

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA
INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

INGENIERÍA GEOTECNICA

APUNTES TEMA 5

CIMENTACIONES PROFUNDAS

- 5.1. INTRODUCCIÓN (UD: 42.1)
- 5.2. TIPOLOGÍA DE PILOTES (UD: 42.2-42.3)
- 5.3. PILOTE AISLADO. CARGA DE HUNDIMIENTO (UD: 42.5-42.6/
LW: 33.1-33.2)
 - 5.3.1. Introducción
 - 5.3.2. Resistencia por punta. Expresiones estáticas y semiempíricas
 - 5.3.3. Resistencia por fuste
 - 5.3.4. Fórmulas de hinca y pruebas de carga
- 5.4. GRUPOS DE PILOTES. CARGA DE HUNDIMIENTO (UD: 43.2/ LW: 33.4)
- 5.5. DISTRIBUCIÓN DE CARGAS EN GRUPOS DE PILOTES
- 5.6. COMPROBACIÓN EN ROTURA Y EN SERVICIO (UD: 43.3)
- 5.7. FRICCIÓN NEGATIVA Y OTRAS SOLICITACIONES ESPECIALES (LW:
33.5)
- 5.8. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO Y NORMAS TECNOLÓGICAS (UD:
42.4/ NTE)

Nota. En este tema se han convertido las variables o parámetros a unidades del sistema internacional mediante la equivalencia: $1 \text{ kp/cm}^2 = 10 \text{ t/m}^2 \cong 100 \text{ kPa}$

5.1. INTRODUCCIÓN

Tipología general de cimentaciones

Objeto de una cimentación: transmitir al terreno de forma amortiguada las cargas estructurales que no se pueden transmitir directamente al mismo por ser un material de baja resistencia y elevada deformabilidad.

- Cimentaciones superficiales: $D/B < 4$
- Cimentaciones semiprofundas $4 < D/B < 8$ a 10
- Cimentaciones profundas 8 a $10 < D/B$

Pilotes: Elementos de cimentación de gran longitud que se hincan directamente en el terreno o bien se construyen en una cavidad previamente abierta en el mismo.

La cimentación mediante pilotes es necesaria cuando la cimentación superficial o semiprofunda no es posible por razones técnicas, de dimensiones o económicas.

Originalmente se establecieron criterios de esbeltez tales como:

$$\phi/l > 1/12 \quad (\text{siglo XV y XVI})$$

posteriormente se desarrollaron criterios de rechazo

menos de 1-4 mm en 25 a 30 golpes de una maza de determinado peso

seguidamente se desarrollaron las fórmulas de hinca:

$$Q_h = \frac{P_m H}{\delta} \times \frac{P_m}{P_m + P_p} \quad (1851)$$

y finalmente expresiones estáticas y empíricas, respectivamente, en función de parámetros característicos del suelo o de resultados de ensayos de penetración:

$$p_p = 9 c_u \quad \text{o} \quad p_p = q_c / \beta$$

Historia de los pilotes

(tomado de **Piling Engineering**, Fleming, Weltman, Randolph y Elson)

- Construir zonas elevadas en zonas húmedas: orillas de lagos (Lago de Ginebra, hace 4000 años).
- En Robenhausen (Suiza), 100 000 pilotes fueron encontrados bajo un depósito de terreno de 2000 años de antigüedad.
- En Lough Drumkeery (Irlanda) se encontraron 30 000 pilotes antiguos de madera de roble de 3 m de profundidad.
- Herodoto (escritor Griego, 400 A.C.) explica que en una tribu africana (PEONIONS) vivían en una zona levantada con pilotes: para contraer matrimonio cada hombre tenía que hincar 3 pilotes. Eran polígamos.
- Los Fenicios usaban pilotes para las construcciones portuarias. Los constructores de barcos empezaron a construir las pantallas formadas por hileras de pilotes o tablestacas.

- Los cedros del Líbano prácticamente desaparecieron exportados a Egipto para construir pilotes
- Tanto los Griegos como los Romanos usaron pilotes en todas sus construcciones. Tuvieron problemas con el 'teredo navalis', lo que ha provocado la desaparición de dichas construcciones. Ejemplo de los Romanos es un puente en Newcastle (UK) con pilotes de madera negra de roble de 3 m.
- El Emperador Trajano construyó un puente en el Danubio. Cuando se descubrieron los pilotes estaban en fase de petrificación.
- Vitrubio (arquitecto romano del siglo 0), describe técnicas constructivas para la ejecución de pilotes y tablestacas.
- La mayoría de los edificios antiguos (siglo VIII) en Venecia se fundamentan mediante pilotajes. La ciudad empezó en una zona de pantanosa.

- La ciudad de Amsterdam, fundada hace 1000 años, prácticamente se encuentra construida sobre pilotes de 15-20 m de longitud.
- Los pilotes de madera sumergidos han demostrado ser más duraderos que los sometidos a secado-mojado periódico (en tal caso se usaban grasas para proteger la superficie).
- La hinca se hacía mediante un simple trípode que permitía la caída de un peso que golpeaba el pilote.

- SIGLOS XIX y XX
- En el siglo XIX empezaron los cambios importantes, tanto en los materiales de los pilotes como en su ejecución.
- En 1830 se empezaron a usar los pilotes metálicos de forma tubular.
- En 1824 (siglo XIX) Joseph Aspdin patentó el cemento que más tarde se conoció como cemento Portland (se parece a las piedras de Portland).
- Hacia finales de siglo aparece el hormigón armado en Francia.
- A principios del siglo XIX empieza a usarse en Inglaterra la máquina de vapor para levantar las mazas.

- Durante este siglo aparecen otras técnicas basadas en la máquina de vapor (percusión directa) o con máquinas de aire comprimido e incluso con pólvora.

 - En 1897 Raymond patentó su sistema de pilotes.
 - En 1903 Beale desarrolló el sistema de entubación metálica, posterior hormigonado interior y extracción de la entubación.
 - El Belga Franki desarrolló un sistema similar que permitía el ensanchamiento de la base del pilote.
 - En USA (1900) se empezaron a usar los pilotes metálicos en forma de viga-I y viga-H.
 - A partir de 1946 empiezan a aparecer máquinas diesel para la hincada de pilotes.
 - Los pilotes perforados fueron muy usados en la India, por ejemplo mediante 'pozos de cimentación' que se rellenaban con piedra. Ej: Taj Mahal (construido entre 1632-1650).

 - La maquinaria para perforación era más ligera que la maquinaria de hincada, lo que facilitó la técnica de la perforación.
 - Originalmente se impedía la entrada de agua en la entubación mediante aire comprimido. Actualmente se hormigona desde la zona inferior del tubo aunque exista agua en su interior.
 - Actualmente existe maquinaria de perforación desde 150 mm hasta 2 m.
 - Actualmente se hincan pilotes prefabricados (machiambrados) o se hincan pilotes ejecutados in situ.
 - Actualmente los pilotes tubulares hincados se suelen usar en plataformas off-shore.
-

Forma de trabajo de los pilotes

Contribución por fuste: se basa en la fricción entre el terreno y el pilote. Es un comportamiento tensión tangencial versus desplazamiento relativo que puede tener términos friccionales o de adherencia. $F = \text{integral de } \tau \times dA_{\text{fuste}}$

Contribución por punta: se basa en el apoyo normal en capas inferiores normalmente más resistentes ya sea por naturaleza diferente como por mayor confinamiento. $P = \text{integral de } \sigma_n \times dA_{\text{punta}}$

Una componente (cualquiera de ellas) puede ser muy superior a la otra. El fuste puede actuar en contra, es decir, en lugar de resistir se apoya.

Criterios básicos de utilización de los pilotes

Cuando en superficie las capas no son suficientemente resistentes como para obtener tamaños de cimentación superficial aceptables cumpliendo las condiciones en rotura y de servicio (asientos).

- Relleno de suelo blando que nunca ha sido sometido a una carga exterior (suelo normalmente consolidado).
- Estricta limitación de asientos, asientos diferenciales o asientos sobre otras estructuras. Los pilotes son cimentaciones que dan lugar a movimientos muy pequeños en comparación con las cimentaciones superficiales.
- Terreno heterogéneo. Presencia de capas de apoyo duras a profundidad variable.
- Cargas muy fuertes: Offshore, muelles en zonas portuarias, muros, apoyos de puentes, cargas verticales invertidas (tracción).

En todo caso debe considerarse la posible mejora del terreno por ejemplo mediante precarga o eliminación de capas de terreno blando.

5.2. TIPOLOGÍA DE PILOTES

a) Por la forma de transmitir la carga al terreno

- **Columna:** fuerte predominio de la componente de punta (capa resistente bajo suelo blando).
- **Flotantes** o de rozamiento: transmisión a lo largo del pilote al suelo deformable al que se adhiere por fuste.

Según la NTE se puede establecer que:

- $P > 3 F$ el pilote trabaja esencialmente por punta
- $P < 3 F$ el pilote trabaja esencialmente por fuste

b) Por la forma de puesta en obra con respecto al terreno

- Pilotes de **desplazamiento** o hincados: se instala en el terreno desplazando en el terreno un volumen de suelo equivalente. Primero el terreno sube, pero luego solo se comprime.

Se caracterizan por:

- fuerte fricción suelo - pilote (el pilote queda fuertemente confinado)
 - alteración del suelo: en general mejora por compresión del terreno
 - para reducir el coste de hinca puede interesar que el pilote sea liso
- Pilotes de **extracción:** se excava previamente el terreno donde se va a instalar el pilote. A continuación se ejecuta el pilote.

Se caracterizan por:

- débil fricción suelo - pilote debido a la débil tensión normal
 - interesa que el pilote sea rugoso para mejorar la contribución por fuste.
- De **extracción - desplazamiento:** se excava previamente un volumen de suelo inferior al que ocupará el pilote terminado. Se hace para reducir el coste de la hinca en un terreno medio.

c) por el lugar de fabricación y la forma de ejecución

- **Prefabricados:** en este caso se transportan desde una planta de fabricación y se hincan por percusión, por presión o vibración, mediante gatos hidráulicos, roscados al terreno o, se instalan en perforaciones previamente perforadas.
- **Ejecutados in situ:** hay varias tipologías
 - Hinca de entubación recuperable con un **azuche** (tapón perdido en la punta de la entubación). Se hormigona en el interior de la entubación que se va extrayendo simultáneamente al hormigonado. Siempre deben quedar 2 diámetros de hormigón dentro de la camisa para evitar la

- entrada de agua. Se extrae la entubación mediante golpeo lateral que sirve para vibrar el hormigón. CPI 2
- Idem pero con **tapón de gravas** en lugar del azuche. En este caso el golpeo se hace con un martillo interior que golpea sobre el tapón. CPI 3
 - Extracción mediante cuchara (trépano si es terreno duro) con entubación recuperable. Al hormigonar se quita la entubación. CPI-4.
 - **Extracción** mediante cuchara (trépano si es terreno duro) con entubación no recuperable. CPI-5.
 - **Perforados con hélice** y manteniendo la excavación con lodos tixotrópicos (mezcla de agua con arcilla bentonítica) que mantienen las paredes evitando los derrumbes (su densidad puede ser de 1.3 a 1.4). CPI-6
 - **Barrenados**: introduciendo un mortero por el eje de la barrena que desplaza el terreno triturado. Finalmente se va extrayendo la barrena y al mismo tiempo se hormigona. Las armaduras se introducen en el hormigón fresco. CPI-7

d) según el material

- Madera: bajo el agua se conserva bien
- Metálicos: aprovechar perfiles laminados. Velocidad de oxidación es lenta
- Hormigón: armado o pretensado.
- Mixtos: combinación de perfiles con hormigón.

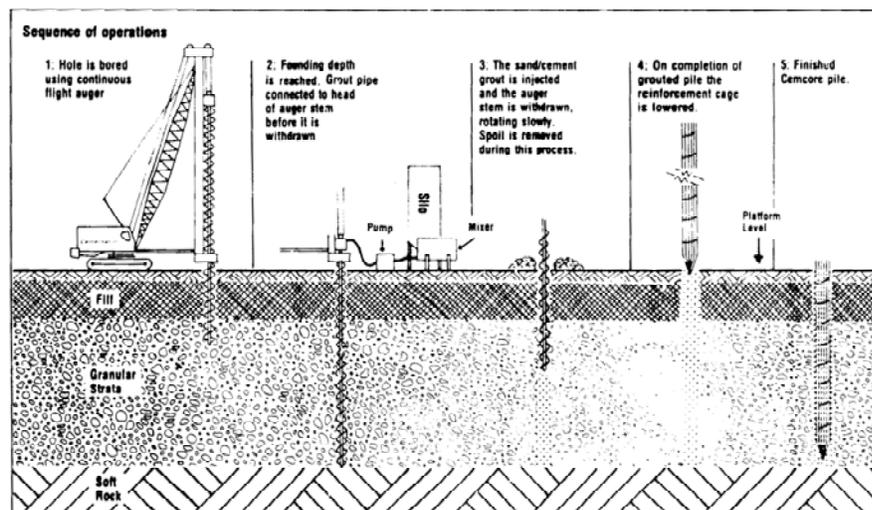


Figura 5.2.1 PILOTE BARRENADO SIN SOSTENIMIENTO. Se caracteriza por: perforación mediante barrena, hormigonado por el interior de la barrena y extracción simultánea de la barrena, se introduce la armadura con el hormigón fresco

