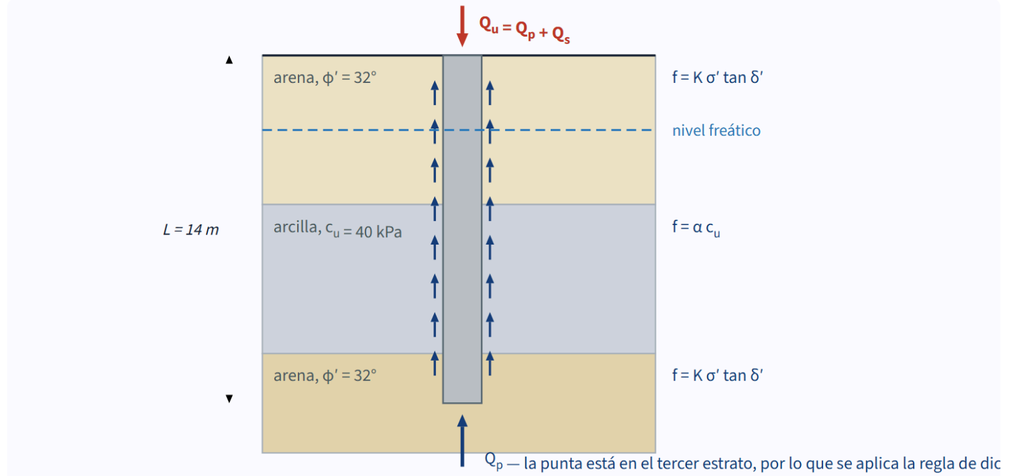
Presentación de clase de geotecnia · Pilotes

Capacidad portante de pilotes en suelo estratificado

Clase: capacidad de un pilote que atraviesa estratos de arena y arcilla. Qué regla es válida en cada caso y cómo se acumula la tensión efectiva a través de los estratos; ejemplo resuelto en cada tema.

- Cálculo estrato por estrato
- Punta: estrato de la punta
- Reglas de arena + arcilla
- Pilote perforado
- Ejemplos resueltos



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

¿Qué aprenderemos en esta clase?

Acumular la **tensión efectiva estrato a estrato**; ver cómo el estrato de arcilla, aunque su propia resistencia no pasa a la arena, influye con su peso en la arena que tiene debajo

Saber que la **resistencia por punta** depende solo del estrato en el que se halla la punta y se calcula con la regla de ese estrato

Aplicar la regla K–δ **en el estrato de arena** (la profundidad crítica $L' = 15D$ corresponde a todo el pilote) y las reglas α, λ y β **en el estrato de arcilla**

La suma de la **resistencia por fuste a lo largo de los estratos**; la interpretación de los saltos de rozamiento en los límites entre estratos y del efecto de la longitud del pilote

Comprender que en el **pilote perforado** la ventana de α^* y c_{ub} pueden proceder de varios estratos

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

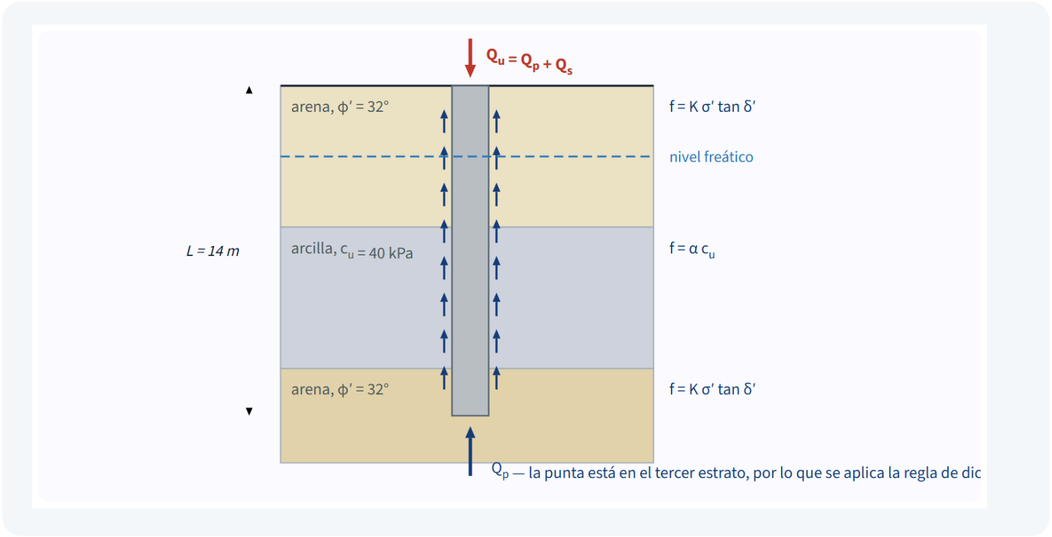
3 · **Solución**: paso a paso, con números

La mayoría de los ejemplos se resuelven con el mismo pilote: de 0.4 m de diámetro y 14 m de longitud, que atraviesa un perfil de arena–arcilla–arena.

Esta presentación se apoya en las presentaciones sobre **pilotes en arena** y **pilotes en arcilla**: las reglas se estudiaron allí; aquí se analiza cuál es aplicable en cada caso.

Cada estrato responde según su propia regla

TEORÍA



Un pilote rara vez penetra en un único suelo. El perfil consta de **varios estratos**; cada uno se define como arena o arcilla y se le aplica **la regla de su propio material**. La capacidad vuelve a constar de dos partes, pero ya no se obtiene de una única fórmula, sino que se **construye parte por parte**:

$$Q_u = Q_p + Q_s \qquad Q_{all} = \frac{Q_u}{FS}$$

No hay ninguna teoría nueva: las reglas de la arena pertenecen al módulo de arena y las de la arcilla, al módulo de arcilla.

