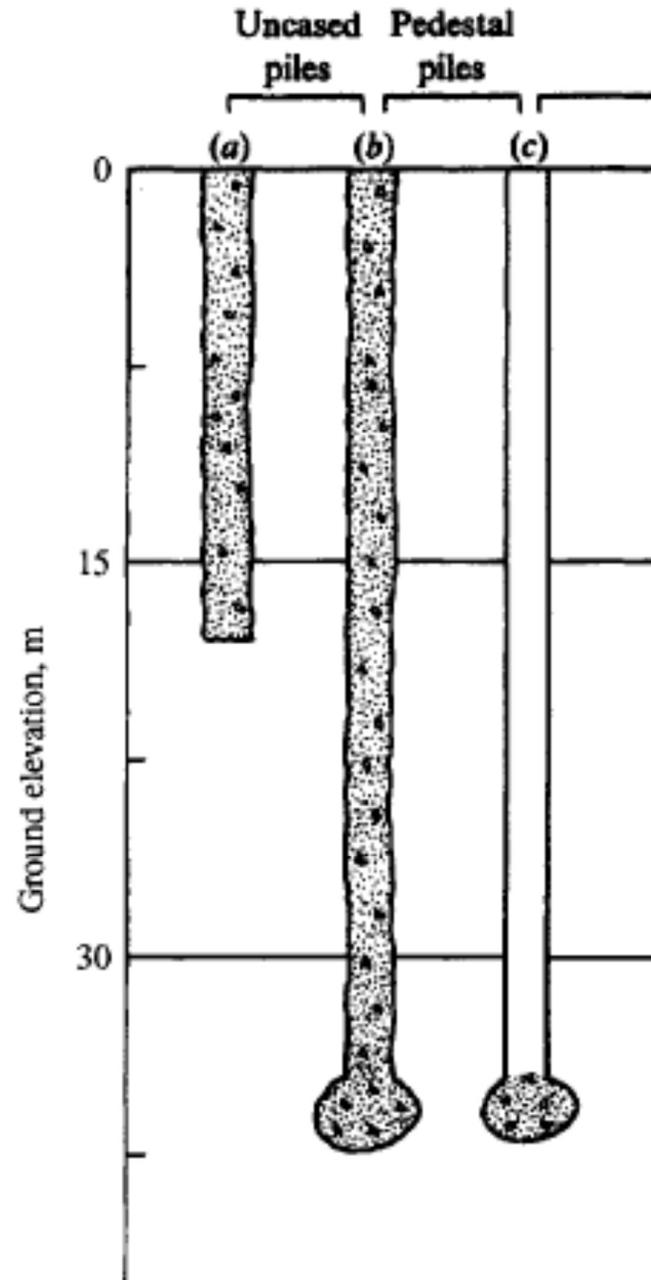
(e) Pile penetrating below a soil layer that swells (shown) or consolidates.

Generalmente aparecen en grupos y no siempre existe H.

Generalmente los pilotes trabajan mediante una combinación de punta y fuste.

No vemos lo referente a métodos constructivos que suele ser determinante.

Disposiciones típicas locales: Generalmente colados "in situ".



# OBJETIVOS

- TRANSFERIR ACCIONES (V + H) AL TERRENO
- RESISTIR TIROS Y MOMENTOS DE VUELCO
- COMPACTAR DEPÓSITOS MUY SUELTOS Y SIN COHESIÓN
- CONTROLAR ASIENTOS EN PLATEAS
- RIGIDIZAR LOS SUELOS E INTEGRAR MASAS EN CIMENTACIONES DE MÁQUINAS
- COMO MANERA DE ELEVAR EL FACTOR DE SEGURIDAD DE CIMENTACIONES ORIGINALMENTE SUPERFICIALES Y CRÍTICAS
- TRANSFERIR CARGAS AL FONDO MARINO O LACUSTRE EN ESTRUCTURAS “OF SHORE”

## CAPACIDAD DE CARGA

En todos los casos puede estimarse como sigue:

$$\left. \begin{aligned} P_u &= P_{pu} + \sum P_{si} \\ &= P_P + \sum P_{si,u} \end{aligned} \right\} \text{(compression)}$$
$$T_u = \sum P_{si,u} + W_P \quad \text{(tension)}$$

$$\sum P_{si}$$

Carga por el fuste simultánea con la carga última por la punta

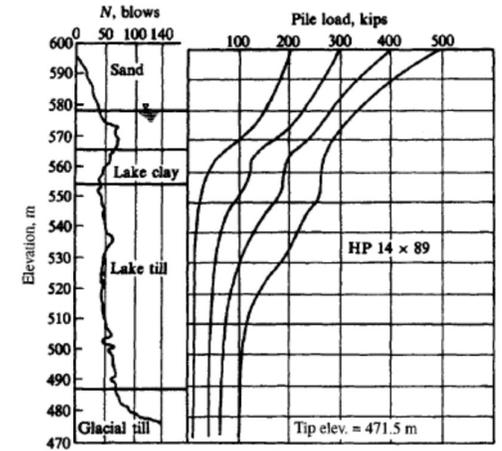
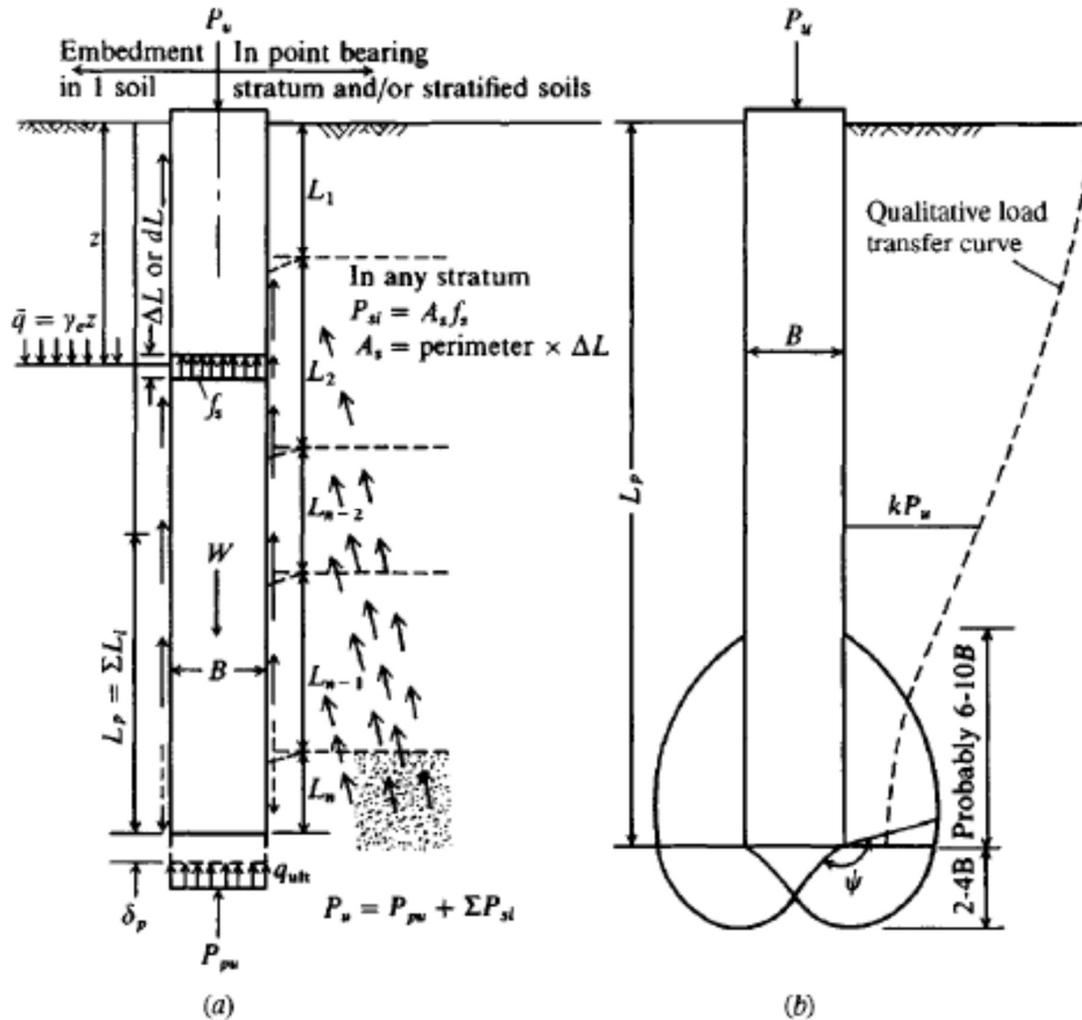
$$P_P =$$

