

C/ Determinación de la resistencia mediante pruebas de carga

F.2.3 Métodos basados en pruebas de carga

- 1 Para la utilización de este procedimiento se considera fundamental un conocimiento detallado de la estratigrafía del terreno.
- 2 Cuando, para el dimensionado de pilotes, se determine la resistencia por punta R_{pk} o por fuste R_{fk} del terreno mediante pruebas estáticas de carga in situ hasta rotura podrá adoptarse como valor característico R_k de cualquiera de esas resistencias el proporcionado por la siguiente expresión:

$$R_k = \text{Min} \{R_{\text{media}}/\xi_1 ; R_{\text{mínima}}/\xi_2\} \quad (\text{F.39})$$

siendo

ξ_1 el coeficiente aplicable al valor medio de los resultados obtenidos en los ensayos;

ξ_2 el coeficiente aplicable al valor mínimo de los resultados obtenidos en los ensayos.

- 3 Los valores numéricos de los coeficientes ξ_1 y ξ_2 dependen del número de ensayos, n . La tabla F.3 contiene dichos valores

Tabla F.3. Valores de los coeficientes ξ_1 y ξ_2 para pruebas de carga in situ de pilotes

n	1	2	3	4	≥ 5
ξ_1	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00
ξ_2	1,40	1,20	1,05	1,00	1,00

- 4 Cuando, para el dimensionado de pilotes, se determine la resistencia global del pilote mediante pruebas dinámicas de hinca, debidamente contrastadas con pruebas estáticas hasta rotura sobre pilotes del mismo tipo y características geométricas en terrenos con las mismas propiedades geotécnicas, podrá adoptarse como valor característico R_k el proporcionado por la siguiente expresión:

$$R_k = \text{Min} \{R_{\text{media}}/\xi_3 ; R_{\text{mínima}}/\xi_4\} \quad (\text{F.40})$$

siendo

ξ_3 el coeficiente aplicable al valor medio de los resultados obtenidos en los ensayos

ξ_4 el coeficiente aplicable al valor mínimo de los resultados obtenidos en los ensayos.

- 5 Los valores numéricos de los coeficientes ξ_3 y ξ_4 depende del número de ensayos, n . La tabla F.4. contiene dichos valores.

Tabla F.4. Valores de los coeficientes ξ_3 y ξ_4 para ensayos dinámicos de hinca de pilotes

N	≥ 2	≥ 5	≥ 10	≥ 15	≥ 20
ξ_3	1,60	1,50	1,45	1,42	1,40
ξ_4	1,50	1,35	1,30	1,25	1,25

- 6 En función de cómo se realice y controle la prueba de carga, los valores de los coeficientes ξ_3 y ξ_4 de la tabla F.4 deben multiplicarse por los siguientes factores:

a) 0,85, cuando el ensayo dinámico de hinca se haga con control de deformación y aceleración;

b) 1,10, cuando se utilice una fórmula de hinca basada en la medida de las compresiones casi-elásticas de la cabeza del pilote durante el proceso de la hinca;

c) 1,20, cuando se utilice una fórmula de hinca sin medir el desplazamiento de la cabeza del pilote durante el proceso de la hinca.

- 7 Cuando se realicen pruebas de carga estáticas o dinámicas, para ayudar en la determinación de la resistencia de hundimiento, se podrán reducir los coeficientes de seguridad, de acuerdo con los criterios establecidos, para cada situación de dimensionado, en la tabla 2.1.

Histórico: Resistencia por punta según N.T.E. – C.P.I. (1977)

ARENAS ($q_p = \sigma = R_p$) No tenía en cuenta el factor de profundidad "D"

Resistencia del cono estático	Resistencia a la penetración SPT	R_p (kp/cm ²) = 4 a 5 N (golpes / 30cm)
R_p 20 kp/cm²	N (SPT)	$\sigma = q_p$
20 kp/cm ²	5	20 kp/cm ²
30 kp/cm ²	7	30 kp/cm ²
40 kp/cm ²	10	40 kp/cm ²
60 kp/cm ²	14	60 kp/cm ²
80 kp/cm ²	18	80 kp/cm ²
100 kp/cm ²	22	100 kp/cm ²
120 kp/cm ²	26	120 kp/cm ²
140 kp/cm ²	30	140 kp/cm ²
160 kp/cm ²	34	160 kp/cm ²
180 kp/cm ²	37	180 kp/cm ²
200 kp/cm ²	40	200 kp/cm ² → Límite igual a CTE

Histórico: Resistencia por fuste según N.T.E. – C.P.I. (1977)

ARENAS

Resistencia del cono estático	Resistencia a la penetración SPT	τ_f
R_p (kp/cm²)	N SPT	
20 kp/cm ²	5	0,30 kp/cm ²
30 kp/cm ²	7	0,37 kp/cm ²
40 kp/cm ²	10	0,41 kp/cm ²
60 kp/cm ²	14	0,51 kp/cm ²
80 kp/cm ²	18	0,59 kp/cm ²
100 kp/cm ²	22	0,69 kp/cm ²
120 kp/cm ²	26	0,76 kp/cm ²
140 kp/cm ²	30	0,85 kp/cm ²
160 kp/cm ²	34	0,91 kp/cm ²
180 kp/cm ²	37	0,95 kp/cm ²
200 kp/cm ²	40	1,00 kp/cm ² → Límite casi igual a CTE

Histórico: Resistencias por punta arcillas según N.T.E. – C.P.I. (1977)

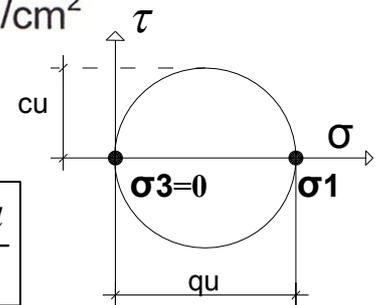
ARCILLAS Resistencia compresión simple → Igual a CTE

q_u (kp/cm ²)	R_p (kp/cm ²)	$\sigma = q_u$ (kp/cm ²)
2,5	19	11,25 kp/cm ²
5	37	22,50 kp/cm ²
7,5	56	33,75 kp/cm ²
10	75	45 kp/cm ²
12,5	94	56,25 kp/cm ²
15	113	67,50 kp/cm ²
17,5	132	78,75 kp/cm ²
20	150	90 kp/cm ²

$$\sigma = 4,5 * q_u = 0,6 R_p$$

La relación entre la resistencia por punta del cono holandés y la cohesión sin drenaje de un suelo saturado es **$q_p = 15c_u$**

$$c_u = \frac{q_u}{2}$$



Histórico: Resistencias por fuste arcillas según N.T.E. – C.P.I. (1977)

ARCILLAS

q_u (kp/cm ²)	R_p (kp/cm ²)	n^c	τ_f	
0,10	0,75		0,04 kp/cm ²	(Ru/2,5)
0,20	1,5		0,10 kp/cm ²	
0,30	2,25		0,15 kp/cm ²	
0,40	3,00		0,18 kp/cm ²	
0,50	4,00		0,22 kp/cm ²	
0,75	6,00		0,30 kp/cm ²	
1,00	7,50		0,34 kp/cm ²	(Ru/2,95)
1,25	9,50		0,37 kp/cm ²	
1,50	12,0		0,40 kp/cm ²	
2,00	15,0		0,45 kp/cm ²	
2,50	18,5		0,48 kp/cm ²	(Ru/5)
3,00	22,5		0,52 kp/cm ²	
4,00	30,0		0,59 kp/cm ²	
5,00	37,0		0,66 kp/cm ²	
7,50	56,0		0,83 kp/cm ²	
10	75,0		1,00 kp/cm ²	(Ru/10)

→ Límite igual a CTE

Las fórmulas empíricas de NTE-CPI derivan de la teoría desarrollada en la universidad de Delft a partir de ensayos de penetración (muy usados en Los Países Bajos) y con ligeras variaciones están universalmente admitidas por la comunidad científica internacional.

Histórico: Ejemplo comparación CTE:SE-C (2006) <> N.T.E.-C.P.I. (1977)

Ejemplo 1º **SUELO GRANULAR**: pilote perforado

$N = 10 \rightarrow \phi = 30^\circ \quad \gamma_s = 1,8 t / m^3 \quad \text{¿ Resistencias unitarias a 10 m de profundidad ?}$

2006 CTE:SE-C Resistencia punta: $q_p = f_p \cdot \sigma'_{vp} \cdot N_q \leq 20 \text{ MPa} = 200 \text{ kp/cm}^2$

$f_p = 2,5 \quad \sigma'_{vp} = (1,8 t/m^3 \cdot 10 \text{ m}) \quad N_q = 18,4 \quad (\text{Fórmulas analíticas})$

$q_p = 2,5 \cdot (18 \cdot 10) \cdot N_q = 2,5 \cdot 180 \cdot 18,4 = 8280 \text{ kN/m}^2 = \underline{82,8 \text{ kp/cm}^2}$ (antes de introducir la seguridad)

Resistencia fuste: (se usa el valor medio a lo largo del pilote). $18 \cdot 5 = 90 \text{ kN/m}^2$

$\tau_f = 90 \cdot 0,75 \cdot 1 \cdot \text{tg}30^\circ = 38,97 \text{ kN/m}^2 = \underline{0,39 \text{ kp/cm}^2}$ (antes de introducir seguridad)

2006 CTE:SE-C Resistencia punta: $q_p = 10^3 \cdot f_N \cdot N \text{ (kPa)}$ (Ensayos in situ)

$f_N = 0,2$ para pilotes hormigonados in situ $q_p = 10^3 \cdot 0,2 \cdot 10 = 2000 \text{ (kPa)} = \underline{20 \text{ kp/cm}^2}$ 
(antes de introducir la seguridad)

Resistencia fuste: (se usa valor medio a lo largo del pilote) $\tau_f = 2 N_{\text{PST}} \text{ (kPa)} = 2 \cdot 10 / 100 = \underline{0,2 \text{ kp/cm}^2}$
(antes de introducir la seguridad)

1977 NTE-CPI con $N = 10$

Resistencia punta: $q_p = \underline{40,00 \text{ kp/cm}^2}$ (mitad que CTE) (antes de introducir la seguridad)

Resistencia fuste: $\tau = \underline{0,41 \text{ kp/cm}^2}$ (prácticamente igual que CTE) (antes de introducir la seguridad)

Ejemplo 2º **SUELO COHERENTE**: pilote perforado

$q_u = 5 \text{ kp/cm}^2 \rightarrow cu = 1/2 q_u$ (datos de rotura probeta compresión simple)

2006 CTE:SE-C Resistencia a corto plazo (a largo plazo se comporta como terreno granular)

Resistencia punta: $q_p = 9 \cdot cu = 9 \cdot 250 = 2250 \text{ kN/m}^2 = \underline{22,5 \text{ kp/cm}^2}$ (antes de introducir la seguridad)

Resistencia por fuste: $\tau_f = \frac{100 \cdot cu}{100 + cu} = \frac{100 \cdot 250}{100 + 550} = 71,4 \text{ kPa} = \underline{0,71 \text{ kp/cm}^2}$
(τ_f y cu en kPa) (antes de introducir la seguridad)

2006 CTE:SE-C Resistencia punta: $q_p = f_q \cdot q^* c$ $f_q = 0,4$ para pilotes hormigonados in situ

Según NTE para $q_u = 5 \text{ kpcm}^2 \rightarrow q^* c = 37 \text{ kp/cm}^2 \rightarrow q_p = 0,4 \cdot 3700 = 1480,0 \text{ kN/m}^2 = \underline{14,80 \text{ kp/cm}^2}$

Resistencia por fuste: (antes de introducir la seguridad)

Para $q_c = 37 \text{ kpcm}^2 \rightarrow \tau = 1/100 (3700) = 37 \text{ kN/m}^2 = \underline{0,37 \text{ kp/cm}^2}$ (antes de introducir la seguridad)

1977 NTE-CPI

Resistencia por punta: $q_p = 4,5 \cdot 5 = \underline{22,5 \text{ kp/cm}^2}$ (antes de introducir la seguridad) (igual que CTE)

Resistencia por fuste: para $q_u = 5 \text{ kp/cm}^2$ tenemos $\tau = \underline{0,76 \text{ kp/cm}^2}$ (muy próximo CTE)

Pilotes en roca

Pilotes con la punta en roca

En el caso de pilotes en roca se puede determinar directamente el valor de Rcd a través de los valores q_{pd} y τ_{fd} según el anejo F.

F.2.4 Cimentaciones de pilotes en roca

- 1 El valor de cálculo de la resistencia por punta en roca $q_{p,d}$ de los pilotes excavados se podrá calcular de acuerdo con lo indicado en el capítulo 4 para cimentaciones superficiales en roca, introduciendo un coeficiente d_f para tener en cuenta la longitud de empotramiento en roca:

$$q_{pd} = K_{sp} * q_u * d_f \quad (F.41)$$

siendo

K_{sp} el coeficiente dado por la expresión (4.12)

$$K_{sp} = \frac{3 + \frac{s}{B}}{10 \sqrt{1 + 300 \frac{a}{s}}} \quad (\text{Ver 4.3.4 Presiones verticales admisibles para cimentaciones en roca de CTE}) \quad (4.12)$$

- s espaciamiento de las discontinuidades; $s > 300$ mm
B anchura del cimiento en m; $0,05 < s/B < 2$
a apertura de las discontinuidades; $a < 5$ mm en junta limpia, $a < 25$ mm en junta rellena con suelo o con fragmentos de roca alterada; siendo $0 < a/s < 0,02$

q_u la resistencia a compresión simple de la roca

$$d_f = 1 + 0,4 \frac{L_r}{d} \leq 3 \quad (F.42)$$

siendo

L_r profundidad de empotramiento en roca de la misma o mejor calidad que la existente en la base del apoyo

d diámetro real o equivalente (igual área) del pilote

- 2 La longitud del empotramiento debe medirse a partir de la profundidad en que se obtiene contacto con la roca en toda la sección del pilote. Esta profundidad dependerá de la inclinación local del techo rocoso.

- 3 Debe garantizarse la continuidad de la roca con características no inferiores a las consideradas en el cálculo del pilote, al menos, en una profundidad de tres diámetros por debajo del apoyo de la punta.

- 4 Dentro de esta zona de roca se debe considerar, para la evaluación de la resistencia de los pilotes perforados, un valor de cálculo de la resistencia unitaria por fuste $\tau_{f,d}$ (MPa) igual a:

$$\tau_{f,d} = 0,2 q_u^{0,5} \quad (F.43)$$

q_u , vendrá especificado en MPa, debiéndose verificar siempre que la roca es estable en agua.

Para conseguir el empotramiento de la punta del pilote la penetración debe ser igual o superior a

$2 \varnothing$ a $3 \varnothing$ en rocas blandas ($q_u < 50$ Kplcm²) $1 \varnothing$ a $1,5 \varnothing$ en rocas medias a duras.

1.3 Asiento del pilote

F.2.6 Estimación de asientos en pilotes

F.2.6.1 Asientos del pilote aislado

- Se puede adoptar la simplificación de que el asiento de un pilote vertical aislado sometido a una carga vertical, de servicio, en su cabeza igual a la máxima recomendable por razones de hundimiento, es aproximadamente, el uno por ciento de su diámetro, más el acortamiento elástico del pilote.
- El asiento del pilote individual aislado, considerando el acortamiento elástico del pilote se podrá expresar mediante la siguiente fórmula aproximada:

$$s_i = \left(\frac{D}{40 R_{ck}} + \frac{l_1 + \alpha l_2}{AE} \right) P \quad \text{Con } P = R_{cd} = R_{ck}/3 \text{ entonces: } (D \cdot 1/3 R_{ck}) / (40 \cdot R_{ck}) = D / 120 \quad (F.44)$$

$$\text{Con } P = R_{cd} = R_{ck}/2,5 \text{ entonces: } (D \cdot 1/3 R_{ck}) / (40 \cdot R_{ck}) = D / 100$$

siendo

- s_i el asiento del pilote individual aislado;
- D el diámetro del pilote (para formas no circulares se obtendrá el diámetro equivalente);
- P la carga sobre la cabeza; **del pilote P_i**
- R_{ck} la carga de hundimiento;
- l_1 la longitud del pilote fuera del terreno;
- l_2 la longitud del pilote dentro del terreno;
- A el área de la sección transversal del pilote;
- E el módulo de elasticidad del pilote; Puede tomarse el clásico: $E = 2 \cdot 10^5$ daN/cm²
- α un parámetro variable según el tipo de transmisión de cargas al terreno, $\alpha=1$ para pilotes que trabajan principalmente por punta y $\alpha=0.5$ para pilotes flotantes. Para situaciones intermedias, se adoptará el siguiente valor de α :

$$\alpha = \frac{1}{R_{ck}} (0,5 R_{fk} + R_{pk}) \quad (F.45)$$

donde

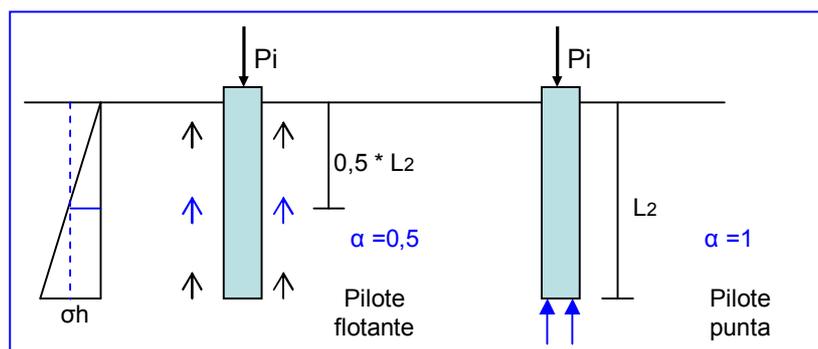
- R_{pk} es la carga de hundimiento por punta; $R_{ck} = R_{pk} + R_{fk}$
- R_{fk} es la carga de hundimiento por fuste.

