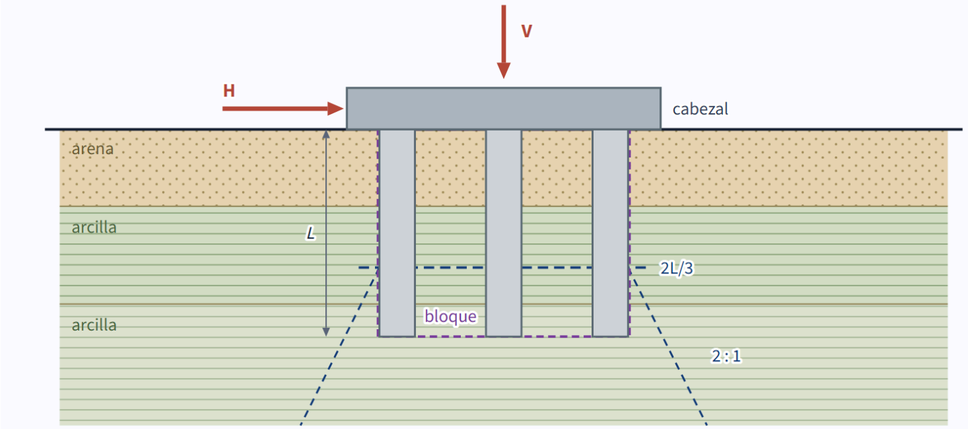
Presentación de clase de geotecnia · Pilotes

Análisis del grupo de pilotes

Clase: carga que corresponde a cada pilote de un grupo bajo un cabezal, su capacidad, su asentamiento y su comportamiento bajo carga lateral; ejemplo resuelto en cada tema.

- Cabezal rígido
- Eficiencia del grupo · bloque
- Asentamiento
- Carga lateral: multiplicadores p
- Ejemplos resueltos



Se basa en la página de teoría de GeoTerva · geoterva.com

Introducción

¿Qué aprenderemos en esta clase?

- Hallar **la carga que recibe cada pilote** bajo un cabezal rígido y reconocer el pilote que tiende a trabajar a tracción
- Construir la capacidad del **pilote aislado** estrato a estrato como base de la capacidad del grupo
- La aplicación de la **eficiencia del grupo** (Converse–Labarre, Los Angeles, Seiler–Keeney; reglas para pilotes hincados y perforados en arena) estrato por estrato
- Comprobar la **rotura en bloque** del grupo y elegir **el menor** valor
- Calcular el asentamiento elástico (Vesic) y el de **consolidación** (reparto 2:1)
- Interpretar los multiplicadores p y los aportes desiguales de las filas bajo **carga lateral**

DESARROLLO DE LA CLASE

Cada tema se desarrolla en **tres pasos**:

1 · **Teoría**: ¿cuál es la regla y por qué es así?

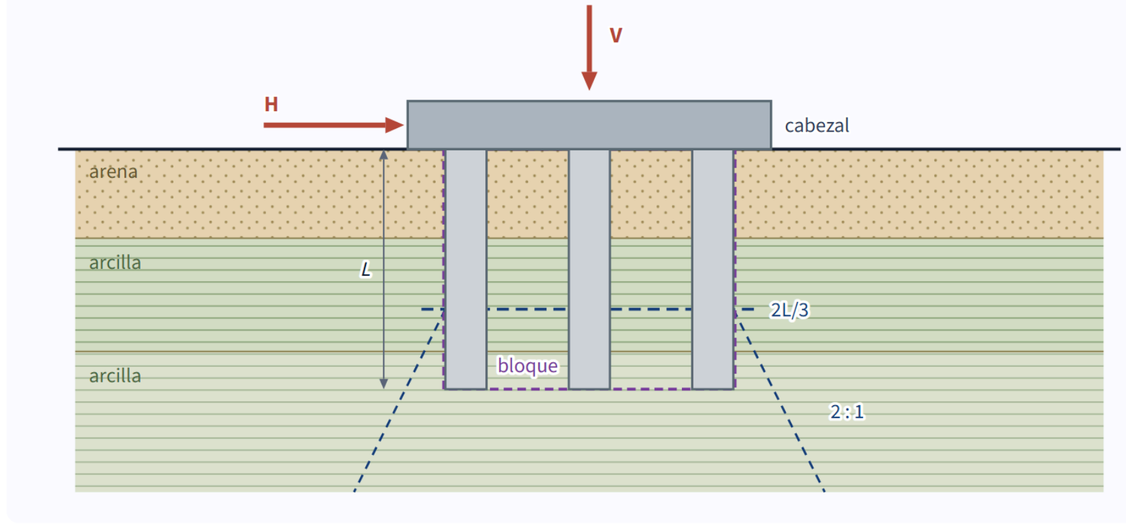
2 · **Enunciado**: datos y se pide

3 · **Solución**: paso a paso, con números

Esta presentación se apoya en la presentación sobre el **pilote en suelo estratificado**: allí se expuso el cálculo estrato por estrato del pilote individual; aquí se examina su lugar dentro del grupo.

¿Qué cambia cuando los pilotes actúan en conjunto?

TEORÍA



Los pilotes se disponen en filas bajo un **cabezal**; cuando están próximos, el terreno situado entre ellos y a su alrededor debe servir a todos a la vez. Cambian tres cosas y el módulo trata cada una como una comprobación independiente:

Capacidad: el terreno intermedio es solicitado por el fuste de cada pilote; cada pilote soporta menos que si estuviera aislado (eficiencia $\eta < 1$). Si el terreno es débil y los pilotes están próximos, el grupo y el terreno comprendido entre ellos pueden también romperse como un único **bloque**.

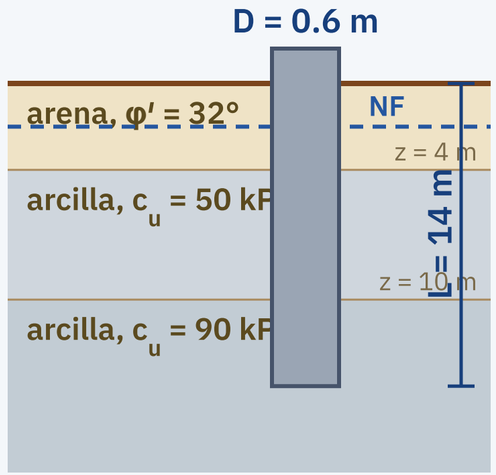
Asentamiento: la carga del grupo se reparte sobre **el área de todo el grupo**, no la de un pilote aislado, y alcanza los estratos de arcilla situados muy por debajo de las puntas; el grupo se asienta mucho más que un pilote aislado.

Carga lateral: las filas posteriores trabajan en un terreno empujado y deformado por los pilotes precedentes; la fila delantera recibe más carga y las demás menos.

El grupo que se empleará a lo largo de la clase

Grupo de ejemplo (modelo con el que se abre el módulo)

Pilotes	**9 pilotes perforados (diámetro D = 0.60 m, longitud L = 14 m), 3 filas × 3 pilotes, base del cabezal en el terreno**
Separación	$s_x = s_y = 1.80\ \text{m}\ (3.0\,D)$
Suelo	**arena 0–4 m (φ′ = 32°), arcilla 4–10 m (c_u = 50), arcilla 10–18 m (c_u = 90 kPa); γ = 18, γ_{sat} = 19 kN/m³**
Agua subterránea	**a 2.0 m de profundidad**
Cargas	$V = 1\,600\ \text{kN},\ H = 900\ \text{kN},\ M_y = 900\ \text{kN}\cdot\text{m}$
Material, seguridad	$E_p = 30\,000\ \text{MPa},\ E_s = 30\ \text{MPa},\ \nu_s = 0.30;\ FS = 3$



La mayoría de los ejemplos se resuelve con este grupo; los resultados coinciden con los números de la pestaña **Modelo** del módulo.

Cabezal rígido: los pilotes son muelles idénticos

TEORÍA

Se supone que el cabezal es rígido y que los pilotes son muelles verticales idénticos. Un cabezal rígido se mueve como un **plano**: su asentamiento y sus giros son las únicas incógnitas. Por ello, la carga sobre cada pilote es una función **lineal** de su posición (regla del grupo de pernos):

$$P_i = \frac{V}{n} + B\,x_i + C\,y_i$$

$$B = \frac{M_y}{\sum x^2} \qquad C = \frac{M_x}{\sum y^2} \qquad \left(\sum xy = 0\right)$$

$$\sum x^2 = n_y s_x^2\,\frac{n_x(n_x^2-1)}{12}$$

Si M_y es positivo, añade presión en el lado **+x** (el lado empujado por la carga lateral, el lado delantero). Los momentos se toman **en la base del cabezal**: una carga H a una altura h sobre la base da $M_y = H\,h$.

Si los pilotes están dispuestos al tresbolillo (en triángulo), Σxy no es nulo; el módulo toma las sumas de las posiciones de los pilotes y resuelve las dos ecuaciones conjuntamente.

La mayor carga corresponde a los pilotes delanteros y la menor a los traseros; **si el momento es grande**, el pilote trasero puede llegar a quedar a tracción.

Enunciado

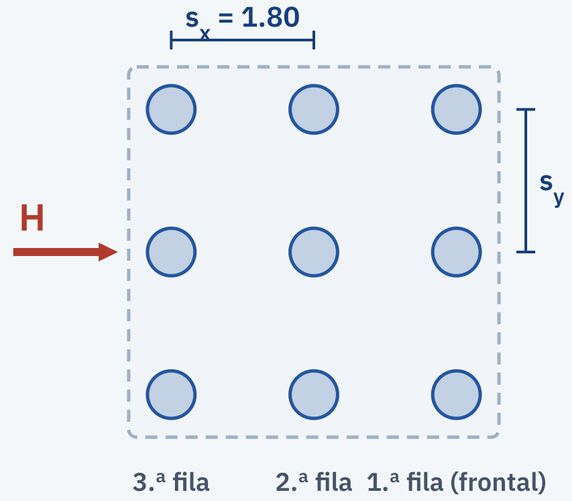
EJEMPLO

Datos

Grupo	**9 pilotes perforados, 3 filas × 3 pilotes, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Suelo	**arena 0–4 m (φ′ = 32°) · arcilla 4–10 m (c_u = 50) · arcilla 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Cargas	$V = 1\,600\ \mathrm{kN},\ M_y = 900\ \mathrm{kN\cdot m}$ **(en la base del cabezal)**
Título	**rígido; pilotes idénticos**

SE PIDE

Determinar la carga que recibe **cada pilote**. Las filas se numeran **desde la parte delantera** (delante = lado empujado por la carga lateral, +x).