Carga por la punta simultánea con la carga última por el fuste

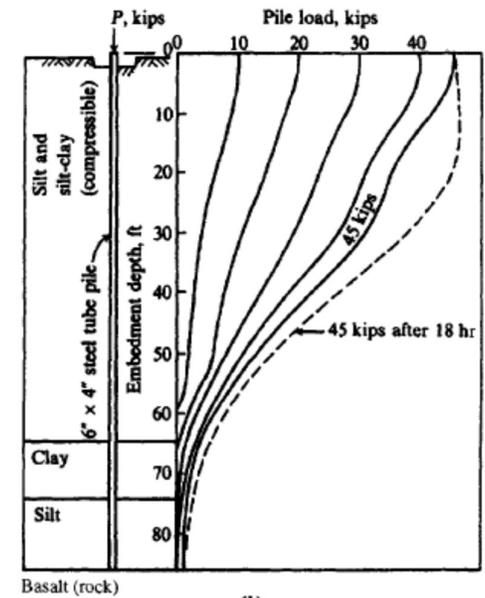
Cuando se desprecia la resistencia por la punta tenemos **“pilotes flotantes”**.

# FUNCIONAMIENTO "REAL" DE UN PILOTE:

mecanismo de transferencia de carga al terreno



(a)



(b)

La resistencia por el fuste se supera con pequeños desplazamientos en la parte superior.

Luego la carga pasa más abajo y se vuelve a superar con pequeños desplazamientos hasta que se desarrolla la carga por la punta y se llega al equilibrio sin desplazamientos verticales (sin descensos).

La **transferencia de carga** del pilote al terreno se produce mediante **diversos mecanismos complejos** y no muy bien conocidos.

## CAPACIDAD PORTANTE ADMISIBLE

$$P_a = \frac{P_{pi}}{SF_p} + \frac{\sum P_{si}}{SF_s}$$

Con dos factores de seguridad distintos para punta y para fuste.

También:

$$P_a = \frac{P_u}{SF} \quad \text{or} \quad T_a = \frac{T_u}{SF}$$

Con un SF único

Los factores de seguridad SF<sub>i</sub> en cimentaciones profundas tienden a ser mayores que en cimentaciones superficiales debido a las mayores incertidumbres.

La capacidad última total **no es la suma** de las capacidades últimas por la punta y por el fuste sino que es **la suma de una de ellas y parte de la otra** (difícil de determinar).

## CAPACIDAD DE CARGA DEL PILOTE POR LA PUNTA

$$P_{pu} = A_p(cN'_c d_c s_c + \eta \bar{q} N'_q d_q s_q + \frac{1}{2} \gamma' B_p N'_\gamma s_\gamma)$$

Dónde:

$A_p$ : Área del pilote con plug. Área envolvente en perfiles.

$c$ : Cohesión del suelo que rodea al pilote.

$B_p$ : Ancho de la punta incluyendo plug.

$N'_c$ : Factor de capacidad de carga por cohesión. Si  $\phi = 0$ , tomar  $N'_c = 9,0$

$$d_c = 1 + 0,4 \cdot \text{atg}(l/B)$$

$N'_q$ : Factor de capacidad de carga por sobrecarga.

$$d_q = 1 + 2 \cdot \text{tg } \phi \cdot (1 - \text{sen } \phi)^2 \cdot \text{atg}(L/B)$$

$N'_\gamma$ : Factor de capacidad de carga por profundidad;

$N'_\gamma = N_\gamma$  (de fundaciones superficiales).

$q = \gamma \cdot L$ : Presión efectiva en la punta del pilote.

$\eta = 1$  salvo en el método de Vesic:  $\eta = (1 + 2 \cdot K_0)/3$

Los parámetros geotécnicos indicados **son los naturales del terreno** y no los modificados o revisados por las operaciones de hincado de pilotes.

Pueden emplearse los factores de forma de B.HANSEN sin errores relevantes. También los de Terzaghi.

## FACTORES DE VESIC

$$N'_q = \frac{3}{3 - \sin \phi} \left\{ \exp \left[ \left( \frac{\pi}{2} - \phi \right) \tan \phi \right] \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) I_{rr}^{\frac{1.333 \sin \phi}{1 + \sin \phi}} \right\}$$

El “índice de rigidez reducida” es:

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + \epsilon_v I_r}$$

con:

$$\epsilon_v = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \quad (\epsilon_v = 0 \text{ en material incompresible})$$

El “índice de rigidez”  $I_r$  es:

$$I_r = G / (c + q \cdot \text{tg} \phi)$$

$I_r$  puede estimarse así (valores más altos para suelos más rígidos):

Suelo	$I_r$
Arena ( $D_r = 0,5$ a $0,8$ )	75 - 150
Limo	50 - 75
Arcilla	150 - 250

$$N'_c = (N'_q - 1) \cot \phi$$

si  $\phi = 0$  (condición no drenada):

$$N'_c = \frac{4}{3}(\ln I_{rr} + 1) + \frac{\pi}{2} + 1$$

### FACTORES DE JANBU:

$$N'_q = \left( \tan \phi + \sqrt{1 + \tan^2 \phi} \right)^2 \exp(2\psi \tan \phi)$$

$\psi$  [rad]: varía entre  $60^\circ$  (materiales muy sueltos) y  $110^\circ$  para los muy densos

**TABLE 16-2**

**Bearing-capacity factors  $N'_c$  and  $N'_q$  by Janbu's and Vesic's equations**

A shape factor of  $s_c$  1.3 may be used with Janbu's  $N'_c$ . Use program FFACTOR for intermediate values.