Observaciones en los ensayos de Mezenbach cuando la carga a la que se somete al pilote se aproxima a su carga admisible teórica: $\Delta L = D / 100$

El acortamiento elástico de un pilote, de acuerdo con la ley de Hooke es: $\Delta l = \frac{P \cdot L}{A \cdot E}$

La expresión de Mazenbach originalmente utilizaba un el factor 30 en lugar de 40. Por otro lado en cuanto a la seguridad antes de CTE era usual un coeficiente de 3 por punta y 2 por fuste

Sobre el coeficiente “ α ”



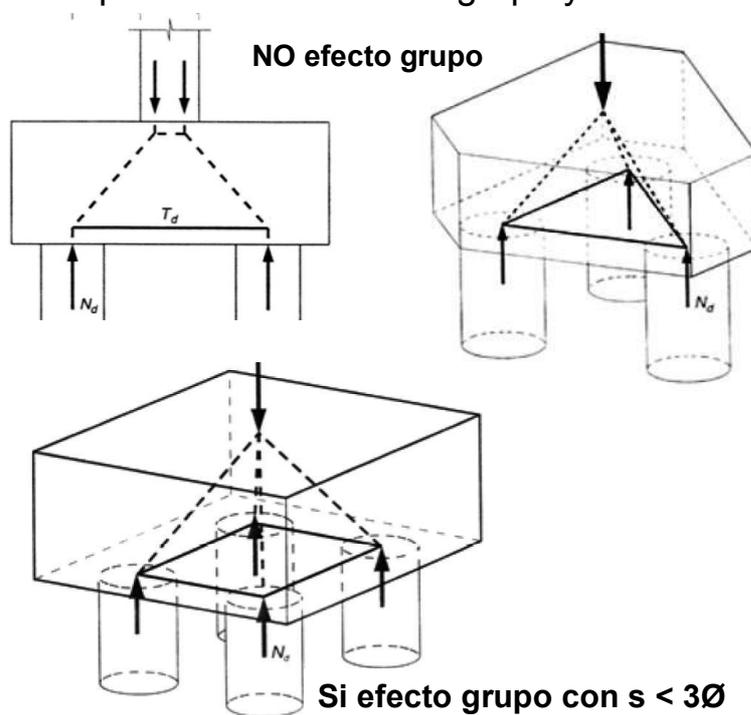
2 GRUPO DE PILOTES: (efecto de conjunto)

2.1 Carga de hundimiento grupo. Eficiencia (a partir de 4 pilotes CTE)



Para determinar la carga admisible de un grupo de pilotes, se suma la carga de hundimiento de todos los pilotes, afectados por un coeficiente de grupo y un factor de seguridad de carga admisible:

$$R_{cd, g} = \frac{\eta}{\gamma_R} * \sum_1^n R_{ck, i}$$



Siendo:

En general no hay efecto grupo con $s \geq 3 \varnothing$

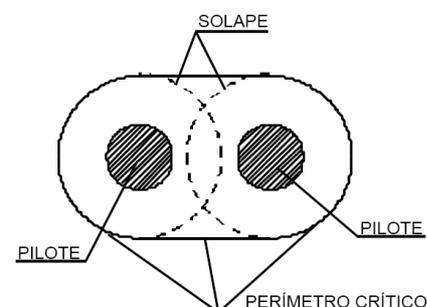


$R_{cd, g}$ = Resistencia de cálculo al hundimiento del grupo.

$R_{ck, i}$ = Resistencia al hundimiento del pilote individual.

$\gamma_R = 3$ Coeficiente de seguridad pactado (CTE).

η = Coeficiente de eficiencia.



Para separaciones entre pilotes $s \geq 3$ diámetro $\eta = 1$

Para separaciones entre pilotes $s = 1$ diámetro $\eta = 0,7$ (pantalla de pilotes)

Para valores intermedios se interpola linealmente

Si alguna de las cargas P_i resultara negativa (es decir, de tracción), puede admitirse si es del mismo orden del peso del pilote.

Si es superior puede aumentarse el peso del encepado (lo cual suele ser antieconómico) o mejorar la inercia del grupo (mayor $\sum F_i^2$ ó $\sum F_{xi}^2$), separando más los pilotes.

En determinados casos se llega a hacer trabajar los pilotes a tracción aumentando su longitud y disponiendo una armadura adecuada.

2.2 Asiento del grupo de pilotes

F.2.6.2 Consideración del efecto grupo

- 1 En los grupos de pilotes, y debido a la interferencia de las cargas, el asiento de cada pilote puede ser mayor. Para tenerlo en cuenta, se podrán adoptar las siguientes simplificaciones:
- 2 Para pilotes columna, trabajando por punta en roca, separados más de tres diámetros, el efecto grupo se considera despreciable.
- 3 Para otras situaciones se puede suponer que toda la carga del grupo está uniformemente repartida en un plano situado a la profundidad "z" bajo la superficie del terreno:

$$Z = \alpha \cdot l_2 \quad l_2 = \text{longitud del pilote dentro del terreno} \quad (F.46)$$

con los significados de " α " y " l_2 " indicados anteriormente y con unas dimensiones transversales B_1 x L_1 dadas por:

Pilote columna: $\alpha = 1$	Pilote flotante: $\alpha = 0,5$
Situaciones intermedias; $\alpha = \frac{1}{Rck} (0,5Rfk + Rpk)$	

$$B_1 = B_{\text{grupo}} + (1 - \alpha) l_2 \quad (F.47)$$

$$L_1 = L_{\text{grupo}} + (1 - \alpha) l_2 \quad (F.48)$$



siendo B_{grupo} y L_{grupo} las dimensiones del grupo, considerando planos exteriores tangentes a los pilotes externos del grupo.

Cuadro resumen profundidad del plano virtual para estimación de asiento grupo pilotes

Pilote flotante	Pilote columna
<p>Superficie apoyo equivalente:</p> $S = [B_{\text{Grupo}} + (1 - 0,5) * L_2] \times [L_{\text{Grupo}} + (1 - 0,5) * L_2]$	<p>Superficie apoyo equivalente:</p> $S = B_{\text{Grupo}} \times L_{\text{Grupo}}$



- 4 El cálculo del asiento debido a esta carga vertical repartida en profundidad se estimará de acuerdo con los procedimientos generales de cálculo de asientos de cimentaciones superficiales.

5.3.4.1.4 Consideraciones del efecto grupo

- 1 De forma general, para el cálculo de los pilotes, no se considerará el efecto grupo para una separación entre ejes de pilotes igual o mayor a 3 diámetros.
- 2 A partir de grupos de 4 pilotes se debe considerar que la proximidad entre los pilotes se traduce en una interacción entre ellos, de tal forma que si el grupo tiene n pilotes, y la carga de hundimiento del pilote aislado es R_{ck} , la carga que produce el hundimiento del grupo, R_{ckg} , en general, no suele ser igual a $n \cdot R_{ck}$, al tener que aplicar a este valor, $n \cdot R_{ck}$, un coeficiente de eficiencia, η , que se define como el cociente:

$$\eta = \frac{\text{Carga de hundimiento del grupo}}{n \cdot \text{Carga hundimiento del pilote individual}} = \frac{R_{ckg}}{n \cdot R_{ck}} \quad (5.13)$$

Siendo n el numero de pilotes

- 3 El coeficiente de eficiencia será de 1, para separaciones entre ejes iguales o superiores a 3 D. Para separaciones de 1 D el coeficiente de eficiencia será 0,7. Para separaciones entre 1 D y 3 D se interpolará linealmente entre 0,7 y 1.
- 4 En pilotes hincados en arenas densas o muy densas se podrá adoptar un coeficiente de eficiencia igual a 1. Podrá aumentarse este valor, previa justificación, por la posible compactación que se pueda producir, sin que en ningún caso pueda ser superior a 1,3.
- 5 Para determinar el valor de cálculo de la resistencia al hundimiento del grupo, analizado como una única cimentación que engloba los pilotes, debe utilizarse un coeficiente, γ_R , que como mínimo será el indicado en la tabla 2.1.

5.3.4.1.5 Métodos para verificar el estado límite por hundimiento de un pilote

- 1 En el caso de pilotes en arcillas y arenas el valor de cálculo de la resistencia del terreno R_{cd} que permite verificar el estado límite del hundimiento se obtendrá a partir de la expresión (5.7), pudiéndose determinar la resistencia R_{ck} del terreno con los métodos indicados en el anejo F.
- 2 En el caso de pilotes en roca se puede determinar directamente el valor de R_{cd} a través de los valores $q_{p,d}$ y $\tau_{f,d}$ determinados según se indica en el anejo F.2.

5.3.5 Cálculo de la resistencia al arrancamiento

- 1 Si el pilote está sometido a tracción, la sollicitación no debe superar la capacidad resistente al arrancamiento. Se puede considerar que la resistencia al arrancamiento es igual al 70% de la resistencia por fuste a compresión, establecida en la determinación de la carga de hundimiento.
- 2 En los pilotes sometidos a tracción se debe prestar un especial cuidado a los problemas de posible corrosión.

$$\gamma_R = 3,5 \text{ coeficiente seguridad}$$

5.3.6 Resistencia del terreno frente a acciones horizontales

- 1 Tal como se ha indicado en el apartado 5.2.3, el cálculo de los pilotes frente a esfuerzos horizontales, a efectos de este DB, tan sólo debe realizarse en aquellos casos en los que la máxima componente de los empujes horizontales sea superior al 10% de la carga vertical compatible con ella.
- 2 En el caso de utilizar pruebas de carga en la estimación de la carga horizontal de rotura, se podrán reducir los coeficientes de seguridad en función de la importancia de las pruebas. El coeficiente de seguridad no será, en cualquier caso, inferior al 70% de los valores recogidos en la tabla 2.1.
- 3 En el anejo F.2.5. se indica un método para la estimación de la resistencia del terreno frente a acciones horizontales, válida para pilote aislado.
- 4 En el caso de grupo de pilotes, la resistencia frente a esfuerzos horizontales del terreno situado alrededor del grupo se estimará como el menor valor de los dos siguientes:
 - a) la suma de las resistencias horizontales del terreno alrededor de cada pilote, calculadas individualmente;
 - b) la resistencia horizontal del terreno correspondiente a un pilote equivalente cuyo diámetro fuese la anchura del grupo y cuya profundidad fuese igual a la profundidad media de los pilotes del grupo.
- 5 En los casos en los que este aspecto en el proyecto resulte crítico, se deben utilizar procedimientos de cálculo más detallados o realizar pruebas de carga que permitan una estimación más exacta de la carga de rotura.

$$\gamma_R = 3,5 \text{ coeficiente seguridad}$$

5.3.7 Movimientos de la cimentación

5.3.7.1 Asientos

- 1 La limitación de asientos se hará de acuerdo con los criterios recogidos en el apartado 2.4.3.
- 2 Si el asiento en los pilotes resulta ser un aspecto crítico, será conveniente la realización de pruebas de carga especialmente diseñadas para la determinación de asientos a largo plazo, única manera precisa de conocer la relación carga-asiento. Para la realización de dicha prueba se recomienda independizar la resistencia de punta de la del fuste del pilote.
- 3 En los casos en los que este aspecto no resulte crítico, los asientos se calcularán tanto para el pilote aislado como teniendo en cuenta el efecto grupo, debiéndose cumplir que los valores así estimados deben ser menores que los límites admisibles para los estados límite de servicio. En el anejo F2.6. se indica un método para la estimación de asientos en pilotes.

5.3.7.2 Movimientos horizontales

- 1 Los movimientos horizontales deben estudiarse en aquellos casos en los que se analice el comportamiento de los pilotes frente a esfuerzos horizontales.
- 2 Si el movimiento horizontal de la cimentación pilotada resulta ser un aspecto crítico del problema en estudio, será conveniente hacer pruebas de campo para estimarlos.
- 3 Se comprobará que los movimientos horizontales sean inferiores a los límites admisibles para los estados límite de servicio. En el anejo F.2.7. se indica un método simplificado para su estimación, distinguiendo entre pilote aislado y efecto grupo.

DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LOS PILOTES

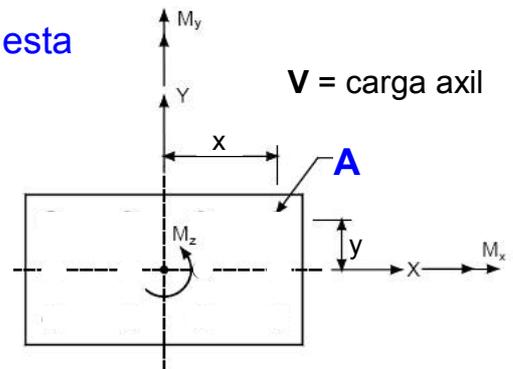
Esfuerzo transmitido a cada pilote por el encepado. (encepado rígido).

Se utiliza la formula de Navier para flexión compuesta

con una pequeña adaptación.

Tensión que en un punto de la sección, según

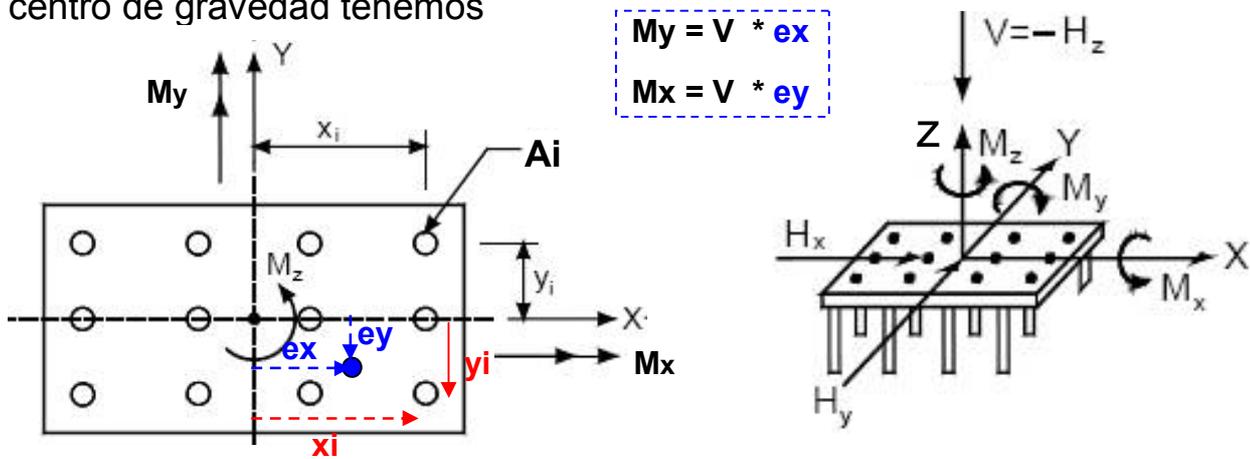
$$\text{Navier: } \sigma_{(xy)} = \frac{V}{A} \pm \frac{Mx}{Ix} y \pm \frac{My}{Iy} x$$



Ahora en lugar de una sección maciza (**A**), tenemos un conjunto (**n**) de pilotes de área individual **Ai** y el axil del pilar se reparte entre todos los pilotes de su encepado

El momento de inercia de cada uno de los pilotes respecto de los ejes principales y centrales del encepado es: aplicando Steiner = momento de inercia baricéntrico respecto del c. d. g. de cada pilote + Ai del pilote * distancia al cuadrado al eje considerado.

Despreciando en esta suma el primer sumando frente al segundo, es decir, despreciando el momento de inercia baricéntrico de cada pilote respecto de su centro de gravedad tenemos



El esfuerzo axil en cada uno de los "n" pilotes supuestos iguales es:

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A_i} = \frac{V}{n * A_i} \pm \frac{Mx}{\sum A_i * y_i^2} y_i \pm \frac{My}{\sum A_i * x_i^2} x_i$$

Se deduce finalmente:

$$P_i = V \left[\frac{1}{n} + \frac{ey * yi}{\sum y_i^2} + \frac{ex * xi}{\sum x_i^2} x_i \right]$$


(iguales todos los pilotes del mismo encepado)

Siendo:

V la carga vertical transmitida al encepado = carga pilar + peso propio encepado + (peso pilote en algunas normas, no en CTE) + rozamiento negativo en su caso.

ex, ey coordenadas cartesianas de centro de presiones .

xi, yi coordenadas cartesianas del c.d.g. del pilote que queremos averiguar su carga axil total.

n = número de pilotes

5.2.1 Acciones del resto de la estructura sobre la cimentación

- 1 Para el dimensionado del pilotaje se tomarán las acciones indicadas en el apartado 2.3.2.
- 2 En el caso de un grupo de pilotes, para cada combinación de acciones se debe realizar un reparto de cargas entre los pilotes del grupo. Este reparto requiere de un proceso iterativo. Los coeficientes de reparto entre pilotes dependen de la naturaleza del terreno y de la rigidez de los pilotes y del encepado.
- 3 En general, si el encepado que une los pilotes es suficientemente rígido, bastará con considerar la distribución de cargas que se obtiene al suponer que los pilotes están articulados en cabeza y que el encepado es infinitamente rígido (véase Figura 5.3).
- 4 Si hubiera pilotes de distinto diámetro dentro de un mismo grupo, los valores de cálculo se determinarán para cada uno de los diámetros (o diámetros equivalentes para formas no circulares) que se usen.