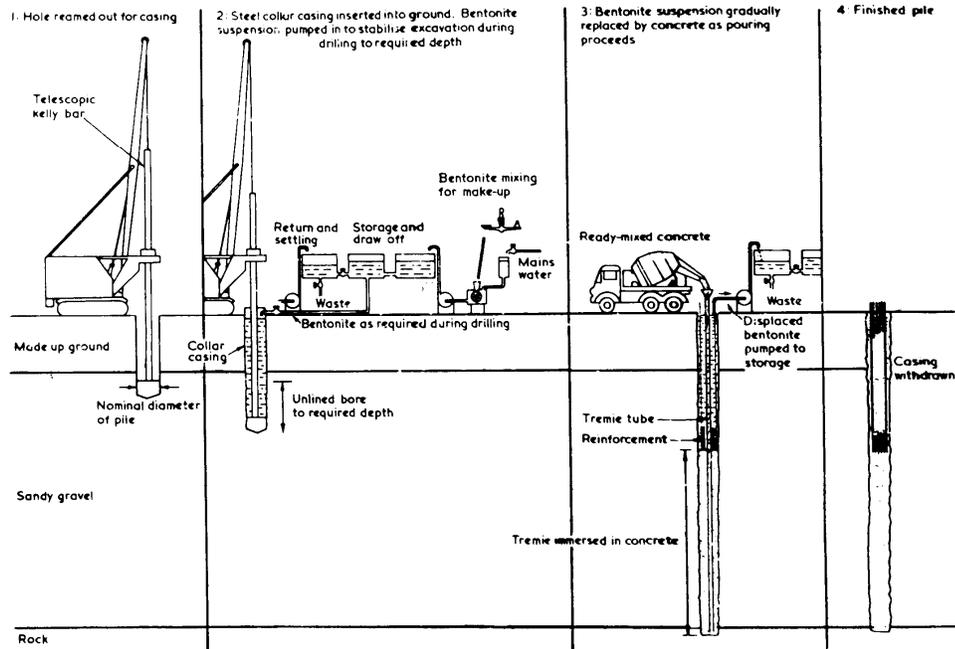


Figure 5.2.2. PILOTE PERFORADO SIN ENTUBACIÓN Y CON LODOS BENTONÍMICOS. Se caracteriza por los siguientes aspectos. Perforación mediante hélice. Lodo bentonítico de densidad mayor que la del agua y menor que la del terreno. Es capaz de transmitir cierta presión en la perforación. Se hormigona desde el extremo inferior y el propio hormigón desaloja el lodo. La armadura se introduce con el hormigón fresco.

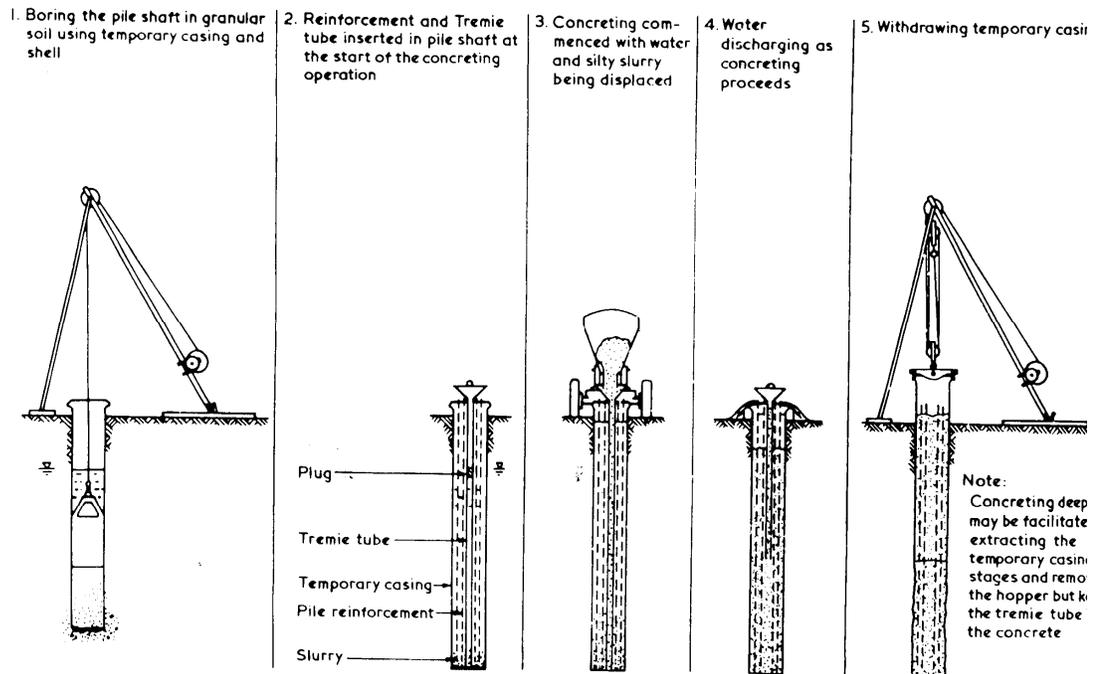


Figure 5.2.3. PILOTE EXCAVADO CON CAMISA RECUPERABLE. Se caracteriza por los siguientes pasos o aspectos. Se excava con cuchara (suelo granular). Se introduce camisa de chapa a tiempo que se avanza con la cuchara. Se introduce armadura en el interior vacío de la camisa. Se introduce tubo para hormigonar por el interior de la armadura. Se hormigona desde el extremo inferior a medida que se extrae el agua. Se extrae la camisa, por tramos a medida que se hormigonan.

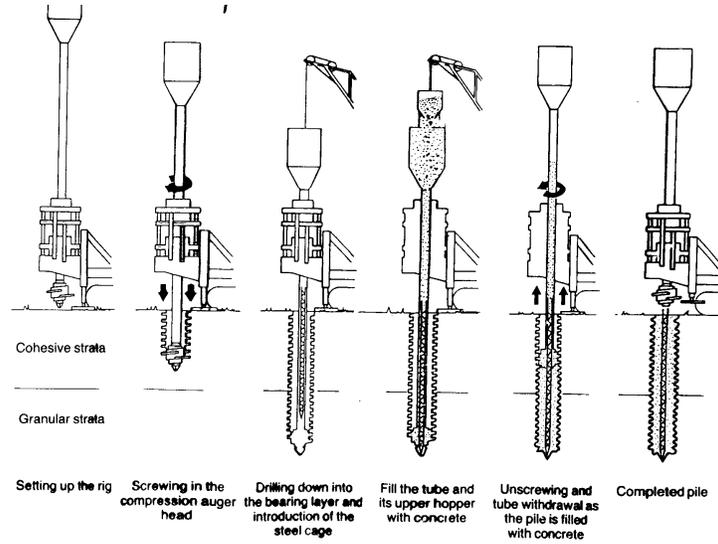


Figura 5.2.4. PILOTE PERFORADO CON HELICE. Se caracteriza por los siguientes aspectos. Perforación mediante hélice. Introducción de armadura y hormigón por el interior del tubo. Hormigonado y extracción de herramienta de corte simultáneos

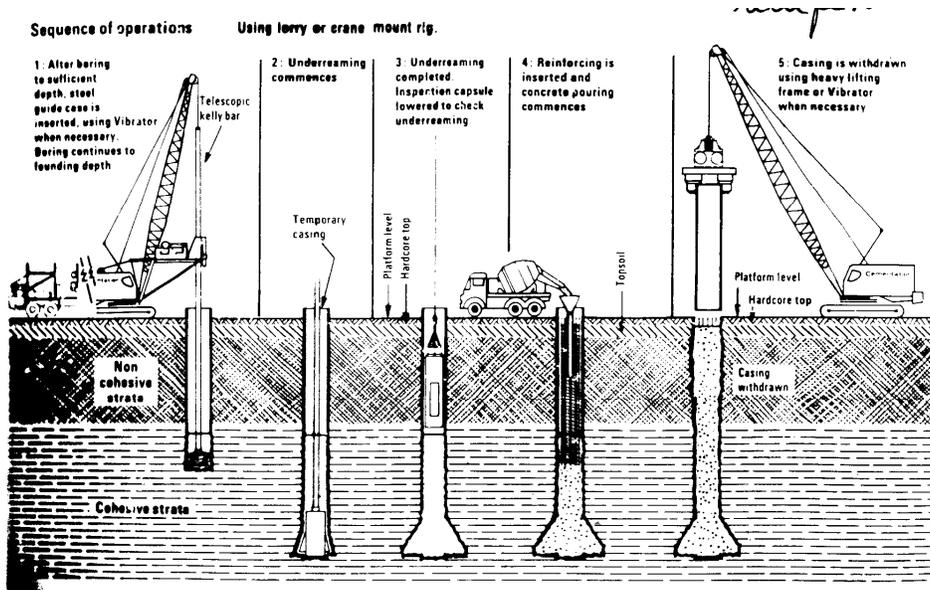
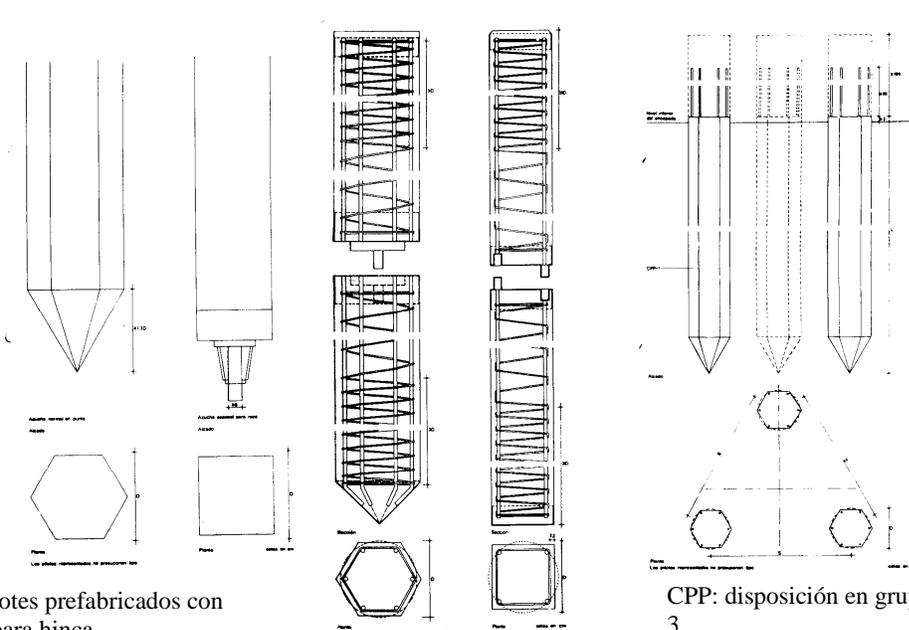


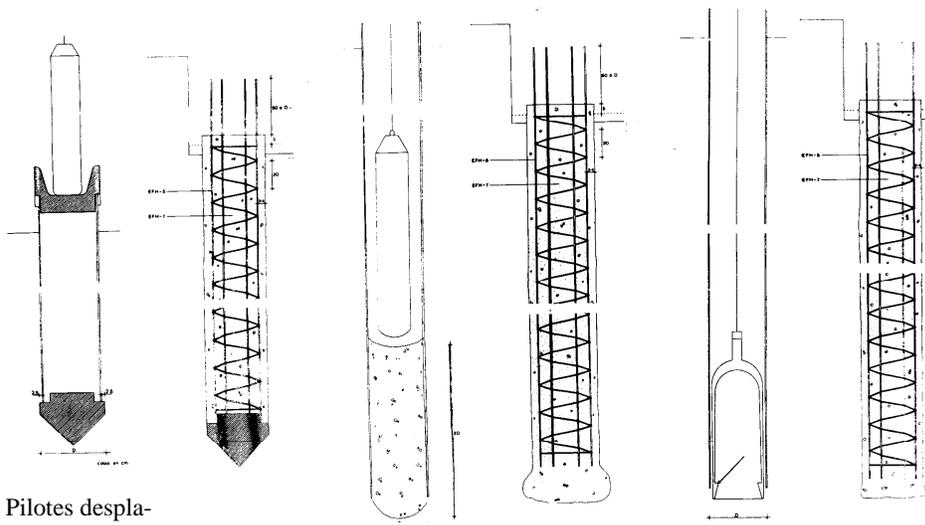
Figura 5.2.5. PILOTE PERFORADO CON HÉLICE Y ENTUBACIÓN RECUPERABLE. Se caracteriza por los siguientes pasos. La perforación es acompañada de una entubación sobre todo en estratos granulares. En los cohesivos puede no ser necesaria. Herramienta especial para ensanchar la base. Introducción de armadura en el interior de la camisa. Hormigonado y extracción de entubación simultáneos

CLASIFICACIÓN DE LOS PILOTES SEGÚN NTE



CPP: pilotes prefabricados con azuche para hinca

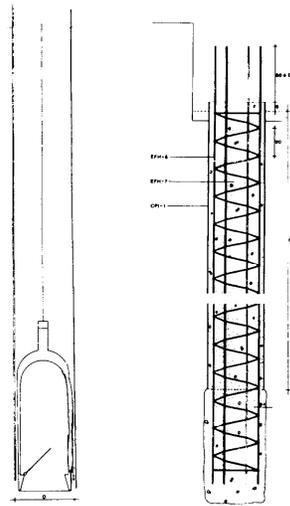
CPP: disposición en grupo de 3



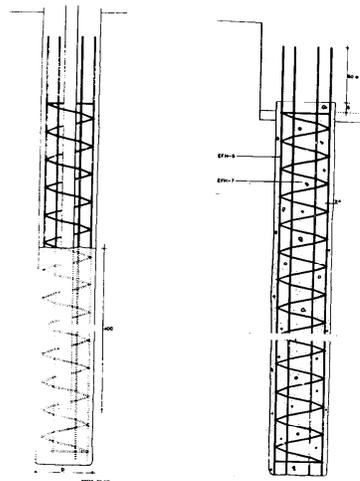
CPI-2: Pilotes desplazamiento con azuche y camisa recuperable

CPI-3: Pilotes desplazamiento con tapón de gravas y camisa recuperable

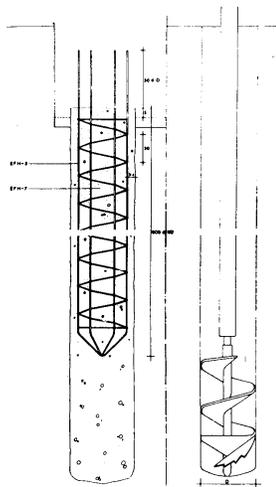
CPI-4: Pilotes extracción con cuchara y camisa recuperable



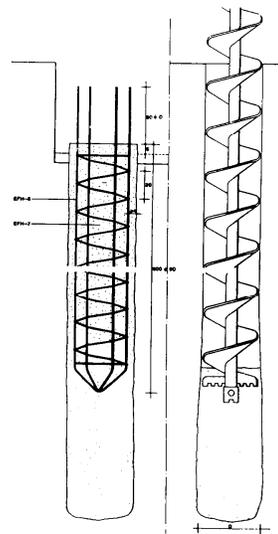
CPI-5: Pilotes extracción con cuchara y camisa perdida



CPI-6: Pilotes perforados sin entubación y con lodos tixotrópicos



CPI-7: Pilotes barrenados sin entubación



CPI-8: Pilotes barrenados sin entubación. Hormigonado por eje barrena

Figure 5.2.6. Clasificación de los pilotes según la normativa tecnológica de la edificación (NTE).