$\phi$	Janbu			Vesic				
	$\psi = 75^\circ$	90	105	$I_{rr} = 10$	50	100	200	500
0°	$N'_q = 1.00$	1.00	1.00	$N'_q = 1.00$	1.00	1.00	1.00	1.00
	$N'_c = 5.74$	5.74	5.74	$N'_c = 6.97$	9.12	10.04	10.97	12.19
5	1.50	1.57	1.64	1.79	2.12	2.28	2.46	2.71
	5.69	6.49	7.33	8.99	12.82	14.69	16.69	19.59
10	2.25	2.47	2.71	3.04	4.17	4.78	5.48	6.57
	7.11	8.34	9.70	11.55	17.99	21.46	25.43	31.59
20	5.29	6.40	7.74	7.85	13.57	17.17	21.73	29.67
	11.78	14.83	18.53	18.83	34.53	44.44	56.97	78.78
30	13.60	18.40	24.90	18.34	37.50	51.02	69.43	104.33
	21.82	30.14	41.39	30.03	63.21	86.64	118.53	178.98
35	23.08	33.30	48.04	27.36	59.82	83.78	117.34	183.16
	31.53	46.12	67.18	37.65	84.00	118.22	166.15	260.15
40	41.37	64.20	99.61	40.47	93.70	134.53	193.13	311.50
	48.11	75.31	117.52	47.04	110.48	159.13	228.97	370.04
45	79.90	134.87	227.68	59.66	145.11	212.79	312.04	517.60
	78.90	133.87	226.68	53.66	144.11	211.79	311.04	516.60

## RESISTENCIA DE PUNTA A PARTIR DEL SPT

Según Meyerhof:  $P_{pu} = A_p * (40*N)*L_b/B \leq A_p * (380*N)$  [kN]

N: promedio estadístico de los valores  $N_{55}$  del ensayo SPT, en una zona del orden de 3B a 8B bajo la punta del pilote.

FS entre 1,5 y 3,0 (Bowles). FS  $\geq 3,5$  (CCSR MDZ)

## CAPACIDAD DE CARGA POR EL FUSTE

$$\sum_1^n A_s f_s$$

Está dada por:

en unidades de tensión.

Con:

As: Área efectiva del fuste sobre la que actúa  $f_s$ . Se computa como perímetro \* parte de longitud de pilote ( $\Delta L$ ).

$\Delta L$ : Parte de la longitud de pilote (L) para representar la estratificación.

$f_s$ : Resistencia por el fuste aplicable sobre  $\Delta L$ .

Hay diversos métodos para evaluar  $f_s$ . Damos el método  $\alpha$  por ser aplicable a suelos cohesivos y no cohesivos.

## Método a para estimar capacidad portante por el fuste

Propuesto por Tomlison (1971):

$$f_s = \alpha * c + \bar{q} * K * \operatorname{tg} \delta \quad (\text{unidades de } c; \bar{q})$$

$\alpha * c$ : adhesión, que puede determinarse interpolando linealmente entre:

$\alpha$ :	1,1	0,8	0,5	0,5
$c$ [kPa]:	0	75	200	>200

$K$  es el coeficiente de empuje de suelos que depende del volumen desplazado por la hincia, de la "densidad" inicial del suelo, etc., y varía entre  $K_0$  y 1,75 aproximadamente. Puede usarse la expresión que sigue, con  $F_w$  como factor de peso del coeficiente de empuje en reposo ( $F_w > 1$ ):

$$K = \frac{K_a + F_w * K_0 + K_p}{2 + F_w}$$

$\delta$ : Ángulo de fricción entre suelo y pilote; puede estimarse por la regla de los 2/3. Tomar  $\delta = 0$  si  $\phi = 0$ .

# ASIENTO EN PILOTES

Para estimar asientos en pilotes, se puede proceder como sigue:

- Calcular el acortamiento del pilote:

$$\Delta H_{ss} = \frac{P_{av} \times \Delta L}{A_{av} \times E_p}; \quad \left. \begin{matrix} P_{av} \\ A_{av} \end{matrix} \right\} \text{Carga y \u00e1rea promedio}; \quad \Delta H_a = \sum \Delta H_{ss}$$

- Calcular el asiento de punta como sigue:

$$\Delta H_{pt} = \Delta q \times D \times \frac{1 - \nu^2}{E_s} \times m \times I_s \times I_F \times F_1$$

$$m \times I_s = 1,0$$

factor de forma

$I_F$

factor de pseudo embebimiento;

$$I_F = 0,55 \text{ si } L/D \leq 3$$

$$I_F = 0,50 \text{ si } L/D > 3$$

Destacamos que se usa la carga total.

D: Di\u00e1metro de la punta del pilote o la menor de un pilote perfil

$\mu$ : Relaci\u00f3n de Poisson  $\mu \approx 0,35$

$\Delta q$ : Presi\u00f3n en la punta  $\Delta q \approx \text{carga} / A_p$

$E_s$ : M\u00f3dulo en la punta del pilote.

$F_1$ : Factor de reducci\u00f3n: 0,25 si el pilote carga \u00fanicamente por el fuste.  
0,50 si el pilote carga por el fuste y por la punta.  
0,75 si el pilote carga \u00fanicamente por la punta.  
Otro valor dado por experiencias locales.

- Sumar ambos asientos:

$$\Delta H_p = \Delta H_a + \Delta H_{pt}$$

# PILOTES EN TRACCIÓN

Típicamente este tipo de pilote resulta en los casos siguientes:

- Subpresión
- Suelos expansivos
- Viento
- Situación de tensor roto en una torre
- Sismo (!)

Generalmente, un pilote que trabaja en tracción (“tensión”) lo hace también en compresión

La capacidad portante última es:

$$P_{t\acute{u}} = \sum P_{si} + W$$

$\sum P_{si}$  representa la resistencia por el fuste en las distintas capas de suelos de longitud total  $L$  y se computa como sigue:

$$P_{si} = A_s * f_s$$

$$f_s = c_a + q * K * \text{tg}\delta$$

$$A_s = \text{perímetro fuste} * \Delta L$$

$c_a$ : adhesión (fracción de la cohesión)

$q$ : presión efectiva

Valores propuestos para  $K$ :

API:  $K = 0,8$  para arena con escaso desplazamiento de volumen.

$K = 1,0$  idem desplazamiento importante

Para arena no cementada, se debe considerar el diámetro del pilote. Se sugieren los valores que siguen:

$D \leq 30 \text{ cm}$   $K_0$

$30 \text{ cm} < D < 60 \text{ cm}$   $\frac{1}{2} * (K_0 + K_a)$

$D > 60 \text{ cm}$   $\frac{1}{3} * (K_0 + K_a + K_p)$

La razón de ser de estos valores es que el efecto arco se desarrolla plenamente sólo en casos de pilotes pequeños.

# PILOTES CON CARGAS LATERALES

Hasta los 60` se consideraba que los pilotes trabajaban únicamente con cargas axiales y las acciones horizontales se tomaban inclinándolos.

Actualmente se admite que toman importantes acciones laterales con las consecuencias siguientes.

- Flexión en el pilote
- Corte en el pilote
- Transición brusca con la superestructura
- Reacción horizontal del terreno
- Superposición con carga axial
- Eventual efecto P -  $\Delta$

## PROBLEMAS O CASOS GENERALES

- Análisis elástico en bajas deformaciones
- Verificación de carga última del terreno
- Efectos de grupo

## ANÁLISIS ELÁSTICO EN BAJAS DEFORMACIONES

Lo más simple es tomar sección constante, respuesta elástica del pilote y del suelo y reacción horizontal proporcional a la deformación (hipótesis de Winkler).

$$q = k * y$$

Por flexión tenemos la ecuación siguiente:

$$EJ \eta^4 = -q$$

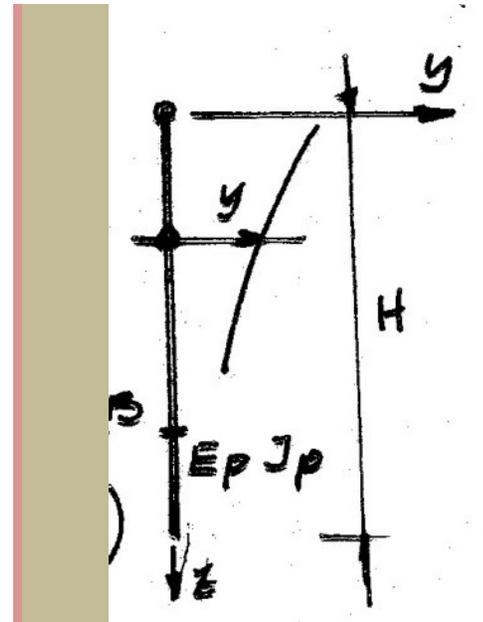
... o bien:

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} + kB y = 0$$

EDL de 4to orden cuya solución es:

$$y_z q = \frac{2H}{k\lambda} \left( e^{-\frac{z}{\lambda}} * \cos \left( \frac{z}{\lambda} \right) \right)$$

$$\text{Con: } \lambda = \sqrt{\frac{EJ}{kB}}$$



A partir de la deformada pueden determinarse cargas, cortes y momentos.