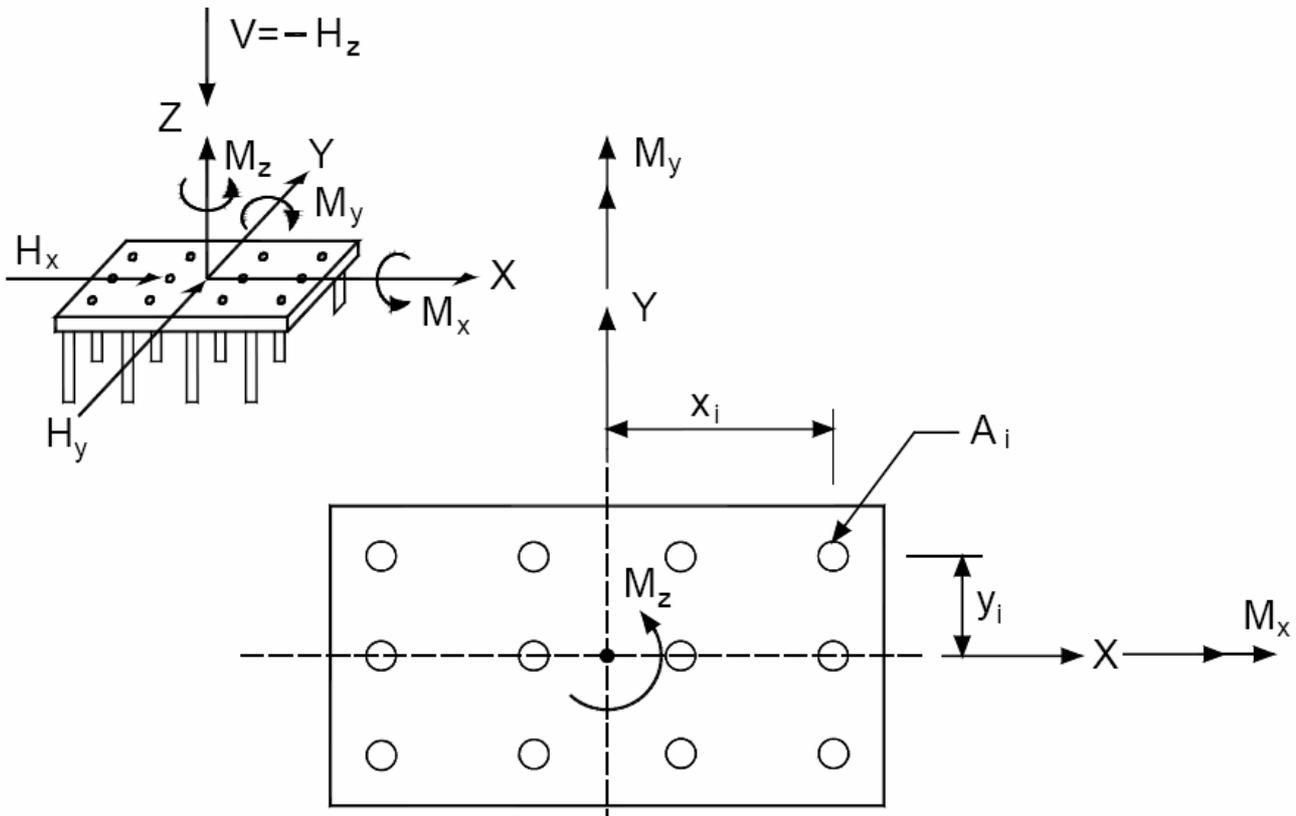


Figura 5.3. Distribución de esfuerzos en la hipótesis de encepado rígido y pilotes articulados en cabeza

Resultante de las acciones

Vertical = V

Horizontales = H_x, H_y

Momentos = M_x, M_y, M_z

Reparto entre pilotes

Compresión
$$P_i = \frac{A_i}{\sum A_i} \cdot V \pm \frac{A_i y_i}{\sum A_i y_i^2} \cdot M_x \pm \frac{A_i x_i}{\sum A_i x_i^2} \cdot M_y$$

(pueden no ser iguales todos los pilotes del mismo encepado)

Cortantes

$$\left\{ \begin{aligned} H_{xi} &= \frac{A_i}{\sum A_i} \cdot H_x \pm \frac{A_i^2 y_i}{\sum A_i^2 (x_i^2 + y_i^2)} \cdot M_z \\ H_{yi} &= \frac{A_i}{\sum A_i} \cdot H_y \pm \frac{A_i^2 x_i}{\sum A_i^2 (x_i^2 + y_i^2)} \cdot M_z \end{aligned} \right.$$

3/ Acciones especiales: ROZAMIENTO NEGATIVO

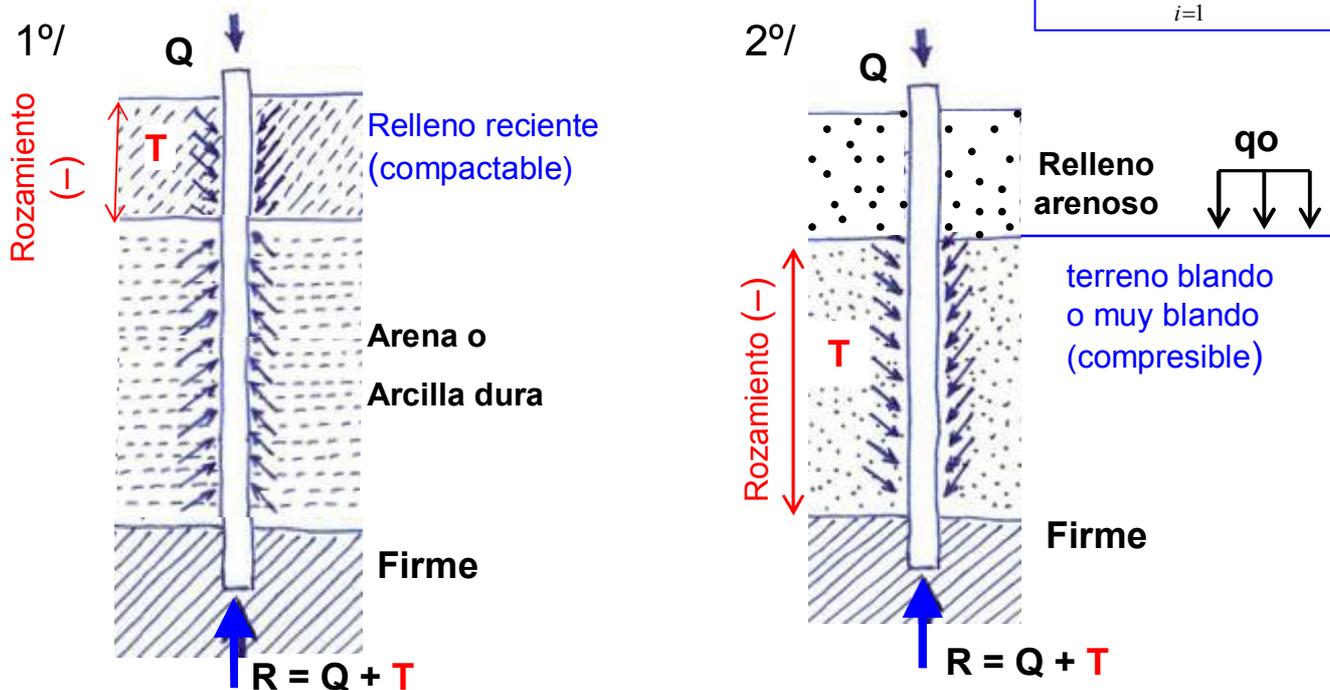
El fenómeno se produce en aquellos casos en que los asientos o consolidaciones del terreno que envuelve al pilote son mayores que el asiento del propio pilote.

El terreno queda parcialmente colgado de los pilotes, a los que transmite por tanto una tensión tangencial que multiplicada por la superficie afectada del pilote se convierte en una fuerza que intenta hundir más el pilote. **Asientos de 1 cm pueden producir ya efectos notables..**

Es típico cuando se atraviesan rellenos o terrenos blandos antes de encontrar firme.

Se estima (CTE) la fricción negativa unitaria sobre el pilote con:

$$\sigma_{s,neg} = \sum_{i=1}^n \beta_i * \sigma'_{vi}$$



Tradicionalmente se consideran tres casos en arcillas y uno en arenas:

1/ Relleno de suelo arcilloso colocado sobre un estrato de suelo granular.

(por esta razón se desaconseja en todos los casos estos rellenos). El terreno arcilloso se compacta por su propio peso y aparece fricción negativa sobre el pilote.

2/ Relleno de suelo granular sobre un estrato arcilloso. El terreno granular actúa como una sobrecarga (q_0) sobre el suelo arcilloso que se compacta y ocasiona fricción negativas sobre el pilote.

3/ Descenso del nivel freático en suelos arcillosos. Se incrementa las tensiones verticales efectivas sobre la arcilla lo que induce en la misma asientos por consolidación y fricción negativa. Alternativamente ascenso nivel freático y humectación de suelos colapsables.

4/ Compactación de estratos arenosos: debidos a efectos dinámicos como el sismo

El rozamiento negativo sobre el pilote en arcillas puede evaluarse por la expresión:

$$\sigma_{s,neg} = K'_o * \sigma'_{vi} * \tan \delta' \left. \begin{array}{l} K'_o = (1 - \sin \phi) \text{ coeficiente empuje al reposo} \\ \delta' \text{ ángulo rozamiento pilote - terreno } \leq \phi \end{array} \right\}$$

Con carga superficial añadida (q_0) se incrementa la fricción negativa en:

$$K'_o * q_0 * \tan \delta'$$

Rozamiento negativo (CTE)

5.2.2 Rozamiento negativo

- 1 La situación de rozamiento negativo se produce cuando el asiento del terreno circundante al pilote es mayor que el asiento del pilote. En esta situación, el pilote soporta, además de la carga que le transmite la estructura, parte del peso del terreno. Como consecuencia, el rozamiento negativo hace que aumente la carga total de compresión que el pilote tiene que soportar.
- 2 Debe estudiarse el posible desarrollo de rozamiento negativo cuando se dé alguna de las circunstancias siguientes:
 - a) consolidación por su propio peso de rellenos o niveles de terreno de reciente deposición;
 - b) consolidación de niveles compresibles bajo sobrecargas superficiales;
 - c) variaciones del nivel freático;
 - d) humectación de niveles colapsables;
 - e) asientos de materiales granulares inducidos por cargas dinámicas (vibraciones, sismo);
 - f) subsidencias inducidas por excavaciones o disolución de materiales profundos.
- 3 La identificación del problema puede realizarse comparando, mediante un cálculo previo, los asientos del terreno y del pilote. En general, es suficiente una pequeña diferencia de asientos para que se produzca la situación de rozamiento negativo. Un asiento de 1 cm puede producir ya efectos notables.
- 4 El rozamiento lateral por fuste se puede reducir notablemente en pilotes prefabricados (hormigón, metálicos o madera) tratándolo mediante pinturas bituminosas.
- 5 El rozamiento unitario negativo en el fuste se calculará con la expresión:

$$F_{s,neg} = \sum_{i=1}^n \beta_i * \sigma'_{vi} \quad (5.4)$$

siendo:

i cada una de los terrenos con rozamiento negativo a lo largo del pilar

σ'_{vp} = tensión efectiva vertical en el punto del fuste considerado.

$\beta = 0,25$ para arcillas y limos blandos...

Para una arcilla estándar con $\phi' = 20^\circ$ y δ' máximo = ϕ
 $(1 - \sin \phi) * \tan \phi = (1 - 0,342) * 0,364 = 0,24 \approx 0,25$ (CTE)

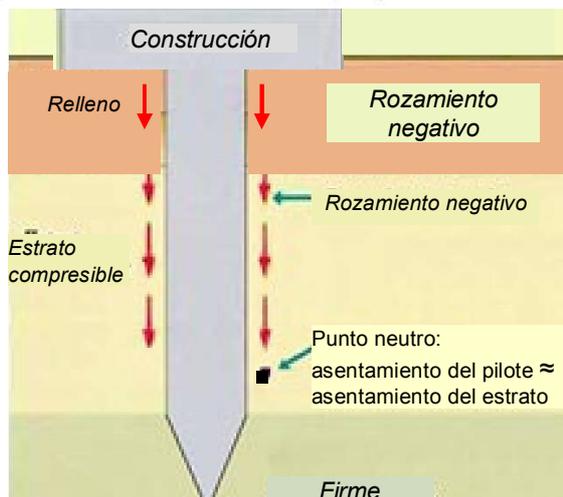
$\beta = 0,10$ para arenas flojas

Para una arena floja con $\phi' = 30^\circ$ y δ' máximo = $1/3 \phi$
 $(1 - \sin \phi) * \tan 1/3 \phi = (1 - 0,5) * 0,176 = 0,09 \approx 0,10$ (CTE)

$\beta = 0,80$ para arenas densas. Con la formula de rozamiento en arenas (CTE anejo F.2.1)

$\tau_f = \sigma'_{v} * 0,75 * \text{tg} \phi$ Con $\phi_{max} = 45^\circ \rightarrow \tan 45^\circ = 1 \rightarrow K_f = 0,75 \approx 0,8 \rightarrow F_{s,neg} = \sum 0,8 * \sigma'_{vi}$

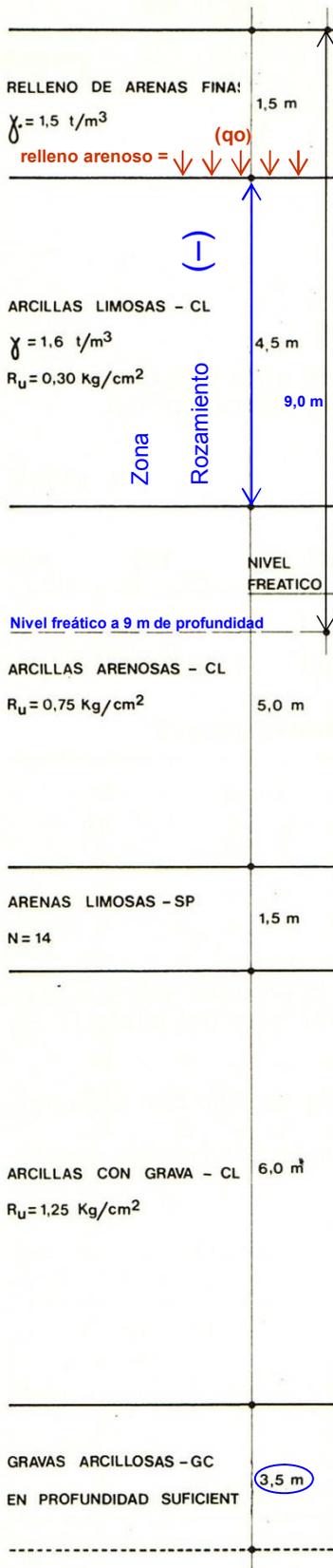
- 6 Cuando el rozamiento negativo no se desarrolle en su totalidad a lo largo del fuste, podrán emplearse métodos de cálculo que consideren deformaciones relativas entre el suelo y el pilote para cuantificar la profundidad hasta la que se produce.
- 7 Los pilotes exteriores de los grupos de pilotes deben considerarse sometidos al mismo rozamiento negativo que si estuviesen aislados, especialmente los situados en las esquinas.



Zona de rozamiento negativo
 Asiento pilote < asiento suelo que rodea al pilote

Ejemplo rozamiento negativo en cálculo de pilote NTE-CPI

6. Ejemplo



Datos

Esfuerzos en el plano superior del grupo de pilotes.
Características del terreno:

$$Q = 200 \text{ t}; M_x = 10 \text{ mt}, M_y = 3,5 \text{ mt}$$

Las especificadas en el esquema adjunto. Existe rozamiento negativo por consolidación de la capa blanda de ARCILLAS LIMOSAS-CL al disponer un relleno de ARENAS de 1,5 m de espesor.

Hormigonado de los pilotes:

Utilización de CPI-5, y hormigonado con agua en la entubación.
Hormigonado en agua

Cálculo

Predimensionado

$$n = 4; D = 45 \text{ cm}; L = 19,5 \text{ m-apoyo en gravas}$$

Carga axil equivalente E:

$$M = 10 + 3,5 = 13,5 \text{ mt}$$

En la Tabla 1, $E = 230 \text{ t}$

Resistencia por punta, P:

Para $L = 19,5 \text{ m}$, se tiene una penetración en las gravas de $1 \text{ m} \approx 2 D$
En la Tabla 5, $P = 56,7 \text{ t}$

Resistencia por fuste, F:

Estrato granular entre estratos coherentes (aplicación de la regla complementaria).
En las Tablas 8, 9 y 7
 $F = 1 \times 7,2 + 6 \times 5,3 + 1,5 \times 7,2 + 5 \times 4,2 + 4,5 \times 2,1 = 80,25 \text{ t}$

Coefficiente, c: (paso a valores de cálculo)

En la Tabla 2, $P < 3 F$, $c = 1,14$

Rozamiento negativo, R_1 :

$$\text{En la Tabla 10, } R_1 = 4,5 \times 2,12 = 9,54 \text{ t}$$

Comprobación $E < c(P + F - R_1)$:

$$230 > 1,14 (56,7 + 80,25 - 9,54)$$

$$230 \text{ t} > 145,2 \text{ t. No se cumple}$$

seguridad = 3,5 → 4 pilotes / 3,5 = 1,14

Coefficiente, c':

En la Tabla 15, $c' = 4$

Resistencia estructural, T:

En la Tabla 16, $T = 55,7$

Comprobación $E < c'(T - 0,4 R_1)$:

$$230 > 4 (55,7 - 0,4 \times 9,54)$$

$$230 \text{ t} > 184,6 \text{ t. No se cumple}$$

Corrección de los parámetros del predimensionado:

$$n = 4; D = 55 \text{ cm}; L = 22 \text{ m}$$

Carga axil equivalente E:

$$M = 13,5 \text{ mt}$$

En la Tabla 1, $E = 225 \text{ t}$

Resistencia por punta P:

Para $L = 22 \text{ m}$, se tiene una penetración en las gravas de $3,50 \text{ m} \approx 6 D$
En la Tabla 5, $P = 107,6 \text{ t}$

Resistencia por fuste, F:

Estrato granular entre estratos coherentes (aplicación de la regla complementaria)
En las Tablas 8, 9 y 7
 $F = 3,5 \times 8,8 + 6 \times 6,5 + 1,5 \times 8,8 + 5 \times 5,1 + 4,5 \times 2,5 = 119,75 \text{ t}$

Coefficiente c:

En la Tabla 2, $P < 3 F$, $c = 1,14$

Rozamiento negativo, R_1 :

$$\text{En la Tabla 10, } R_1 = 4,5 \times 2,59 = 11,65 \text{ t}$$

Comprobación $E < c(P + F - R_1)$:

$$225 < 1,14 (107,6 + 119,75 - 11,65)$$

$$225 \text{ t} < 248 \text{ t. Se cumple}$$

Coefficiente, c':

En la Tabla 15, $c' = 4$

Resistencia estructural, T:

En la Tabla 16, $T = 83,2 \text{ t}$

Comprobación $E < c'(T - 0,4 R_1)$:

$$225 < 4 (83,2 - 0,4 \times 11,65)$$

$$225 \text{ t} < 314 \text{ t. Se cumple}$$

Asientos

No es necesaria la comprobación de asientos por estar empotrada la punta de los pilotes en gravas con profundidad suficiente.