Lo nuevo es el **esquema de cálculo**: qué regla es válida en cada tramo del fuste y cómo se acumula la tensión efectiva a partir de los estratos superiores.

La resistencia por punta procede de **un único estrato**; la resistencia por fuste, de **la suma de todos los estratos**.

Tensión continua, fricción escalonada

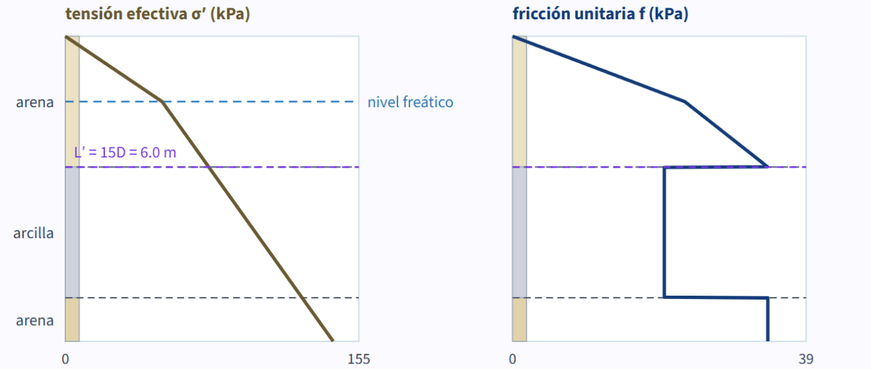
TEORÍA

La tensión vertical efectiva es lo que une los estratos: se acumula **el peso de cada estrato superior**; por encima del nivel freático se emplea el peso específico húmedo y por debajo, el sumergido.

$$\sigma'(z) = \sum \gamma_i h_i \qquad \text{(sobre el NF)}$$
$$+ \sum (\gamma_{sat,i} - \gamma_w) h_i \qquad \text{(bajo el NF)}$$

El estrato de arcilla no aporta a la arena su propia resistencia; pero, **con su peso**, modifica la resistencia que ofrece la arena situada debajo.

El rozamiento, en cambio, no es continuo: en el límite arena–arcilla **cambia la propia regla** y el rozamiento unitario puede dar un gran salto. Este salto no es un error del cálculo, sino la **firma** del perfil estratificado.



La tensión es continua a través de los estratos; la fricción presenta un salto en cada límite, porque en él cambia la regla.

Enunciado

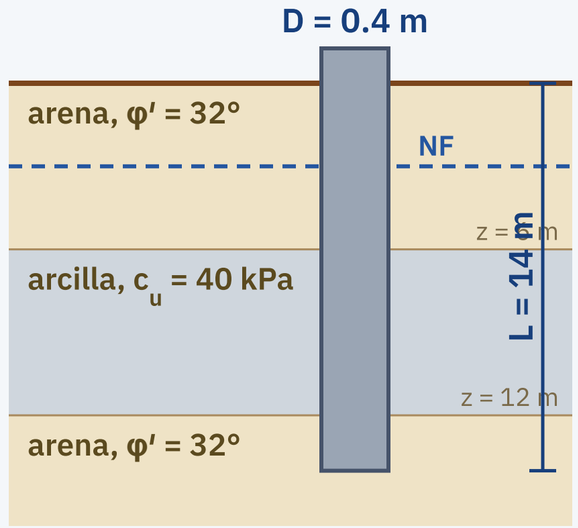
EJEMPLO

Datos

Arena 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Arcilla (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Arena 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Peso específico	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(tres estratos)**
Agua subterránea	**a 3.0 m de profundidad**
Pilote	**hincado, D = 0.4 m, L = 14 m**
Peso específico del agua	$\gamma_w = 9.81\ \mathrm{kN/m^3}$

SE PIDE

Determinar la tensión vertical efectiva a las profundidades de **3, 6, 12 y 14 m** (14 m = punta del pilote).



Solución (1/2)

SOLUCIÓN

1 Hasta el nivel freático (3 m): todo el estrato está húmedo, γ = 17

$$\sigma'(3) = 17(3) = \mathbf{51.0}\ \text{kPa}$$

2 6 m (límite arena–arcilla): bajo el nivel freático, $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = 18 - 9.81$

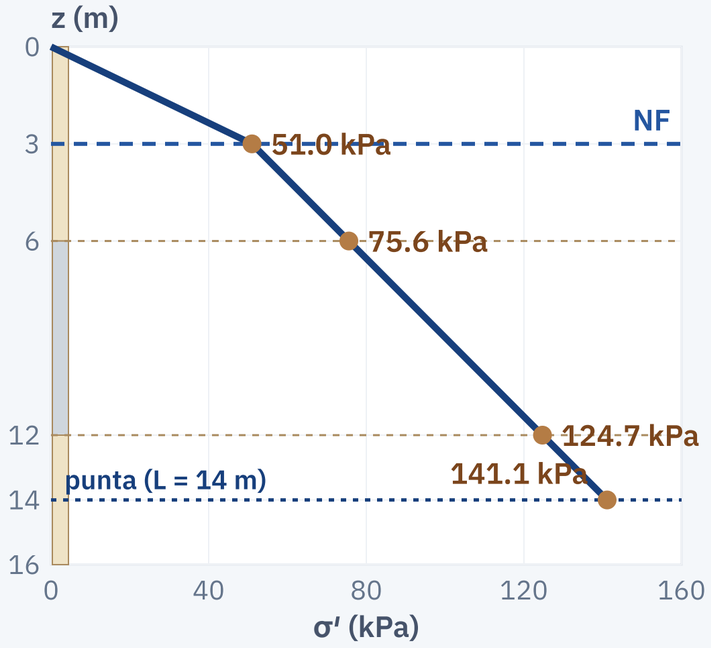
$$\sigma'(6) = 51.0 + (18 - 9.81)(3) = \mathbf{75.6}\ \text{kPa}$$