Este abordaje es sólo una primera aproximación con limitaciones importantes:

Sección constante y suelo uniforme

Hace algunas décadas se usaba el método de las diferencias finitas.

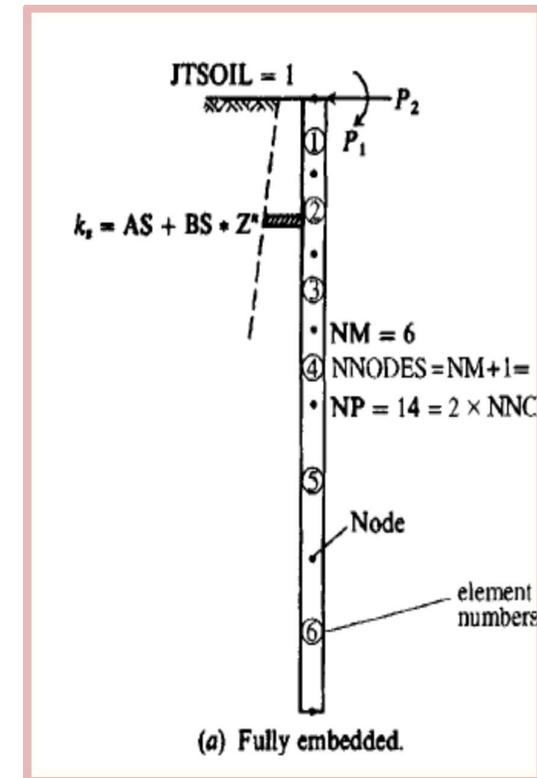
Actualmente el procedimiento de análisis recomendado es el **FEM** con las ventajas siguientes:

- La matriz de rigidez tiene una banda relativamente angosta.
- Se considera traslación y rotación.
- No hay dificultad en considerar las variaciones de longitud, área,  $J$ ,  $E$ , de los elementos de barra o del terreno.
- Hay libertad para fijar condiciones de vínculo: traslación o rotación nulas.

### Proceso de Análisis

- División del pilote en tramos: La parte superior es la más delicada. Se sugiere que en un mismo pilote, la relación de elemento más largo a más corto sea menor que 3 ó 4. Evitar tramos cortos junto a tramos largos. Poner nodos en los cambios de sección, en los cambios de suelos, en los puntos de aplicación de cargas o momentos y en los vínculos. Generalmente es adecuado trabajar con 10 a 15 elementos por pilote.
- Identificación de vínculos.
- Estimación del coeficiente de balasto a diferentes profundidades: Es el punto difícil.
- Retro análisis resultados de ensayos de carga horizontal (en caso de estar disponibles) para determinar los valores de coeficiente de balasto: no hace falta gran precisión.

Debido a que  $k_s \ll EJ$  (pilote), el valor de  $k_s$  no es demasiado importante, resultando "aceptables" valores de  $\frac{1}{2}$  ó dobles de los reales. Esto es tanto más cierto cuánto más rígido es el pilote.



## DETERMINACIÓN DE $k_s$

El “módulo de reacción de la subrasante” o “coeficiente de balasto”  $k_s$ , en primera instancia puede medirse mediante ensayos de carga lateral en pilotes

Hay distintas maneras de estimarlo. Recomendamos la siguiente:

$$k_s = A_s + B_s * Z^n$$

Para limitar el crecimiento de  $k_s$  con la profundidad, el segundo término suele escribirse así.  $B_s * (Z/D)^n$

Otra manera consiste en considerar  $n < 1$ , por ejemplo  $n = 0,5$ .

- $Z[m]$ : profundidad considerada
- $D[m]$ : profundidad total del pilote
- $A_s$  y  $B_s$  dependen de la geometría del pilote y del tipo de terreno
- $n$ : valor a estimar o a determinar con ensayo de carga horizontal.

Se puede estimar  $A_s$  y  $B_s$  como sigue:

$$A_s = AS = C(cN_c + 0.5\gamma B_p N_\gamma)$$

$$B_s Z^n = BS * (Z^N) = C(\gamma N_q Z^1)$$

$$C = 40 \text{ (SI)}; C = 12 \text{ (Fps)}$$

Se tienen valores aproximados.

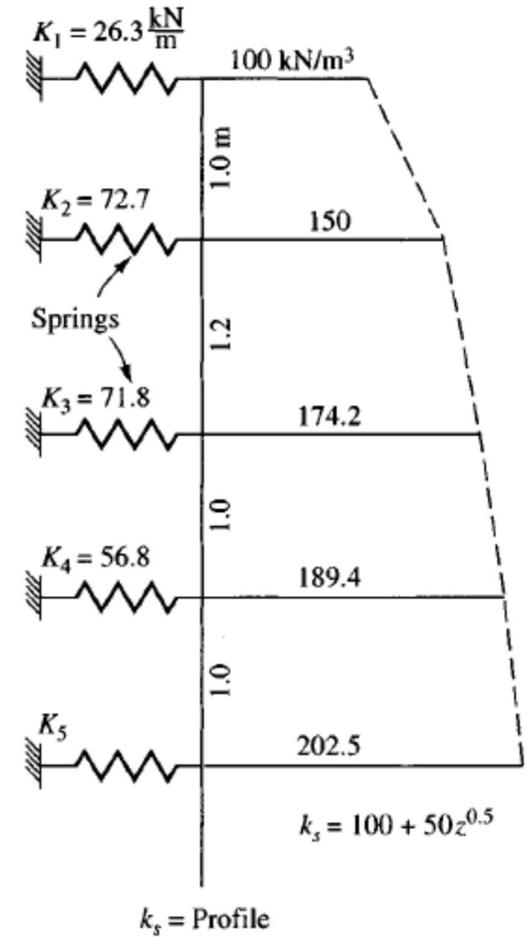
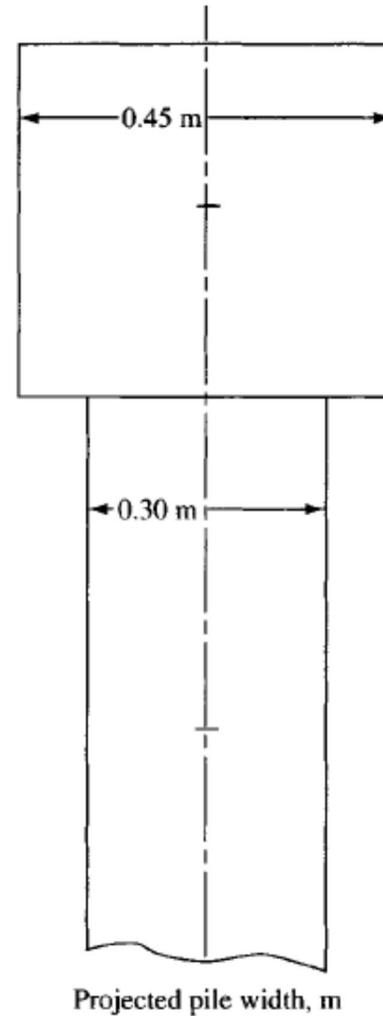
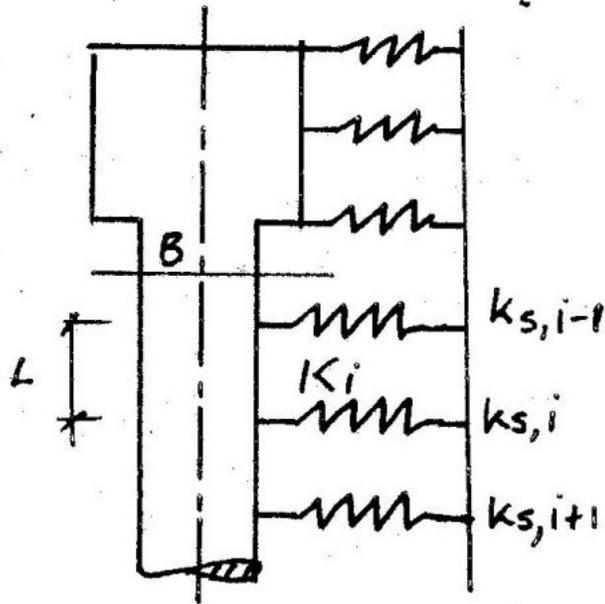
Lo importante es el orden de magnitud de los mismos (su rango), que puede verificarse con la tabla siguiente.