Separación, S:

En la Tabla 17, $S = 160 \text{ cm}$

Resultados:

$$n = 4; D = 55 \text{ cm}; L = 22 \text{ m}; S = 160 \text{ cm}$$

5.2.3 Empujes horizontales causados por sobrecargas

- 1 Cuando existan suelos blandos en profundidad, las cargas colocadas en superficie producen desplazamientos horizontales del terreno que pueden afectar negativamente a las cimentaciones próximas pilotadas. Por tanto, si en ese tipo de terreno se proyecta un edificio contiguo a una construcción pilotada, debe evitarse una cimentación superficial.
- 2 Los pilotes ejecutados en taludes pueden estar sometidos también a cargas horizontales importantes.
- 3 A efectos de este DB podrá prescindirse de la consideración de los empujes horizontales sobre los pilotes siempre que la máxima componente de estos empujes sea inferior al 10% de la carga vertical compatible con ella.
- 4 El estudio del efecto de los empujes horizontales requiere un análisis de interacción terreno-pilote, que será necesario realizar con tanto más detalle cuanto más crítico resulte el problema. Para el cálculo se podrá seguir el método simplificado que se indica a continuación.

5.2.3.1 Método simplificado para la consideración del empuje horizontal en pilotes

- 1 El empuje horizontal se estimará de acuerdo con la siguiente expresión:

$$p_h = p_v - 2 c_u \quad (5.5)$$

siendo

p_v la presión vertical en la parte superior del estrato blando, considerando un reparto a 30° de las presiones en superficie.

c_u la resistencia al corte sin drenaje.

- 2 Se supondrá que cada pilote soporta una carga por unidad de longitud igual al valor menor de los siguientes:

- a) $P_p = p_h \cdot S$, siendo S la separación entre ejes de pilotes;
- b) $P_p = p_h \cdot 3D$, siendo D el diámetro del pilote;
- c) $P_p = p_h \cdot H$, siendo H el espesor del estrato blando.

- 3 Cuando existan varias filas de pilotes se podrá suponer que los esfuerzos se distribuyen entre las sucesivas filas de acuerdo con la siguiente expresión:

$$p'_h = p_h - \frac{P_p}{S} \quad (5.6)$$

que se aplicará de forma sucesiva $p''_h = p'_h - \frac{P_p}{S}$;; $p^n_h = p^{n-1}_h - \frac{P_p}{S}$

- 4 Una vez calculado el valor de P_p se obtendrán los valores de los momentos flectores en los pilotes como una viga, suponiendo, según los casos, las condiciones en los apoyos que se reflejan en la Figura 5.4 y que se concretan en:

- a) empotramiento en cabeza;
- b) empotramiento a 0,5 m en la capa resistente inferior;
- c) empotramiento a 1 m en capas resistentes situadas por encima de la capa blanda si su espesor es superior a 8 diámetros, en caso contrario se considerará como una articulación (apoyo).

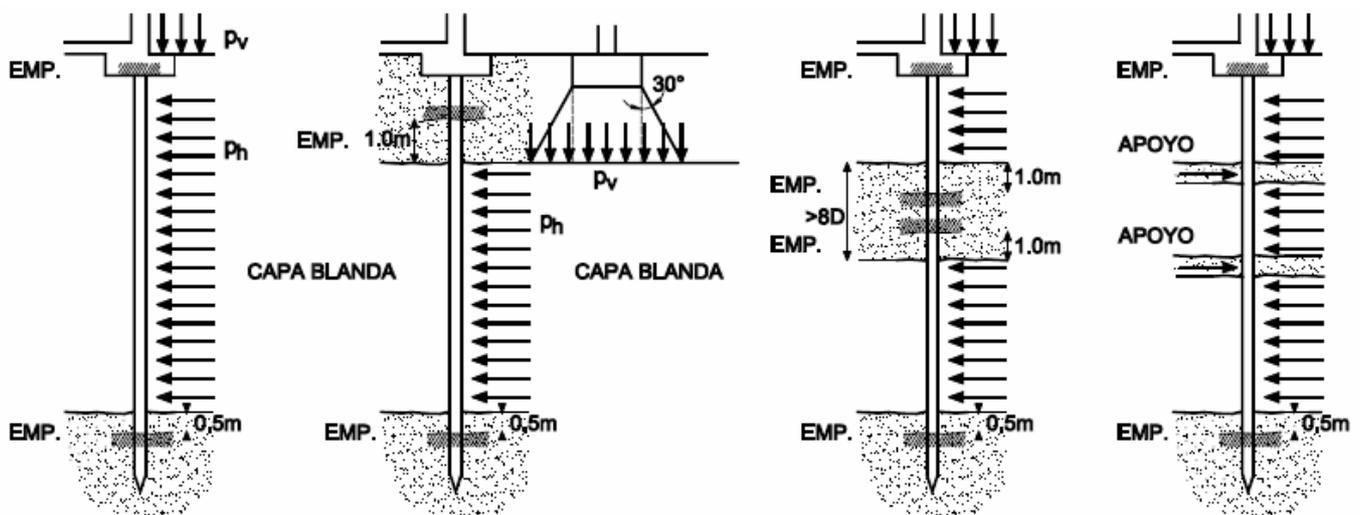


Figura 5.4. Condiciones de apoyo para el cálculo de esfuerzos horizontales en los pilotes

5.3 Análisis y dimensionado

- 1 Las comprobaciones para verificar que una cimentación profunda cumple los requisitos necesarios se basarán en el método de los estados límite tal y como se indica en el apartado 2.2.
- 2 Además deben analizarse los problemas indicados en el apartado 5.3.3.

5.3.1 Estados límite últimos

- 1 Las formas de fallo de una cimentación profunda pueden ser de muy diverso tipo. Los tipos de rotura más comunes y que en cualquier caso deben verificarse son:
 - a) estabilidad global;
 - b) hundimiento;
 - c) rotura por arrancamiento;
 - d) rotura horizontal del terreno bajo cargas del pilote;
 - e) capacidad estructural del pilote.
- 2 La verificación de estos estados límite para cada situación de dimensionado se hará utilizando la expresión (2.2) y los coeficientes de seguridad parciales para la resistencia del terreno y para los efectos de las acciones del resto de la estructura sobre la cimentación definidos en la tabla 2.1.

5.3.1.1 Estabilidad global

- 1 El conjunto de la estructura y su cimentación pilotada pueden fallar mediante un mecanismo de rotura aún más profundo que la cimentación o que, no siendo tan profundo, pudiera cortar los pilotes por su fuste.

5.3.1.2 Hundimiento

- 1 Se podrá producir este modo de rotura cuando la carga vertical sobre la cabeza del pilote supere la resistencia del terreno causando asientos desproporcionados. En el apartado 5.3.4, se establece un método para la determinación de la carga de hundimiento, R_{ck} .
- 2 Teniendo en cuenta el valor de los coeficientes de la tabla 2.1 y las consideraciones hechas en el apartado 2.4.2.6 el valor de R_{cd} puede expresarse para cada situación de dimensionado mediante la siguiente ecuación:

$$R_{cd} = \frac{R_{ck}}{\gamma_R} \quad (5.7)$$

5.3.1.3 Rotura por arrancamiento

- 1 Los pilotes podrán utilizarse para soportar cargas de tracción en su cabeza. Si estas cargas exceden la resistencia al arrancamiento, el pilote se desconecta del terreno, rompiendo su unión y produciéndose el consiguiente fallo. Este tipo de mecanismo y el procedimiento de evaluación de la carga de arrancamiento se consideran en el apartado 5.3.5.

5.3.1.4 Rotura horizontal del terreno bajo cargas del pilote

- 1 Cuando las cargas horizontales aplicadas en los pilotes producen en el terreno tensiones que éste no puede soportar, se producen deformaciones excesivas o incluso, si el pilote es corto y suficientemente resistente como estructura, el vuelco del mismo. Este estado límite debe comprobarse tan sólo en aquellos casos en los que la máxima componente de los empujes horizontales sobre los pilotes sea mayor del 10% de la carga vertical compatible con ellos.
- 2 La carga horizontal límite que puede soportar el terreno que rodea a los pilotes o a los grupos de pilotes se considera en el apartado 5.3.6.

Análisis y dimensionado CTE

5.3.1.5 Capacidad estructural del pilote

- 1 Las cargas transmitidas a los pilotes en su cabeza inducen esfuerzos en los mismos que pueden dañar su estructura.
- 2 Los criterios de verificación de la capacidad estructural de los pilotes frente a los esfuerzos axiales (tope estructural), cortantes y momentos flectores a lo largo de su eje se indican en el apartado 5.3.8.

5.3.2 Estados límite de servicio

- 1 Los estados límite de servicio en las cimentaciones profundas están normalmente asociados a los movimientos.
- 2 Tanto al proyectar pilotes aislados como grupos de pilotes, deben realizarse las comprobaciones relacionadas con los movimientos (asientos y desplazamientos transversales) en los que influye no sólo la resistencia del terreno sino también su deformabilidad, tal y como se indica en el apartado 5.3.7.

5.3.3 Otras consideraciones

- 1 Aparte de la consideración de los estados límite citados en los apartados precedentes, se tendrán en cuenta otros efectos que pueden afectar a la capacidad portante o aptitud de servicio de la cimentación. Entre los posibles problemas que puedan presentarse se hará una consideración expresa de los siguientes:
 - a) influencia de la hincada de pilotes prefabricados en estructuras o edificaciones cercanas;
 - b) ataques del medio ambiente al material del pilote con la consiguiente merma de capacidad. Se debe prestar una atención especial al efecto de la corrosión del acero en las zonas batidas por la carrera de marea o por las oscilaciones del nivel freático;
 - c) posible expansividad del terreno que pueda provocar el problema inverso al rozamiento negativo, causando el levantamiento de la cimentación;
 - d) posible heladicidad del terreno, que pudiera afectar a encepados poco empotrados en el terreno;
 - e) protección contra la helada en las cabezas de los pilotes recién construidos;
 - f) posible ataque químico del terreno o de las aguas a los pilotes;
 - g) posible modificación local del régimen hidrogeológico por conexión de acuíferos ubicados a distinta profundidad que podrían quedar conectados al ejecutar los pilotes;
 - h) posible contaminación medioambiental por la utilización de lodos o polímeros durante la excavación de pilotes de hormigón "in situ";
 - i) estabilidad de los taludes de las excavaciones y plataformas realizadas para construir el pilotaje;
 - j) desprendimientos sobre la cabeza del pilote recién construido, debidos a la diferencia de cota entre el pilote terminado y la plataforma de trabajo, así como desprendimientos o contaminaciones causadas por la limpieza de la plataforma, especialmente en el caso de pilotes de hélice continua, en los que es necesaria la limpieza de la cabeza para la introducción de la armadura;
 - k) mala limpieza del fondo de las excavaciones de los pilotes perforados;
 - l) problemas de colapso en suelos que tengan una estructura metaestable;
 - m) posibles efectos sísmicos y en particular la posible licuefacción del entorno y que pudiera incluir al propio pilotaje;
 - n) posible pérdida de capacidad portante por socavación de pilotajes.

ENSAYOS PARA CONTROL DE CALIDAD

5.4.2 Control

5.4.2.1 Control de ejecución de pilotes hormigonados in situ

- 1 La correcta ejecución del pilote, incluyendo la limpieza y en su caso el tratamiento de la punta son factores fundamentales que afectan a su comportamiento, y que deben tomarse en consideración para asegurar la validez de los métodos de cálculo contemplados en este DB.
 - 2 Los pilotes ejecutados "in situ" se controlarán durante la ejecución, confeccionando un parte que contenga, al menos, los siguientes datos:
 - a) datos del pilote (Identificación, tipo, diámetro, punto de replanteo, profundidad, etc.);
 - b) longitud de entubación (caso de ser entubado);
 - c) valores de las cotas: del terreno, de la cabeza del pilote, de la armadura, de la entubación, de los tubos sónicos, etc;
 - d) tipos de terreno atravesados (comprobación con el terreno considerado originalmente);
 - e) niveles de agua;
 - f) armaduras (tipos, longitudes, dimensiones, etc.);
 - g) hormigones (tipo, características, etc.);
 - h) tiempos (de perforación, de colocación de armaduras, de hormigonado);
 - i) observaciones (cualquier incidencia durante las operaciones de perforación y hormigonado).
 - 3 Durante la ejecución se consideran adecuados los controles siguientes, según la norma UNE-EN 1536:2000 (tablas 6 a 11):
 - a) control del replanteo;
 - b) control de la excavación;
 - c) control del lodo;
 - d) control de las armaduras;
 - e) control del hormigón.
 - 4 En el control de vertido de hormigón, al comienzo del hormigonado, el tubo Tremie no podrá descansar sobre el fondo, sino que se debe elevar unos 20 cm para permitir la salida del hormigón.
 - 5 En los pilotes de barrena continua se consideran adecuados los controles indicados en la tabla 12 de la norma UNE-EN 1536:2000. Cuando estos pilotes se ejecuten con instrumentación, se controlarán en tiempo real los parámetros de perforación y de hormigonado, permitiendo conocer y corregir instantáneamente las posibles anomalías detectadas.
 - 6 Se pueden diferenciar dos tipos de ensayos de control:
 - a) ensayos de integridad a lo largo del pilote;
 - b) ensayos de carga (estáticos o dinámicos).
 - 7 Los ensayos de integridad tienen por objeto verificar la continuidad del fuste del pilote y la resistencia mecánica del hormigón.
 - 8 Pueden ser, según los casos, de los siguientes tres tipos:
 - a) transparencia sónica;
 - b) impedancia mecánica;
 - c) sondeos mecánicos a lo largo del pilote.
- Además, se podrá realizar un registro continuo de parámetros en pilotes de barrena continua.
- 9 El número y la naturaleza de los ensayos se fijarán en el Pliego de condiciones del proyecto y se establecerán antes del comienzo de los trabajos. El número de ensayos no debe ser inferior a 1 por cada 20 pilotes, salvo en el caso de pilotes aislados con diámetros entre 45 y 100 cm que no debe ser inferior a 2 por cada 20 pilotes. En pilotes aislados de diámetro superior a 100 cm no debe ser inferior a 5 por cada 20 pilotes.

ENSAYOS PARA CONTROL DE CALIDAD 1

1/ Ensayo impedancia mecánica en pilotes in situ

Ensayo no destructivo de integridad mediante el análisis de la respuesta de un elemento a un pequeño impacto.

Es un método más completo que la simple detección de un eco

Principio físico

La impedancia mecánica es la relación entre la fuerza aplicada y la velocidad registrada en cabeza. El método se basa en la analogía con la impedancia eléctrica (Fuerza y Tensión) y (Velocidad e Intensidad).