3 12 m (límite arcilla–arena): el valor de γ_{sat} de la arcilla también es 18

$$\sigma'(12) = 75.6 + (18 - 9.81)(6) = \mathbf{124.7}\ \text{kPa}$$

4 14 m (punta del pilote)

$$\sigma'(14) = 124.7 + (18 - 9.81)(2) = \mathbf{141.1}\ \text{kPa}$$



Solución (2/2)

SOLUCIÓN

5 En cada tramo, el área del diagrama de σ′ (trapecio); estas darán la tensión media en el cálculo del fuste

$$A_{0-6} = \tfrac{1}{2}(0 + 51.0)(3) + \tfrac{1}{2}(51.0 + 75.6)(3) = 266.4$$
$$A_{6-12} = \tfrac{1}{2}(75.6 + 124.7)(6) = 600.8$$
$$A_{12-14} = \tfrac{1}{2}(124.7 + 141.1)(2) = 265.8$$

σ′ es **continua a través de los estratos**: no hay salto en el límite arena–arcilla; la pendiente solo cambia en el NF y cuando cambia γ′. Estas tres áreas se utilizarán como σ̄′ medio en los Ejemplos 4 y 5.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

La punta depende únicamente de su propio estrato

TEORÍA

La resistencia por punta pertenece a **un único estrato**: aquel en el que se encuentra la punta del pilote. Se calcula según el material de ese estrato; los estratos superiores actúan solo a través de σ′ (**en una punta en arena**) y **no influyen en absoluto en una punta en arcilla**.

$$\text{arena:}\quad Q_p = A_p\, q'\, N_q^* \le A_p\, q_l, \quad q_l = 0.5\, p_a N_q^* \tan\varphi'$$

$$\text{arcilla:}\quad Q_p = A_p\, c_u\, N_c^*, \quad N_c^* = 9\ \text{(Meyerhof)}$$

Un pilote cuya punta coincide **exactamente con un límite** se considera apoyado en el estrato situado **bajo** el límite.

Coyle–Castello es una correlación para **arena**; carece de sentido con la punta en arcilla y, aunque se seleccione, se aplica la regla de arcilla.



En la punta en arena rigen σ′ y N^*_q; en la punta en arcilla, solo el valor de c_u de ese estrato.

Enunciado

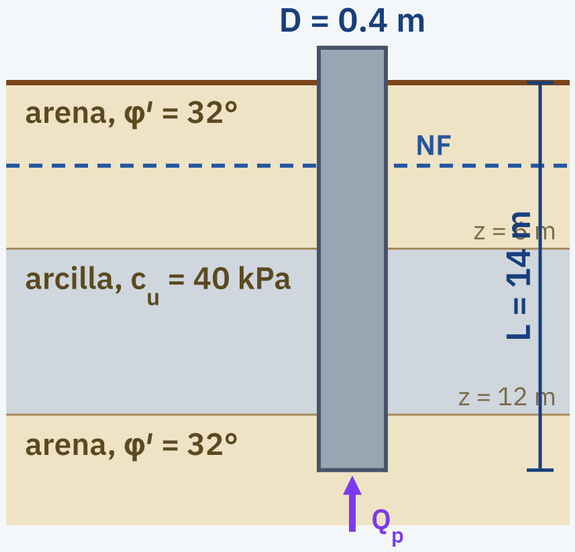
EJEMPLO

Datos

Arena 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Arcilla (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Arena 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Peso específico	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(tres estratos)**
Agua subterránea	**a 3.0 m de profundidad**
Pilote	**hincado, sección circular, D = 0.4 m, L = 14 m**
Método de la punta	**Meyerhof**
Presión atmosférica	$p_a = 100\ \mathrm{kPa}$
Tensión efectiva en la punta	$q' = \sigma'(14) = 141.1\ \mathrm{kPa}$ **(Ejemplo 1)**

SE PIDE

Determinar en qué estrato se encuentra la punta y calcular la **resistencia por punta** Q_p.



Solución (1/2)

SOLUCIÓN

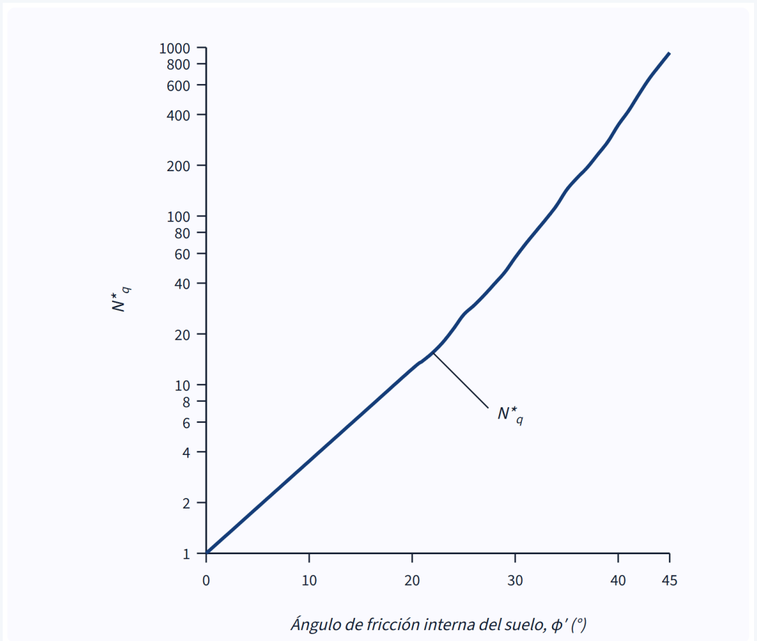
1 Estrato de la punta: L = 14 m, en la arena entre 12–16 m → regla de la arena (la arcilla superior no afecta a la punta)