Suelo	$k_s$ [ $\text{kN/m}^3$ ]
Arena suelta	4800 - 16000
Arena medianamente densa	9600 - 80000
Arena densa	64000 - 128000
Arena arcillosa med. densa	32000 - 80000
Arena limosa med. densa	24000 - 48000
Arcillas ( $200 \text{ kPa} < q_a < 800 \text{ kPa}$ )	12000 - 48000

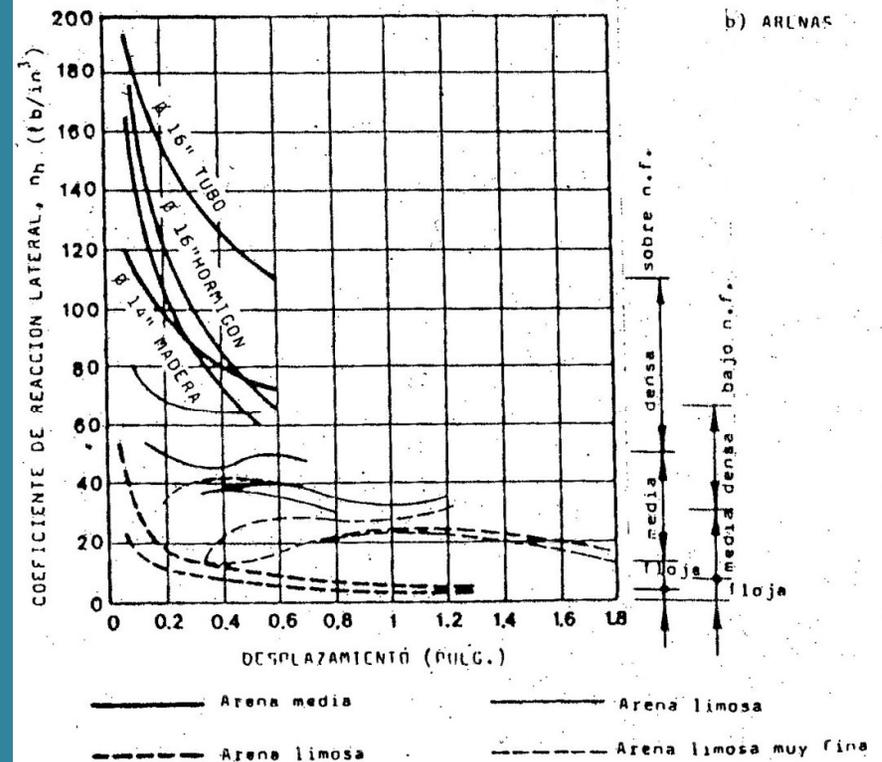
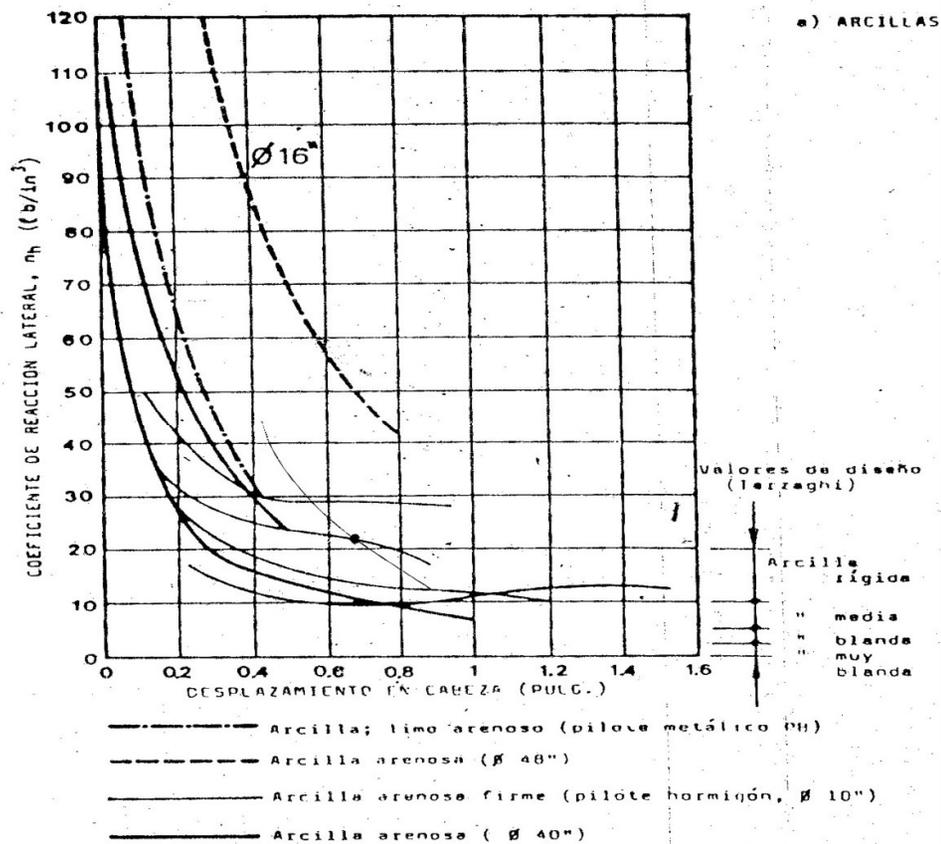
Se asume que los resortes son independientes lo que no es real.