Solución (1/2)

SOLUCIÓN

1 Reparto igual

$$\frac{V}{n} = \frac{1\,600}{9} = \mathbf{177.8}\ \mathrm{kN}$$

2 Σx² (grupo simétrico, forma cerrada)

$$\sum x^2 = n_y s_x^2\,\frac{n_x(n_x^2-1)}{12} = 3(1.8)^2\,\frac{3(9-1)}{12} = \mathbf{19.44}\ \mathrm{m}^2$$

3 Coeficiente de momento (C = 0 dado que $M_x = 0$)

$$B = \frac{M_y}{\sum x^2} = \frac{900}{19.44} = \mathbf{46.30}\ \mathrm{kN/m}$$

Solución (2/2)

SOLUCIÓN

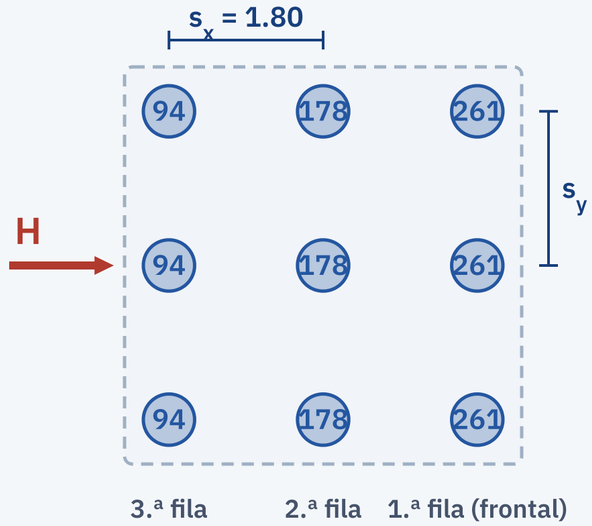
4 Cargas por fila: P = V/n + B x (x = +1.8; 0; −1.8 m)

$$P_1 = 177.8 + 46.30(1.8) = \mathbf{261.1}\ \text{kN (delantero)}$$

$$P_2 = \mathbf{177.8}\ \text{kN}$$

$$P_3 = 177.8 - 46.30(1.8) = \mathbf{94.4}\ \text{kN (posterior)}$$

Total: 3(261.1 + 177.8 + 94.4) = **1,600 kN** = V. La mayor carga corresponde a los pilotes delanteros (261.1 kN) y la menor a los traseros (94.4 kN); **ningún pilote trabaja a tracción**.



Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Si el momento es grande, los pilotes traseros trabajan a tracción

TEORÍA

Si el momento es grande respecto a la carga vertical, los pilotes situados en el lado opuesto del momento se **descargan** y pueden verse sometidos a tracción. El pilote resiste la tracción **únicamente por el fuste**: el estrato de arcilla con su valor completo, el de arena con **tres cuartos** de su resistencia a compresión; la base no aporta nada.

$$T_u = \sum_i \chi_i \, Q_{s,i} \qquad \chi = 1 \ (\text{arcilla}),\ \chi = 0.75 \ (\text{arena})$$

$$T_g = \min(T_{ind},\, T_{block}) \quad T_{ind} = n_T \sum_i \eta_i \chi_i Q_{s,i}$$

Pilote aislado a tracción: $T_{max} \leq T_u/FS$. Pilotes a tracción **en conjunto**: $\Sigma T \leq T_g/FS$; el bloque se mantiene por su propio peso y por la resistencia al corte en sus caras laterales.

COMPROBACIÓN A COMPRESIÓN

$$P_{max} \leq \frac{Q_u}{FS}$$

La carga máxima en un pilote se compara con la carga admisible del **pilote aislado**; aquí no interviene el efecto de grupo. Bajo momento, el pilote más cargado recibe más que V/n y puede superar su parte **incluso cuando el grupo se encuentra dentro de su propia capacidad**.

Enunciado

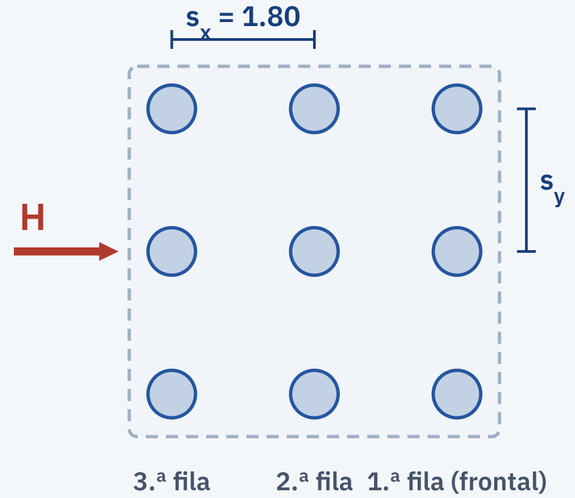
EJEMPLO

Datos

Grupo	**9 pilotes perforados, 3 filas × 3 pilotes, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Suelo	**arena 0–4 m (φ′ = 32°) · arcilla 4–10 m (c_u = 50) · arcilla 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Carga	$V = 1\,600$ kN, **momento aumentado:** $M_y = 2\,400$ kN·m
Pilote aislado	**Aportaciones a Q_s (Ejemplo 3): arena 49.8, arcilla 311.0, arcilla 317.2 kN**
Eficiencia	**arena 0.767, arcilla 0.727 (Ejemplos 5–6)**

SE PIDE

Hallar las cargas; comprobar con FS = 3 la capacidad del pilote a tracción y la de los pilotes a tracción **en conjunto**.



Solución (1/2)

SOLUCIÓN

1 Cargas ($B = M_y/\Sigma x^2$)

$$B = \frac{2\,400}{19.44} = 123.46\ \text{kN/m}$$

$$P_{front} = 177.8 + 123.46(1.8) = \mathbf{400.0}\ \text{kN}$$

$$P_{rear} = 177.8 - 123.46(1.8) = -\mathbf{44.4}\ \text{kN (tracción)}$$

2 Capacidad de un pilote aislado a tracción (arena × 0.75, arcilla × 1)

$$T_u = 0.75(49.8) + 311.0 + 317.2 = \mathbf{665.6}\ \text{kN} \quad \Rightarrow \quad \frac{T_u}{FS} = 221.9\ \text{kN}$$

Pilote en tracción: T_{max} = **44.4 kN** ≤ T_u/FS = 221.9 kN → **suficiente**. El número de pilotes en tracción es 3 (fila posterior) y la tracción total es ΣT = 133.3 kN; la comprobación del grupo se realiza en el paso siguiente.

Solución (2/2)

SOLUCIÓN

3 Capacidad conjunta de los 3 pilotes a tracción: suma de fustes efectivos × 3

$$T_{ind} = 3\left[\eta_s \chi_s Q_{s1} + \eta_c Q_{s2} + \eta_c Q_{s3}\right] = \mathbf{1{,}456}\ \text{kN}$$

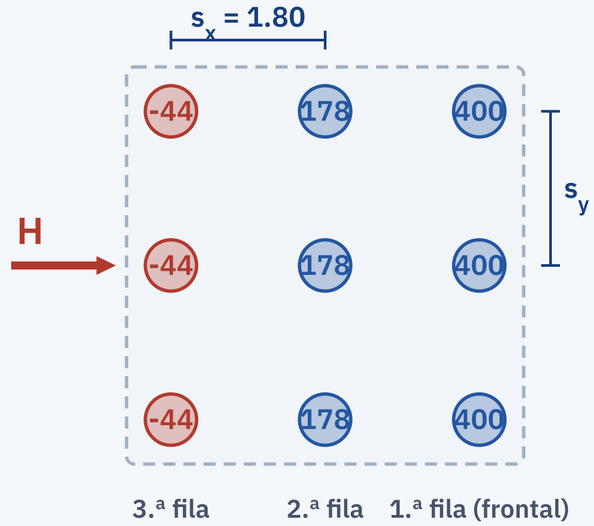
4 Bloque de tracción (3 pilotes, L_t = D = 0.6 m, B_t = 4.2 m): resistencia por rozamiento lateral + peso del bloque

$$T_{block} = \sum \tau_i P_t \Delta L_i + W = 6{,}692 + 369 = \mathbf{7{,}061}\ \text{kN}$$

5 Comprobación: el menor y FS

$$T_g = \min(1{,}456;\ 7{,}061) = 1{,}456\ \text{kN}$$

$$\sum T = 133.3 \leq \frac{T_g}{3} = 485\ \text{kN} \ \Rightarrow\ \text{suficiente}$$



Comprobar la solución en GeoTerva ↗

La capacidad del grupo se basa en la del pilote individual

TEORÍA

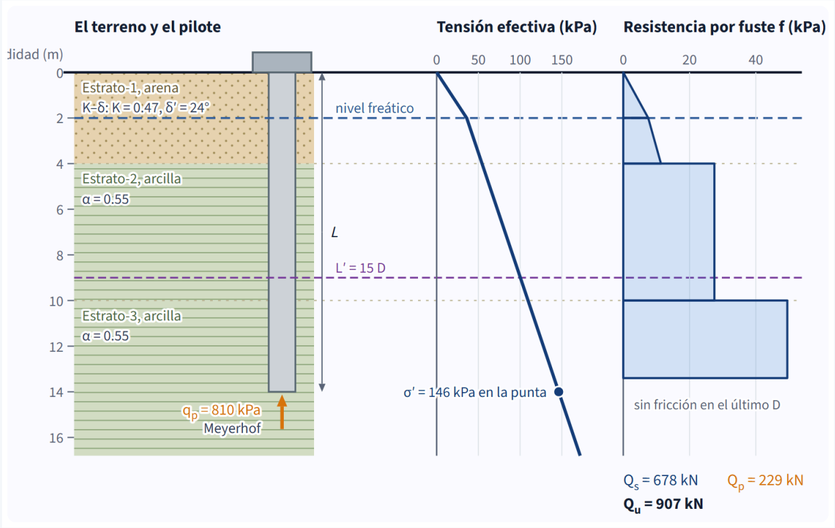
En primer lugar se calcula la resistencia **individual** de un pilote del grupo: cada estrato con la regla de su propio material, **sin ninguna resistencia introducida**. Las reglas son las de la presentación *pilote en suelo estratificado*:

$$Q_u = Q_s + Q_p \qquad Q_s = p \sum_i f_i \, \Delta L_i \qquad Q_p = A_b \, q_p$$

Arena: f = Kσ′tanδ′ (profundidad crítica L′ = 15D). En pilote perforado **K = K₀ = 1 − sinφ′**, δ′ = 0.75φ′; en pilote hincado, K = 1.4K₀.