$$\varphi' = 32^\circ \qquad q' = \sigma'(14) = 141.1\ \text{kPa}$$

2 N^*_q del ábaco de Meyerhof para φ′ = 32°; después, los dos valores lado a lado

$$N_q^* = 81$$
$$q' N_q^* = 141.1(81) = 11{,}428\ \text{kPa}$$
$$q_l = 0.5(100)(81)\tan 32^\circ = 2{,}531\ \text{kPa}$$

El valor de N^*_q del ábaco (a un lado) es 81; $q'N^*_q$ = 11,428 kPa, muy superior al valor límite q_l = 2,531 kPa: **rige el límite**.



Solución (2/2)

SOLUCIÓN

3 Resistencia unitaria por punta: el menor de los dos valores

$$q_p = \min(q' N_q^*;\ q_l) = \min(11{,}428;\ 2{,}531) = \mathbf{2{,}531}\ \text{kPa}$$

4 Área de la punta del pilote y resistencia por punta

$$A_p = \frac{\pi (0.4)^2}{4} = 0.1257\ \text{m}^2 \qquad Q_p = A_p\, q_p = 0.1257(2{,}531) = \mathbf{318.0}\ \text{kN}$$

Resistencia por punta **318.0 kN**. Como la punta del pilote está en arena, rige la regla de la arena; como el límite está activo, el valor de σ′ no modifica el resultado en este ejemplo.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Enunciado

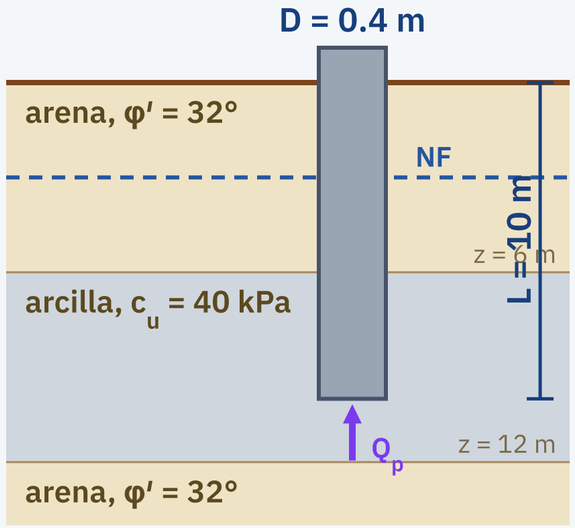
EJEMPLO

Datos

Arena 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Arcilla (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Arena 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Peso específico	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(tres estratos)**
Agua subterránea	**a 3.0 m de profundidad**
Pilote	**el mismo pilote, pero con L = 10 m**
Métodos de punta	**Meyerhof y Vesic**
Presión atmosférica	$p_a = 100\ \mathrm{kPa}$

SE PIDE

Si el pilote se acorta a 10 m, determinar en qué estrato queda la punta y hallar la **resistencia por punta** con dos métodos.



Solución

SOLUCIÓN

1 Estrato de la punta: L = 10 m, en la arcilla entre 6–12 m → regla de la arcilla (la arena y σ′ ya no intervienen en el cálculo)

$$c_u = 40\ \text{kPa} \qquad A_p = 0.1257\ \text{m}^2$$

2 Meyerhof: $N^*_c = 9$

$$q_p = 9\,c_u = 9(40) = 360\ \text{kPa} \qquad Q_p = 0.1257(360) = \mathbf{45.2}\ \text{kN}$$

3 Vesic: $I_{rr} = I_r = 347(c_u/p_a) - 33$

$$I_{rr} = 347(0.4) - 33 = 105.8$$
$$N_c^* = \tfrac{4}{3}(\ln 105.8 + 1) + \tfrac{\pi}{2} + 1 = 10.12$$
$$q_p = 40(10.12) = 405\ \text{kPa} \ \Rightarrow\ Q_p = 0.1257(405) = \mathbf{50.9}\ \text{kN}$$

En un pilote con la punta en arena, Q_p era de **318 kN**; al quedar en arcilla, **45 – 51 kN**: aproximadamente la séptima parte. Prolongar el mismo pilote 2 m para introducir la punta en la arena aumenta bruscamente la resistencia por punta.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

K–δ: la profundidad crítica pertenece a todo el pilote

TEORÍA

En el estrato de arena, el fuste resiste por fricción frente a la tensión efectiva horizontal. Cada estrato de arena tiene **sus propios** valores de K y δ′:

$$f = K_i\,\sigma'\tan\delta_i' \quad (z \le L') \qquad f = f_{z=L'} \quad (z > L'),\quad L' = 15D$$

L′ corresponde a **todo el pilote**, no al estrato: por debajo de L′ el valor de σ′ se mantiene igual al que tiene en L′.