Las constantes de resorte del pilote toman en cuenta la constante propia del suelo (dependiente de sus parámetros y características) y del área de influencia, como sigue:

$$K_i = L/6 * (k_{s,i-1} * B_{i-1} + 4k_{s,i} * B_i + k_{s,i+1} * B_{i+1})$$



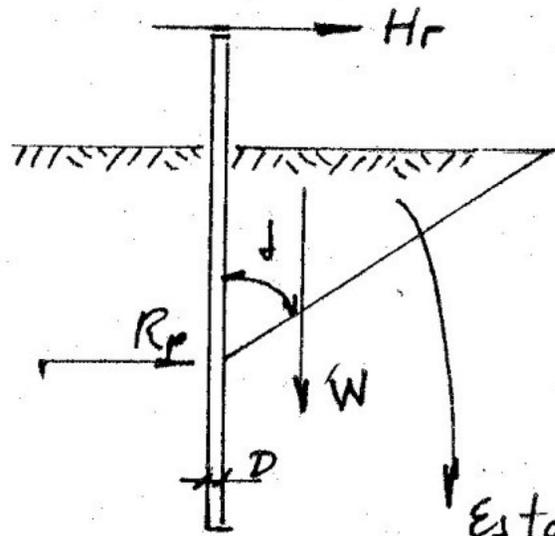
- Otra posibilidad para obtener directamente los coeficientes, son los factores de Vesic y Terzaghi. Estos últimos corresponden a grandes deformaciones: Ver figuras.
- **IMPORTANTE:** Ver variación de  $k_s$  con la deformación de la cabeza del pilote y ver la influencia del material.
- En la elección y determinación de valores, son esenciales la experiencia y juicio ingenieriles, y la adaptación al problema concreto que se analiza.
- No obstante, en líneas generales no es muy relevante asignar valores exactos para los  $k_{s,i}$  debido a que son mucho menores que la rigidez del pilote.
- En pilotes sometidos a sismo o cargas horizontales fuertes, puede ser apropiado considerar la sección de hormigón armado fisurada.
- No vemos efectos de grupo de pilotes.



Variación del coeficiente de reacción lateral  $n_h$  (Vesic, 1977)

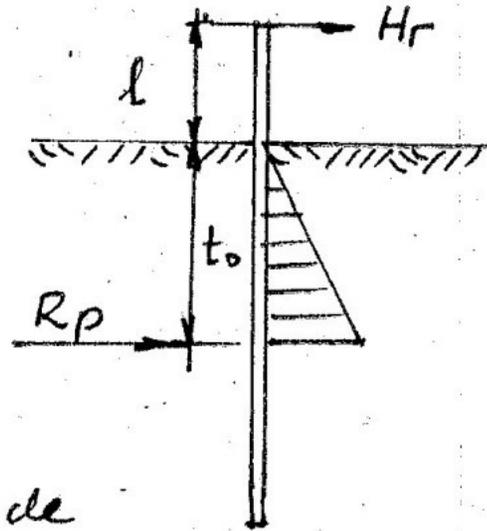
# VERIFICACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL TERRENO ANTE ACCIONES HORIZONTALES

## MÉTODO DE BLUM (Suelos granulares)

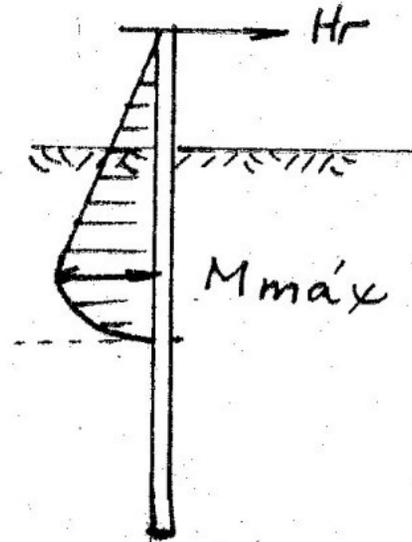


Estado de Rankine

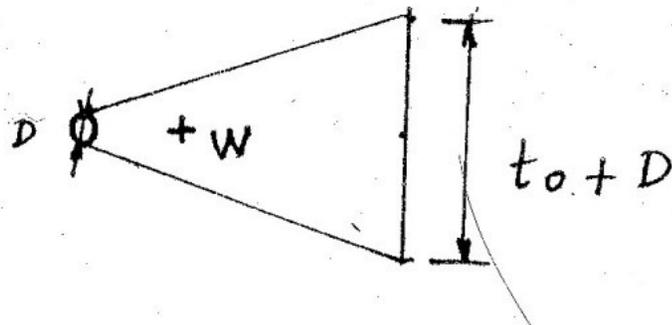
$$\delta = \pi/4 + \phi/2$$



Reacciones



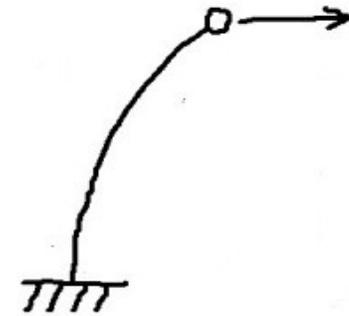
Momentos



**Rp: Reacciones bajo la cuña pasiva**

## Carga de rotura para pilote libre en la cabeza:

$$H_r = \frac{t_0^3 (t_0 + 4D)}{t_0 + l} \cdot \frac{K_p \gamma'}{24}$$



- $K_p$ : coeficiente de empuje pasivo de Rankine
- $\gamma'$ : peso específico aparente del suelo
- $t_0$ : profundidad de la cuña pasiva

## Carga de rotura para pilote empotrado en la cabeza:

$$H_r = \gamma' K_p \cdot \left[ \frac{t_0^3 \cdot (t_0 + 4D)}{12 \cdot (t_0 + l)} - \frac{D t_0^4}{12 (t_0 + l)^2} - \frac{t_0^5}{60 \cdot (t_0 + l)^2} \right]$$



El procedimiento de Blum no funciona correctamente para suelos cohesivos. Para ellos proponemos el método de Broms que sigue.

# MÉTODO DE BROMS (Suelos cohesivos y arenas)

$C_u$ : cohesión no drenada del suelo que rodea al pilote

$K_p$ : coeficiente de empuje pasivo

Pilotes Cortos (rompe el suelo)