Para finalizar esta sección, y previo a describir la metodología de cálculo de diferentes aspectos de los pilotes, se incluye una descripción de cómo se realizaría el cálculo de un grupo de pilotes teniendo en cuenta que en este problema existen varios grados de libertad y, por tanto, se pueden plantear varias soluciones posibles.

Procedimiento general de cálculo de un grupo de pilotes

1. Selección de la solución en base a criterios preestablecidos
2. Comprobación en rotura/hundimiento (pilote aislado / grupo de pilotes). Si no cumple, volver a 1.
3. Comprobación de deformaciones / asentos para la carga de trabajo. Si no cumple, volver a 1.
4. Dimensionamiento estructural del pilote: armaduras
5. Dimensionamiento de elementos auxiliares tales como encepados o vigas riostras.

Posteriormente se explicaran con más detalle los pasos a realizar una vez que se hayan descrito las variables geométricas y resistentes que intervienen en el problema.

Por otro lado, se incluye a continuación la nomenclatura y unidades en cada una de las variables que van a intervenir posteriormente.

Notación

p_p : presión por punta o resistencia a la rotura por punta (unidades de tensión, kPa)

p_f : resistencia por fuste o resistencia a la rotura por fuste (unidades de tensión, kPa)

Q_h : Carga de hundimiento (unidades de fuerza, kN)

$Q_h = Q_p + Q_f = P + F$: contribuciones por punta y por fuste

q_c, R_p : resistencia a la penetración (unidades de tensión, kPa)

q_u : resistencia a la compresión simple (unidades de tensión, kPa)

c_u : resistencia al corte sin drenaje (unidades de tensión, kPa)

l, D : longitud del pilote (unidades de longitud, m)

ϕ, B : diámetro del pilote (unidades de longitud, m)

5.3 PILOTE AISLADO. CARGA DE HUNDIMIENTO

5.3.1. Introducción

La rotura global (típica de cimentaciones superficiales) difícilmente se produce en pilotes. Debido a su mayor esbeltez, la rotura en un pilote es por punzonamiento. La rotura de un pilote se identifica en la curva carga-asiento. Esta curva es de la misma forma que las curvas tensión-deformación de comportamiento de un material elastoplástico. Puede mostrar comportamiento dúctil y comportamiento frágil.

Según Winterkorn y Fang, los tipos de rotura en pilotes pueden esquematizarse como:

- Terreno blando con base rocosa en su límite inferior. El pilote es de tipo columna y prácticamente toda la carga se soporta por punta. El fuste es despreciable y también la capacidad de confinamiento del suelo alrededor del pilote. Si la carga es suficientemente grande en relación a la esbeltez del pilote, éste puede llegar a pandear. La rotura es de tipo completamente frágil.
- Terreno blando sobre terreno medio o terreno medio sobre terreno duro. En este caso también se puede tratar de pilote columna lo que si da lugar a una rotura global del estrato de apoyo (mecanismo de Prandtl) entonces también provocaría una curva de rotura con comportamiento frágil.
- Terreno homogéneo con pilote flotante. A medida que un pilote flotante se va introduciendo en el terreno, va comprimiendolo y la resistencia por fuste va aumentando. Por tanto, la curva de rotura de un pilote flotante tiende a mostrar endurecimiento.
- Pilote a tracción. Un pilote flotante puede soportar cargas a tracción y la curva de rotura que produce será de tipo plástico perfecto.

Acciones y reacciones sobre un pilote

Sea un sistema de cargas, V, H, M general. En realidad el pilote aislado solo puede soportar cargas verticales V y, aunque en menor magnitud e importancia, cargas horizontales. La carga vertical V sobre un pilote se acaba comparando con la carga de hundimiento del pilote Q_h a través de un factor de seguridad al hundimiento. Dicha carga de hundimiento se expresa como:

$$Q_h = Q_p + Q_f$$

donde Q_p y Q_f son respectivamente las cargas de hundimiento de la punta y del fuste y se expresan como:

$$Q_p = p_p A_p \quad A_p = \pi \phi^2 / 4$$

$$Q_f = \int_0^l \pi \phi p_f(z) dz = \pi \phi \int_0^l p_f(z) dz = \pi \phi \sum p_f^i l^i$$

De estas dos componentes, la contribución por fuste se ve afectada por el sistema de ejecución en mayor medida que la contribución por punta.

5.3.2. Resistencia por punta. Expresiones estáticas

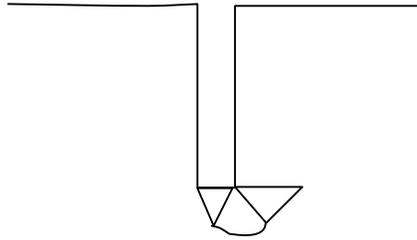


Figura 5.3.1. Esquema de la rotura global por punta en un pilote de forma análoga a cómo se produce en cimentaciones superficiales

Se puede considerar la analogía con cimentaciones superficiales de forma que en principio se partirá de la expresión general de Brinch-Hansen:

$$ph = c' N_c s_c d_c i_c + q N_q s_q d_q i_q + \frac{1}{2} B \gamma N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma$$

El término de peso (γ) es despreciable en todos los casos de pilotes. En condiciones no drenadas $N_\gamma=0$ lo que anula todo el término. En condiciones drenadas es despreciable ya que:

$$\frac{1}{2} B \gamma N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma \ll q N_q s_q d_q i_q$$

debido a que, por un lado, $B = \phi$ es pequeño, y por otro lado, $q N_q$ es muy grande ($q = \gamma l$, y la longitud l es grande).

Los términos de inclinación, serán la unidad en cualquier caso ya que las cargas actúan verticalmente en los pilotes.

Por tanto la expresión de partida será la siguiente:

$$ph = c' N_c s_c d_c + q N_q s_q d_q$$

que posteriormente se particularizará según el tipo de suelo y en diferentes casos.

Los mecanismos de rotura en pilotes han sido estudiados por diferentes autores con el objetivo de encontrar formas analíticas para N_c y N_q . Algunos de éstos mecanismos son:

Terzaghi: Se supone rotura global (zona en rotura activa y zona en rotura pasiva) en el terreno bajo la punta del pilote y el terreno lateral actúa en forma de sobrecarga $q = \gamma l$.

Meyerhoff: El mecanismo de rotura empieza de forma parecida al de rotura global, sin embargo, las líneas de rotura continúan en forma de espiral que se va abriendo hasta que se intersecta con el fuste del pilote.

Este mecanismo permite definir la ZAI y ZAS que son, respectivamente, la zona activa inferior ($ZAI=2$ a 3ϕ) y la zona activa superior (4ϕ en arcillas y 8ϕ en arenas).

La existencia de esta ZAS justifica que los pilotes mejoran su contribución por punta si se empotran en la capa dura respecto a un simple apoyo

Berezantsev: La hipótesis básica de este autor es que en realidad la sobre carga q en el plano de apoyo es inferior que γl debido a efecto silo causado por la propia construcción del pilote o por el estado natural del terreno. Esto facilita la subida del terreno en la zona lateral.

Gibson: Este mecanismo se basa en la existencia de un bulbo en el que el suelo se encuentra plastificado. Este bulbo es estable hasta que se llega a rotura en que va creciendo alcanzando incluso la superficie del terreno.

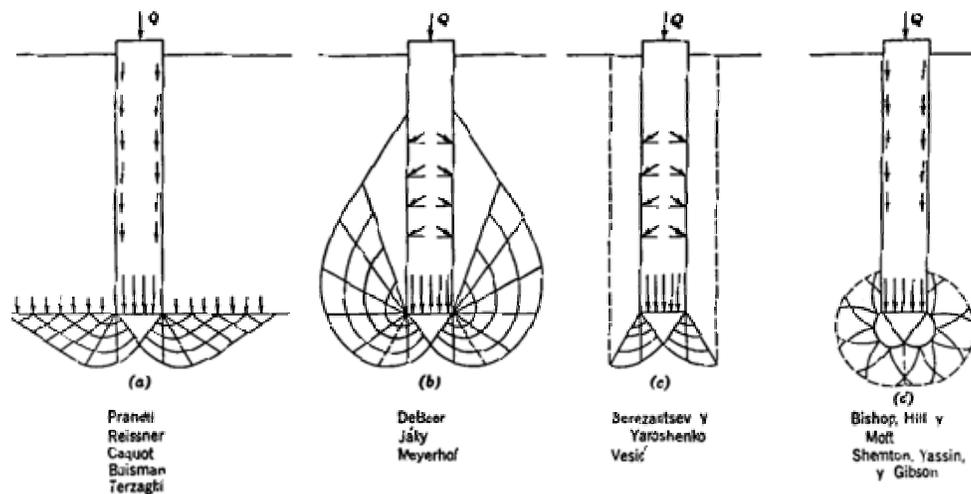


Figure 5.3.2. Mecanismos de rotura por punta en un pilote aislado según diferentes autores

Resistencia por punta en Arenas

Se desprecia la cohesión y por tanto:

$$ph = qN_q s_q d_q$$

La existencia de diferentes mecanismos provoca también la existencia de diferentes modelos que se pueden usar para determinar el coeficiente N_q (en el caso de suelos granulares).

Caquot-Kerisel las ha recopilado y obtenido una curva media que podría ser:

$$N_q = 10^{3.04 \tan \phi'}$$

Si se compara esta expresión con los resultados obtenidos para cimentaciones superficiales se obtiene por ejemplo:

ϕ	N_q en zapatas	N_q en pilotes
50	320	4200
30	18.4	56.9

Es decir que para valores altos de ϕ' las diferencias son de un orden de magnitud según se consideren modelos más parecidos a los de zapatas o modelos desarrollados propiamente para la geometría de un pilote.

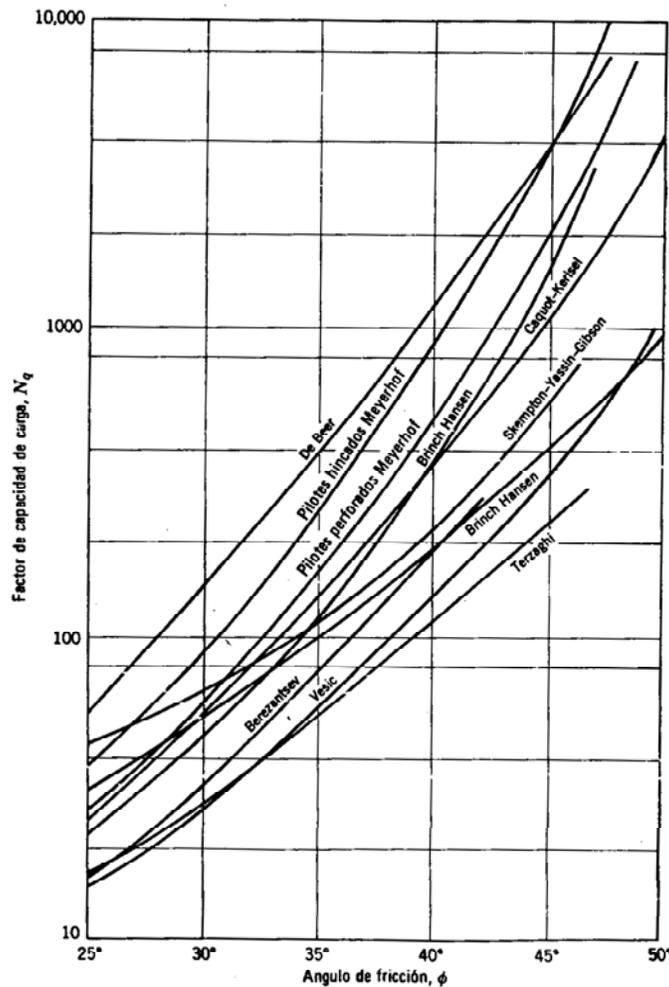


Figure 5.3.3. Factor de capacidad de carga según diferentes teorías propuestas por diferentes autores en base a mecanismos de rotura plausibles.