Requerimientos previos

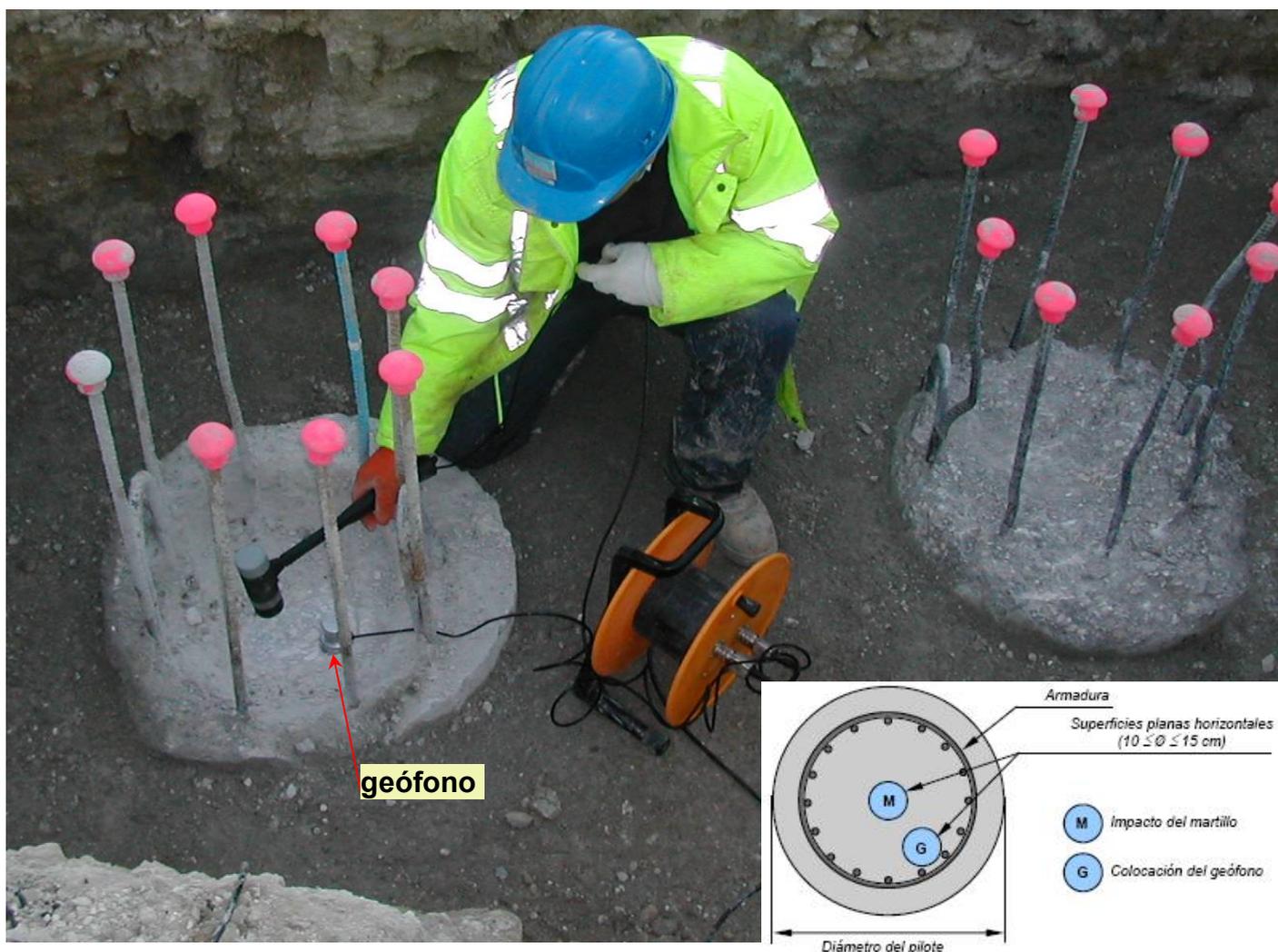
Requiere una pequeña preparación de la cabeza del elemento.

Procedimiento

Se realiza con un equipo portátil, que incluye un auscultador, un martillo instrumentado que mide la fuerza del impacto y un geófono que mide la respuesta en velocidad.

El geófono se acopla correctamente mediante un compuesto viscoso sobre la cabeza del elemento (pilote). Se golpea en su centro del pilote.

Se almacenan digitalmente ambas señales para su posterior tratamiento.



Para pilotes de longitud hasta 30 o 40 Ø en arenas y algo menos en arcillas. Hormigón con al menos 7 días de curación. Rendimiento unos 100 pilotes /día

ENSAYOS PARA CONTROL DE CALIDAD 1

Resultados. Se obtienen varias gráficas que permiten obtener una curva de movilidad que permite calcular los siguientes parámetros:

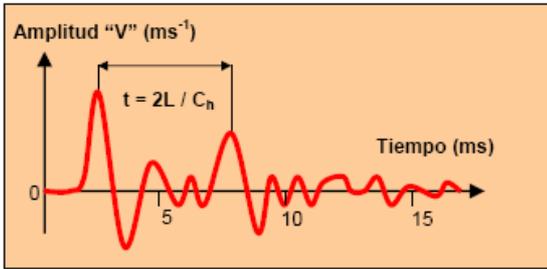


Figura 1. Análisis temporal: amplitud de la señal recibida en función del tiempo.

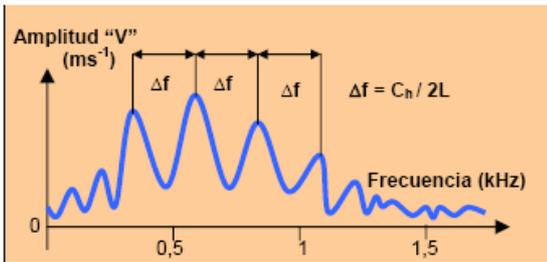


Figura 2. Análisis frecuencial: amplitud de la señal recibida en función de la frecuencia.

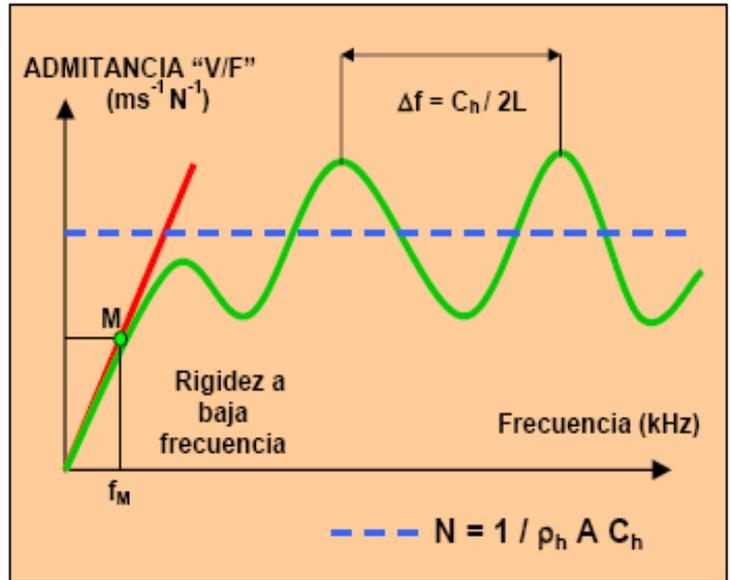
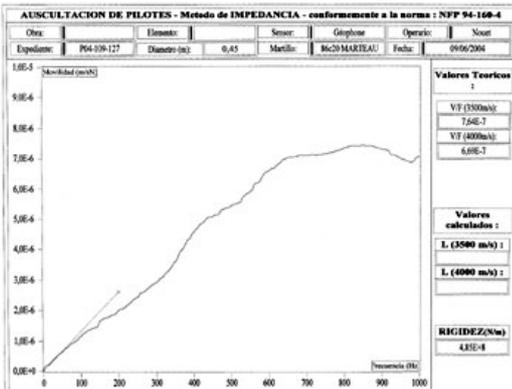


Figura 3. Curva de admitancia teórica de un pilote.

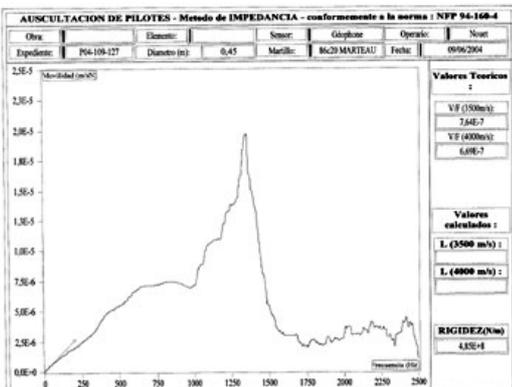
Longitud (entre la cabeza y el reflector) que corresponde a la profundidad del elemento ó a una anomalía,

Rigidez que permite cuantificar la interacción elemento/suelo,

Admitancia que caracteriza la sección y las propiedades mecánicas del material. El análisis conjunto de estos tres parámetros reales y su comparación con la respuesta teórica proporciona un diagnóstico preciso sobre la integridad del elemento.



Curvas de movilidad teórica y real



Corte en la cabeza del pilar detectado en ensayo

ENSAYOS PARA CONTROL DE CALIDAD 2

2/ Ensayo sónico por transparencia o Cross- Hole sónicos.

Para efectuar el ensayo se necesita dejar instalados dentro de los pilotes, tubos para poder introducir sondas hasta la profundidad que se quiera ensayar.

Los tubos por lo general son de acero, con diámetros entre 40 y 50 mm, prefiriéndose el de mayor diámetro. Los empalmes se realizan con manguitos roscados, no se usan uniones soldadas pues dejan rebabas que dificultan el paso de las sondas o perjudican los cables.

El extremo inferior de cada tubo debe cerrarse con tapones metálicos en forma totalmente hermética, de esta manera se impide que ingresen elementos extraños y que haya pérdida de agua que deberá contener al momento del ensayo.

El extremo superior debe cerrarse para impedir que caiga cualquier material hasta el momento del ensayo; deben sobresalir como mínimo 40 cm del hormigón del pilote.

Antes del ensayo se llenan los tubos con agua limpia, comprobando que no haya obstrucciones ni pérdidas de agua.



Número de tubos por pilote:

2 tubos para \varnothing de pilote igual o menor a 60 cm.

3 tubos para \varnothing de pilote hasta 120 cm.

4 tubos para \varnothing de pilote mayores a 120 cm.

El hormigón deberá tener al menos una semana de construido habiendo adquirido cierta resistencia para efectuar el ensayo.

Antes del ensayo se debe pasar una plomada por cada tubo midiendo su longitud y comprobando que no haya obstrucciones.

Comprobar previamente que estén llenos de agua.

ENSAYOS PARA CONTROL DE CALIDAD 2

Ensayo

Este método consiste en introducir y hacer descender un emisor y un receptor de ultrasonidos por dos conductos huecos en el interior del fuste del pilote, guardando registro del tiempo empleado en recorrer la distancia entre ambos.

Si se encontraran defectos en el paso de las ondas, como oquedades, coqueras, inclusiones de tierras u otro problema que alargue el tiempo de recorrido, esto queda reflejado en la gráfica de ensayo indicado en las variaciones y la marcando la profundidad donde se ha encontrado.

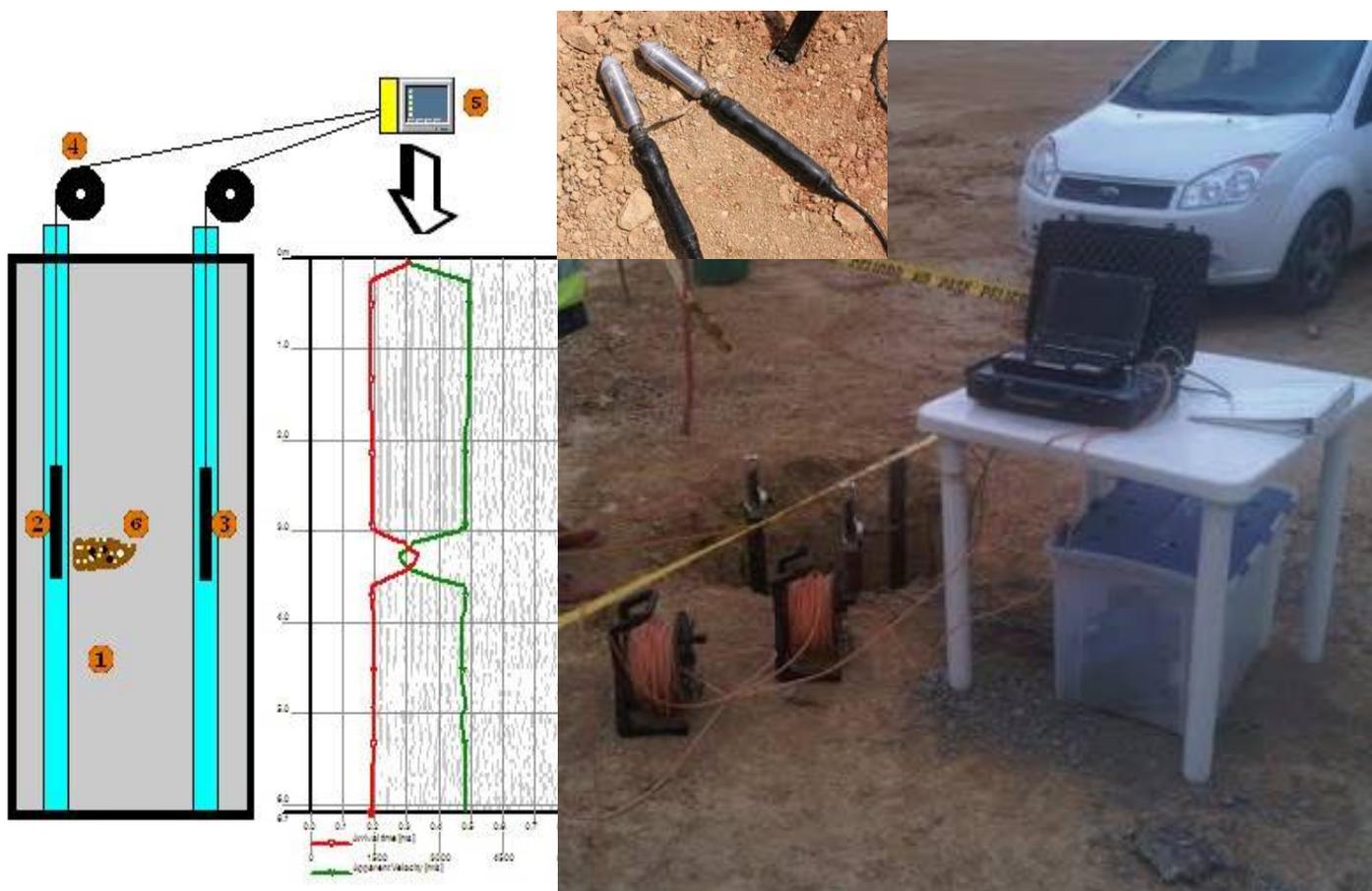
En los pilotes con 4 tubos, se efectúan 6 ensayos, 4 en las parejas de tubos adyacentes y 2 en parejas de tubos opuestos en diagonal.

El ensayo se realiza cuando se han bajado las sondas hasta el fondo de los tubos, levantando ambas al mismo tiempo después de cerciorarse que se encuentren en el mismo plano horizontal.

Aceptación o Rechazo del Pilote

Los pilotes que muestran una gráfica uniforme de tiempo de llegada de la onda ultrasónica en toda su longitud y en todos los perfiles ensayados, son aceptados.

Cuando uno o varios de los perfiles entre parejas de tubos muestran retrasos notables o pérdidas de la señal a una o varias profundidades, el ingeniero especialista dará una interpretación evaluando los defectos probables del pilote.



ENSAYOS PARA CONTROL DE CALIDAD 2

Pérdida local de calidad del hormigón en el fuste de un pilote perforado detectado por transparencia sónica.

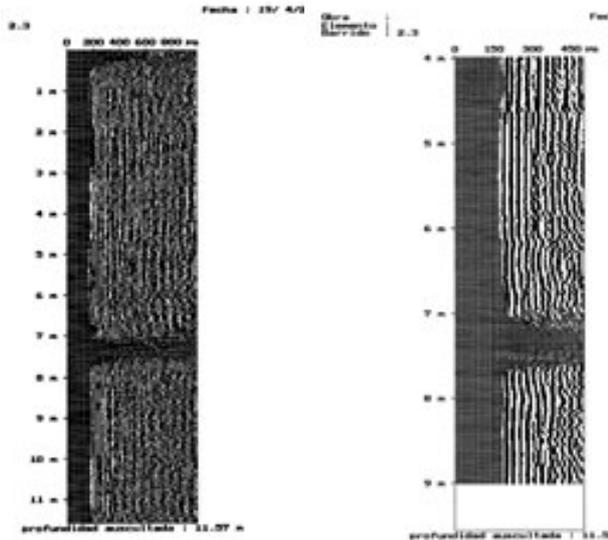
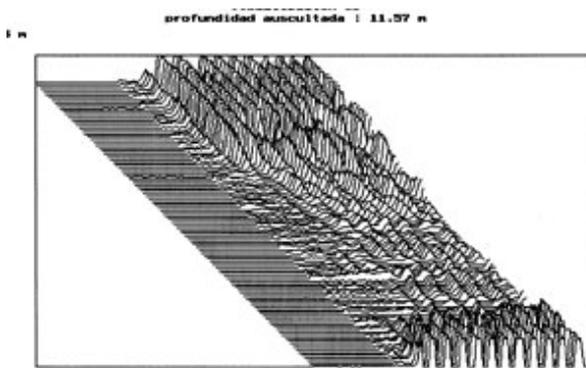


Diagrama 1

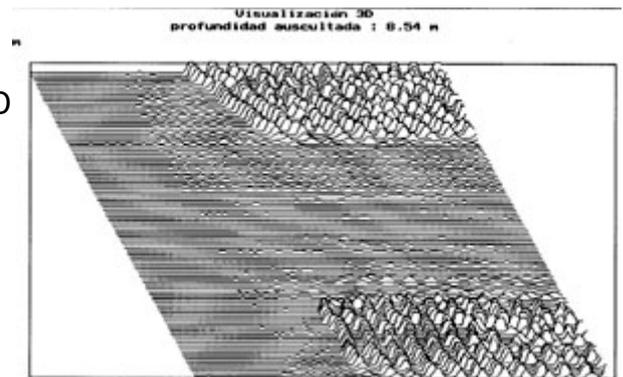
Diagrama 2



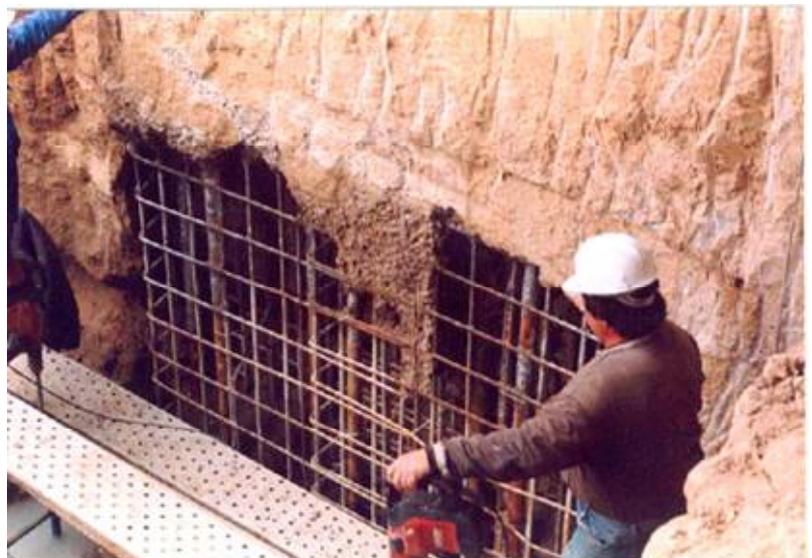
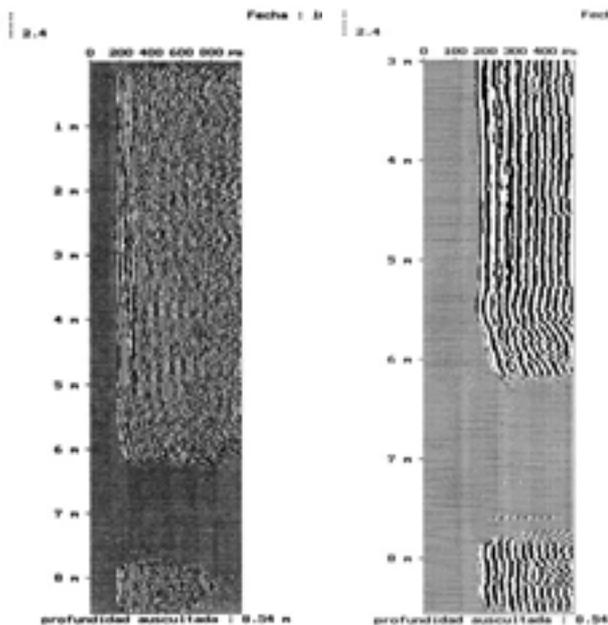
Muestras extraídas del pilote



Diagramas 3D



Deslavado importante del fuste de un módulo de pantalla, detectado por transparencia sónica.