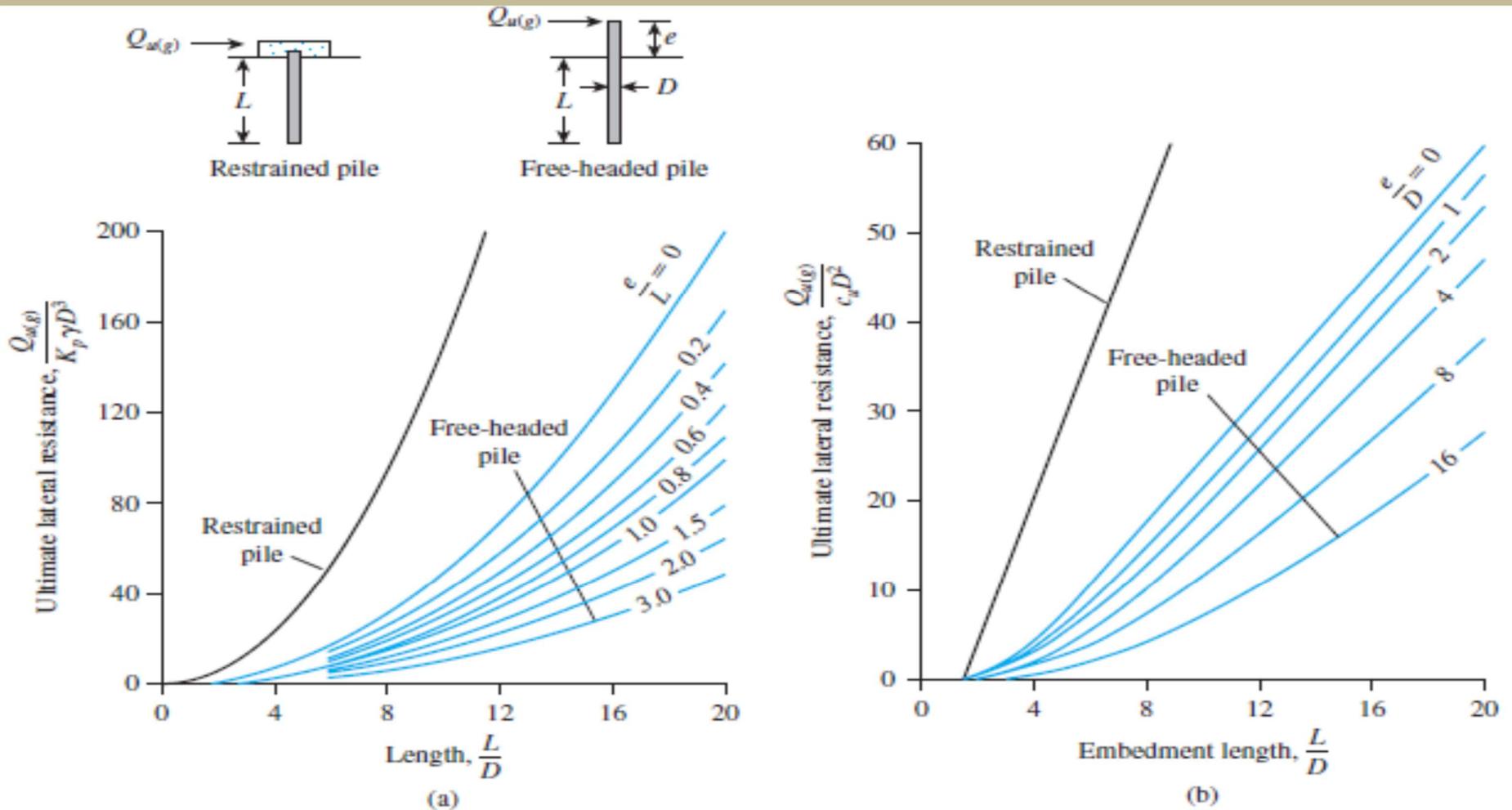


Figure 11.31 Broms's solution for ultimate lateral resistance of short piles (a) in sand and (b) in clay

## Pilotes Largos (plastifica el pilote)

$M_y = S \cdot F_y$  (momento plástico);

S: “módulo” de la sección;

$F_y$ : tensión de fluencia

$$\eta = \sqrt[5]{\frac{n_h}{E_p I_p}}$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{KD}{4E_p I_p}}$$

$$K = \frac{\text{pressure (kN/m}^2\text{)}}{\text{displacement (m)}}$$

## Módulo de balasto

Unconfined compression strength, $q_u$ kN/m <sup>2</sup>	$K$ kN/m <sup>3</sup>
200	10,000–20,000
200–800	20,000–40,000
> 800	> 40,000

$$k_z = n_h z$$

## Módulo de balasto

Table 11.15 Representative Values of  $n_h$

Soil	$n_h$ kN/m <sup>3</sup>
Dry or moist sand	
Loose	1800–2200
Medium	5500–7000
Dense	15,000–18,000
Submerged sand	
Loose	1000–1400
Medium	3500–4500
Dense	9000–12,000

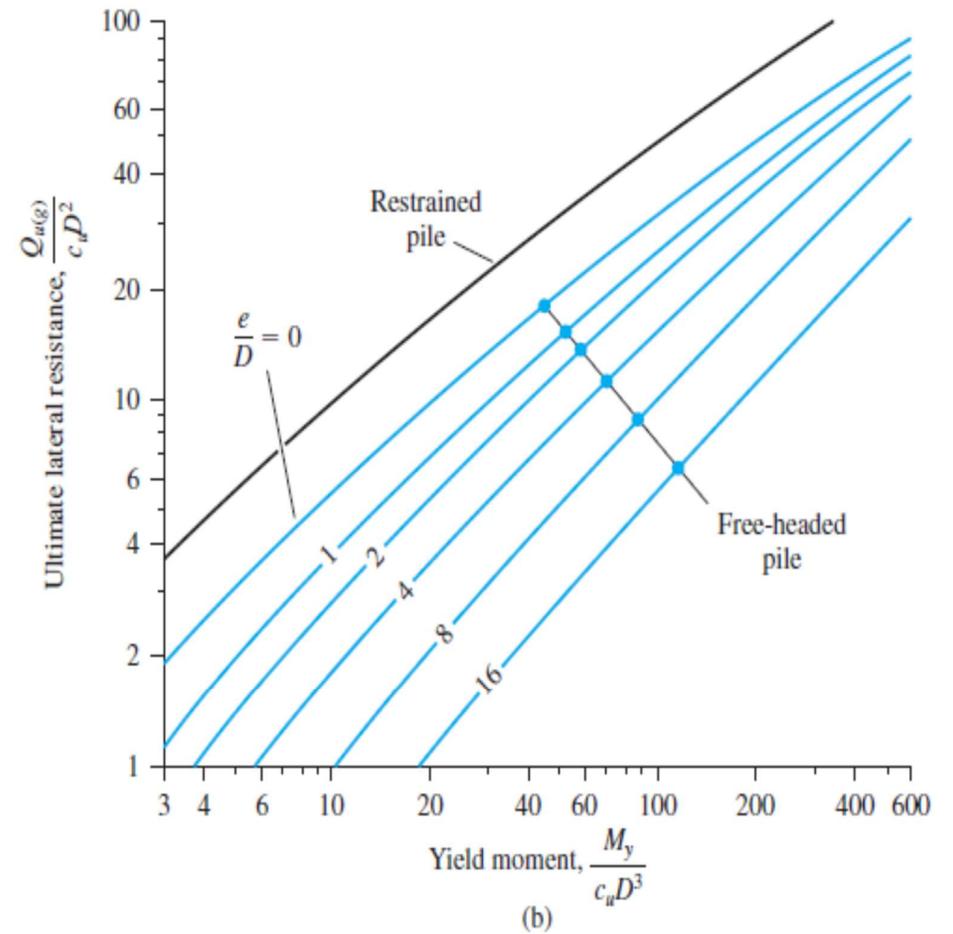
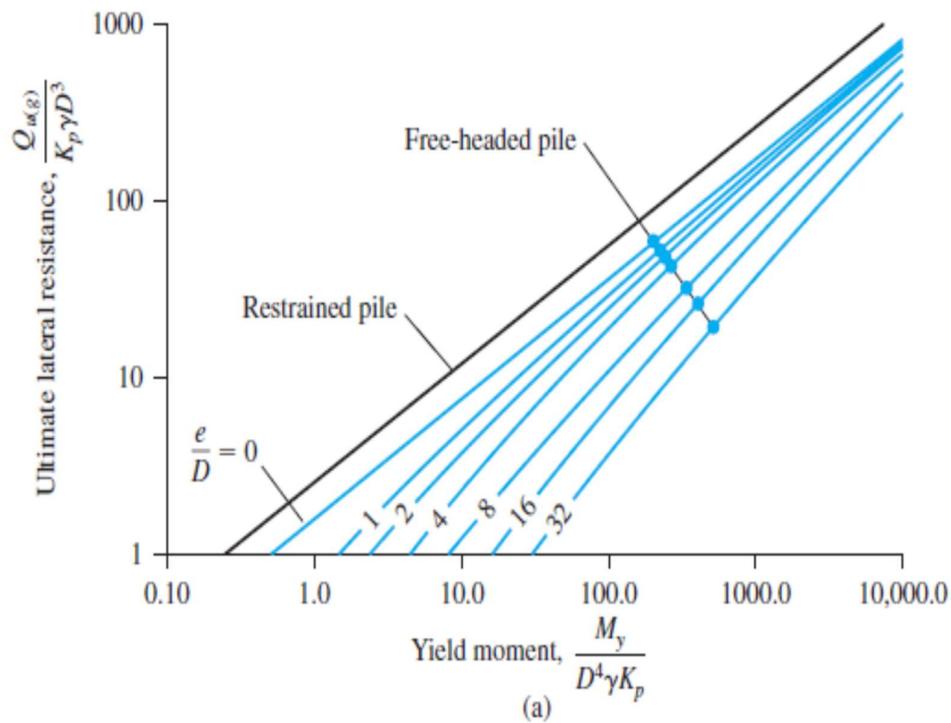