Los otros coeficientes de la expresión se pueden calcular en este caso como:

$$S_q = 1 + \frac{B}{L} \tan \phi' = 1 + \tan \phi' \cong 1.3$$

$$d_q = 1 + 2 \tan \phi' (1 - \sin \phi')^2 \arctan \left(\frac{L}{\phi} \right) = 1 + 2 \tan \phi' (1 - \sin \phi')^2 \times 1.57 = 1.45$$

$$\arctan \left(\frac{L}{\phi} \right) = \arctan(\infty) = 1.57$$

Sin embargo, la expresión:

$$ph = qN_q S_q d_q = \gamma l N_q S_q d_q$$

resulta que da lugar a un aumento lineal con la profundidad de la presión de hundimiento y esto en la realidad no se observa.

Para una arena densa, la resistencia a la penetración (q_c) se estabiliza en 300 kp/cm² (30 MPa) hacia 5 m (puede corresponder a unos 20 ϕ) mientras que en arenas sueltas la estabilización se alcanza en 100 kp/cm² (10 MPa).

Para superar esta dificultad se han propuesto otros modelos menos fundados teóricamente, como por ejemplo:

$$p_p = 5N_q \tan \phi' \quad \text{t/m}^2 \quad \text{para } z > 20\phi$$

En este caso, queda por tanto:

$$p_p = \min(qN_q S_q d_q, 5N_q \tan \phi')$$

Para cada tipo de arena existe un rango del número de golpes del ensayo de penetración dinámica, y por otro lado se puede calcular el factor N_q . La tabla siguiente muestra los valores, pero es importante tener en cuenta que no es conveniente correlacionar estas variables (N_{SPT} y N_q) ya que su origen conceptual es muy diferente.

N (SPT)	0-4	4-10	10-30	30-50	>50
N_q	20	30	70	90	150
Tipo arena	Muy suelta	Suelta	media	densa	Muy densa

Por último, ha que poner de manifiesto que la teoría presentada anteriormente es de difícil aplicación por dos razones principales: existen varios modelos con elevada variabilidad y es difícil disponer de un perfil de valores de ángulo de rozamiento interno en función de la profundidad del terreno.

Por tanto, en la práctica se ha buscado un planteamiento más empírico que se escribe en función de parámetros penetrométricas como:

$$p_p = \frac{q_c}{\beta} \cong \frac{4N}{\beta} \quad (1 < \beta < 3)$$

$$q_c \text{ (kp/cm}^2\text{)} \cong 4N$$

$$q_c \text{ (kPa)} \cong 400N$$

en la que β no es constante, sino que:

- Aumenta al aumentar q_c
- Aumenta al aumenta el diámetro del pilote

Según estas dependencias, es posible plantear la resistencia por punta como:

$$p_p = \frac{q_c}{\beta} \left(\beta = 1 + \alpha B q_c \quad \text{o bien:} \quad \beta = 1 + \frac{B q_c}{A} \right)$$

$\alpha = 4 \times 10^{-5} (\text{kp/cm}^2)^{-1} \text{cm}^{-1}$, o bien $A = 25000 \text{ cm kp/cm}^2$; para B en cm y q_c en kp/cm^2

$\alpha = 4 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$, o bien $A = 25000 \text{ m kPa}$; para B en m y q_c en kPa

Que se deduce de los valores calculados en la NTE, es decir, su uso da lugar a cargas de hundimiento muy parecidas.

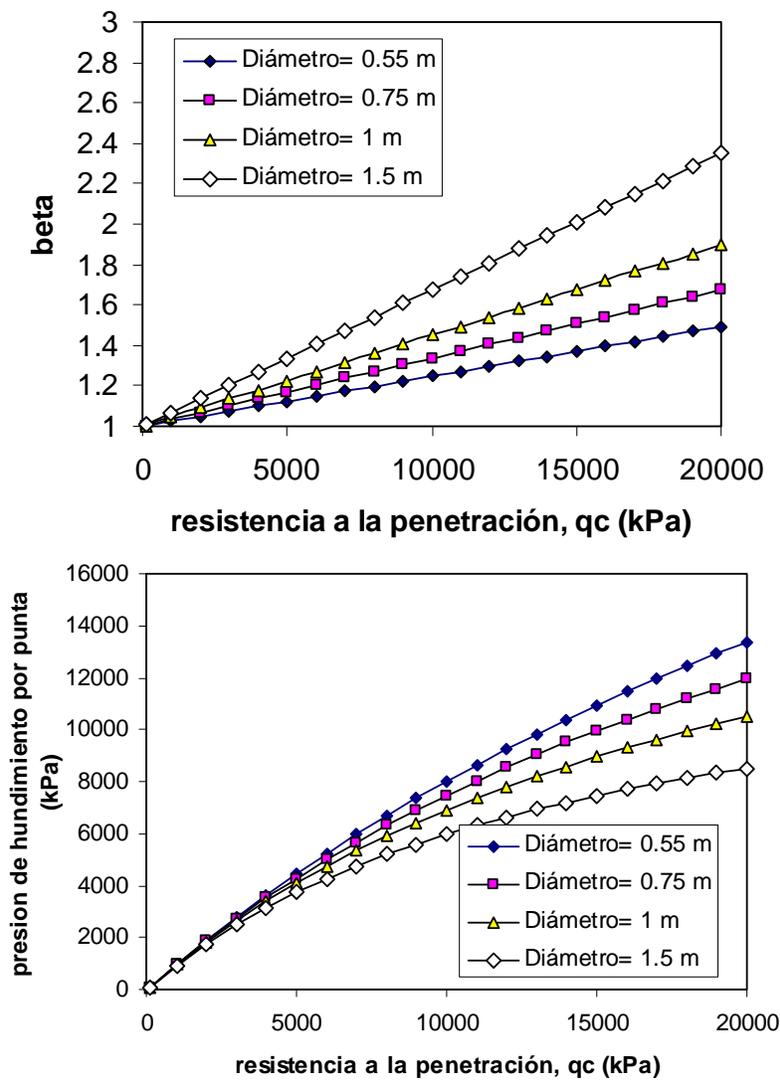


Figura 5.3.4. Coeficiente beta y presión de hundimiento por punta en función de la resistencia a la penetración (q_c) expresada en kPa (arenas).

Resistencia por punta en Gravas

En el caso de que exista una base granular de tipo grava y no sea posible realizar el ensayo de penetración se puede tomar:

$$\text{Gravas límpias: } p_p = 120 \text{ kp/cm}^2 \text{ (12000 kPa)}$$

$$\text{Gravas arenosas: } p_p = 80 \text{ kp/cm}^2 \text{ (8000 kPa)}$$

$$\text{Gravas arcillosas: } p_p = 50 \text{ kp/cm}^2 \text{ (5000 kPa)}$$

En cualquier caso es recomendable empotrar la punta y disponer, como mínimo, de 6ϕ tanto por arriba como por abajo del nivel de apoyo.

Si solo se apoya, es decir que no se realiza una cierta penetración en el terreno más resistente, p_p puede verse reducido a la mitad de su valor de cálculo.

Resistencia por punta en arcillas

El comportamiento de las arcillas es más complejo que el de los materiales granulares debido a que se generan presiones intersticiales durante la hincada, se puede producir remoldeo del suelo con el consiguiente cambio de propiedades y se pueden producir procesos de consolidación simultáneamente.

Generalmente se trabaja en tensiones totales, porque las condiciones de rotura más desfavorables son las de la rotura en condiciones no drenada.

En arcillas blandas ($q_u < 2.5 \text{ kp/cm}^2$, 250 kPa) puede despreciarse la contribución por punta del pilote ya que es pequeña en comparación con la contribución que se obtendrá del fuste.

Análogamente a como se ha hecho en arenas se parta de la expresión general de B-H que en este caso de condiciones no drenadas es:

$$p_h = c_u N_c s_c d_c + q N_q s_q d_q$$

en la que los factores N_c y N_q valen:

$$N_q = 1$$

$$N_c = \pi + 2 = 5.14$$

y los factores de forma se pueden calcular como:

$$S_q = 1 + \frac{B}{L} \tan \phi = 1$$

$$S_c = 1 + \frac{N_q B}{N_c L} = 1 + \frac{1}{5.14} = 1.2$$

y los factores de empotramiento:

$$d_q = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \arctan \left(\frac{D}{B} \right) = 1$$

$$d_c = d_c - \frac{1-d_q}{N_c \tan \phi} = 1 + \frac{2}{N_c} \arctan \frac{D}{B} = 1 + \frac{2}{\pi+2} \frac{\pi}{2} \cong 1.6$$

$$\frac{D}{B} \rightarrow \infty \Rightarrow \arctan \frac{D}{B} \rightarrow \frac{\pi}{2}$$

Para finalizar resulta que la presión de hundimiento por punta es:

$$p_p = \gamma_n l \times 1 \times 1 \times 1 + c_u \times 5.14 \times 1.2 \times 1.6 \cong 9c_u$$

Como puede verse el término de sobrecarga se desprecia ya que todos sus factores correctores son la unidad en cuyo caso sólo aporta $q = \gamma l$ que equivale prácticamente al peso del propio pilote. Es decir que la resistencia por punta en arcillas se evalúa como:

$$p_p = 9c_u$$

Si se dispone de la resistencia a la compresión simple o la resistencia a la penetración entonces dicha expresión se transforma en:

$$p_p = 9c_u = 4.5q_u \cong 0.6q_c \quad q_u \cong \frac{q_c}{7.5}$$

Un caso particular son las pantallas que actúan como cimentación y cuya resistencia por punta es:

$$p_p = 7.5c_u = 3.75q_u \cong 0.5q_c \quad q_u \cong \frac{q_c}{7.5}$$

que tiene coeficientes diferentes al no haberse incluido el factor de forma (una pantalla es análogo a una zapata corrida).

Resistencia por punta en roca

En general puede establecerse una expresión de la resistencia por punta en función de la resistencia a la compresión simple:

$$p_p = \alpha q_u = \beta \left(0.5 + \frac{D}{6\phi} \right) q_u$$

$$\alpha = \beta \left(0.5 + \frac{D}{6\phi} \right) \leq 1$$

en la que el parámetro β depende del tipo de roca según:

Tipo de roca	Resistencia compresión simple q_u (kp/cm ²)	Resistencia compresión simple q_u (kPa)	β
Granito, pórfido	150	15000	0.6
Caliza compacta no margosa	80	8000	0.8
Pizarra dura	40	4000	0.3
Arenisca compacta	100	10000	0.8

Normalmente para conseguir penetración de la punta del pilote en la roca de apoyo será necesario el uso de trépanos. En caso de hincas de pilotes prefabricados se puede usar también la punta de Oslo que consiste en un apéndice más estrecho del pilote en su extremo inferior en forma de aguja que puede penetrar en la roca.

Por último, si hay roca o suelo muy duro pero en un espesor limitado puede suponerse una mecanismo de punzonamiento como en el caso de cimentaciones superficiales (Hanna o Brown Meyrhoff), en este caso, la carga por punta puede calcularse como:

$$Q_p = \frac{1}{2} q_u \pi \phi e$$

siendo e el espesor de la capa dura, q_u su resistencia a la compresión simple.

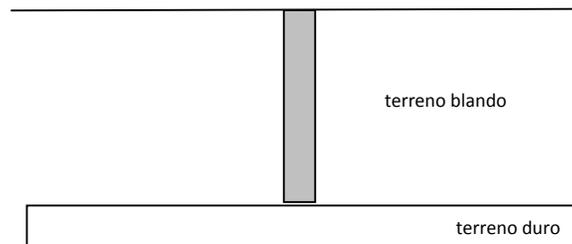


Figura 5.3.5. Esquema de un pilote apoyado en una capa dura de terreno.

5.3.3. Resistencia por fuste

Ya se había indicado que la carga de hundimiento por fuste se calcula en función de la presión de hundimiento por fuste según:

$$Q_f = \pi \phi \int_0^l p_f dz$$

El mecanismo de rotura por fuste está muy bien definido ya que tiene lugar en la interfase pilote-terreno. Basta por tanto plantear la condición de rotura, que en este caso es la de Mohr-Coulomb, en dicha interfase:

$$p_f = \tau = a + \sigma_h' \tan \delta$$

en la que a es la adherencia, δ es el ángulo de rozamiento y σ_h' es la tensión efectiva horizontal que se puede expresar como: $\sigma_h' = K \sigma_v' = K \gamma' z$ y por tanto resulta:

$$p_f = \tau = a + \sigma_h' \tan \delta = a + K \gamma' z \tan \delta$$

Al usar esta condición de rotura se observa que la resistencia por fuste crece linealmente con la profundidad. Esto, sin embargo, no es muy realista ya que al medir con el penetrómetro (manguito) la resistencia por fuste en profundidad se observa que se produce una estabilización y que incluso con los mejores suelos (arenas densas) nunca se supera el valor límite de $p_f = 1 \text{ kp/cm}^2$ (100 kPa)

Puesto que tanto la resistencia por punta como la resistencia por fuste se estabilizan con la profundidad entonces el cociente p_p / p_f se mantiene constante a partir de cierta profundidad.

En general la resistencia por fuste es mayor en suelos granulares que en suelos cohesivos debido a que en los primeros se basa en la componente friccional (que depende del confinamiento) mientras que en los segundos las condiciones de rotura no drenada implican que solo quede la componente de adherencia. Sin embargo, es habitual que en arenas el fuste se movilice poco debido a que la punta se encuentra bien apoyada y el pilote asienta poco (baja deformabilidad del suelo en la zona de punta). Por el contrario, en arcillas, la capacidad portante en la punta es baja y la deformabilidad del terreno alta (pilotes flotantes) y el fuste se moviliza siendo por tanto importante la contribución por fuste del pilote.

Por último hay que remarcar que la componente por fuste es muy sensible a la puesta en obra. Por ejemplo, hay mucha diferencia si el pilote es hincado o perforado.