Arcilla: α, λ o β. En el pilote perforado, **α* = 0.55** ($c_u/p_a \le 1.5$) y α* = 0 a lo largo de los **1.5 m superiores y de 1D inferior**.

Punta: la regla del estrato en el que se encuentra la punta: en arena $q'N^*_q \le q_l$, en arcilla $9c_u$ (en pilotes perforados puede elegirse Reese–O'Neill).



Enunciado

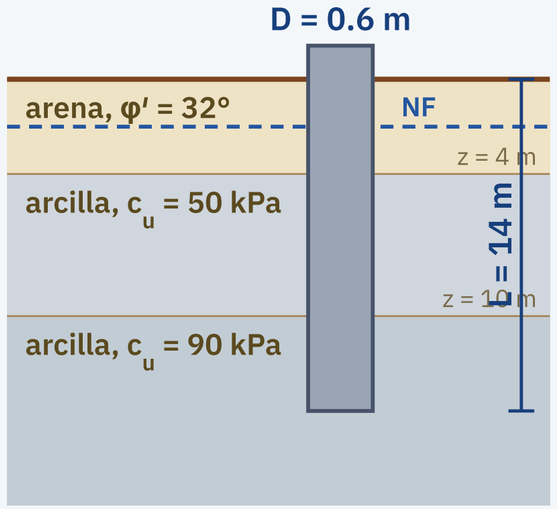
EJEMPLO

Datos

Grupo	**9 pilotes perforados, 3 filas × 3 pilotes, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Suelo	**arena 0–4 m (φ′ = 32°) · arcilla 4–10 m (c_u = 50) · arcilla 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Planteamiento	**pilote perforado: K = K_0 = 0.47, δ′ = 0.75φ′ = 24°, α* = 0.55; punta: Meyerhof**
Agua subterránea	**2.0 m**
Peso específico	$\gamma = 18,\ \gamma_{sat} = 19\ \mathrm{kN/m^3}$

SE PIDE

Determinar, estrato por estrato, la resistencia por **fuste** de un pilote individual, su resistencia por **punta** y el valor de **Q_u**; realizar la comprobación $P_{max} \le Q_u/FS$.



Solución (1/3)

SOLUCIÓN

1 Arena (0–4 m): L′ = 15D = 9 m > 4 m, no hay tope; σ′(2) = 18(2) = 36.0 y σ′(4) = 36.0 + (19 − 9.81)(2) = 54.4 kPa

$$\bar{\sigma}' = \frac{126.4}{4} = 31.6\ \text{kPa}$$

$$f = K \tan\delta'\, \bar{\sigma}' = 0.47(0.4452)(31.6) = 6.61\ \text{kPa}$$

$$Q_{s1} = p\, f\, H = 1.885(6.61)(4) = \mathbf{49.8}\ \text{kN}$$

Solución (2/3)

SOLUCIÓN

2 Arcilla (4–10 m): α* = 0.55 (c_u/p_a = 0.5 ≤ 1.5); la ventana 1.5 → L − D = 13.4 m cubre por completo el estrato

$$f = 0.55(50) = 27.5\ \text{kPa} \qquad Q_{s2} = 1.885(27.5)(6) = \mathbf{311.0}\ \text{kN}$$

3 Arcilla (10–14 m): la ventana termina a 13.4 m → se descarta el 1D inferior = 0.6 m, longitud efectiva 13.4 − 10 = 3.4 m

$$f = 0.55(90) = 49.5\ \text{kPa} \qquad Q_{s3} = 1.885(49.5)(3.4) = \mathbf{317.2}\ \text{kN}$$

Solución (3/3)

SOLUCIÓN

4 Suma del fuste y punta (estrato de la punta: arcilla, c_u = 90 kPa, Meyerhof N^*_c = 9)

$$Q_s = 49.8 + 311.0 + 317.2 \approx \mathbf{678.1}\ \text{kN}$$

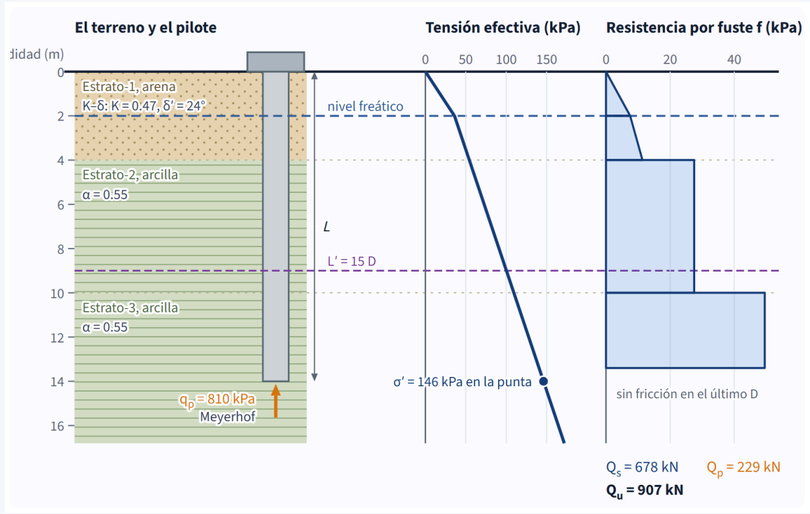
$$q_p = 9(90) = 810\ \text{kPa}$$

$$Q_p = A_b q_p = 0.2827(810) = \mathbf{229.0}\ \text{kN}$$

5 Capacidad del pilote individual y comprobación

$$Q_u = 678.1 + 229.0 = \mathbf{907.1}\ \text{kN}$$

$$\frac{Q_u}{FS} = 302.4\ \text{kN} \geq P_{max} = 261.1\ \text{kN} \ \Rightarrow\ \text{suficiente}$$



Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Los pilotes muy próximos soportan menos que si actuaran individualmente

TEORÍA

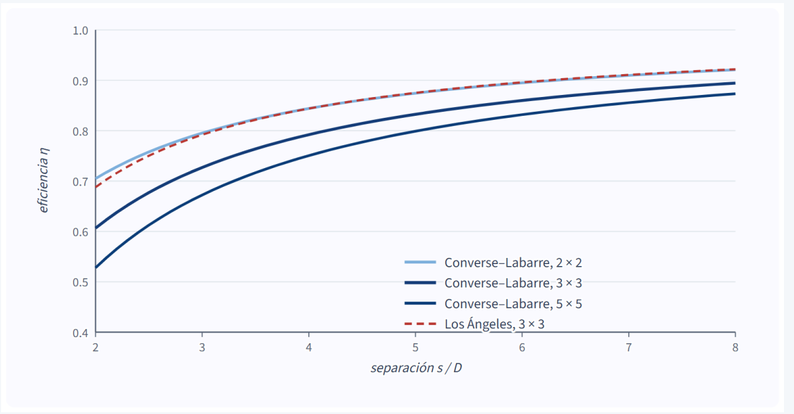
Al aproximarse los pilotes, los suelos cortados y deformados por cada uno de ellos se solapan. La **eficiencia del grupo** es la relación entre la capacidad del grupo y la suma de las capacidades de los pilotes aislados. La fuente da tres ecuaciones empíricas para un grupo de $n_1 \times n_2$ pilotes de diámetro D con separación d:

$$\eta = \frac{Q_{g(u)}}{\sum Q_u}$$

$$\eta_{CL} = 1 - \frac{\theta}{90}\,\frac{(n_1-1)n_2 + (n_2-1)n_1}{n_1 n_2}, \quad \theta = \tan^{-1}\frac{D}{d}\ \text{(grados)}$$

Converse–Labarre cuenta los **pares de pilotes contiguos**: $(n_1 - 1)n_2$ pares uno tras otro y $(n_2 - 1)n_1$ pares lado a lado, cada uno con el ángulo $\theta = \tan^{-1}(D/d)$ correspondiente a su propia separación.

El módulo emplea esta ecuación en arcilla; con ella reduce el fuste de los estratos de arcilla y la base de un pilote cuya punta está en arcilla.



Al aumentar la separación, la eficiencia tiende a 1; en un grupo de 3 × 3, aproximadamente 0.7 – 0.8 para 3D.

Las otras dos ecuaciones y los límites

TEORÍA

Las otras dos ecuaciones de la fuente también corresponden a un grupo rectangular. La ecuación de **Los Angeles** y la ecuación de **Seiler–Keeney** (con d en **pies**):

$$\eta_{LA} = 1 - \frac{D}{\pi d\, n_1 n_2}\left[n_1(n_2-1) + n_2(n_1-1) + \sqrt{2}(n_1-1)(n_2-1)\right]$$

$$\eta_{SK} = \left[1 - \frac{11d}{7(d^2-1)}\,\frac{n_1+n_2-2}{n_1+n_2-1}\right] + \frac{0.3}{n_1+n_2}$$

Seiler–Keeney tiene un polo en 1 ft y carece de sentido por debajo de 2 ft; el módulo lo da a partir de **2 ft**.

Una separación menor que 2.5D se **marca**: es la separación mínima que da la fuente para pilotes por fricción, y las ecuaciones están escritas para separaciones mayores.

Para una disposición triangular, Converse–Labarre se plantea contando los pares de pilotes contiguos; esto es una **extensión del módulo** y da una eficiencia menor que la malla con la misma separación.