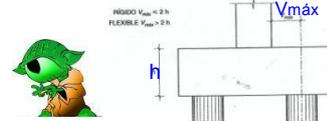


ENCEPADOS (manual Tricalc)

Los encepados no están contemplados por la mayoría de las normativas. En el programa se utilizan los criterios específicos de encepados de la norma española de hormigón, EHE, en su artículo 58 (Elementos de Cimentación), y la normativa seleccionada por el usuario en lo que sea de aplicación.

Los únicos encepados calculados por el programa son los encepados rígidos de canto constante. Para que un encepado pueda considerarse rígido, debe cumplirse

$$V_{max} \leq 2h \quad \text{Canto mínimo EHE (art. 58.2)}$$



siendo

V_{max} el máximo vuelo de los pilotes del encepado; definido como la distancia entre la cara del pilar o soporte y el eje del pilote
 h es el canto del encepado, $h \geq 40 \text{ cm}$ y $h \geq \text{Ø pilote}$ (EHE art 58.8.1)

También el canto debe permitir el anclaje en prolongación recta a compresión de la armadura longitudinal del pilar y del pilote. (EHE art. 69.5.1.1 y art. 69.5.1.2)

$$h \geq L_p \rightarrow \begin{cases} L_p = m \cdot \text{Ø}^2 \leq f_{yk} \cdot \text{Ø} / 20 \\ L_p \geq 10 \text{ Ø} \text{ y } L_p \geq 15 \text{ cm} \end{cases} \begin{cases} F_{ck} = 25 \rightarrow m = 1,5 \\ F_{ck} = 30 \rightarrow m = 1,3 \\ F_{ck} = 35 \rightarrow m = 1,2 \\ F_{ck} = 40 \rightarrow m = 1,1 \end{cases}$$

$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$ (prácticamente el único)

Además, la distancia entre la cara de los pilotes y la del encepado será no menor de 25 cm ni de 1/2 del diámetro de los pilotes.

Los encepados rígidos se calculan por el método de 'bielas' de hormigón comprimidas y tirantes traccionados constituidos por barras de acero. **Canto Recomendado; $h \geq 1,5 \text{ Ø}$ (pilote)**

26.4.2.1 Encepados de un pilote

Los encepados de un pilote deben arriostrarse al menos por dos vigas de cimentación en dos direcciones sensiblemente ortogonales. Estas vigas son las encargadas de absorber los momentos transmitidos por la estructura y los derivados por la no coincidencia entre el eje del pilar y el del pilote.

Este encepado está formado por una única biela con nudos multicomprimidos (CCC), que se comprueban de acuerdo con el apartado de "cargas concentradas sobre macizos" de la normativa utilizada en cada caso. La comprobación se realiza según la expresión

$$N_d \leq A_c \cdot f_{3cd}$$

siendo

N_d el axil transmitido al pilote
 A_c es el área cargada, que es la menor entre las secciones del pilar y el pilote
 f_{3cd} es la resistencia a compresión del nudo de hormigón. En EHE viene dada por la expresión

$$f_{3cd} = \sqrt{\frac{A_c}{A_{c1}}} \cdot f_{cd} \not\geq 3,3 \cdot f_{cd}$$

donde

A_{c1} es la mayor entre el área de la sección del pilar y la del pilote
 f_{cd} es la resistencia a compresión del hormigón

Es necesario disponer una armadura horizontal en las caras superior e inferior del encepado y en ambas direcciones cuya cuantía mecánica sea al menos (en cada cara y dirección)

$$T_d = 0,25 \cdot N_d \cdot \left(\frac{a - a_1}{a} \right) = A_s \cdot f_{ytd}$$

siendo

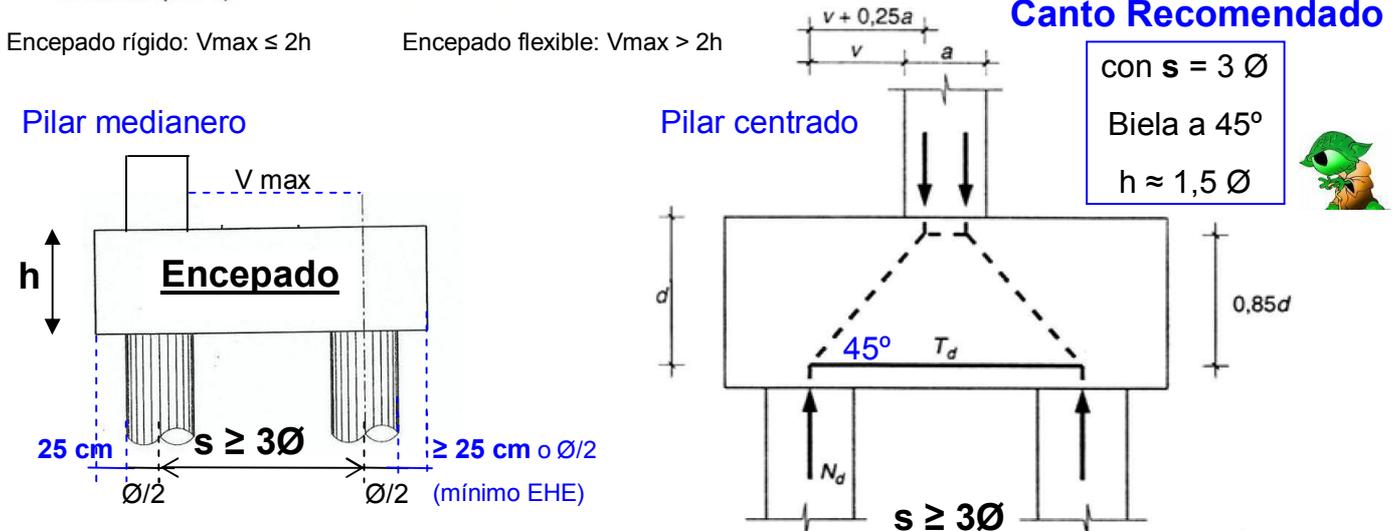
a la dimensión mayor entre la de la sección del pilar y la del pilote
 a_1 la dimensión menor entre la de la sección del pilar y la del pilote
 f_{ytd} la tensión de tracción del tirante, que se limita respecto a la del acero en cada normativa. En EHE, por ejemplo, se limita a 400 MPa

Encepados de dos pilotes

Los encepados de dos pilotes deben arriostrarse al menos por una viga de cimentación en una dirección sensiblemente ortogonal a la línea que une ambos pilotes. Esta viga es la encargada de absorber los momentos según el eje paralelo a la línea que une los pilotes transmitidos por la estructura y los derivados por la no coincidencia del eje del pilar en la línea que une los pilotes. En todo caso no se permite que la proyección del eje del pilar sobre la línea que une los pilotes quede exterior a la zona delimitada por los ejes de los pilotes.

En general se forma un tirante horizontal que une los ejes de los pilotes en la zona inferior del encepado y dos bielas inclinadas que unen los pilotes al pilar. En casos extremos, en los que debido a un momento de gran magnitud, uno de los pilotes quede traccionado, el esquema de celosía formado por bielas y tirantes es algo más complejo, con un tirante en la parte superior del encepado y una biela inclinada en sentido contrario.

En todo caso, bajo el pilar se forma un nudo multicomprimido (CCC) que se comprueba de forma análoga al encepado de un pilote, y sobre los pilotes se forman sendos nudos de unión entre bielas y tirantes (CCT).



Los nudos tipo CCT se comprueban de forma que el hormigón no supere la tensión de compresión f_{2cd} , que en el caso particular de EHE es $f_{2cd} = 0,70 \cdot f_{cd}$.

Armadura principal

El programa evalúa la tensión T_d a la que está sometido el tirante (o tirantes), con lo que se calcula una armadura que cumpla $T_d < A_s \cdot f_{yd}$. Esta armadura se ancla a partir del eje de los pilotes. En el caso más sencillo, en el que el eje del pilar es equidistante de los ejes de los pilotes y se sitúan en un mismo plano vertical, esta tensión se calcula con la expresión

$$T_d = \frac{N_d \cdot (v + 0,25 \cdot a)}{0,85 \cdot d}$$

siendo

N_d	el axil del pilote más solicitado	$= 1,6 \cdot N_{pilote}$
v	el vuelo de los pilotes	
a	la dimensión del pilar	
d	el canto útil del encepado	

El o los tirantes tienen un ancho igual al ancho del pilote más dos veces la distancia entre el fondo del encepado y el eje de las armaduras del tirante.

Armadura secundaria

Además del armado del o los tirantes, se coloca la siguiente armadura

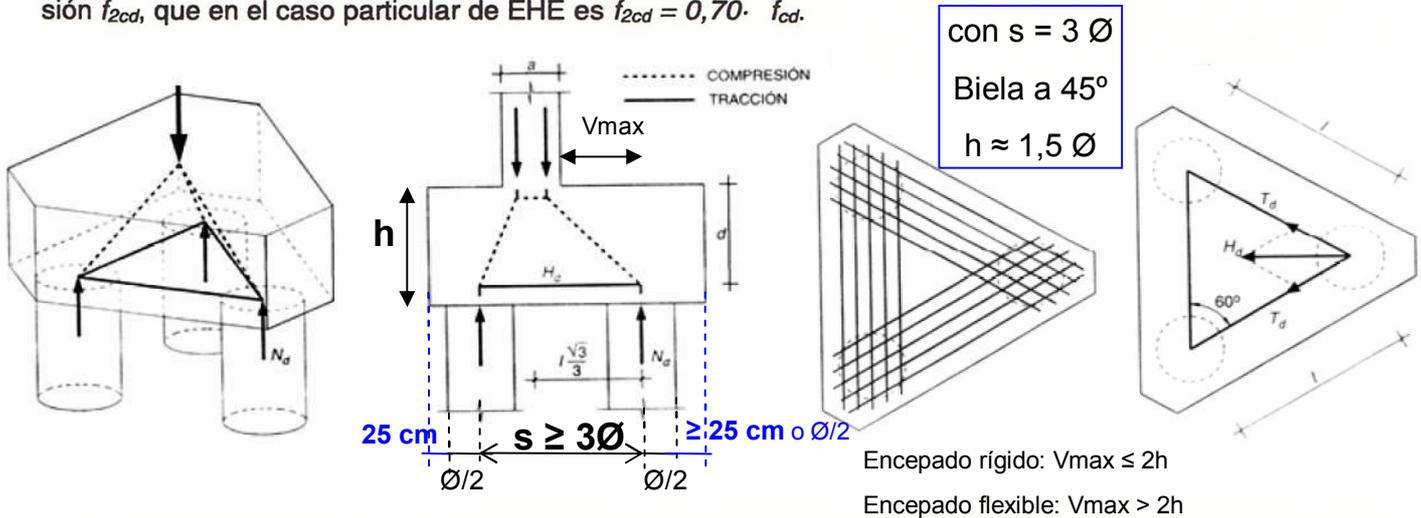
- La armadura longitudinal superior e inferior tendrá una cuantía no menor de 1/10 de la de la cara opuesta, y se extenderá a lo largo del encepado.
- Una armadura horizontal y vertical dispuesta en retícula en las caras laterales. La armadura vertical, que en el programa se identifica como armadura transversal, consta de cercos cerrados que atan la armadura longitudinal. La armadura horizontal, que en el programa se identifica como armadura de piel, consiste en cercos cerrados que atan a la armadura vertical anterior. La cuantía de estas armaduras, referida al área de la sección de hormigón perpendicular a su dirección, es de al menos el 4%. Si el ancho supera la mitad del canto, la sección de referencia se toma con un ancho igual a la mitad del canto. La capacidad mecánica total de la armadura vertical será no menor de $N_d/4,5$, siendo N_d el axil de cálculo del soporte. Tomás Cabrera (U.P.M.)

Encepado de tres pilotes

En general se forman tres tirantes horizontales que unen los ejes de los pilotes en la zona inferior del encepado y tres bielas inclinadas que unen los pilotes al pilar. En casos extremos, en los que debido a un momento de gran magnitud, alguno de los pilotes quede traccionado, el esquema de celosía formado por bielas y tirantes es algo más complejo, con tirantes también en la parte superior del encepado y una biela inclinada en sentido contrario.

En todo caso, bajo el pilar se forma un nudo multicomprimido (CCC) que se comprueba de forma análoga al encepado de un pilote, y sobre los pilotes se forman nudos de unión entre bielas y tirantes (CCT).

Los nudos tipo CCT se comprueban de forma que el hormigón no supere la tensión de compresión f_{2cd} , que en el caso particular de EHE es $f_{2cd} = 0,70 \cdot f_{cd}$.



Armadura principal

El programa evalúa la tensión T_d a la que están sometidos los tirantes, con lo que se calcula una armadura que cumpla $T_d < A_s \cdot f_{ytd}$. Esta armadura se ancla a partir del eje de los pilotes. En el caso más sencillo, en el que el eje del pilar está situado en el baricentro de los pilotes, esta tensión se calcula con la expresión

$$T_d = 0,68 \cdot \frac{N_d}{d} \cdot (0,58 \cdot l - 0,25 \cdot a)$$

siendo

N_d	el axil del pilote más solicitado
l	la distancia entre ejes de pilotes
a	la dimensión del pilar
d	el canto útil del encepado

Los tirantes conforman unas bandas o fajas situadas entre los ejes de los pilotes que tienen un ancho igual al ancho del pilote más dos veces la distancia entre el fondo del encepado y el eje de las armaduras del tirante. Se iguala la armadura de los tres tirantes ó bandas, para facilitar la ejecución del mismo.

Armadura secundaria

Además del armado de los tirantes, se coloca la siguiente armadura

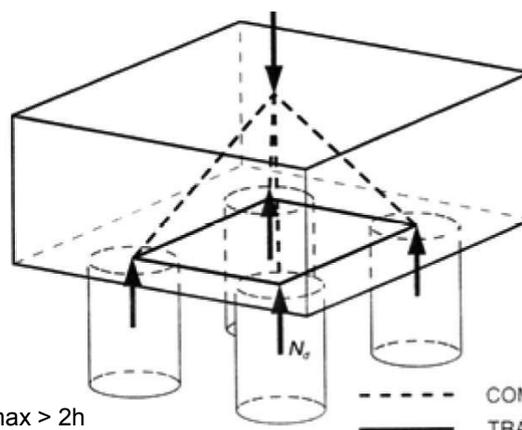
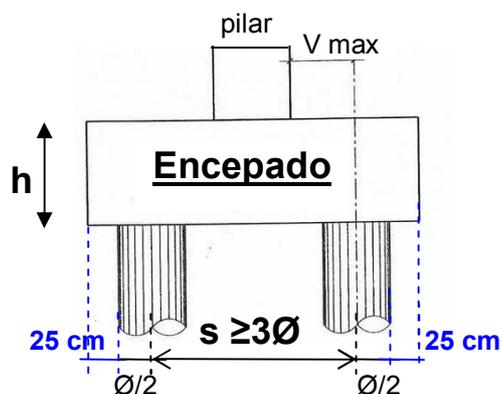
- La armadura longitudinal superior e inferior de las bandas tendrá una cuantía no menor de 1/10 de la de la cara opuesta, y se extenderá a lo largo del encepado.
- Una armadura vertical, que en el programa se identifica como armadura transversal, que consta de cercos cerrados que atan la armadura longitudinal de las bandas. La cuantía de estas armaduras, referida al área de la sección de hormigón de la banda perpendicular a su dirección, es de al menos el 4‰. Si el ancho supera la mitad del canto, la sección de referencia se toma con un ancho igual a la mitad del canto. La capacidad mecánica total de esta armadura (en la dirección vertical) será no menor de $N_d/4,5$, siendo N_d el axil de cálculo del soporte.
- Una armadura horizontal, que en el programa se identifica como armadura de piel, consiste en cercos cerrados que recorren perimetralmente el encepado y atan a la armadura vertical anterior. La cuantía de estas armaduras, referida al área de la sección de hormigón perpendicular a su dirección, es de al menos el 4‰. Si el ancho supera la mitad del canto, la sección de referencia se toma con un ancho igual a la mitad del canto.