Resistencia por fuste en arenas

Se parte de la condición general de rotura de Mohr-Coulomb:

$$pf = \tau = a + \sigma_h' \tan \delta = a + K\gamma' z \tan \delta$$

y se discute a continuación la importancia relativa de cada término:

- El término de adherencia a , que está relacionado con la cohesión del suelo puede despreciarse en suelos granulares.
- El ángulo de rozamiento δ corresponde al rozamiento en la interfase suelo-pilote y puede estimarse según:
 - $\delta = \phi'$ en el caso de pilotes de extracción ya que la rugosidad del pilote con el terreno puede ser buena.
 - $\delta = \phi'/3$ en el caso de pilotes metálicos hincados que son muy lisos.
 - $\delta = 2\phi'/3$ en el caso de pilotes hincados de hormigón.
- El coeficiente de empuje K está muy influido por la forma de ejecución de los pilotes:
 - En pilotes de extracción puesto que el terreno se descomprime al hacer la perforación y acaba empujando sobre el pilote, $K_a < K < K_0$. En caso de tener que tomar un valor sería aconsejable adoptar $K = K_a$ que dejaría del lado de la seguridad.
 - En pilotes de desplazamiento puesto que el terreno se comprime al hincar el pilote, $K_0 < K < K_p$. En caso de tener que tomar un valor sería aconsejable adoptar $K = K_0$ que dejaría del lado de la seguridad.

Valores típicos de K	Arena suelta	Arena densa
Hincado	1.0	2.5
perforado	0.25	0.7

En todo caso, ya se ha dicho que es más probable disponer de información penetrométrica que de ángulos de rozamiento. Esto quiere decir que se deberá estimar la resistencia por fuste en base a dichos resultados penetrométricos. En este caso:

$$p_f = \frac{q_c}{\beta} \quad q_c \text{ (kp/cm}^2\text{)} \cong 4N \quad q_c \text{ (kPa)} \cong 400N$$

$$20 < \beta < 200$$

La variable β aumenta con la resistencia del terreno, lo que implica que el modelo no es lineal.

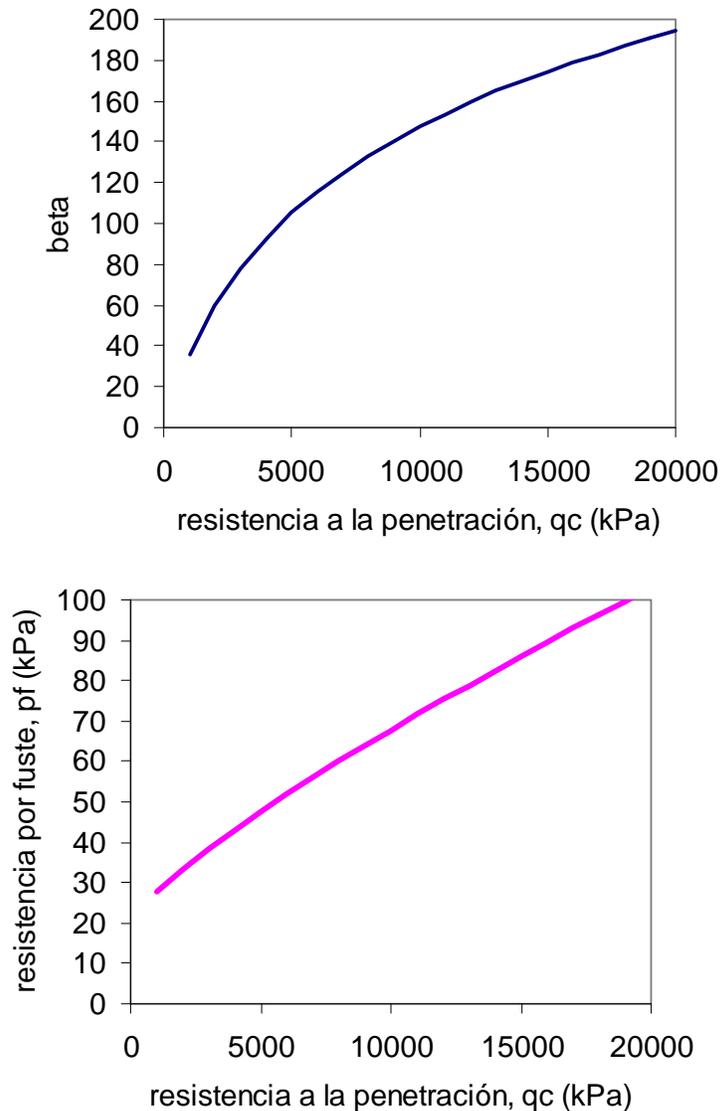


Figura 5.3.6. Coeficiente beta y resistencia por fuste en función de la resistencia a la penetración (q_c) expresada en kPa (arenas).

En general, la resistencia por fuste se puede expresar, como se ha indicado, como:

$$p_f = \frac{q_c}{\beta} \left(\beta = \gamma \ln(1 + \alpha q_c), \text{ o bien: } \beta = \gamma \ln\left(1 + \frac{q_c}{A}\right) \right)$$

$$\gamma = 75.23 \text{ (-)}$$

$$\alpha = 0.061 \text{ (kp/cm}^2\text{)}^{-1}, \text{ o bien } A = 16.4 \text{ kp/cm}^2; \text{ es decir para } q_c \text{ en kp/cm}^2$$

$$\alpha = 0.00061 \text{ (kPa)}^{-1}, \text{ o bien } A = 1640 \text{ kPa; es decir para } q_c \text{ en kPa}$$

Que se deduce de los valores calculados en la NTE, es decir, su uso da lugar a cargas de hundimiento muy parecidas.

Por último, el penetrómetro estático también es capaz de aportar información directa de la resistencia por fuste, es decir, medida directa de p_f . En cualquier caso está limitada, como ya se ha dicho, al valor de 1 kp/cm^2 (100 kPa).

Resistencia por fuste en gravas

Puesto que en gravas es difícil la realización de ensayos de penetración, se pueden tomar los siguientes valores de referencia:

	p_f (kp/cm ²)	p_f (kPa)
Gravas límpias (GW, GP)	1	100
Gravas arenosas (GS)	0.77	77
Gravas arcillosas o limosas (GC, GM)	0.51	51

Resistencia por fuste en arcillas

La estimación de la resistencia por fuste en arcillas es difícil por la generación de presiones intersticiales debido a su baja permeabilidad, el remoldeo que pueden sufrir durante la ejecución de los pilotes y la presencia de procesos de consolidación en el terreno donde se instalan.

Prácticamente se trata de una resistencia por adherencia lo que daría lugar a una carga por fuste de la forma:

$$Q_f = \pi \phi \int_0^l a dz$$

es decir que se supuesto que no hay fricción ($\delta=0$) lo que corresponde a la rotura de la interfase en condiciones no drenadas. La adherencia a depende de varios factores y lógicamente se podrá estimar a partir de la resistencia al corte sin drenaje del suelo c_u .

Una posible forma de evaluar la adherencia puede ser:

$$p_f = a = \beta c_u$$

De las observaciones realizadas por diferentes autores se deduce que la variable β es prácticamente igual a la unidad para arcillas blandas ($c_u < 0.3 \text{ kp/cm}^2$, 30 kPa)

mientras que va decreciendo a medida que va aumentando la resistencia llegando a valer del orden de 0.2 para resistencias altas, es decir, reducción de la resistencia en la interfase a 1/5 del valor de la resistencia del terreno.

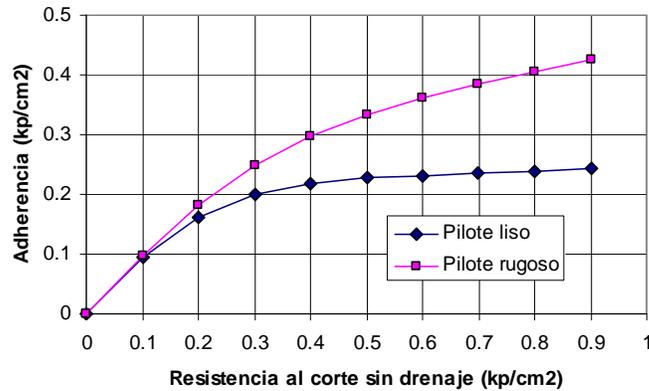


Figura 5.3.7. Adherencia en función de la resistencia al corte sin drenaje

Kerisel propuso la siguiente expresión para la determinación de β :

$$\beta = \frac{1 + c_u^2}{1 + 7c_u^2} \quad (c_u \text{ en kp/cm}^2)$$

$$\beta = \frac{1 + (c_u/100)^2}{1 + 7(c_u/100)^2} \quad (c_u \text{ en kPa})$$

aunque resulta demasiado conservadora (reducción demasiado grande).

Finalmente es conveniente expresar la resistencia por fuste en función de la resistencia a la penetración, en cuyo caso resulta:

$$p_f = a = \beta c_u = \beta \frac{q_u}{2} \cong \beta \frac{q_c}{15}$$

sujeto en todo caso a la limitación de 1 kp/cm² (100 kPa). Si se toma una función de β parecida a la de Kerisel, se puede plantear la siguiente expresión:

$$p_f = \beta c_u$$

$$\left(\beta = \frac{1 + a c_u^2}{1 + b c_u^2}, \quad a = 0.86, \quad b = 3.65, \quad c_u \text{ en kp/cm}^2 \right)$$

$$(a = 0.86 \times 10^{-4}, \quad b = 3.65 \times 10^{-4}, \quad c_u \text{ en kPa})$$

Que se deduce de los valores calculados en la NTE, es decir, su uso da lugar a cargas de hundimiento muy parecidas.

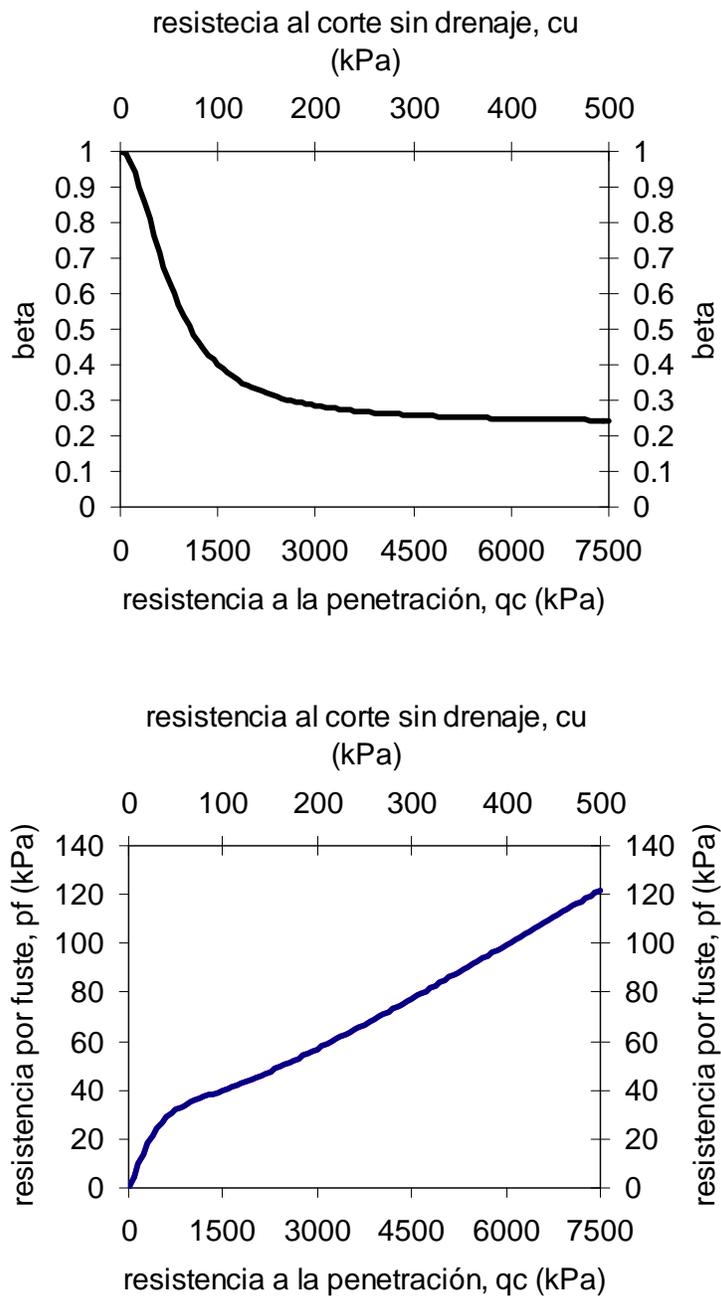


Figura 5.3.8. Coeficiente beta y presión de hundimiento por fuste en función de la resistencia a la penetración (q_c) expresada en kPa, y en función de la resistencia al corte sin drenaje (c_u) expresada en kPa (arcillas).

Por último, hay que hacer una serie de recomendaciones respecto a la evaluación de la resistencia por fuste que se pueden aplicar para quedar del lado de la seguridad:

- En el caso de encontrar capas de arcillas muy blandas profundas, la resistencia por fuste de las que se encuentran por encima no puede ser superior a 3 veces la de las capas blandas.
- En el caso de encontrar capas granulares intercaladas en arcillas, la resistencia por fuste de las capas granulares no puede ser superior que 2 veces la de las capas arcillosas.
- En capas de arcilla con consistencia media o superior se deben despreciar los 2 metros superiores en contacto con la superficie del terreno.