Enunciado

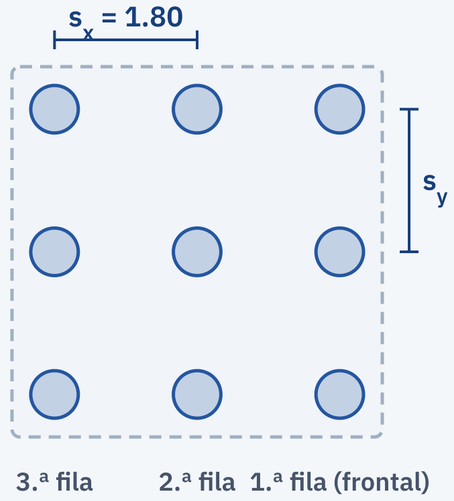
EJEMPLO

SE PIDE

Determinar la eficiencia del grupo con las ecuaciones de **Converse–Labarre**, **Los Angeles** y **Seiler–Keeney**.

Datos

Grupo	**3 × 3 pilotes, D = 0.60 m, separación d = 1.80 m (en ambas direcciones)**
Seiler–Keeney	**d en pies: 1.80 m = 5.906 ft**



Solución

SOLUCIÓN

1 Converse–Labarre: θ = tan⁻¹(D/d); pares adyacentes: (2)(3) + (2)(3) = 12

$$\theta = \tan^{-1}\frac{0.6}{1.8} = 18.43^\circ \;;\quad \eta_{CL} = 1 - \frac{18.43}{90}\cdot\frac{12}{9} = \mathbf{0.727}$$

2 Los Angeles

$$\eta_{LA} = 1 - \frac{0.6}{\pi(1.8)(9)}\left[3(2) + 3(2) + \sqrt{2}(2)(2)\right] = \mathbf{0.792}$$

3 Seiler–Keeney (d = 5.906 ft)

$$\eta_{SK} = \left[1 - \frac{11(5.906)}{7(5.906^2 - 1)}\cdot\frac{4}{5}\right] + \frac{0.3}{6} = \mathbf{0.831}$$

Tres ecuaciones en el intervalo 0.727 – 0.831. En arcilla el módulo emplea **Converse–Labarre** (0.727).

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Eficiencia en arena: una regla, no una ecuación

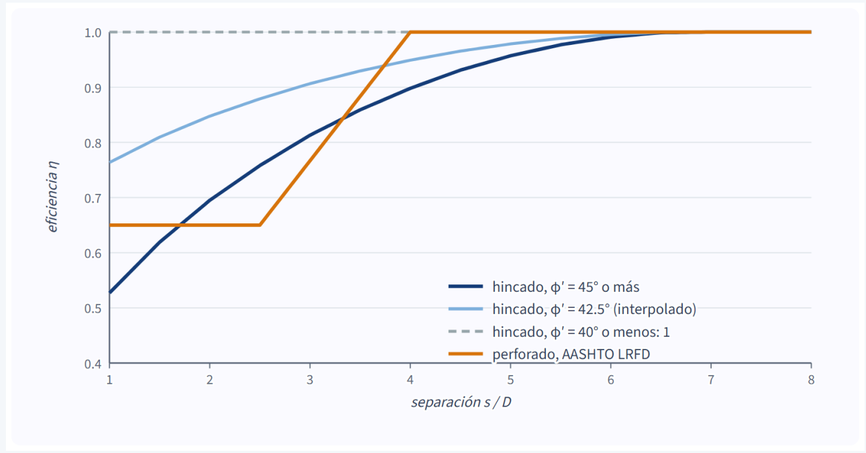
TEORÍA

El pilote hincado **compacta** la arena suelta o medianamente densa; en esta arena el grupo soporta tanto como la suma de los pilotes (en los ensayos, incluso más). Solo en arena densa ($\varphi' > 40°$ aproximadamente) una separación pequeña reduce la capacidad. Para el pilote hincado, el módulo toma el ábaco de la fuente y **nunca eleva la eficiencia por encima de 1**:

- $\varphi' \leq 40°$: **$\eta = 1$**
- $40° < \varphi' < 45°$: **interpolación lineal** entre 1 y la curva de 45°
- $\varphi' \geq 45°$: curva de 45° (1.0 para s/D = 7; 0.53 para s/D = 1)

El **pilote perforado** no compacta el suelo; incluso puede aflojarlo. AASHTO LRFD multiplica la resistencia de cada pilote perforado del grupo por **0.65** para s/D = 2.5 y por **1.0** para 4:

$$\eta = 0.65 + 0.35\,\frac{s/D - 2.5}{1.5} \qquad 2.5 \leq s/D \leq 4$$



La eficiencia correspondiente al estrato de arena se aplica al fuste de ese estrato y a la resistencia por punta del pilote cuya base se apoya en la arena. Separación: **la menor distancia entre dos pilotes**.

Enunciado

EJEMPLO

Datos

Separación	**s = 1.80 m, D = 0.60 m: s/D = 3.0**
Pilote perforado	**regla de AASHTO en arena**
Pilote hincado	**arena, $\varphi' = 42^\circ$ (curva de 45° para s/D = 3: $\eta_{45} = 0.813$)**

SE PIDE

Determinar la eficiencia del estrato de arena para un pilote **perforado** y para un pilote **hincado** en arena con φ′ = 42°; ¿qué ocurre para φ′ = 35°?

Solución

SOLUCIÓN

1 Pilote perforado (AASHTO): s/D = 3.0

$$\eta = 0.65 + 0.35\,\frac{3.0 - 2.5}{1.5} = \mathbf{0.767}$$

2 Pilote hincado, φ′ = 42°: peso w = (φ′ − 40)/5 y curva de 45°

$$w = \frac{42 - 40}{5} = 0.4 \qquad \eta = 1 - w(1 - \eta_{45}) = 1 - 0.4(1 - 0.813) = \mathbf{0.925}$$

3 Pilote hincado, φ′ = 35°

$$\varphi' \leq 40^\circ \;\Rightarrow\; \eta = \mathbf{1.000}$$

En el mismo intervalo, un pilote **perforado** en arena toma 0.767, mientras que un pilote **hincado** (en arena suelta–media) toma 1.00: el hincado compacta, la perforación no.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

El módulo de cada estrato es el módulo de ese suelo

TEORÍA

El fuste del pilote se corta en los límites de los estratos y cada tramo se calcula con su propio método. Un efecto de grupo ligado al terreno debe aplicarse también **tramo a tramo**: la eficiencia de un estrato es la de ese terreno, mientras que la **base** adopta la eficiencia del terreno sobre el que se apoya:

$$Q_{ind} = n \left(\sum_i \eta_i \, Q_{s,i} + \eta_b \, Q_p \right)$$

$$\eta_{group} = \frac{Q_{ind}}{\sum Q_u}$$

Estratos de **arcilla** y base de un pilote con la punta en arcilla: Converse–Labarre.

Estrato de **arena**: ábaco para pilotes hincados, norma AASHTO para pilotes perforados.

La eficiencia del grupo **no es un dato de entrada**, sino la **media ponderada** de las contribuciones de los estratos: el pilote que recibe la mayor parte de su carga de la arena refleja el efecto de grupo de esa arena, y el pilote suspendido en la arcilla refleja el efecto de grupo de la arcilla.

Enunciado

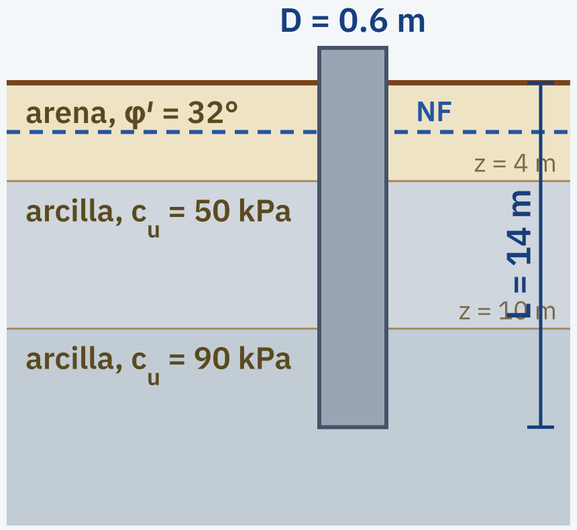
EJEMPLO

SE PIDE

¿Qué son Q_{ind} y la **eficiencia del grupo** $\eta = Q_{ind}/\Sigma Q_u$?

Datos

Pilote individual (Ejemplo 3)	**Q_{s1} = 49.8 (arena), Q_{s2} = 311.0, Q_{s3} = 317.2 (arcilla), Q_p = 229.0 kN**
Eficiencias	**arena (perforado, s/D = 3): 0.767; arcilla: 0.727; base (arcilla): 0.727**
Grupo	**9 pilotes**



Solución

SOLUCIÓN

1 Contribución efectiva de cada parte (η Q): fuste en arena, fuste en arcilla 1, fuste en arcilla 2, base

$$0.767(49.8) = 38.2\ ; \quad 0.727(311.0) = 226.1$$
$$0.727(317.2) = 230.6\ ; \quad 0.727(229.0) = 166.5$$

2 Capacidad efectiva de un pilote y del grupo

$$\sum \eta Q = 38.2 + 226.1 + 230.6 + 166.5 = \mathbf{661.4}\ \text{kN}$$
$$Q_{ind} = 9(661.4) \approx \mathbf{5{,}952}\ \text{kN}$$

3 Eficiencia del grupo

$$\eta = \frac{Q_{ind}}{n\,Q_u} = \frac{5{,}952}{9(907.1)} = \mathbf{0.729}$$

El grupo soporta el **73%** de la suma de los pilotes actuando individualmente (arena η = 0.767, arcilla η = 0.727).

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

El grupo puede fallar como una cimentación profunda

TEORÍA

Si los pilotes están próximos, el grupo y el terreno situado entre ellos pueden descender **conjuntamente**: una cimentación profunda de dimensiones $L_g \times B_g$ y profundidad L. Su capacidad es el **corte** en las cuatro caras más la **capacidad portante** bajo la base:

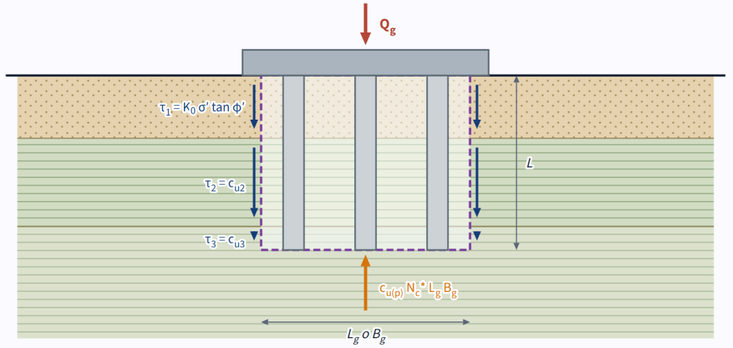
$$Q_{block} = \sum_i \tau_i \, P_b \, \Delta L_i + q_b \, L_g B_g \qquad P_b = 2(L_g + B_g)$$

Cara lateral en arcilla: $\tau = c_u$ (el suelo desliza contra suelo, no se reduce con α).