Encepado de cuatro pilotes

En general se forman cuatro tirantes horizontales que unen los ejes de los pilotes en la zona inferior del encepado y cuatro bielas inclinadas que unen los pilotes al pilar. En casos extremos, en los que debido a un momento de gran magnitud, alguno de los pilotes quede traccionado, el esquema de celosía formado por bielas y tirantes es algo más complejo, con tirantes también en la parte superior del encepado y bielas inclinadas en sentido contrario.

En todo caso, bajo el pilar se forma un nudo multicomprimido (CCC) que se comprueba de forma análoga al encepado de un pilote, y sobre los pilotes se forman nudos de unión entre bielas y tirantes (CCT).

Los nudos tipo CCT se comprueban de forma que el hormigón no supere la tensión de compresión f_{2cd} , que en el caso particular de EHE es $f_{2cd} = 0,70 \cdot f_{cd}$.



con $s = 3 \ Ø$
 Biela a 45°
 $h \approx 1,5 \ Ø$

25 cm (mínimo entre borde encepado y cualquier generatriz de pilotes)

Encepado rígido: $V_{max} \leq 2h$ Encepado flexible: $V_{max} > 2h$

Armadura principal

El programa evalúa la tensión T_d a la que están sometidos los tirantes, con lo que se calcula una armadura que cumpla $T_d < A_s \cdot f_{yd}$. Esta armadura se ancla a partir del eje de los pilotes. En el caso más sencillo, en el que el eje del pilar está situado en el baricentro de los pilotes, y el encepado es cuadrado, esta tensión se calcula con la expresión

$$T_d = \frac{N_d}{0,85 \cdot d} \cdot (0,50 \cdot l - 0,25 \cdot a)$$

siendo

N_d	el axil del pilote más solicitado
l	la distancia entre ejes de pilotes
a	la dimensión del pilar
d	el canto útil del encepado

Los tirantes conforman unas bandas o fajas situadas entre los ejes de los pilotes que tienen un ancho igual al ancho del pilote más dos veces la distancia entre el fondo del encepado y el eje de las armaduras del tirante. Se iguala la armadura de los cuatro tirantes ó bandas, para facilitar la ejecución del mismo.

Armadura secundaria

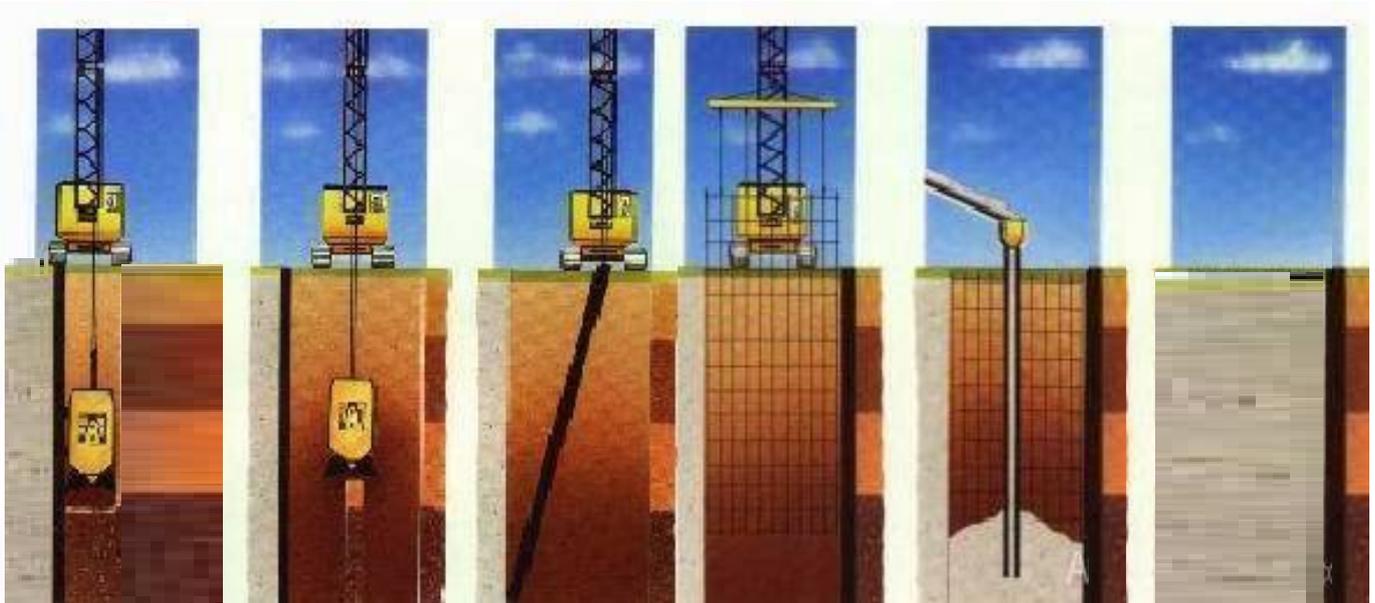
Además del armado de los tirantes, se coloca la siguiente armadura

- La armadura longitudinal superior e inferior de las bandas tendrá una cuantía no menor de 1/10 de la de la cara opuesta, y se extenderá a lo largo del encepado.
- Una armadura horizontal, entre las bandas, de cuantía no menor a $\frac{1}{4}$ de la de las bandas.
- Una armadura vertical, que en el programa se identifica como armadura transversal, que consta de cercos cerrados que atan la armadura longitudinal de las bandas. La cuantía de estas armaduras, referida al área de la sección de hormigón de la banda perpendicular a su dirección, es de al menos el 4%. Si el ancho supera la mitad del canto, la sección de referencia se toma con un ancho igual a la mitad del canto. La capacidad mecánica total de esta armadura (en la dirección vertical) será no menor de $N_d/4,5$, siendo N_d el axil de cálculo del soporte.
- Una armadura horizontal, que en el programa se identifica como armadura de piel, consiste en cercos cerrados que recorren perimetralmente el encepado y atan a la armadura vertical anterior. La cuantía de estas armaduras, referida al área de la sección de hormigón perpendicular a su dirección, es de al menos el 4%. Si el ancho supera la mitad del canto, la sección de referencia se toma con un ancho igual a la mitad del canto.

Hundimiento pantallas hormigón \diamond pilote rectangular

La teoría de resistencia por punta y por fuste de un pilote hormigonado in situ puede aplicarse para el calculo de la resistencia al hundimiento en el terreno de un muro pantalla de hormigón armado con algunas matizaciones:

1º Se calcula por metro lineal de profundidad de muro al igual que los muros de contención o por modulo constructivo de pantalla usualmente 2,5 a 5 m (ver tema 8).



Usual de: **2,5 a 5 m**

2º Asimilación sección recta muro pantalla a pilote conforme C.T.E. (factor reductor sección: **f**)

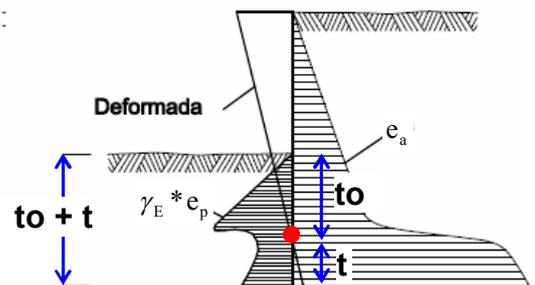
5.1.2.2.2 Por la forma de la sección transversal

- 1 La forma de la sección transversal del pilote podrá ser circular o casi circular (cuadrada, hexagonal u octogonal) de manera que no sea difícil asimilar la mayoría de los pilotes a elementos cilíndricos de una cierta longitud L y de un cierto diámetro D .
- 2 La asimilación a cilindros debe hacerse de acuerdo con los siguientes criterios:
 - a) Cuando se quiera evaluar la capacidad portante por la punta, debe hacerse la equivalencia igualando las áreas de la sección transversal, esto es:

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{4}{\pi} A}$$

siendo

A la sección transversal del área de apoyo.



- 3 Como caso excepcional deben considerarse los pilotes-pantalla. Los pilotes-pantalla, o elementos portantes de pantalla, suelen ser de hormigón armado y con una sección recta rectangular con una proporción longitud-anchura tal, que la asimilación a la forma circular es difícil. En el presente DB se admitirá que, a efectos de estimar la resistencia por punta, se utilice el factor reductor siguiente:

$$f = 0,7 + 0,3 \frac{B}{L}$$

con $B/L \approx 1/5$ a $1/10$

$$f \approx 0,75$$

Área punta = $0,75 * A$

Área fuste = $2L * (t_o + t)$

$L \approx 2,5$ a 5 m



$B \approx 0,5$ a 1 m

Profundidad enterrada = $t_o + t$

Siendo B el ancho y L la longitud de la sección recta rectangular equivalente. La resistencia por fuste se calculará del mismo modo que en los pilotes excavados, contando, como longitud del perímetro de la sección transversal, la longitud real del mismo.

Resistencia terreno mediante soluciones analíticas I (CTE anejo F.2.1)

SUELOS GRANULARES: (el cálculo siempre es a largo plazo).

Para pilotes <> pantallas:

$$Q_h = Q_p + Q_f = (q_p \cdot A_p) + \sum(\tau_f \cdot A_f)$$

Resistencia unitaria hundimiento por punta:

(antes de introducir la seguridad)

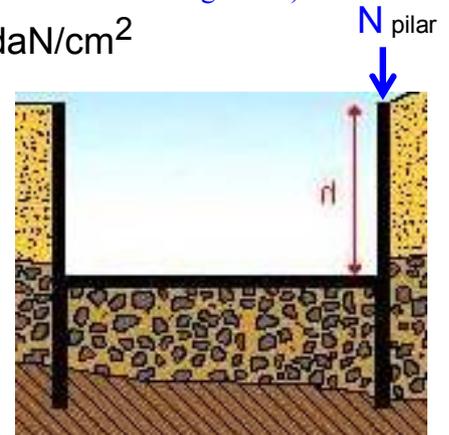
$$q_p = f_p \cdot \sigma'_{vp} \cdot N_q \leq 20 \text{MPa} = 20000 \text{ kN/m}^2 = 200 \text{ daN/cm}^2$$

siendo:

$f_p = 2,5$ para pilotes hormigonados in situ

σ'_{vp} = tensión **efectiva** vertical al nivel de la punta del pilote.

N_q = coeficiente capacidad carga cimentaciones superficiales:



Resistencia unitaria hundimiento por fuste

$$\tau_f = \sigma'_{v} \cdot K_f \cdot f \cdot \text{tg} \phi \leq 120 \text{kPa} = 120 \text{kN} / \text{m}^2 = 1,2 \text{ daN/cm}^2$$

(antes de introducir la seguridad)

siendo:

σ'_{v} = tensión **efectiva** vertical **al nivel considerado**. (para un sólo terreno homogéneo es el punto medio del pilote).

K_f = el coeficiente de empuje horizontal. $K_f = 0,75$ para pilotes perforados

f = factor de reducción de rozamiento por fuste. ($f = 1$ para pantallas hormigón in situ)

ϕ = ángulo de rozamiento interno del suelo granular.

SUELOS COHERENTES:

La carga de hundimiento de pilotes verticales en suelos limosos o arcillosos, evaluada mediante fórmulas estáticas, debe calcularse en dos situaciones:

1º Hundimiento sin drenaje a corto plazo: → CTE: Seguridad : $\gamma_R = 2$ 🌱

La **resistencia unitaria** de hundimiento por **PUNTA a corto plazo** se podrá obtener mediante la expresión:

$$q_p = N_p \cdot c_u$$



(antes de introducir la seguridad)

N_p depende del empotramiento del pilote-pantalla pudiendo adoptarse un valor igual a **7,5** 🌱

Factor de forma zapata rectangular: $Sc = 1 + 0,2 \frac{B^*}{L^*}$ con $L \gg B \rightarrow B/L \approx 0 \rightarrow Sc = 1$

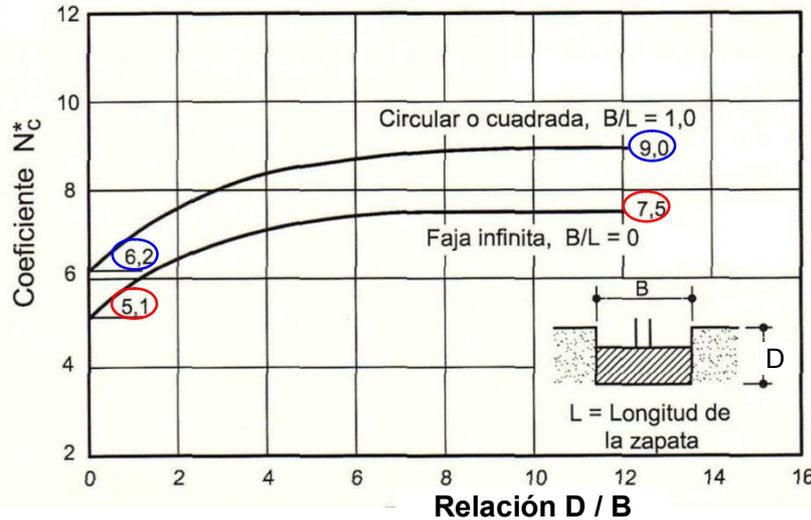
Pantalla hormigón Con $\phi=0^\circ \rightarrow N_c = 5,14$ $d_c(\text{max}) = 1,45$ y $sc = 1$. → $5,14 \cdot 1,45 \cdot 1 = 7,45$ **7,5**

Para alcanzar este valor $N_p = 7,5$ es necesario que la punta del pilote - pantalla penetre al menos **4** diámetros dentro de la capa

Resistencia terreno mediante soluciones analíticas II

Cuando la zapata está situada a gran profundidad (**pilotaje**), dentro de un terreno homogéneo, el producto del coeficiente de capacidad portante **N_c** por sus factores de corrección puede sustituirse por el valor **N*_c** (**factor de cohesión modificado**) que aparece en la figura siguiente, propuesto por Skempton (1951) para tener en cuenta la resistencia debida al terreno existente por encima del plano de apoyo.

Factores de capacidad de carga para zapatas en arcilla



(Este es el caso calculo por punta de pilotes en arcilla a corto plazo)

$$q_h = 9 \text{ cu}$$

(Este es el caso calculo por punta de pantallas en arcilla a corto plazo)

$$q_h = 7,5 \text{ cu}$$

La resistencia unitaria de hundimiento por **FUSTE a corto plazo** será:

$$\tau_f = \frac{100 * cu}{100 + cu} \leq 100 \text{ kPa} = 100 \text{ kN} / \text{m}^2 = 0,1 \text{ MPa} = 1,0 \text{ da N/cm}^2 = 1,0 \text{ kp/cm}^2$$

(antes de introducir la seguridad)

En esta fórmula empírica: τ_f y cu en $\text{kPa} = \text{kN} / \text{m}^2$

En el ensayo de compresión simple en suelos **qu** es la resistencia a compresión simple de la muestra.

cu el mayor valor de resistencia a cortante

$$cu = \frac{qu}{2}$$

2º Hundimiento a largo plazo con drenaje: → CTE: Seguridad : $\gamma_R = 3$

Para determinar la resistencia de hundimiento a largo plazo, se utilizará el ángulo de rozamiento interno efectivo deducido de los ensayos de laboratorio,

despreciando el valor de la cohesión → $\phi = \phi'$ $c' = 0$

En consecuencia se utilizan las fórmulas para suelos granulares con el valor adecuado del ángulo de rozamiento interno del terreno. Arenas siempre tensiones efectivas y largo plazo.



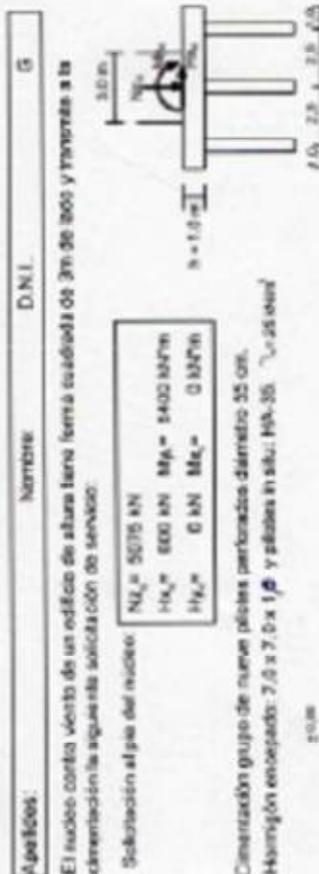
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE EDIFICACION DE MACRO
 Dpto. "TECNOLOGIA DE LA EDIFICACION"
 (CGA) ANALISIS DE ESTRUCTURAS Y GEOTECNIA
 EXAMEN PARCIAL GEOTECNIA 26/10/2015

Apellidos: _____ Nombre: _____ D.N.I.: _____ G: _____

El núcleo contra viento de un edificio de alba lera tendrá su base de 3m de anchura y 10m de altura y se apoyará sobre 10 pilotes de 30 cm de diámetro y 10m de altura. La cimentación se realizará en el terreno arcilloso.

Solución al pie del núcleo:
 $N_{k,0} = 5075 \text{ kN}$
 $H_{k,0} = 600 \text{ kN}$
 $M_{k,0} = 1400 \text{ kNm}$
 $H_{k,1} = 0 \text{ kN}$
 $M_{k,1} = 0 \text{ kNm}$

Comenzación grupo de nuevos pilotes perforados diámetro 35 cm.
 Hincación encajados: 7.0 x 7.0 x 1.0 y pilotes en situ: 10x35. $\gamma_{R,0.25} = 2.5$



1/ Solicitación reducida a la base del encajado. Los pilotes en su parte superior están sometidos a las siguientes cargas: indicar su numeración.