Un estrato de arena profundo, con independencia de dónde se encuentre su límite, aporta un rozamiento unitario **constante a lo largo del estrato**.

Opción: **Coyle–Castello**. La K propia del estrato (del ábaco), δ′ = 0.8φ′ y el valor medio de σ′ del estrato; no hay profundidad crítica, el promedio cumple esa función.

COYLE–CASTELLO (POR ESTRATO)

$$f_i = K_i\,\bar{\sigma}_i'\tan(0.8\varphi_i')$$

$$Q_s = p\sum f_i\,\Delta L_i$$

En el método K–δ, δ′ se toma con frecuencia en el intervalo 0.75φ′ – 0.8φ′; en esta presentación se utilizarán **δ′ = 0.8φ′ = 25.6°** y **K = 1.0**.

Enunciado

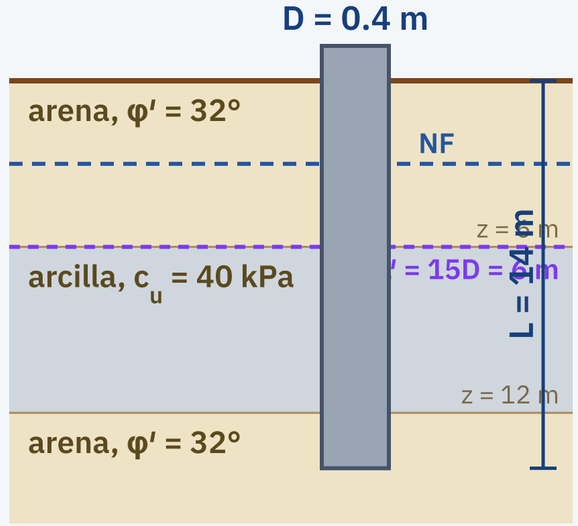
EJEMPLO

Datos

Arena 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Arcilla (6–12 m)	$c_u = 40\ \text{kPa}$
Arena 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Peso específico	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \text{kN/m}^3$ **(tres estratos)**
Agua subterránea	**a 3.0 m de profundidad**
Pilote	**hincado, D = 0.4 m, L = 14 m**
Perímetro	$p = \pi D = 1.257\ \text{m}$
En los estratos de arena	$K = 1.0,\ \delta' = 0.8\varphi' = 25.6^\circ$ **(introducir estos valores en el módulo; el módulo se abre con K = 0.66 y δ′ = 24°)**

SE PIDE

Hallar la resistencia por fuste de los **estratos de arena** (0–6 m y 12–14 m) mediante el método K–δ. Profundidad crítica L′ = 15D.



Solución (1/2)

SOLUCIÓN

1 Profundidad crítica (única para todo el pilote)

$$L' = \min(15D;\ L) = \min(15(0.4);\ 14) = \mathbf{6}\ \text{m} \qquad \sigma'(L') = 75.6\ \text{kPa (Ejemplo 1)}$$

2 Arena 1 (0–6 m): el estrato queda por completo dentro de L′; sin tope; σ′ medio = área / espesor

$$\bar{\sigma}'_1 = \frac{266.4}{6} = 44.4\ \text{kPa}$$

3 Fricción unitaria y resistencia

$$f_1 = K \tan\delta'\, \bar{\sigma}'_1 = 1.0(0.4791)(44.4) = 21.3\ \text{kPa}$$

$$Q_{s1} = p\, f_1 H = 1.2566(21.3)(6) = \mathbf{160.4}\ \text{kN}$$

Solución (2/2)

SOLUCIÓN

4 Arena 2 (12–14 m): íntegramente por debajo de L′ → el valor de σ′ se mantiene en el que tiene en L′

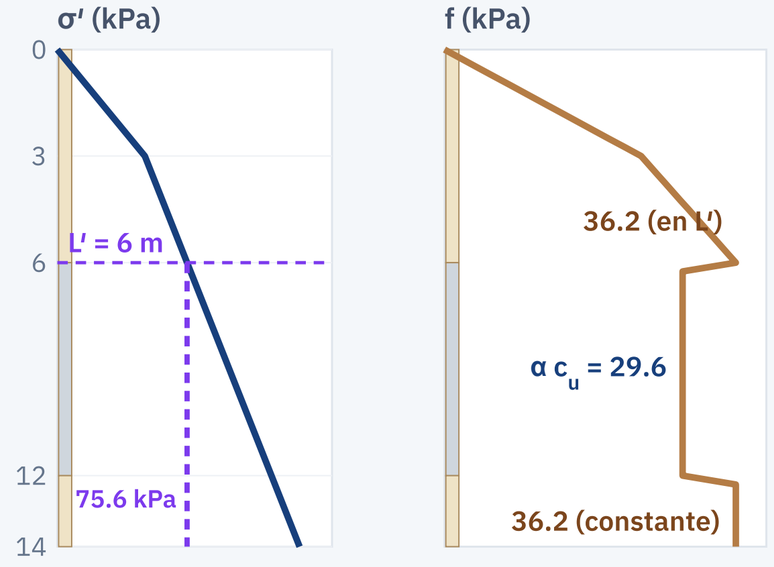
$$\sigma' = \sigma'(L') = 75.6 \text{ kPa}$$

$$f_3 = 1.0(0.4791)(75.6) = \mathbf{36.2} \text{ kPa}$$

5 Resistencia (espesor 14 – 12 = 2 m)

$$Q_{s3} = p\, f_3 H = 1.2566(36.2)(2) = \mathbf{91.0} \text{ kN}$$

Sin la profundidad crítica, este tramo daría σ⃗ = 132.9 kPa, f = 63.7 kPa y Q_{s3} = 160 kN. El **tope L′** reduce en **69 kN** el tramo profundo de la arena.