Resistencia por fuste en rocas

En general no habrá que considerar el fuste en capas de roca ya que la roca interesa para un apoyo por punta. Si hay que considerar algún caso:

$$p_f = \frac{1}{20} q_u$$

5.3.4. Fórmulas de hinca

Las fórmulas de hinca se usan principalmente para control de cambios de terreno durante la ejecución, posible rotura del pilote durante la hinca, detección de capas firmes de apoyo y, en general, control del terreno durante la ejecución

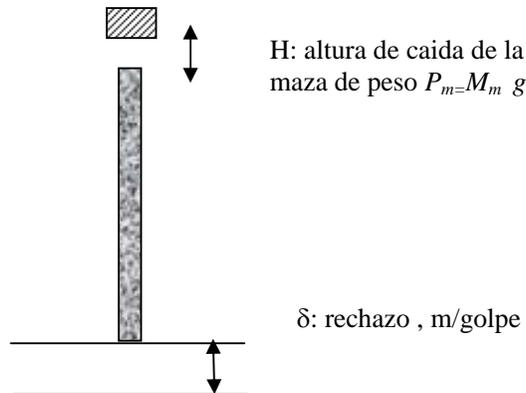


Figura 5.3.9. Esquema del pilote con una carga que cae para realizar el proceso de hincado..

El trabajo desarrollado por un peso P_m al caer de una altura H se puede escribir como:

$$T_{\text{total}} = \eta P_m H$$

siendo η un coeficiente de pérdidas de energía, es decir que no toda la energía potencial se llega a transformar en trabajo. También se designa como rendimiento del sistema de golpeo.

Este trabajo se consume en: pérdidas por choque no elástico, trabajo/energía consumido en la hincia y en deformación elástica del pilote y otros elementos.

La caída de la maza provoca un cierto asiento del pilote δ . La carga de hundimiento del pilote puede determinarse como:

$$Q_h = \frac{P_m H}{\delta} \times \frac{P_m}{P_m + P_p}$$

Demostración:

M_p : masa del pilote,

M_m : masa de la maza,

v_i : velocidad inicial de caída de la maza,

v_p : velocidad del pilote después de ser golpeado,

v_m : velocidad de la maza después de ser golpeado

Las ecuaciones para resolver el problema planteado son las de la teoría de choques, es decir, la conservación de la cantidad de movimiento:

$$M_m v_i = M_m v_m + M_p v_p$$

y la conservación de la energía cinética:

$$E_o - E_f = \left(\frac{1}{2} M_m v_i^2 \right) - \left(\frac{1}{2} M_m v_m^2 + \frac{1}{2} M_p v_p^2 \right)$$

expresión que puede tomar diferentes valores en función de que se considere choque elástico (con rebote) o no elástico (sin rebote):

<p>Choque elástico:</p> $M_m v_i = (M_m v_m + M_p v_p)$ $v_m = \frac{M_m v_i - M_p v_p}{M_m}$	$E_o - E_f = 0$ $\left(\frac{1}{2} M_m v_i^2 \right) = \left(\frac{1}{2} M_m v_m^2 + \frac{1}{2} M_p v_p^2 \right)$ $v_p = \frac{2v_i M_m}{M_m + M_p}$
<p>Choque no elástico (sin rebote): ($v_m = v_p$)</p> $M_m v_i = (M_m + M_p) v_p$ $v_p = \frac{v_i M_m}{M_m + M_p}$	$E_o - E_f =$ $= \left(\frac{1}{2} M_m v_i^2 \right) - \left(\frac{1}{2} (M_p + M_m) v_p^2 \right) =$ $= \frac{M_p}{M_p + M_m} \frac{1}{2} M_m v_i^2$

En la realidad se produce una situación intermedia que se puede expresar como:

$$E_o - E_f = \frac{M_p}{M_p + M_m} \frac{1}{2} M_m v_i^2 (1 - \rho^2) = \Delta T_{choque}$$

que corresponde al caso elástico cuando $\rho=1$ y al caso no elástico (sin rebote) cuando $\rho=0$. Este coeficiente ρ recibe el nombre de coeficiente de percusión.

En primer lugar se igualará el trabajo disponible con la energía inicial:

$$T_{total} = \eta P_m H = \frac{1}{2} M_m v_i^2 = E_o$$

lo que permite escribir las pérdidas de energía como:

$$E_o - E_f = \frac{M_p}{M_p + M_m} (\eta P_m H) (1 - \rho^2) = \Delta T_{choque}$$

Por otro lado, se pueden escribir dos contribuciones más del trabajo total, que son:

$$\text{Hinca del pilote:} \quad \Delta T_{hinca} = \delta Q_h$$

$$\text{Deformación elástica del propio pilote:} \quad \Delta T_{elastico} = \frac{1}{2} Q_h \delta_e$$

Finalmente, la ecuación de conservación del trabajo total es:

$$T_{total} = \Delta T_{choque} + \Delta T_{hinca} + \Delta T_{elástico}$$

en la que se substituye:

$$\eta P_m H = (\eta P_m H) \frac{M_p (1 - \rho^2)}{M_m + M_p} + Q_h \delta + \frac{1}{2} \delta_e Q_h$$

que tras algunas transformaciones algebraicas conduce a:

$$Q_h = \frac{\eta P_m H}{\delta + \frac{1}{2} \delta_e} \times \frac{P_m + \rho^2 P_p}{P_m + P_p}$$

que conduce a la fórmula final si se desprecia la deformación elástica y se supone la percusión completamente plástica (sin rebote):

$$Q_h = \frac{\eta P_m H}{\delta} \times \frac{P_m}{P_m + P_p}$$

En la NTE hay una tabla para control de ejecución de pilotes hincados. En función de diferentes variables (peso pilote, peso maza, diámetro, longitud, altura caída) se obtiene el rechazo máximo para 10 golpes (r) que garantiza que la carga de hundimiento es igual que la carga estructural del pilote.

Pruebas de carga

En casos de responsabilidad donde se requieran garantías excepcionales es recomendable realizar pruebas de carga sobre los pilotes construidos. Éstas pueden ser destructivas y no destructivas. En el primer caso, la información es más completa.

5.4. GRUPOS DE PILOTES. CARGA DE HUNDIMIENTO

Normalmente los pilotes se agrupan para formar cimentaciones a las que se da continuidad mediante el encepado. Dicho encepado es un elemento estructural cuya misión es transmitir las cargas a los pilotes y no al terreno. De hecho, su apoyo al terreno será débil o inexistente debido a la elevada rigidez de los pilotes. La separación entre pilotes es una variable fundamental tanto para el comportamiento del terreno como para la distribución de cargas en el grupo. Dicha separación s suele estar en el rango de 2.5ϕ a 4ϕ .

En pilotes **hincados en arenas** se ha observado una mejora de la resistencia al hundimiento debido a la compactación del suelo en las inmediaciones del grupo. El máximo efecto se observa para $s = 3.5\phi$. Para valores muy superiores ($s \gg 3.5\phi$) los pilotes se comportarán como aislados y la mejora por efecto grupo será despreciable. Para valores muy inferiores ($s \cong 2\phi$) queda poco suelo entre los pilotes y se pierde eficiencia.

El máximo efecto correspondería a:

$$Q_h^{grupo} = 1.25 \sum Q_h^i$$

Como en la práctica es difícil de garantizar esta eficiencia, suele tomarse:

$$Q_h^{grupo} = \sum Q_h^i$$

En el caso de pilotes de **extracción en arenas** la descompresión del terreno puede dar lugar a una disminución de la resistencia por fuste, lo que llevaría a evaluar la carga de hundimiento del grupo como:

$$Q_h^{grupo} = 0.7 \sum Q_h^i \quad 2\phi \leq s \leq 4\phi$$

En suelos **arcillosos**, independientemente de la forma de ejecución, se produce remoldeo de la arcilla lo que suele reducir la eficiencia del grupo de pilotes. Normalmente se puede expresar como:

$$Q_h^{grupo} = \eta \sum Q_h^i$$

en la que η recibe el nombre de coeficiente de eficiencia. Dicho coeficiente se puede calcular como (Coeficiente de grupo de Los Angeles):

$$\eta = 1 - \frac{\beta}{\pi} \left(\frac{m(n-1) + n(m-1) + \sqrt{2}(m-1)(n-1)}{mn} \right) \quad \beta = \arctg\left(\frac{\phi}{2s}\right)$$

en la que m es el número de pilotes por fila y n es el número de pilotes por columna del grupo.

En el caso de arcillas, para separaciones pequeñas ($s < 2\phi$) no debe descartarse la posible rotura en bloque del grupo como si de una cimentación semiprofunda se tratara. En este caso puede llegarse a:

$$Q_h^{grupo} < 0.65 \sum Q_h^i$$

lo que normalmente requeriría de un cálculo en presiones de hundimiento suponiendo rotura global del conjunto (cimentación superficial con planta la del grupo y empotramiento igual a la profundidad de los pilotes).

En el caso de grupos de pilotes en **roca** se puede llegar a separaciones pequeñas de hasta $s = 1.5\phi$ sin reducción de las cargas de hundimiento.

Análisis de grupos de pilotes mediante zapatas equivalentes

En algunos casos especiales (ya se ha mencionado el caso de grupo de pilotes en arcilla con separaciones pequeñas) es posible un mecanismo de rotura global del grupo de pilotes. Normalmente, esta situación implica la necesidad de comprobaciones adicionales por el posible colapso. Estas comprobaciones tienen puntos en común con las comprobaciones planteadas en cimentaciones superficiales. A continuación se presentan algunos de estos casos:

- Capas blandas profundas encima y debajo de capa dura de pequeño espesor: Un grupo de pilotes con la punta en dicha capa dura puede provocar la rotura por punzonamiento de dicha capa dura.
 - Puede plantearse un punzonamiento en dicha capa dura
 - Se puede transmitir la tensión hacia las capas blandas con un ángulo de 30° en el caso de roca o terreno granular y 10° en el caso de arcillas.
- Pilotes flotantes en capa más dura que una profunda más blanda: se puede transmitir la tensión hacia las capas blandas con planos divergentes empezando 5ϕ por arriba del plano de apoyo de los pilotes en el caso de arenas (mayor contribución por punta) o $1/3 l$ desde dicho plano de apoyo en el caso de arcillas (mayor contribución por fuste).

En general el confinamiento es muy alto ($q = \gamma l$) lo que provoca que dichos mecanismos sean poco probables.

5.5. DISTRIBUCIÓN DE CARGAS EN GRUPOS DE PILOTES

Una vez que se ha obtenido la carga de hundimiento de un grupo de pilotes se puede establecer la siguiente condición de seguridad para su comprobación:

$$FS_{\text{hundimiento}} = \frac{Q_h^{\text{grupo}}}{V}$$

en la que V es la carga vertical que transmite la estructura al grupo de pilotes. Se puede suponer además que cada pilote, en situación de servicio, va a recibir:

$$V_i = \frac{V}{n}$$

en la que n es el número de pilotes del grupo.

Estas dos expresiones no son válidas si el grupo de pilotes debe soportar esfuerzos horizontales pequeños y momentos. Tanto unos como otros tienen componentes verticales al actuar sobre un grupo de pilotes. Estas componentes son diferentes en cada pilote del grupo, pudiendo llegar a invertir el esfuerzo total vertical sobre algún pilote (pilote traccionado).

Para obtener la distribución de cargas verticales provocadas por un sistema general de esfuerzos: V , H , M puede hacerse de varias formas:

- Prescindir del terreno y considerar que la unión de los pilotes con el encepado es articulada
- Sustituir las reacciones del terreno por un empotramiento situado a una cierta profundidad l' que depende de la deformabilidad del suelo y de los pilotes. Resolver el pórtico correspondiente.
- Considerar que los pilotes se encuentran en el interior de un medio continuo.

Incorporación de momentos

Se supone la unión articulada entre pilotes y encepado. Se supone que actúan V , M_x , M_y con lo cual, suponiendo una distribución lineal de tensiones, puede escribirse como:

$$\sigma = \frac{V}{\sum A_i} + \frac{M_x y_i}{I_x} + \frac{M_y x_i}{I_y}$$

en la que:

$$I_x = \sum A_j y_j^2 \quad I_y = \sum A_j x_j^2$$

y en el caso de áreas iguales en todos los pilotes resulta:

$$V_i = \frac{V}{n} + \frac{M_x y_i}{\sum_j y_j^2} + \frac{M_y x_i}{\sum_j x_j^2}$$

que permite obtener la carga en cada pilote. En concreto, el pilote más cargado y el menos cargado.

Es importante comprobar que el pilote menos cargado no se encuentra a tracción. En caso de estar a tracción, puede variarse la separación para evitarlo o poner más peso en el encepado.

Incorporación de esfuerzos horizontales

La resolución de un pórtico empotrado e hiperestático sometido a un esfuerzo horizontal H da lugar a los siguientes esfuerzos horizontales, momentos y verticales:

$$H_{xi} = \frac{H_x}{n} \quad M_{yi} = \frac{H_{xi} l'}{2} \quad M_y^H = \sum M_{yi}$$

$$H_{yi} = \frac{H_y}{n} \quad M_{xi} = \frac{H_{yi} l'}{2} \quad M_x^H = \sum M_{xi}$$

$$V_i^H = \frac{M_x^H y_i}{\sum y_i^2} + \frac{M_y^H x_i}{\sum x_i^2}$$

Tanto los esfuerzos verticales como los momentos deben añadirse a los anteriormente calculados. De forma que en total se produce el siguiente esfuerzo vertical sobre cada pilote:

$$V_i = \frac{V}{n} + \frac{M_x y_i}{\sum y_i^2} + \frac{M_y x_i}{\sum x_i^2} + \frac{M_x^H y_i}{\sum y_i^2} + \frac{M_y^H x_i}{\sum x_i^2}$$

En este caso de esfuerzos horizontales, la determinación de l' puede hacerse mediante expresiones como:

$$l' = 1.2 \sqrt[4]{\frac{E_p I_p}{E/3}} \quad \text{para arcillas}$$

$$l' = 1.2 f \sqrt[4]{\frac{E_p I_p}{E_l/3}} \quad \text{para arenas}$$

siendo

E_o/E_l	f
0	1.7
0.5	1.25
1.0	1.0

Donde E_o es el módulo del terreno arriba y E_l es el módulo del terreno en punta.