Figure 11.32 Broms's solution for ultimate lateral resistance of long piles  
(a) in sand (b) in clay

## Estimación de deflexiones en la cabeza

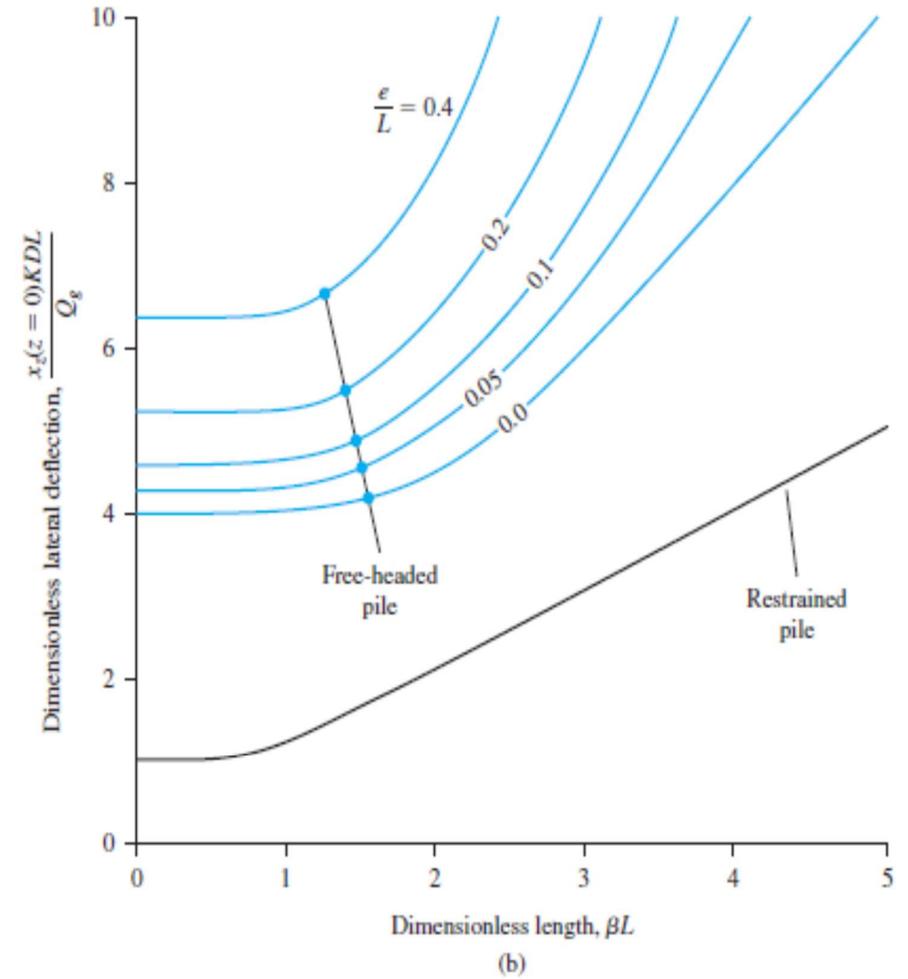
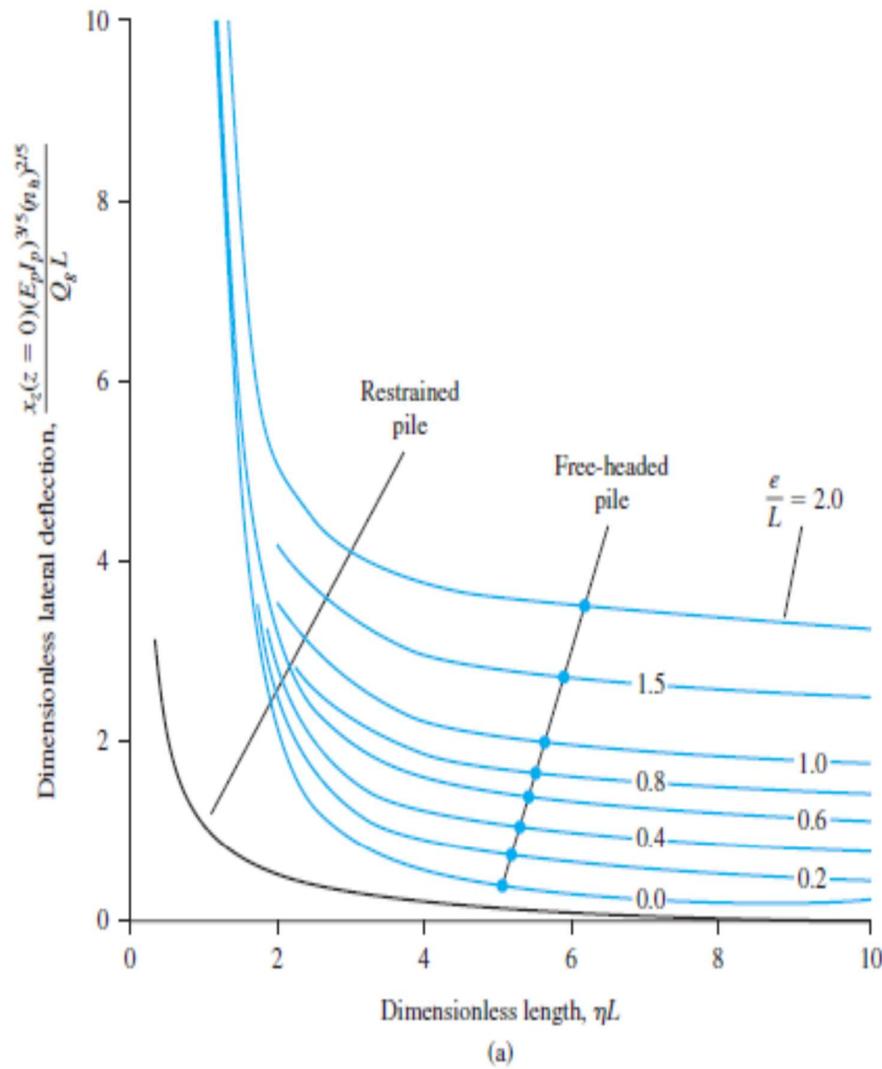


Figure 11.33 Broms's solution for estimating deflection of pile head (a) in sand and (b) in clay

**Qg: carga de trabajo (no última o de plastificación)**