Cara lateral en arena (ampliación del módulo respecto de la fuente): $\tau = K_0 \sigma' \tan\varphi'$, $K_0 = 1 - \sin\varphi'$.

Base en arcilla: $q_b = c_u N^*_c$; N^*_c se obtiene del ábaco en función de L/B_g y L_g/B_g. **Base en arena**: nQ_p.

$$Q_{g(u)} = \min(Q_{ind},\, Q_{block}) \qquad Q_{all} = \frac{Q_{g(u)}}{FS}$$



Enunciado

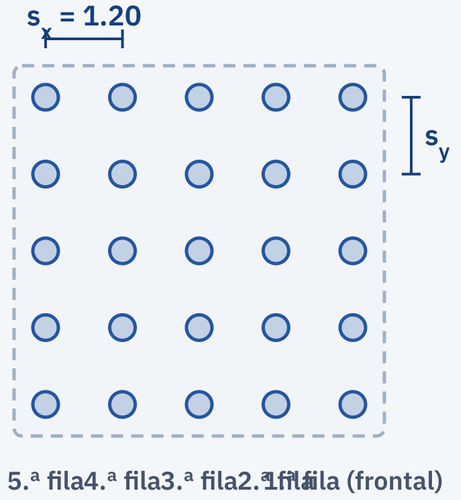
EJEMPLO

Datos

Grupo	**9 pilotes perforados, 3 filas × 3 pilotes, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Suelo	**arena 0–4 m ($\varphi' = 32°$) · arcilla 4–10 m (c_u = 50) · arcilla 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Bloque	**$L_g = B_g = (3 - 1)(1.8) + 0.6$**
Caras laterales	**arena: $\tau = K_0 \bar{\sigma}' \tan\varphi'$ ($\bar{\sigma}'$ = 31.6 kPa); arcilla: $\tau = c_u$**
Base	**arcilla, c_u = 90 kPa; N^*_c del ábaco (L_g/B_g = 1)**
Individual	**Q_{ind} = 5,952 kN (ejemplo 6); V = 1,600 kN, FS = 3**

SE PIDE

Determinar el valor de **Q_{bloque}**, la capacidad del grupo y su carga admisible.



Solución (1/2)

SOLUCIÓN

1 Dimensiones y perímetro del bloque

$$L_g = B_g = 4.2\ \text{m} \qquad P_b = 2(L_g + B_g) = \mathbf{16.8}\ \text{m}$$

2 Cortante en las caras laterales ($\tau\ P_b\ \Delta L$)

$$\text{arena} : \tau = K_0 \bar{\sigma}' \tan\varphi' = 0.470(31.6)(0.6249) = 9.28 \ \Rightarrow\ 624\ \text{kN}$$

$$\text{arcilla 1} : \tau = 50 \ \Rightarrow\ 50(16.8)(6) = 5{,}040\ \text{kN}$$

$$\text{arcilla 2} : \tau = 90 \ \Rightarrow\ 90(16.8)(4) = 6{,}048\ \text{kN}$$

Solución (2/2)

SOLUCIÓN

3 Base: N^*_c obtenido del ábaco para $L/B_g = 14/4.2 = 3.33$ y $L_g/B_g = 1$

$$q_b L_g B_g = c_u N_c^* L_g B_g = 90(8.90)(17.64) = \mathbf{14{,}126}\ \text{kN}$$

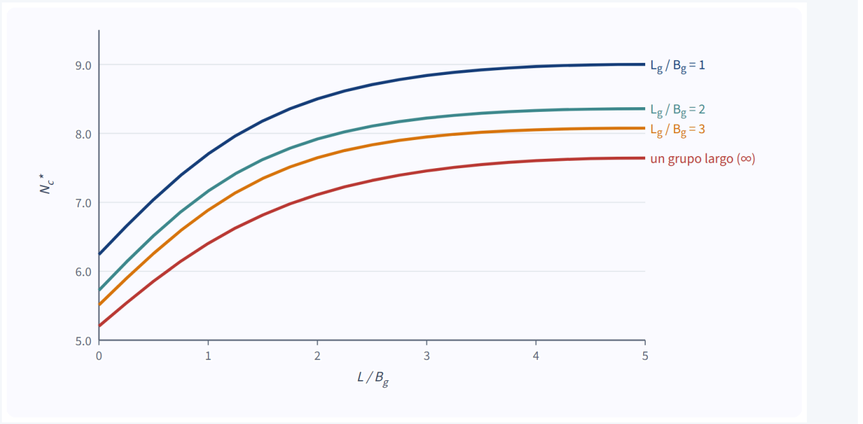
4 Capacidad del bloque, capacidad del grupo y carga admisible

$$Q_{block} = 11{,}712 + 14{,}126 = 25{,}838\ \text{kN}$$

$$Q_{g(u)} = \min(5{,}952;\ 25{,}838) = \mathbf{5{,}952}\ \text{kN}$$

$$Q_{all} = \frac{5{,}952}{3} = 1{,}984\ \text{kN} \geq V = 1\,600\ \text{kN}$$

La capacidad de bloque supera en **más de 4 veces** la suma individual: en este grupo **determinan los pilotes individuales** (individual). El bloque interviene en grupos con pilotes muy próximos y numerosos; a un lado, el ábaco.



Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Enunciado

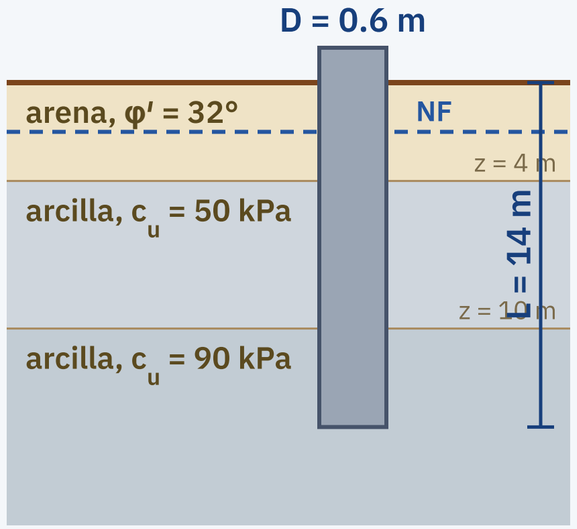
EJEMPLO

Datos

Grupo	**5 × 5 pilotes hincados, D = 0.40 m, s = 1.20 m (3D), L = 12 m**
Suelo	**una sola arena, φ′ = 32°, γ = 18, γ_{sat} = 19 kN/m³, nivel freático a 3 m**
Pilote aislado	**Q_s = 285.7, Q_p = 318.0 kN (hincado, K–δ y Meyerhof)**
Eficiencia	**pilote hincado, en arena con φ′ < 40°: η = 1**

SE PIDE

Comparar los valores de Q_{ind} y Q_{bloque} y determinar la capacidad del grupo.



Solución (1/2)

SOLUCIÓN

1 Pilotes individuales (η = 1)

$$Q_{ind} = n\,Q_u = 25(603.7) = \mathbf{15{,}094}\ \text{kN}$$

2 Bloque: $L_g = B_g = 4(1.2) + 0.4 = 5.2$ m; $\sigma'(3) = 54.0$, $\sigma'(12) = 136.7$ kPa

$$P_b = 2(5.2 + 5.2) = 20.8\ \text{m} \qquad \bar{\sigma}' = \frac{939.2}{12} = 78.3\ \text{kPa}$$

$$\tau = K_0 \bar{\sigma}' \tan\varphi' = 0.470(78.3)(0.6249) = 22.99\ \text{kPa}$$

$$\text{deslizamiento lateral} = 22.99(20.8)(12) = \mathbf{5{,}738}\ \text{kN}$$

Solución (2/2)

SOLUCIÓN

3 Base del bloque en arena: la base equivale a la suma de las resistencias por punta de los pilotes

$$\text{base} = nQ_p = 25(318.0) = \mathbf{7{,}950}\ \text{kN} \qquad Q_{block} = 5{,}738 + 7{,}950 = \mathbf{13{,}689}\ \text{kN}$$

4 Capacidad y eficiencia del grupo

$$Q_{block} = 13{,}689 \ < \ Q_{ind} = 15{,}094$$

$$Q_{g(u)} = \mathbf{13{,}689}\ \text{kN} \qquad \eta_{group} = \frac{13{,}689}{15{,}094} = \mathbf{0.907}$$

Aquí **gobierna el bloque**: en un grupo grande, la suma de las resistencias por fuste de los pilotes supera la capacidad de corte del perímetro exterior del grupo. Aunque cada pilote por separado presenta η = 1.00, la capacidad del grupo es el **91 %** de la suma individual.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Vesic: tres partes y después el grupo

TEORÍA

Un pilote aislado se asienta por el acortamiento de su propia longitud, por la compresión del terreno bajo la base y por la compresión del terreno cargado a lo largo del fuste. Vesic (1969) suma estas tres componentes para la carga de servicio Q_W (Q_{ws} es la parte del fuste y Q_{wp} la de la base):

$$s_e = s_{e1} + s_{e2} + s_{e3}$$

$$s_{e1} = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws})L}{A_p E_p} \qquad s_{e2} = \frac{q_{wp} D}{E_s}(1 - \mu_s^2) I_{wp}$$

$$s_{e3} = \frac{Q_{ws}}{pL}\frac{D}{E_s}(1 - \mu_s^2) I_{ws} \qquad I_{ws} = 2 + 0.35\sqrt{L/D}$$

$$S_{g(e)} = \sqrt{\frac{B_g}{D}}\, s_e$$

La carga de trabajo $Q_W = V/n$; el módulo la reparte entre el fuste y la punta en la proporción **$Q_s : Q_p$**.