2/ Comprobar que no hay tracción sobre de los pilotes menos cargados. Indicar su numeración.

3/ Calcular la sollicitación en la parte superior de los pilotes. Indicar su numeración.

4/ Comprobar el tipo estructural del pilote 35 cm. (señalar el coeficiente de seguridad).

5/ Calcular a corto plazo la longitud en el eje menor de las pilas (Lp) en el terreno arcilloso.

6/ Dibujar el diagrama, accionado, de tensiones verticales efectivas a lo largo del pilote.

7/ Comprobar a largo plazo la longitud de los pilotes (Lp) del apartado anterior.

8/ Medición (es) de un pilote (1) para corroborar el presupuesto. (ver punto 10).

9/ Se conoce que hay dos núcleos iguales. Medición (es) del pilote para corroborar el presupuesto. (ver punto 10).

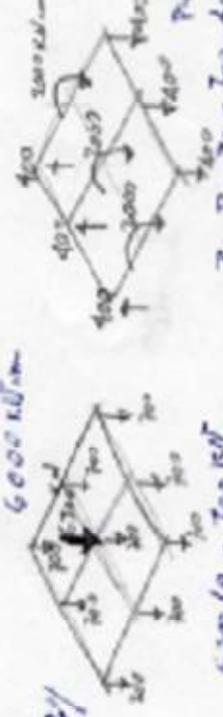
10/ Estimar el coeficiente de seguridad del pilote anclado (CTE). Para el acortamiento del grupo de pilotes indicar el valor de la superficie de apoyo equivalente y su posición. E. B. = 2'10'000mm²

Este valor de la superficie de apoyo equivalente para el momento $M_{0.25} = 1400 \text{ kNm}$ y la carga axial $N_{0.25} = 5075 \text{ kN}$ en el momento de la aplicación de las cargas de servicio.

1/ FUERZAS VERTICALES Y MOMENTOS

P.P. en el punto: $F_{0.25} \times 1.25 = 625 \text{ kN}$
 $S_{0.25} = 5.0$

MOMENTOS: $M_{0.25} = 600 \text{ kNm}$
 $S_{0.25} = 5.0$



2/ 600 kN/m

3/ PILOTES MÁS CARGADOS: $P_2 = P_0 = P_1 = 700 + 600 = 1300 \text{ kN}$

4/ $1.35 \rightarrow \sigma_d = 35 \cdot 35/35 = 4.9 \text{ MPa} = \text{N/mm}^2$

TOTE ESTRUCTURAL $N_{0.25} = 71(55)^2 \cdot 1.9/10 = 146466 \text{ kN} > 1100 \text{ kN}$

$5/ \gamma_{R,0.25} = 40 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \sigma_{cu} = 235 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \text{CTE: } \sigma_p = \sigma_{cu} = 9.325 = 2025 \text{ kN/m}^2$

$\sigma_f = \frac{400 \cdot 0.05}{400 + 0.05} = 69.23 \text{ kN/m}^2 < 100$

COEFICIENTE DE SEGURIDAD: $\sigma_{fd} = \frac{2025}{3} = 675 \text{ kN/m}^2$
 $\sigma_{fd} = \frac{69.23}{3} = 23.07 \text{ kN/m}^2$

COEFICIENTE DE SEGURIDAD: $\sigma_{fd} = 675 \text{ kN/m}^2$
 $\sigma_{fd} = 23.07 \text{ kN/m}^2$

2/ 2025 kN/m^2

3/ 2025 kN/m^2

4/ 2025 kN/m^2

5/ 2025 kN/m^2

6/ 2025 kN/m^2

7/ 2025 kN/m^2

8/ 2025 kN/m^2

9/ 2025 kN/m^2

10/ 2025 kN/m^2

Solución con un coeficiente de seguridad a corto plazo reducido

Tabla 2.1. Coeficientes de seguridad parciales

Situación de dimensionado	Tipo	Materiales		Acciones	
		γ_R	γ_M	γ_E	γ_F
Persistente o transitoria	<u>Hundimiento</u>	3,0 ⁽¹⁾	1,0	1,0	1,0
	Capacidad estructural	- ⁽⁴⁾	- ⁽⁴⁾	1,6 ⁽⁵⁾	1,0
	<u>Pilotes</u>				
	Arrancamiento	3,5	1,0	1,0	1,0
	Rotura horizontal	3,5	1,0	1,0	1,0
	<u>Hundimiento</u>	2,0 ⁽⁸⁾	1,0	1,0	1,0
Extraordinaria	Capacidad estructural	- ⁽⁴⁾	- ⁽⁴⁾	1,0	1,0
	<u>Pilotes</u>				
	Arrancamiento	2,3	1,0	1,0	1,0
	Rotura horizontal	2,3	1,0	1,0	1,0

⁽¹⁾ En pilotes se refiere a métodos basados en ensayos de campo o fórmulas analíticas (largo plazo), para métodos basados en fórmulas analíticas (corto plazo), métodos basados en pruebas de carga hasta rotura y métodos basados en pruebas dinámicas de hincas con control electrónico de la hincas y contraste con pruebas de carga, se podrá tomar 2,0.

⁽⁸⁾ En pilotes, se refiere a métodos basados en ensayos de campo o fórmulas analíticas; para métodos basados en pruebas de carga hasta rotura y métodos basados en pruebas dinámicas de hincas con control electrónico de la hincas y contraste con pruebas de carga, se podrá tomar 1,5

CTE iguala numéricamente, cuando se utilicen fórmulas analíticas, la seguridad a corto plazo sin drenaje del hundimiento de pilotes con la seguridad al hundimiento para situaciones extraordinarias.

En el examen anterior sobre pilotes en arcilla.

A corto plazo, las resistencias unitarias eran: $q_p = 2025 \text{ kN} / \text{m}^2$ $\tau_f = 69,23 \text{ kN} / \text{m}^2$

Con seguridad : $\gamma_R = 2$ $q_{pd} = 2025 / 2 = 1012,5 \text{ kN} / \text{m}^2$ $\tau_{fd} = 69,23 / 2 = 34,62 \text{ kN} / \text{m}^2$

Equilibrio Fuerzas verticales: $1100 = 1012,50(0,55^2 * \pi / 4) + 34,62(0,55 * \pi * L_p)$ $L_p = 14,37 \text{ m}$

A largo plazo, comprobación:

Con seguridad $\gamma_R = 3$ los valores de cálculo eran: $q_{pd} = 2638,72 \text{ kN} / \text{m}^2$ $\tau_f = 22,51 \text{ kN} / \text{m}^2$

$R_p = \pi * 0,55^2 / 4 * 2638,72 = 626,91 \text{ kN}$
 $R_f = \pi * 0,55 * 22,51 * 14,37 = 558,91 \text{ kN}$

$\left. \begin{array}{l} R_p = 626,91 \text{ kN} \\ R_f = 558,91 \text{ kN} \end{array} \right\} \Sigma = 1185,82 \text{ kN} > 1100 \text{ kN}$

(solución segura y más económica) (ahorro proporcional al coeficiente seguridad, de tres a dos)

Longitud pilote: $14,37 + 1 = 15,37 \approx 16 \text{ m}$ Medición: $16 * 9 * 2 = 288 \text{ m}$

Examen tipo terreno arenoso

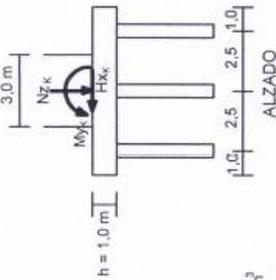


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE EDIFICACIÓN DE MADRID
Dpto. "TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN"
(024) ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS Y GEOTECNIA
EXAMEN FINAL ENERO GEOTECNIA 26/01/2016

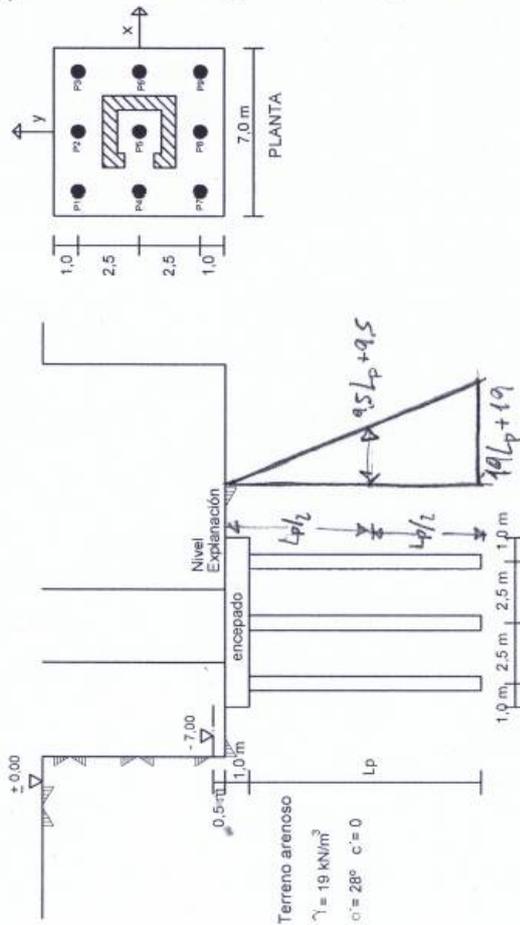
Apellidos: _____ Nombre: _____ D.N.I.: _____ G _____

El núcleo contra viento de un edificio de altura tiene forma cuadrada de 3m de lado y transmite a la cimentación la siguiente sollicitación de servicio:

$N_x = 6875 \text{ kN}$	$M_y = 5200 \text{ kN}\cdot\text{m}$
$H_x = 800 \text{ kN}$	$M_x = 0 \text{ kN}\cdot\text{m}$
$H_y = 0 \text{ kN}$	$M_y = 0 \text{ kN}\cdot\text{m}$



Cimentación grupo de nueve pilotes perforados diámetro 55 cm.
Hormigón encepado: $7,0 \times 7,0 \times 1,0$ y pilotes in situ: HA-35. $\gamma_s = 25 \text{ kN/m}^3$



- 1/ Sollicitación reducida a la base del encepado. (se tendrá en cuenta peso propio encepado) (0,5 puntos)
 - 2/ Calcular la sollicitación axial de los pilotes más cargados. Indicar su numeración. (1,5 puntos)
 - 3/ Comprobar el tope estructural del pilote. (barrenado con control de parámetros) (0,5 puntos)
 - 4/ Dibujar el diagrama, acotado, de tensiones verticales efectivas a lo largo del pilote. (0,5 puntos)
 - 5/ Calcular la longitud de cálculo mínima de los pilotes (Lp) en el terreno arenoso dado. (0,5 puntos)
 - 6/ Medición real de un pilote (Lr) (módulo 1m)
- Con dos núcleos iguales. Medición total del pilotaje para confeccionar presupuesto. (1,5 puntos)

Este ejercicio puntúa sobre 10 puntos. Errores conceptuales puntúan negativamente. Tiempo 45 minutos

1/ FUERZAS VERTICALES
 P.P encepado: $7,0 \times 7,0 \times 1 \times 25 = \frac{1225 \text{ kN}}{6875}$
 $H = 800 \text{ kN} < 10\% \times 8100$

MOMENTOS: $800 \cdot 1 = 800 \text{ kN}\cdot\text{m}$
 $\frac{5200}{6000 \text{ kN}\cdot\text{m}}$

2/ $8100/9 = 900 \text{ kN}$ (PILOTES MAS CARGADOS P1, P4 Y P7)
 $6000/3,5 = 400 \text{ kN}$ ($900 + 400 = 1300 \text{ kN}$)

3/ $H-35 \rightarrow \sigma_d = 4 \cdot \frac{35}{25} = 5,6 \text{ MPa}$

TOPE ESTRUCTURAL PILOTE: $(\frac{91 \cdot 550^2}{4} \cdot 516) / 10^3 = 1330,46 \text{ kN} > 1300 \text{ kN OK}$

5/ $Q_{Lr} = (Q_p + Q_f) / 3 = 1300 \text{ kN}$
 $q_p = 2,5 \cdot 19 \cdot (L_p + 1) \cdot N_q < 20000 \text{ kN/m}^2$ (OJO COMPRIMIR AL FUND) $N_q = 14,72$
 $q_p = 699,2 \cdot (L_p + 1)$
 $Q_p = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot (L_p + 1) / 3 = \frac{91 \cdot 0,55^2}{12} \cdot 699,2 \cdot (L_p + 1) = 55,3727 L_p + 55,3727$
 $q_f = \sigma' \cdot k_f \cdot \gamma \cdot z^{28} = (9,5 L_p + 9,5) \cdot 0,75 \cdot \gamma \cdot 28 < 120 \text{ kN/m}^2$ (OJO COMPRIMIR)
 $q_f = 3,7884 \cdot (L_p + 1)$
 $Q_f = \frac{\pi \cdot D}{3} \cdot 3,7884 \cdot (L_p + 1) \cdot L_p = \frac{\pi \cdot 0,55 \cdot 3,7884}{3} \cdot (L_p^2 + L_p) = 2,1820 L_p^2 + 2,1820 L_p$
 $1300 = 2,1820 L_p^2 + 57,5546 L_p + 55,3727$
 $L_{p \text{ minimum}} = 14,09 \text{ m}$

6/ $14,09 + 1$ (FUERZA DADA) = $15,09 \text{ m} \sim 16 \text{ m}$ | $9 \times 2 = 288 \text{ m}$

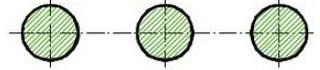
COMPROBACIONES: PUNTA: $2,5 \cdot (19 \cdot 14,09 + 19) \cdot 14,72 = 10550,93 \text{ kN} < 20000 \text{ OK}$
 FUENTE: $(9,5 \cdot 14,09 + 9,5) \cdot 0,75 \cdot \gamma \cdot 28 = 57,17 \text{ kN/m}^2 < 120 \text{ OK}$

Pantallas con pilotes

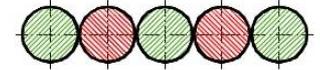


PANTALLAS DE PILOTES

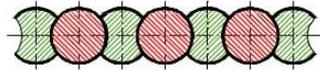
SEPARADOS



TANGENTES



SECANTES



Proceso constructivo secantes:

1. Construcción muro guía.
2. Perforación pilotes secundarios.
3. Hormigonado pilotes secundarios.
4. Perforación pilotes primarios.
5. Colocación armadura pilotes primarios.
6. Hormigonado pilotes primarios.

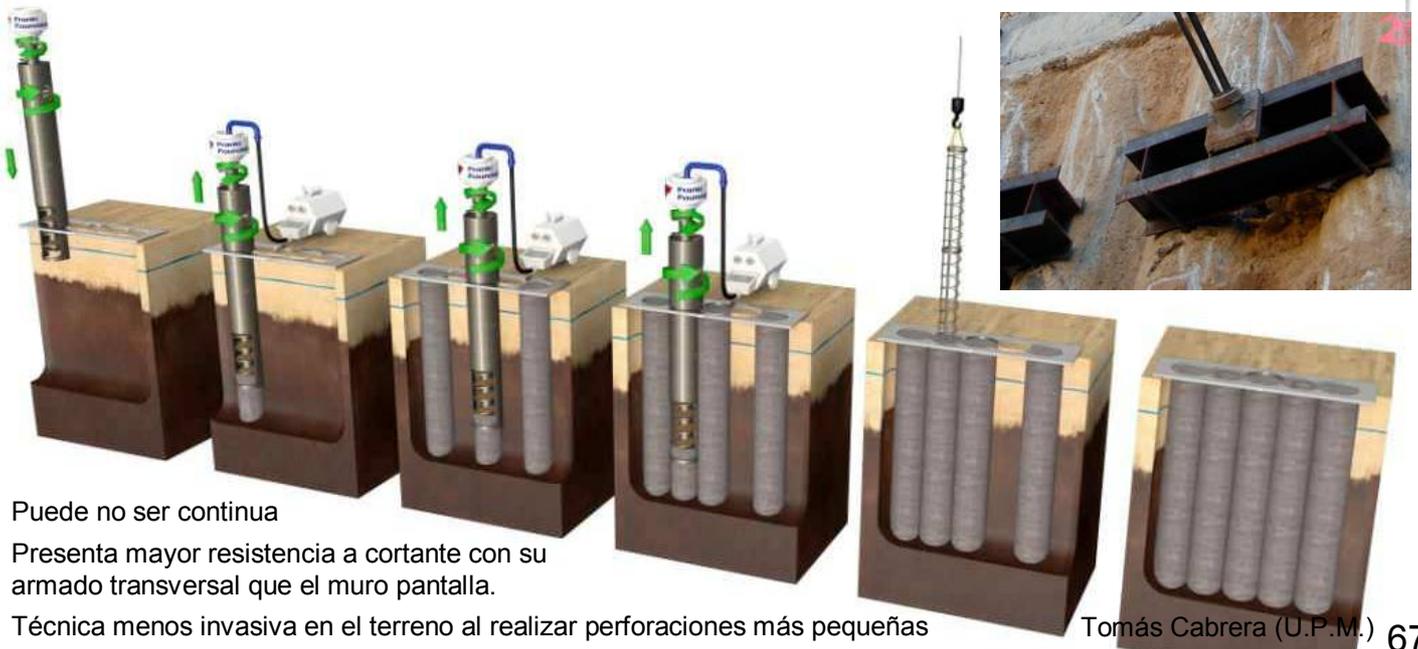


PRIMARIO

PRIMARIO



SECUNDARIO



Puede no ser continua

Presenta mayor resistencia a cortante con su armado transversal que el muro pantalla.

Técnica menos invasiva en el terreno al realizar perforaciones más pequeñas