Finalmente, respecto a la distribución de cargas en grupos de pilotes se van a hacer algunos comentarios o recomendaciones:

- El factor de seguridad al hundimiento de un grupo puede establecerse de forma conjunta, en cuyo caso puede ser que el pilote más cargado se acerque a rotura. Normalmente se puede considerar un factor de seguridad algo menor para la comprobación individual del pilote más cargado.
- Si se hace la comprobación de hundimiento sobre el pilote más cargado, se puede asegurar que el global también se cumple.
- Adicionalmente hay que comprobar la carga sobre el pilote menos cargado y verificar que no se encuentra sometido a tracción. En caso de que haya tracción puede hacerse lo siguiente:
 - Que sea del orden del peso del pilote como máximo
 - Que el pilote no se arranque (solo contribución por fuste y con mismo factor de seguridad que al hundimiento).
 - Aumentar el peso del encepado
 - Mejorar la inercia del grupo aumentando la separación.
- La NTE considera unos grupos pequeños de 2, 3 o 4 pilotes. Como las comprobaciones que se describen en dicha norma se basan en una expresión general y el uso de un momento equivalente, entonces se usa lo siguiente:

- Grupo de 1 pilote: $M_x = M_y = 0$
- Grupo de 2 pilotes: $M_x = 0, M_y \neq 0 \quad M_{eq} = M_y$
- Grupo de 3 pilotes: $M_x \leq 1.75 M_y \quad M_{eq} = 1.75 M_x$
- Grupo de 4 pilotes: $M_x \neq 0, M_y \neq 0 \quad M_{eq} = M_x + M_y$

5.6. COMPROBACIONES EN ROTURA Y EN SERVICIO

Carga de hundimiento: Situación de fallo de la estructura. Se debe asegurar que no se llega a esta situación tanto global como localmente.

Incertidumbre existente: existe incertidumbre tanto en las cargas como en la resistencia.

En las cargas realizar una evaluación por el lado de seguridad. Pueden calcularse mayoradas.

En la resistencia la incertidumbre es tanto del comportamiento del terreno como del pilote. Si el modelo usado es más fiable se puede reducir el factor de seguridad.

Coefficiente de seguridad: Su principal misión es la de alejar el comportamiento de la estructura del estado de rotura para que exista un margen suficiente ante eventuales estados de carga no previstos en el proyecto. Adicionalmente, el factor de seguridad permite cubrir inexactitudes de los modelos usados.

$$FS = \frac{Q_h}{Q_{adm}} \quad \text{o bien} \quad FS = \frac{Q_h}{V_{\max}}$$

Normalmente el valor de $FS = 3$ es un valor de referencia aunque se puede variar en función de diversos factores. Por ejemplo, tradicionalmente a la carga de hundimiento estimada mediante fórmulas de hincas se le ha asociado un factor de seguridad del orden de 6.

Asientos: Con la carga de trabajo o admisible (carga media) se pueden calcular los asientos ya sea por expresiones empíricas, tablas o métodos basados en el comportamiento tensión - deformación del suelo.

Pasos a seguir para calcular un grupo de pilotes. Se trata de determinar las variables: n, ϕ, s, l

1. Elegir un grupo de pilotes (n)
2. Calcular $V_i(s)$, es decir, el pilote más cargado del grupo
3. Se toma $s = 2.5 \phi$
4. Comprobar que $V_i \leq Te$ lo que permite determinar ϕ . Si se considera demasiado grande hay que volver a 1.
5. Comprobar que $FS = Q_h/V_i$ lo que permite determinar l . Si se consideran los pilotes demasiado largos hay que volver a 1.

Nota: en pilotes columna, la longitud l es un dato.

Tope estructural de un pilote:

Es la carga admisible del pilote como estructura de hormigón armado.

$$Te = 0.25\sigma_{\text{hormigón}} A_{\text{hormigón}} + 0.40\sigma_{\text{acero}} A_{\text{acero}}$$

$$0.25\sigma_{\text{hormigón}} \leq 750 \text{ t/m}^2 \text{ (75 kp/cm}^2, 7500 \text{ kPa) en pilotes prefabricados}$$

$$0.25\sigma_{\text{hormigón}} \leq 600 \text{ t/m}^2 \text{ (60 kp/cm}^2, 6000 \text{ kPa) en pilotes ejecutados in situ}$$

$$A_{\text{acero}} \cong 0$$

Asientos en pilotes

Es muy difícil determinar los asientos mediante métodos sencillos de cálculo. Lo más apropiado es realizar pruebas de carga, lo que puede resultar muy costoso.

El asiento de un pilote se debe a dos términos, uno de deformación del propio pilote y otro de deformación del terreno.

La comprobación de asientos es innecesaria en pilotes columna sobre roca, en arenas densas y en arcillas duras.

La deformación del pilote puede determinarse como:

$$s = \int_0^l \frac{\sigma}{E} dz = \frac{Vl}{AE}$$

Por otro lado, existen expresiones empíricas para el cálculo que se pueden encontrar en la literatura.

En pilotes flotantes se pueden usar las soluciones elásticas dadas por Mindlin.

Por último, puede ser conveniente y a la vez fácil de hacer, calcular los asientos de un grupo de pilotes como si se tratara de una cimentación equivalente. Para ello puede tomarse una zapata equivalente apoyada a profundidad de $(2/3)l$ y con superficie la del grupo de pilotes.

5.7. SOLICITACIONES ESPECIALES

Son solicitaciones que pueden presentarse eventualmente y ser muy perjudiciales para el comportamiento de los pilotes.

- Fricción negativa
- Cargas horizontales
- Empujes laterales del terreno
- Pandeo
- Tracción

Fricción negativa

Se produce por consolidación del terreno, por ejemplo:

- Consolidación natural (es decir por peso propio) de un relleno reciente poco compactado.
- Consolidación provocada por un terraplén: carretera en terraplén que llega a puente que se cimenta mediante pilotes.
- Consolidación inducida por variación del nivel freático
- Consolidación inducida por cambio de estructura del suelo (arcillas tixotrópicas) causada por la propia hincada de los pilotes.

El terreno se cuelga del pilote ya que éste no permite el desplazamiento relativo en el contacto. Si el pilote fuese muy liso, el resultado sería que su cabeza iría saliendo.

Comportamiento ideal de la interfase terreno-pilote:

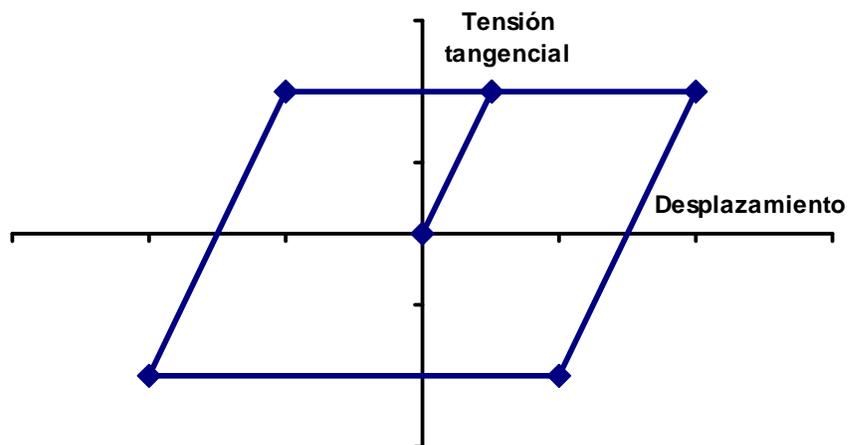


Figura 5.7.1. Evolución de las tensiones tangenciales en el fuste de un pilote a medida que aumenta o disminuye el desplazamiento relativo pilote-terreno

Al aumentar el desplazamiento relativo la tensión tangencial aumenta hasta llegar a un valor límite que es la resistencia por fuste. A partir de este punto se mantiene constante. Si posteriormente el desplazamiento relativo empieza a disminuir, entonces

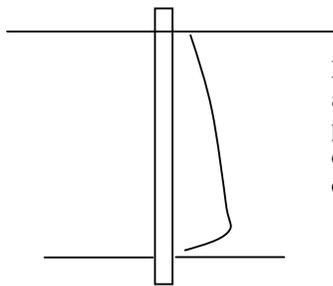
la tensión tangencial también disminuye. Eventualmente, puede llegar a invertir su signo y entonces el fuste empieza a cargar sobre el pilote. Este efecto tiene el mismo límite que en positivo. Se llega a un valor que se mantiene incluso con el desplazamiento relativo descendiendo. Por último, cuando el desplazamiento relativo vuelve a aumentar (por carga de pilote), la tensión tangencial volverá a recuperarse y volverá a cambiar de signo hasta ser positiva nuevamente.

Casos de pilotes con afectados por rozamiento negativo

Pilotes columna:

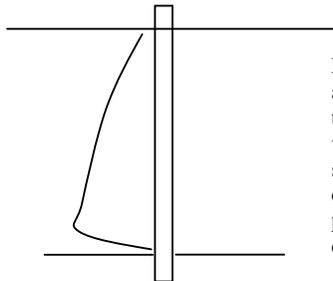
La fricción negativa puede desarrollarse en todo el fuste ya que la punta es un apoyo con muy poca capacidad de movimiento. Se supone que la tensión tangencial máxima se puede expresar como:

$$\tau = a + \sigma'_h \tan \delta$$



Ley de tensiones tangenciales positivas. De arriba hacia abajo: al principio la tensión tangencial aumenta con z por aumento de la tensión vertical. Posteriormente, cerca de la punta, la tensión tangencial disminuye por disminuir el desplazamiento relativo.

Figura 5.7.2 Variación de las tensiones tangenciales en un pilote columna con funcionamiento normal



Las tensiones tangenciales se vuelven negativas si el terreno asienta más que el pilote. De arriba hacia abajo: al principio la tensión tangencial aumenta con z por aumento de la tensión vertical a pesar del mayor desplazamiento relativo en la parte superior. Posteriormente, cerca de la punta, la tensión tangencial disminuye por disminuir el desplazamiento relativo. Como la punta prácticamente no se mueve, el rozamiento negativo puede desarrollarse en todo el fuste.

Figura 5.7.3 Variación de las tensiones tangenciales en un pilote columna con funcionamiento con rozamiento negativo

El paso desde la situación de fricción positiva hasta la fricción negativa se produce progresivamente a medida que se van desarrollando los asientos de consolidación.

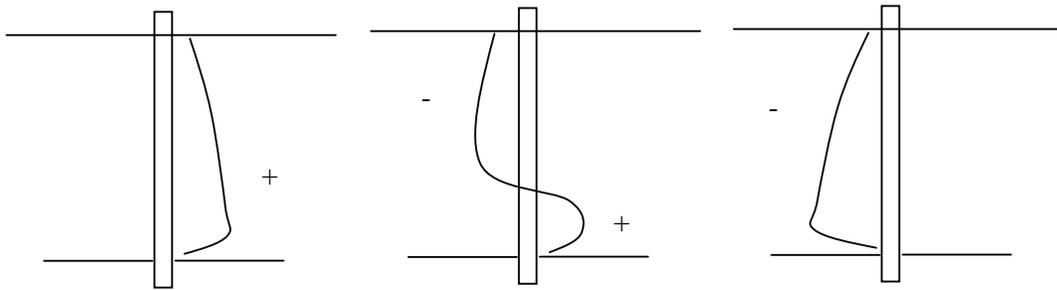


Figura 5.7.4 Evolución de las tensiones tangenciales en un pilote columna desde la situación de funcionamiento normal con tensiones tangenciales positivas (porque se oponen al hundimiento) hasta la situación de rozamiento negativo en todo el fuste.

Pilotes flotantes

En pilotes flotantes no es posible, por el necesario equilibrio de fuerzas, que el rozamiento negativo se desarrolle en todo el fuste. Tiene que quedar una parte en rozamiento positivo.

Cuando empieza a aparecer este efecto por la parte superior debido al asiento del terreno cerca de la superficie, el pilote asienta por aumentar la carga. De esta forma siempre queda una parte en la zona inferior con rozamiento positivo que permite una cierta capacidad portante. Eventualmente se puede llegar al hundimiento, pero al hundirse el pilote siempre se produce un cierto grado de aumento de la zona de fuste resistiendo.

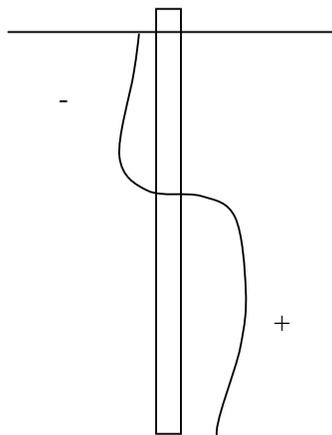


Figura 5.7.5 Distribución de tensiones tangenciales en un pilote flotante en el que se produce rozamiento negativo por consolidación del terreno.

Por otro lado, los asientos para alcanzar el nuevo equilibrio pueden ser inadmisibles, y normalmente es un aspecto problemático en los pilotes flotantes sometidos a rozamiento negativo.

En la zona superior del pilote (por encima del punto neutro) se produce un aumento de las tensiones tangenciales con la profundidad debido al aumento de las tensiones normales con la profundidad. Alrededor del punto neutro, es decir el punto donde las

tensiones tangenciales pasan de negativas a positivas, el comportamiento es elástico. En la zona inferior, el aumento de la tensión normal con la profundidad es compensado por el decremento del desplazamiento relativo en la zona cercana al extremo inferior.