El grupo se asienta **$\sqrt{(B_g/D)}$** veces más que un pilote aislado bajo la misma carga por pilote (relación empírica de Vesic para pilotes en arena).

ξ: distribución de la resistencia por fuste, entre 0.5 (uniforme) y 0.67 (creciente con la profundidad); $I_{wp} = 0.85$.

Enunciado

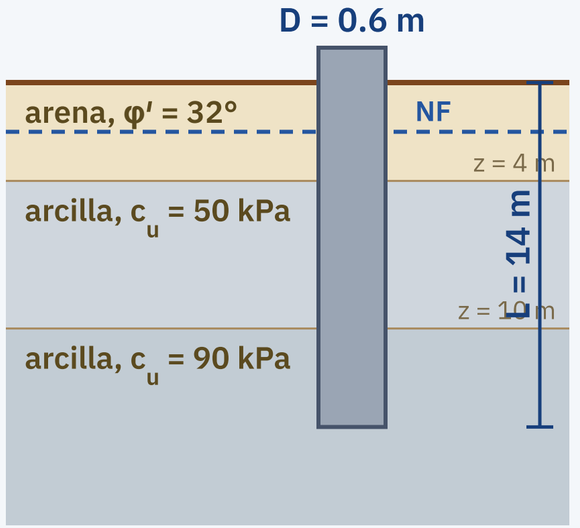
EJEMPLO

Datos

Grupo	**9 pilotes perforados, 3 filas × 3 pilotes, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Suelo	**arena 0–4 m (φ′ = 32°) · arcilla 4–10 m (c_u = 50) · arcilla 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Carga de servicio	**Q_w = V/n = 177.8 kN; Q_s : Q_p = 678.1 : 229.0 (Ejemplo 3)**
Material	$E_p = 30\,000$ MPa, $E_s = 30$ MPa, $\nu_s = 0.30$, $\xi = 0.6$, $I_{wp} = 0.85$

SE PIDE

Determinar el asentamiento elástico de un pilote aislado en tres partes y el asentamiento elástico del **grupo**.



Solución (1/2)

SOLUCIÓN

1 Reparto de la carga de trabajo

$$Q_{ws} = Q_w \frac{Q_s}{Q_u} = 177.8 \frac{678.1}{907.1} = 132.9\ \text{kN} \qquad Q_{wp} = 177.8 - 132.9 = 44.9\ \text{kN}$$

2 Acortamiento del pilote

$$s_{e1} = \frac{(44.9 + 0.6(132.9))(14)}{(0.2827)(30\,000\,000)} = 0.21\ \text{mm}$$

3 Base

$$q_{wp} = \frac{Q_{wp}}{A_b} = 158.7\ \text{kPa} \quad s_{e2} = \frac{158.7(0.6)}{30\,000}(1 - 0.3^2)(0.85) = 2.46\ \text{mm}$$

Solución (2/2)

SOLUCIÓN

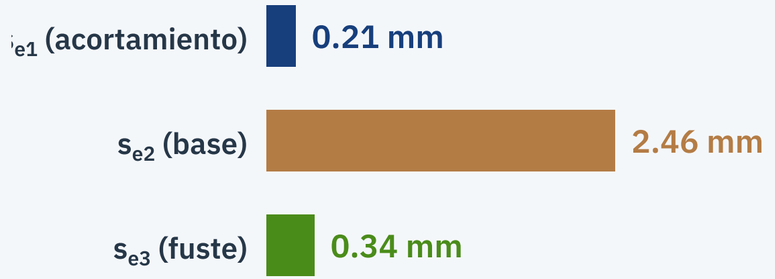
4 Fuste: $I_{ws} = 2 + 0.35\sqrt{(14/0.6)} = 3.69$

$$s_{e3} = \frac{132.9}{(1.885)(14)} \cdot \frac{0.6}{30\,000}(0.91)(3.69) = 0.34 \text{ mm}$$

5 Pilote aislado y grupo

$$s_e = 0.21 + 2.46 + 0.34 \approx 3.00 \text{ mm}$$

$$S_{g(e)} = \sqrt{\frac{B_g}{D}}\, s_e = \sqrt{\frac{4.2}{0.6}}(3.00) = \mathbf{7.9} \text{ mm}$$



El **82 %** del asentamiento procede de la parte de la base (s_{e2}); el asentamiento elástico total es de **7.9 mm**. El asentamiento principal de los estratos de arcilla viene en el paso siguiente: la consolidación.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Asentamiento lento y de gran magnitud de los estratos de arcilla

TEORÍA

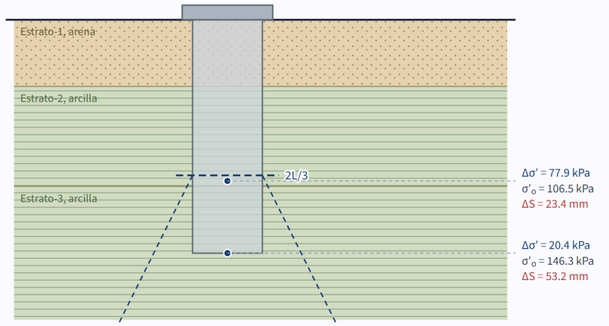
Las arcillas situadas bajo el cabezal se asientan lentamente y en su mayor parte por **consolidación**. La fuente aplica la carga del grupo a una cimentación equivalente situada **2L/3 por debajo** del nivel del cabezal (los pilotes han transmitido parte de la carga al terreno superior) y la reparte por debajo con una pendiente de **2 vertical : 1 horizontal**. En el centro de un estrato de arcilla, a una profundidad z bajo el nivel 2L/3, el incremento de tensión es:

$$\Delta\sigma'_i = \frac{Q_g}{(B_g + z_i)(L_g + z_i)}$$

$$\Delta S_i = \frac{C_c H_i}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'_i}{\sigma'_o} \quad \text{(NC)}$$

En arcilla sobreconsolidada se usa C_s ($C_c/5$ si no se da) hasta la tensión de preconsolidación y C_c a partir de ella.

Se incluye en el cálculo la parte del estrato de arcilla situada **por debajo** de 2L/3; σ'_o se toma en el punto medio de esa parte, según el estrato y el nivel del agua. $S_c = \Sigma\Delta S_i$.



Enunciado

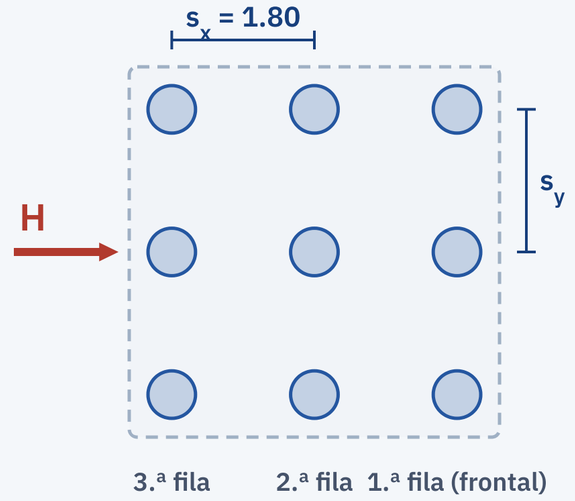
EJEMPLO

Datos

Grupo	**9 pilotes perforados, 3 filas × 3 pilotes, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Suelo	**arena 0–4 m (φ′ = 32°) · arcilla 4–10 m (c_u = 50) · arcilla 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Carga	$Q_g = V = 1\,600$ kN; **bloque** $L_g = B_g = 4.2$ m
Arcilla 1 (4–10 m)	$e_0 = 0.90,\ C_c = 0.28$ **(NC)**
Arcilla 2 (10–18 m)	$e_0 = 0.70,\ C_c = 0.20$ **(NC)**

SE PIDE

Determinar el nivel 2L/3 y calcular el asentamiento de **cada estrato de arcilla** (la parte situada por debajo de 2L/3) y el asentamiento total por consolidación.



Solución (1/2)

SOLUCIÓN

1 Nivel 2L/3 (desde la base del cabezal)

$$z_0 = \frac{2L}{3} = \frac{2(14)}{3} = \mathbf{9.33}\ \text{m} \ \Rightarrow\ \text{el tramo de 9.33–10 m de la arcilla 1 y toda la arcilla 2 entran en el cálculo}$$

2 Arcilla 1 (4–10 m): 9.33–10 m, H = 0.67 m; punto medio 9.67 m, z = 0.33 m

$$\Delta\sigma' = \frac{1\,600}{(4.2+0.33)(4.2+0.33)} = 77.9\ \text{kPa} \qquad \sigma'_o = 106.5\ \text{kPa}$$

$$\Delta S = \frac{0.28(0.67)}{1+0.90}\log\frac{106.5+77.9}{106.5} = \mathbf{23.4}\ \text{mm}$$

Solución (2/2)

SOLUCIÓN

3 Arcilla 2 (10–18 m): 10.00–18 m, H = 8.00 m; punto medio 14.00 m, z = 4.67 m

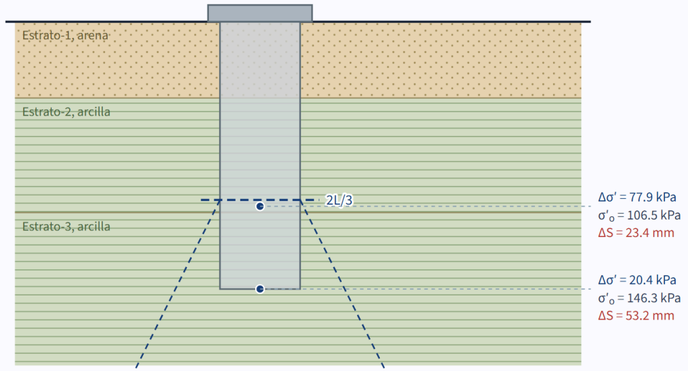
$$\Delta\sigma' = \frac{1\,600}{(4.2+4.67)(4.2+4.67)} = 20.4\ \text{kPa} \qquad \sigma'_o = 146.3\ \text{kPa}$$

$$\Delta S = \frac{0.20(8.00)}{1+0.70}\log\frac{146.3+20.4}{146.3} = \mathbf{53.2}\ \text{mm}$$

4 Asentamiento total por consolidación y su combinación con la componente elástica

$$S_c = 23.4 + 53.2 = \mathbf{76.7}\ \text{mm}$$

$$S = S_{g(e)} + S_c = 7.9 + 76.7 = \mathbf{84.6}\ \text{mm}$$



El **91%** del asentamiento procede de la consolidación y el 69% de este, de las arcillas de 10–18 m: el asentamiento del grupo lo determina la gruesa capa de arcilla situada **muy por debajo** de las puntas; el asentamiento de un pilote aislado no lo refleja.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

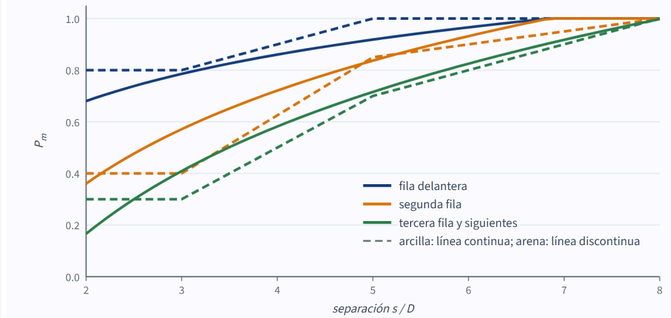
Las filas traseras quedan a la sombra de las delanteras

TEORÍA

Bajo carga lateral, un pilote empuja el terreno y el terreno reacciona a lo largo del pilote (la curva p–y del módulo lateral). Cuando los pilotes están **uno detrás de otro** en la dirección de la carga, cada uno trabaja en un terreno deformado y empujado por el pilote que tiene delante. Los ensayos (Brown et al. 1988; McVay et al. 1995; Rollins et al. 2006) muestran que la curva p–y del grupo conserva su forma, pero se reduce mediante un **multiplicador p (P_m)**; el multiplicador depende de la fila y de la separación:

$$p_{group}(y) = P_m \; p_{single}(y)$$

$$\text{arcilla (Rollins):} \quad \begin{aligned} P_{m1} &= 0.26 \ln \tfrac{s}{D} + 0.5 \\ P_{m2} &= 0.52 \ln \tfrac{s}{D} \\ P_{m3} &= 0.60 \ln \tfrac{s}{D} - 0.25 \end{aligned}$$



Arena: multiplicadores de AASHTO LRFD (en 3D y 5D: 0.8·0.4·0.3 y 1.0·0.85·0.7; lineal entre ambos).

En un suelo estratificado, la curva p–y de **cada estrato** se escala con el multiplicador correspondiente al tipo de suelo de ese estrato. Si la carga se **invierte**, cada fila toma el promedio de los multiplicadores de fila del grupo.

Enunciado

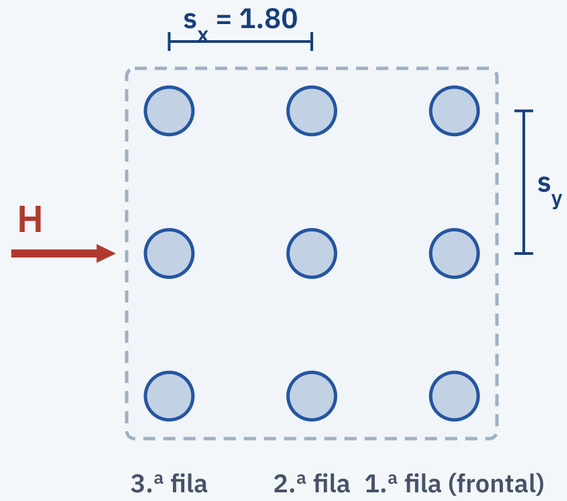
EJEMPLO

SE PIDE

Determinar los **multiplicadores p** de las tres filas para el estrato de arcilla; si la carga **se invierte**, ¿cuál es el multiplicador medio de las filas para la arcilla y para la arena?

Datos

Separación (en la dirección de la carga)	**s_x = 1.80 m, D = 0.60 m: s/D = 3**
Arcilla	**Ecuaciones de Rollins et al. (2006)**
Arena	**AASHTO LRFD: en 3D, $P_m = 0.8 \cdot 0.4 \cdot 0.3$**



Solución

SOLUCIÓN

1 Arcilla: ln(s/D) = ln 3 = 1.099

$$P_{m1} = 0.26(1.099) + 0.5 = \mathbf{0.786}$$

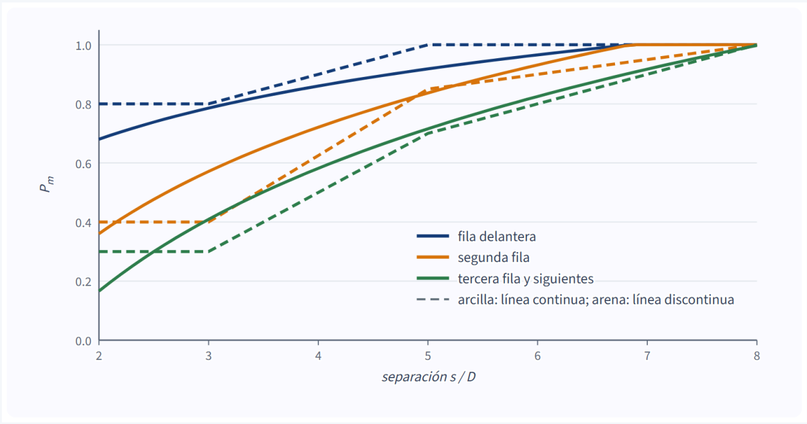
$$P_{m2} = 0.52(1.099) = \mathbf{0.571}$$

$$P_{m3} = 0.60(1.099) - 0.25 = \mathbf{0.409}$$

2 Carga reversible: promedio de las filas

$$\bar{P}_{m,clay} = \frac{0.786 + 0.571 + 0.409}{3} = \mathbf{0.589}$$

$$\bar{P}_{m,sand} = \frac{0.8 + 0.4 + 0.3}{3} = \mathbf{0.500}$$



La fila delantera conserva aproximadamente el 79% de la curva y la tercera y las siguientes solo el 41% (en arcilla); en arena, el 80% y el 30%. Al aumentar la separación, los multiplicadores se aproximan a 1 (a 5D, en arena 1.0 · 0.85 · 0.7).

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

El cabezal experimenta un único desplazamiento

TEORÍA

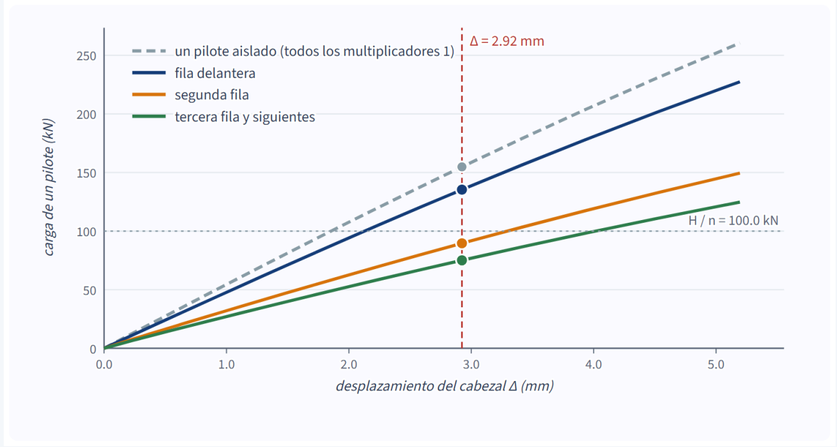
El cabezal es rígido y su giro está impedido: **todas las cabezas de pilote se desplazan el mismo Δ**; pero, como las curvas p–y se escalan de forma distinta, las filas soportan cargas diferentes. El módulo halla el Δ para el que la suma de las cargas de las filas es igual a la carga sobre el cabezal:

$$\sum_{k=1}^{n_x} n_y \, H_k(\Delta) = H$$

El pilote de la fila k es el pilote aislado del **módulo de pilotes con carga lateral** (elementos finitos + Newton); sus curvas se escalan con los multiplicadores de esa fila.

El desplazamiento es **controlado**: la cabeza del pilote se mantiene en Δ y se lee su reacción; así también se puede seguir el punto máximo de la curva con ablandamiento (arcilla cíclica).

La carga máxima que puede soportar el grupo es el **primer máximo** de la suma por filas; si la carga solicitada es mayor, el módulo lo indica.



Enunciado

EJEMPLO

Datos

Solución (módulo)	**Δ = 2.92 mm; carga por pilote: 1.ª fila 135.3, 2.ª fila 89.6, 3.ª fila 75.1 kN**
Pilote individual	**Soporta 154.8 kN en Δ; con 100 kN se desplaza 1.85 mm**
Carga	**H = 900 kN, n = 9: reparto igual H/n = 100 kN**

SE PIDE

Comprobar el equilibrio; determinar la relación entre el desplazamiento del cabezal y el del pilote aislado y la **eficiencia del grupo bajo carga lateral**.

Solución

SOLUCIÓN

1 Equilibrio: $\Sigma n_\gamma H_k = H$

$$3(135.3 + 89.6 + 75.1) = \mathbf{900}\ \text{kN} = H\ \checkmark$$

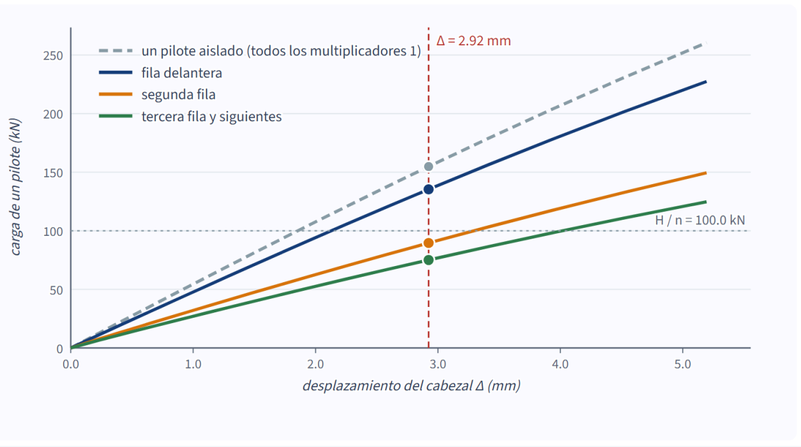
2 Relación entre el desplazamiento del cabezal y el de un pilote aislado

$$\frac{\Delta}{y_{single}} = \frac{2.92}{1.85} = \mathbf{1.58}$$

3 Eficiencia del grupo bajo carga lateral: carga media por pilote / carga de un pilote aislado para el mismo Δ

$$\eta_{lateral} = \frac{H/n}{H_{single}(\Delta)} = \frac{100.0}{154.8} = \mathbf{0.65}$$

La fila delantera soporta **1.35 veces** el reparto uniforme y la tercera fila 0.75 veces; el cabezal se desplaza **1.58 veces** más que un pilote aislado. El máximo momento flector se da en la cabeza del pilote: 207 kN·m.