La fricción negativa es perjudicial porque:

- La carga de hundimiento se reduce
- El estado tensional del pilote aumenta
- Aumenta el asiento

Físicamente puede suponerse que el comportamiento de la interfase suelo pilote se comporta de igual forma en rozamiento positivo que en rozamiento negativo. Por ello, en suelo granular se calcula como un término de tipo **friccional** mientras que en arcillas es un término de tipo **adherencia**. El friccional es capaz de desarrollar tensiones mayores que el de adherencia.

Si bien es cierto que las arenas no consolidan, puede pasar que una capa de arena situada sobre una de arcilla que consolida provoque unos efectos muy negativos sobre el pilote.

El rozamiento negativo se puede reducir de las siguientes formas:

- Disminuir el número de pilotes pero que tengan mayor diámetro. Aumenta la relación área/perímetro.
- Ensanchar el pie del pilote para disponer de mayor carga resistente por punta.
- Lubricar el fuste del pilote para reducir la fricción.
- Evitar la consolidación.

El rozamiento negativo afecta a la condición de hundimiento, a la de tope estructural y a los asientos.

Según la NTE la carga de hundimiento se calcula como:

$$Q_h = Q_p + Q_f - R_2 \quad Q_p < 3Q_f$$

$$Q_h = Q_p + Q_f - R_1 \quad Q_p > 3Q_f$$

El rozamiento negativo debe añadirse como sollicitación también para comprobar la sección de hormigón más cargada a compresión:

$$V_{\max} + R_i \leq T_e$$

Los valores máximos de R_1 y R_2 dependen del tipo de pilote. En columna el valor máximo es la propia resistencia por fuste que normalmente ya se ha calculado para la comprobación de comportamiento normal.

En pilotes flotantes se suele reducir dicha resistencia por fuste a la mitad para tener en cuenta que el pilote asentará durante el desarrollo de dicha fricción negativa, y no se llega a desarrollar toda la resistencia por fuste como rozamiento negativo.

Carga de hundimiento por fricción negativa en diferentes casos

En general, la carga de hundimiento tiene una contribución por punta y una contribución por fuste:

$$Q_h = Q_p + Q_f$$

Eventualmente Q_f puede descomponerse en varios términos de acuerdo con las capas que se atraviesen. Por ejemplo:

$$Q_f = Q_{f1} \times l_1 + Q_{f2} \times l_2 + Q_{f3} \times l_3 + Q_{f4} \times l_4$$

Si se supone que en cada estrato se puede suponer constante.

En el caso de pilotes columna y terreno estratificado en el fuste consolidando las capas 1 y 2 (las superiores).

$$Q_h = Q_p - Q_{f1} \times l_1 - Q_{f2} \times l_2 + Q_{f3} \times l_3 + Q_{f4} \times l_4$$

En el caso de pilotes flotantes y terreno estratificado en el fuste consolidando las capas 1 y 2 (las superiores):

$$Q_h = -\frac{1}{2} Q_{f1} \times l_1 - \frac{1}{2} Q_{f2} \times l_2 + Q_{f3} \times l_3 + Q_{f4} \times l_4$$

se supone despreciable la contribución por punta. El motivo de la reducción por un factor de (1/2) respecto al valor de resistencia por fuste es que el pilote asienta y no se puede movilizar todo el rozamiento negativo posible.

En el caso de pilotes flotantes y terreno homogéneo en el fuste consolidando. Suponemos que las tensiones tangenciales se invierten en $l/3$ y valen la mitad de la resistencia por fuste en esa zona, es decir:

$$Q_h = Q_f \times \left(l - \frac{l}{3}\right) - \frac{1}{2} Q_f \times \frac{l}{3}$$

Es decir se supone que al consolidar el terreno solo una parte del fuste alcanza negativo pues el pilote también asienta ya que se encuentra embebido en el terreno. El esquema propuesto equivale a:

$$\begin{aligned} Q_h &= Q_f \times \left(l - \frac{l}{3}\right) - \frac{1}{2} Q_f \times \frac{l}{3} = Q_f \times \left(l - \frac{l}{3} - \frac{l}{6}\right) = \\ &= Q_f \times \left(\frac{l}{2}\right) = Q_f \times l - Q_f \times \left(\frac{l}{2}\right) = Q_f \times \left(\frac{l}{2}\right) \end{aligned}$$

Este resultado dice que en un pilote flotante en un terreno que consolida, la carga de hundimiento se reduce a la mitad del valor original.

Cargas horizontales

Cuando se ha determinado la distribución de las cargas sobre un grupo de pilotes, se ha considerado la presencia posible de esfuerzos horizontales sobre el grupo. Dichos esfuerzos inducen momentos y cargas verticales sobre cada pilote que ya han sido tratados. También se ha indicado que el pilote recibe un esfuerzo horizontal, que se obtiene simplemente distribuyendo el empuje horizontal entre el número de pilotes, es decir:

$$H_i = \frac{H}{n} \quad H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2}$$

siendo H la resultante de esfuerzos horizontales y n el número de pilotes.

Si $H < 0.05 V$ el propio pilote resiste a flexión y no es necesario realizar comprobaciones adicionales. Si $0.05 V < H < 0.10 V$ hay que analizar si los pilotes resisten a flexión. Si $H > 0.10 V$, entonces es preciso instalar arriostramientos tales como pilotes inclinados, por ejemplo.

En ausencia de pilotes inclinados, este empuje debe ser soportado por el terreno, y los pilotes empujan horizontalmente al mismo. Los mecanismos de rotura, así como las cargas horizontales resistidas por los pilotes han sido estudiados por Broms (1964).

Una vez que se ha determinado el esfuerzo horizontal resistido por el terreno para llegar a la rotura (H_{rot}) se establece un factor de seguridad en el pilote frente a esfuerzos horizontales:

$$FS = \frac{H_{rot}}{H_i}$$

Para determinar la resistencia lateral del terreno se consideran varias situaciones en función de la esbeltez de los pilotes.

Pilotes cortos ($l/\phi < 12$):

En este caso, se supone que los pilotes se mueven lateralmente empujando al terreno y se supone que el terreno responde con una resistencia de tipo pasivo. Además se produce un giro del pilote, aunque éste depende del empotramiento disponible en el encepado.

Se distingue entre el caso drenado y el no drenado. El esfuerzo que resiste el terreno horizontalmente se determina por condiciones de equilibrio.

Caso Drenado

$$H_{rot} = 1.5\gamma' l^2 \phi K_p$$

siendo ϕ el diámetro del pilote, K_p el coeficiente de empuje pasivo, γ' el peso específico sumergido y l la longitud del pilote. Esta solución se obtiene por integración de una ley de empujes:

$$H_{rot} = \phi \int_0^l p'_h dz = \phi \int_0^l 3\gamma' z K_p dz = \frac{3}{2} \phi \gamma' l^2 K_p$$

El factor 3 se debe a efectos tridimensionales de hundimiento del pilote en el terreno.

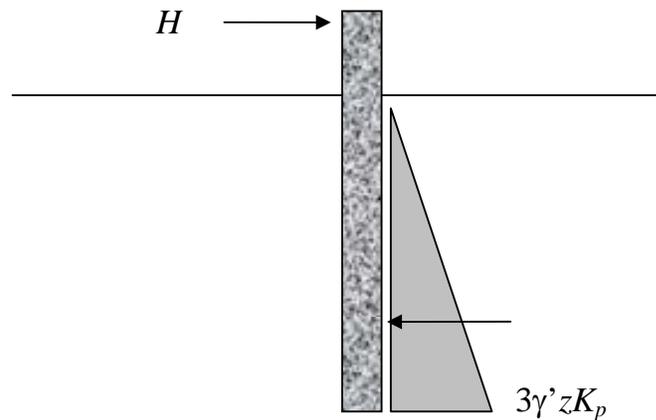


Figura 5.7.6 Pilote corto sometido a carga horizontal en condiciones de rotura drenada.

Caso No drenado

$$H_{rot} = 9c_u \phi (l - 1.5\phi)$$

siendo ϕ el diámetro del pilote, l la longitud del pilote y c_u la resistencia al corte sin drenaje. Esta ley se obtiene de:

$$H_{rot} = \phi \int_0^l p_h dz = \phi \int_{1.5\phi}^l 9c_u dz = 9c_u \phi (l - 1.5\phi)$$

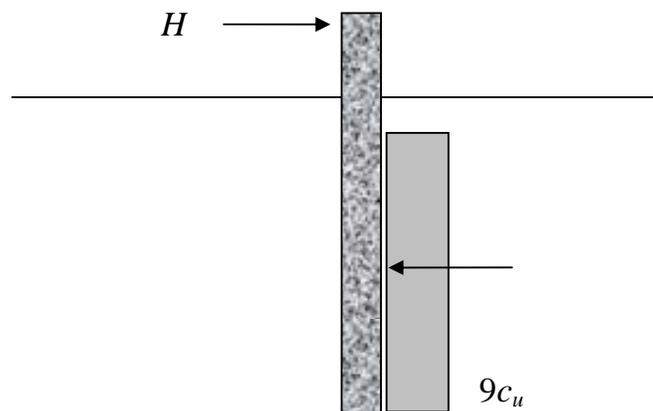


Figura 5.7.7 Pilote corto sometido a carga horizontal en condiciones de rotura no drenada.

Para que se produzca este mecanismo de rotura se supone que el pilote está empotrado en el encepado y esto da lugar a un momento máximo que debe resistir el empotramiento que se puede obtener, respectivamente para el caso drenado y no drenado como:

$$M_{\max} = \phi \int_0^l p'_h z dz = \phi \int_0^l 3\gamma' z^2 K_p dz = \frac{3}{3} \phi \gamma' l^3 K_p = \frac{2}{3} H_{rot} l$$

$$\begin{aligned} M_{\max} &= \phi \int_{1.5\phi}^l p_h z dz = \phi \int_{1.5\phi}^l 9c_u z dz = 9c_u \phi \left(\frac{l^2}{2} - \frac{(1.5\phi)^2}{2} \right) = \\ &= 9c_u \phi (l - 1.5\phi) \frac{1}{2} (l + 1.5\phi) = H_{rot} \left(\frac{l + 1.5\phi}{2} \right) \end{aligned}$$

Pilotes intermedios ($12 < l/\phi < 18$):

En este caso se supone que el pilote puede girar si se produce la rotura del empotramiento en el encepado. Entonces aparece un nuevo parámetro de cálculo que es el momento resistente en el empotramiento. Por equilibrio se obtienen las siguientes expresiones:

Caso Drenado

$$H_{rot} = 0.5\gamma' l^2 \phi K_p + \frac{M_{rot}}{l}$$

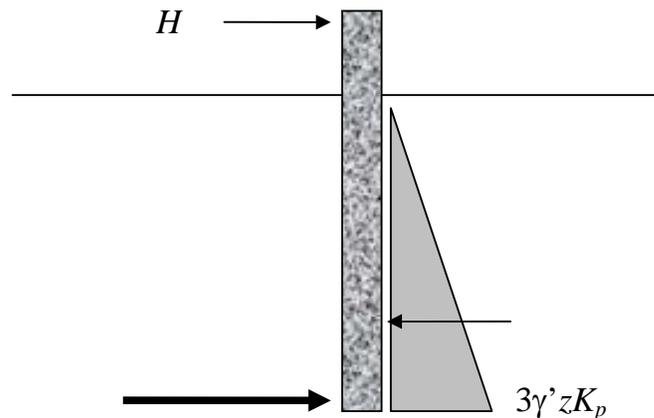


Figura 5.7.8 Pilote intermedio sometido a carga horizontal en condiciones de rotura drenada.

$$H + F = \int_0^l (3\gamma' \phi K_p z) dz = 3\gamma' \phi K_p \frac{l^2}{2}$$

$$M_{rot} + Fl = \int_0^l (3\gamma' \phi K_p z) z dz$$

Caso No drenado

$$M_y = -2.25c_u \phi \left(l - 1.5\phi - \frac{H_{rot}}{9c_u \phi} \right)^2 + H_{rot} \left(1.5\phi + 0.5 \frac{H_{rot}}{9c_u \phi} \right)$$

siendo M_y el momento que produce la rotura del pilote a flexión en el empotramiento, y las demás variables ya se han definido.

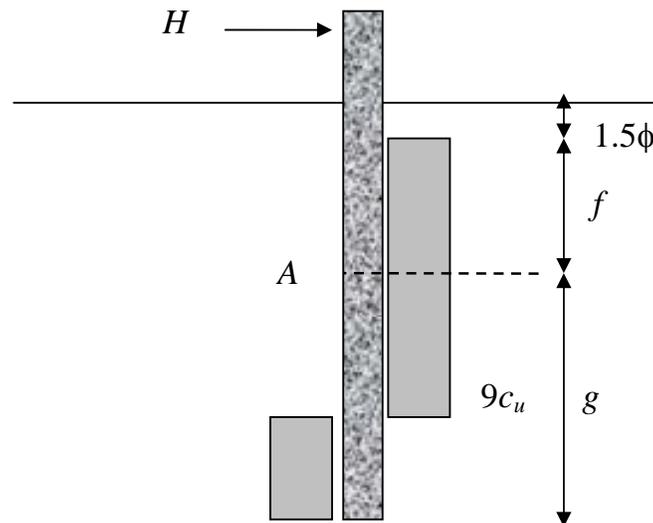


Figura 5.7.9 Pilote intermedio sometido a carga horizontal en condiciones de rotura no drenada.

$$9c_u f \phi = H_{rot}$$

$$l = f + g + 1.5\phi$$

$$\sum M_A = 0$$

Pilotes largos ($18 < l/\phi$):

En este caso hay rotura tanto en el encepado como en un punto a cierta profundidad.

$$H_{rot} = \frac{2M_y}{(1.5\phi + 0.5f)}$$

(ver f en figura).

Empujes laterales del terreno

Los empujes laterales de capas blandas pueden dar lugar a problemas en pilotes y grupos de pilotes.

Pandeo

Tracción