Comprobar la solución en GeoTerva ↗

¿Qué valor corresponde a cada comprobación?

TEORÍA

Cargas en los pilotes: $P_{max} \leq Q_u/FS$ (pilote aislado, sin efecto de grupo); pilote a tracción $T_{max} \leq T_u/FS$; los pilotes a tracción en conjunto $\Sigma T \leq T_g/FS$

Capacidad del grupo: $V \leq Q_{all} = Q_{g(u)}/FS$; cuál rige (la individual o la del bloque)

Asentamiento: elástico + de consolidación; se compara con el valor admisible introducido

Lateral: desplazamiento del cabezal, carga de la fila delantera, momento flector máximo y eficiencia lateral; se comparan con el desplazamiento admisible

La carga por pilote y el momento flector son las acciones del **diseño estructural** de la sección del pilote

GRUPO DE EJEMPLO: COMPROBACIONES

Comprobación	Resultado
$P_{max} \leq Q_u/FS$	261 ≤ 302 kN ✓
$V \leq Q_{all}$	1 600 ≤ 1,984 kN ✓
Asentamiento	84.6 mm
Δ (lateral)	2.92 mm

Enunciado

EJEMPLO

Datos

Grupo	**9 pilotes perforados, 3 filas × 3 pilotes, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Suelo	**arena 0–4 m ($\varphi' = 32°$) · arcilla 4–10 m (c_u = 50) · arcilla 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Variable	**separación entre pilotes s = 2.5D · 3D · 4D · 5D · 6D (en ambas direcciones)**
Cargas	**V = 1 600, H = 900 kN, M_y = 900 kN·m**

SE PIDE

¿Cómo varían la capacidad del grupo, la eficiencia y el desplazamiento del cabezal al aumentar la separación?

Solución (1/2)

SOLUCIÓN

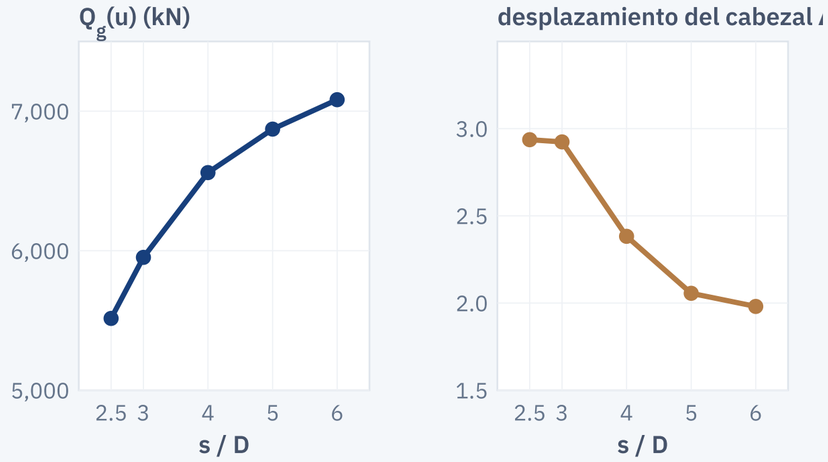
s / D	s (m)	η arena	η arcilla	$Q_{g(u)}$ (kN)	η grupo	Δ (mm)
2.5	1.50	0.65	0.677	5,515	**0.676**	2.94
3.0	1.80	0.77	0.727	5,952	**0.729**	2.92
4.0	2.40	1.00	0.792	6,560	**0.803**	2.38
5.0	3.00	1.00	0.832	6,871	**0.842**	2.06
6.0	3.60	1.00	0.860	7,083	**0.868**	1.98

s = 2.5D → 6D: capacidad **5,515 → 7,083 kN**, eficiencia del grupo 0.68 → 0.87, desplazamiento del cabezal **2.94 → 1.98 mm**. Al aumentar la separación, tanto la eficiencia como los multiplicadores p se aproximan a 1; 2.5D es la separación mínima que da la fuente.

Solución (2/2)

SOLUCIÓN

Comentario. Aumentar la separación de 2.5D a 6D incrementa la capacidad en un 28% y reduce el desplazamiento del cabezal en un 33%; pero el cabezal se agranda y los pilotes se dispersan más. En la práctica, la solución de compromiso se sitúa entre 3D – 3.5D y 5D. En la gráfica, $Q_{g(u)}$ a la izquierda y Δ a la derecha.



Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Las hipótesis detrás de los números

TEORÍA

Grupo: pilotes verticales en malla rectangular o en disposición triangular, de una sola sección y longitud, bajo un cabezal rígido. El cabezal transmite carga pero no añade resistencia (el empuje pasivo, la fricción bajo él y la capacidad portante se dejan del lado de la seguridad).

Pilote aislado: reglas del terreno estratificado, no se introduce ninguna resistencia.

Eficiencia: ecuaciones empíricas a partir de pilotes hincados en arcilla; en arena, una única separación (la distancia mínima). En una disposición triangular, Converse–Labarre es una **extensión**.

Bloque: en arcilla, el fundamento de la fuente; el deslizamiento en arena y la base de arena son una **ampliación del módulo**.

Cargas: V incluye el peso del cabezal; la carga lateral y los momentos se refieren a la base del cabezal. A tracción, solo el fuste, arena ¾.

Asentamiento: es opcional; la parte elástica con un único E_s y v_s, la consolidación con reparto 2:1, en el punto medio de cada estrato.

Lateral: los multiplicadores p proceden de ensayos realizados en suelos y separaciones concretos; las separaciones inferiores a 3D se señalan.

Resumen

Puntos clave

Cabezal rígido: **P = V/n + Bx + Cy**; la mayor carga corresponde al pilote delantero y la menor al trasero; si el momento es grande, el pilote trasero trabaja a **tracción**

El **pilote aislado** se calcula estrato por estrato; sobre él se construye la capacidad del grupo

La **eficiencia** se aplica estrato por estrato: Converse–Labarre en arcilla, el ábaco para pilotes hincados en arena ($\eta \leq 1$) y la regla de AASHTO para pilotes perforados

Capacidad = **min(individual, bloque)**; el bloque rige en grupos con pilotes poco espaciados y numerosos

Asentamiento: elástico (Vesic, con $\sqrt{(B_g/D)}$) + consolidación (reparto 2:1 desde 2L/3); el asentamiento del grupo está gobernado por la arcilla de gran espesor

Lateral: los multiplicadores p disminuyen de la fila delantera a la trasera; el cabezal impone un único Δ y las filas soportan cargas desiguales

Referencias bibliográficas

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning, Boston.

Meyerhof, G.G. (1976). Bearing capacity and settlement of pile foundations. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 102(GT3), 197–228.

Vesic, A.S. (1977). Design of Pile Foundations. NCHRP Synthesis of Highway Practice 42, Transportation Research Board, Washington.

Coyle, H.M. and Castello, R.R. (1981). New design correlations for piles in sand. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 107(GT7), 965–986.

Mansur, C.I. and Hunter, A.H. (1970). Pile tests, Arkansas River project. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 96(SM5), 1545–1582.

Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd ed. John Wiley & Sons, New York.

Vijayvergiya, V.N. and Focht, J.A. (1972). A new way to predict capacity of piles in clay. Proceedings of the 4th Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 1718.

Burland, J.B. (1973). Shaft friction of piles in clay — a simple fundamental approach. Ground Engineering, 6(3), 30–42.

O'Neill, M.W. and Reese, L.C. (1999). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-IF-99-025, Federal Highway Administration, Washington.

Reese, L.C. and O'Neill, M.W. (1989). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-HI-88-042, Federal Highway Administration, Washington; la punta de un pilote perforado en arcilla.

Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1967). Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.

Kishida, H. and Meyerhof, G.G. (1965). Bearing capacity of pile groups under eccentric loads in sand. Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, 2, 270–274.

Vesic, A.S. (1969). Experiments with instrumented pile groups in sand. Performance of Deep Foundations, ASTM STP 444, 177–222.

Jaky, J. (1944). The coefficient of earth pressure at rest. Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers, 7, 355–358.

American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th ed.: los multiplicadores p de los grupos de pilotes y la resistencia de los grupos de pilotes perforados en suelo granular.

Washington State Department of Transportation (2010). Bridge Design Memorandum No. 07-2010, Bearing resistance of shaft groups.

Brown, D.A., Morrison, C. and Reese, L.C. (1988). Lateral load behavior of pile group in sand. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 114(11), 1261–1276.

McVay, M., Casper, R. and Shang, T.-I. (1995). Lateral response of three-row groups in loose to dense sands at 3D and 5D pile spacing. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 121(5), 436–441.

Rollins, K.M., Olsen, R.J., Egbert, J.J., Jensen, D.H., Olsen, K.G. and Garrett, B.H. (2006). Pile spacing effects on lateral pile group behavior: analysis. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 132(10), 1272–1283.

Matlock, H. (1970). Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay. Proceedings of the 2nd Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 1204, 577–594.

Reese, L.C., Cox, W.R. and Koop, F.D. (1974). Analysis of laterally loaded piles in sand. Proceedings of the 6th Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 2080, 473–485.

American Petroleum Institute (2000). Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms — Working Stress Design, API RP 2A-WSD, 21st ed.

GeoTerva

Cálculos geotécnicos en línea

De la teoría a la práctica

Calcular paso a paso en GeoTerva el grupo de ejemplo de esta presentación: los números son los mismos.

Abrir el módulo →

Página de teoría →

Abrir en el teléfono
Los módulos de prueba no requieren registro.

Si desea utilizarlas en sus clases: info@geoterva.com