Comprobar la solución en GeoTerva ↗

También en arcilla, cada estrato elige su propio método

TEORÍA

En el estrato de arcilla el fuste resiste por **adherencia** o por **tensión efectiva**; los tres métodos del módulo de arcilla pueden utilizarse por estrato:

$$\alpha: \ f = \alpha_i c_{u,i} \qquad \lambda: \ f_i = \lambda\,(\bar{\sigma}'_i + 2c_{u,i}),\ \lambda = \lambda(L)$$

$$\beta: \ \beta_i = (1 - \sin\varphi'_{R,i})\tan\varphi'_{R,i}\sqrt{OCR_i}, \quad f_i = \beta_i \bar{\sigma}'_i$$

α: **no depende** de la profundidad dentro del estrato; el rozamiento es constante a lo largo del estrato (uniforme).

λ y β restituyen la tensión efectiva; según los estratos superiores producen un **escalón**.

UNA NOTA HONESTA

Vijayvergiya y Focht expresaron λ como **un único valor medio para toda la longitud enterrada**. Aplicarlo por separado a cada estrato de arcilla de un perfil estratificado (λ para la longitud L, con los valores medios de σ′ y c_u de ese estrato) es **una ampliación del método propia de este programa**; el módulo lo indica siempre.

φ'_R y OCR se **introducen**, no se leen del terreno mediante una correlación (se abre con 30° y 1).

Enunciado

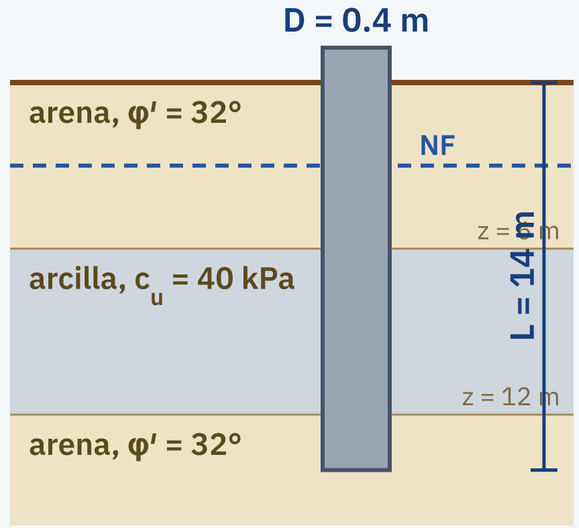
EJEMPLO

Datos

Arena 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Arcilla (6–12 m)	$c_u = 40\ \text{kPa}$
Arena 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Peso específico	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \text{kN/m}^3$ **(tres estratos)**
Agua subterránea	**a 3.0 m de profundidad**
Pilote	**hincado, D = 0.4 m, L = 14 m, p = 1.257 m**
σ′ media de la arcilla	$\bar{\sigma}'_2 = A_{6-12}/6 = 100.1\ \text{kPa}$ **(Ejemplo 1)**
para β	$\varphi'_R = 30^\circ,\ OCR = 1$
para α	$p_a = 100\ \text{kPa}$**, α de la tabla**

SE PIDE

Determinar la resistencia por fuste del estrato de arcilla (6–12 m) mediante los métodos **α, λ y β**.



Solución (1/2)

SOLUCIÓN

1 Método α: α de la tabla para $c_u/p_a = 0.4$

$$\alpha = 0.74 \quad f = \alpha c_u = 0.74(40) = 29.6 \text{ kPa} \quad Q_s = 1.2566(29.6)(6) = \mathbf{223.2} \text{ kN}$$

2 Método λ: λ se obtiene de la tabla según la **longitud del pilote** (L = 14 m) ($\lambda_{10} = 0.245$; $\lambda_{15} = 0.200$)

$$\lambda = 0.209$$

$$f = \lambda(\bar{\sigma}_2' + 2c_u) = 0.209(100.1 + 2(40)) = 37.6 \text{ kPa}$$

$$Q_s = 1.2566(37.6)(6) = \mathbf{283.9} \text{ kN}$$

Solución (2/2)

SOLUCIÓN

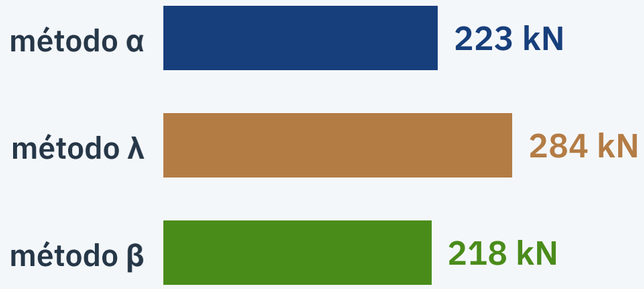
3 Método β: $\varphi'_R = 30°$, OCR = 1

$$\beta = (1 - \sin 30^\circ)\tan 30^\circ = 0.289$$

$$f = \beta \bar{\sigma}'_2 = 0.289(100.1) = 28.9 \text{ kPa}$$

$$Q_s = 1.2566(28.9)(6) = \mathbf{218.0} \text{ kN}$$

Los tres métodos dan **223**, **284** y **218 kN** para el mismo estrato de arcilla: α y β son próximos entre sí, mientras que λ es aproximadamente un 27 % mayor. La diferencia procede de las hipótesis en que se basan los métodos; el uso de λ por estrato es, además, una ampliación.



Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Una única integral: a lo largo del pilote

TEORÍA

La resistencia por fuste es la integral del rozamiento a lo largo del pilote multiplicada por el perímetro. El cálculo se realiza numéricamente; el límite puede estar en **cualquier punto**, y un pilote que termina a media altura de un estrato no requiere un caso especial:

$$Q_s = p \int_0^L f(z)\, dz \;\approx\; p \sum f_i \, \Delta z_i$$

Visto así, la estratificación deja de ser un problema y se convierte en una **pregunta de diseño**: **¿qué tramo** del perfil soporta el pilote?

¿Cómo cambia la capacidad si el pilote se alarga más allá del siguiente límite o se acorta?



Contribución de cada tramo del pilote de ejemplo (Q_s = 475 kN, Q_p = 318 kN).

Enunciado

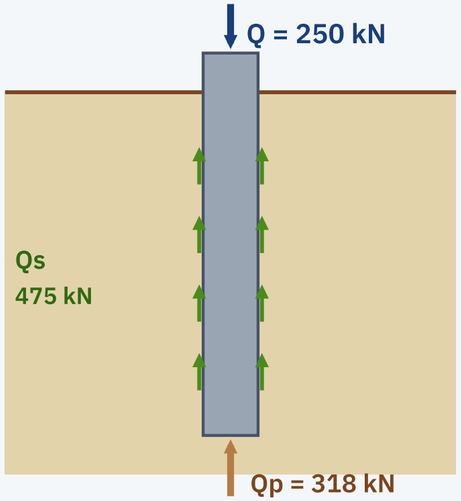
EJEMPLO

Datos

Resistencia por punta	Q_p = 318.0 kN (Ejemplo 2)
Arena 1 (0–6 m)	Q_{s1} = 160.4 kN (Ejemplo 4)
Arcilla (6–12 m)	Q_{s2} = 223.2 kN (método α, Ejemplo 5)
Arena 2 (12–14 m)	Q_{s3} = 91.0 kN (Ejemplo 4)
Factor de seguridad	FS = 3
Carga de trabajo sobre el pilote	Q = 250 kN

SE PIDE

Determinar la capacidad portante **última** y **admisible** del pilote; ¿es suficiente la carga de trabajo?



Solución

SOLUCIÓN

1 Resistencia por fuste: suma de los tramos

$$Q_s = 160.4 + 223.2 + 91.0 \approx \mathbf{474.5}\ \text{kN}$$

2 Capacidad portante última

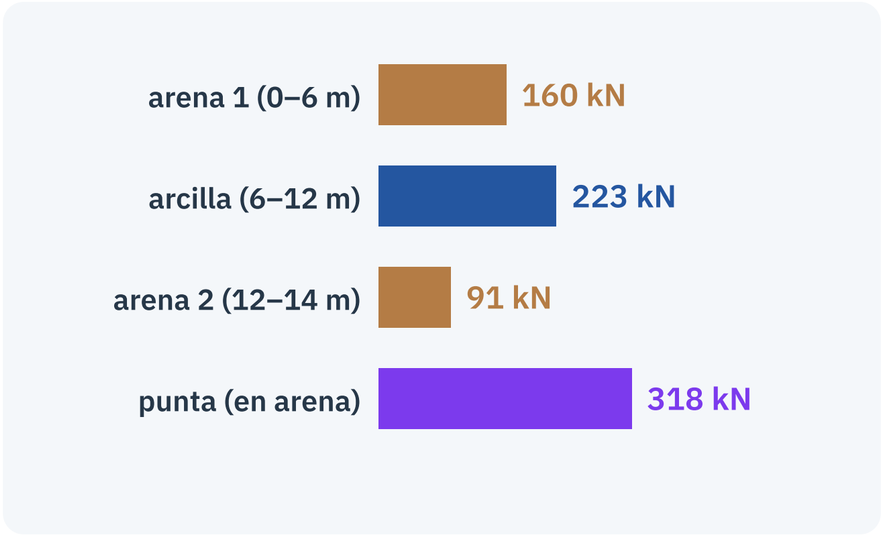
$$Q_u = Q_p + Q_s = 318.0 + 474.5 = \mathbf{792.6}\ \text{kN}$$

3 Capacidad portante admisible y comprobación

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FS} = \frac{792.6}{3} = \mathbf{264.2}\ \text{kN}$$

$$Q = 250 \leq 264.2 \ \Rightarrow\ \text{suficiente}$$

El grado de aprovechamiento es 0.95. El estrato de arcilla representa solo el 43 % de la longitud, pero aporta el 47 % de la resistencia por fuste: tras la profundidad crítica la arena deja de ganar σ′, mientras que la arcilla aporta el mismo valor α c_u a cualquier profundidad.



Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Enunciado

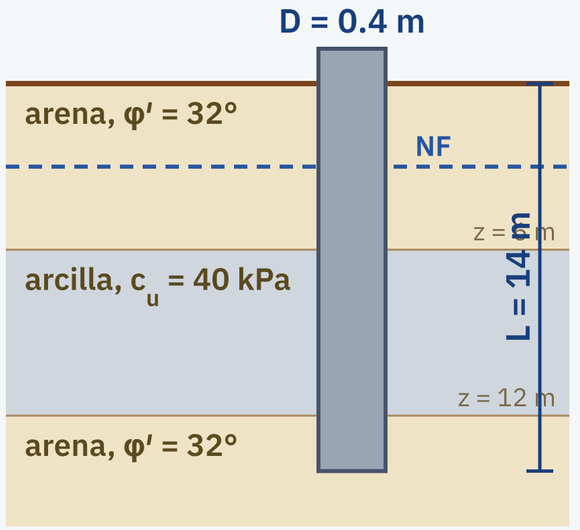
EJEMPLO

Datos

Arena 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Arcilla (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Arena 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Peso específico	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(tres estratos)**
Agua subterránea	**a 3.0 m de profundidad**
Métodos	**hincado, D = 0.4 m; Meyerhof, α, K–δ**
Longitudes	**L = 10, 12, 14 y 16 m**
Datos conocidos	**Ejemplo 2–6 para L = 14 m**

SE PIDE

¿Cómo varía Q_u si la longitud del pilote es de **10, 12 y 16 m**? Explicar la **causa** de la variación.



Solución (1/2)

SOLUCIÓN

1. L = 10 m: punta en arcilla (ejemplo 3); el tramo de arcilla es solo de 6–10 m

$$Q_p = 45.2\ ; \quad Q_s = 160.4 + 148.8 = 309.2\ ; \quad Q_u = \mathbf{354.4}\ \mathrm{kN}$$

2. L = 12 m: la punta queda exactamente en el límite → **apoya en la arena inferior**; la arena 2 aún no entra en el fuste

$$Q_p = 318.0\ ; \quad Q_s = 160.4 + 223.2 = 383.5\ ; \quad Q_u = \mathbf{701.6}\ \mathrm{kN}$$

3. L = 16 m: la arena 2 se incorpora al fuste con un espesor de cuatro metros (σ′ limitada: f constante)

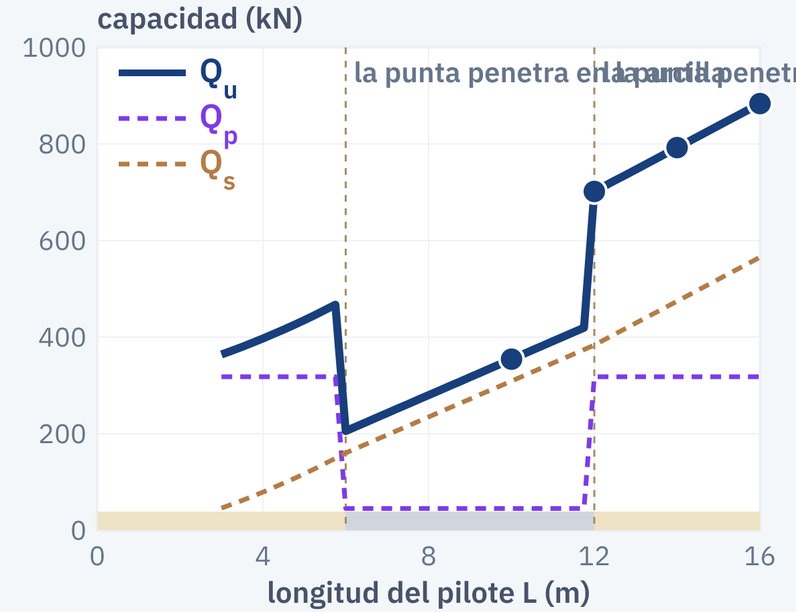
$$Q_p = 318.0\ ; \quad Q_s = 160.4 + 223.2 + 182.0 = 565.5\ ; \quad Q_u = \mathbf{883.6}\ \mathrm{kN}$$

Solución (2/2)

SOLUCIÓN

L (m)	Estrato de la punta	Q_p (kN)	Q_s (kN)	Q_u (kN)	Q_{all} (kN)
10	arcilla	45	309	**354**	118
12	arena	318	384	**702**	234
14	arena	318	475	**793**	264
16	arena	318	566	**884**	295

De 10 m a 12 m: la capacidad aumenta **347 kN** (98 %): de ellos, 273 kN se deben a **la penetración de la punta en la arena**. A partir de 12 m, cada metro aporta solo ≈ 45 kN. En un perfil estratificado, lo que determina la longitud del pilote es **el estrato en el que termina la punta**.



Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Las reglas del pilote perforado también son válidas en un perfil mixto

TEORÍA

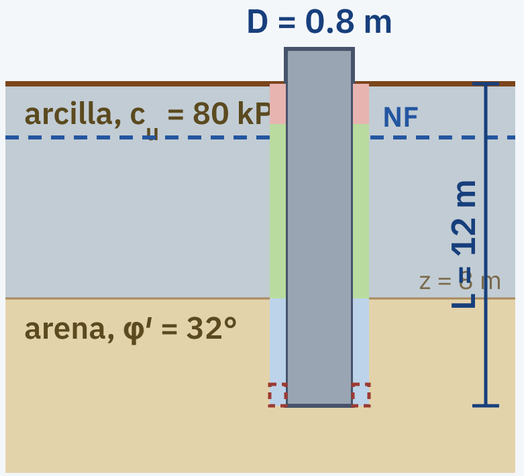
Se perfora el hueco y se vierte el hormigón: el terreno no se desplaza, la arcilla se ablanda en la pared de la perforación y pueden acumularse detritos bajo la base. En un perfil mixto, cada mitad del procedimiento se aplica **donde le corresponde**:

Estratos de arcilla (α): $\alpha^* = 0.55$ ($c_u/p_a \leq 1.5$); en los **1.5 m superiores y 1D inferior**: $\alpha^* = 0$. La ventana pertenece **únicamente a α** y no se traslada a λ ni a β.

Los **estratos de arena** conservan su propia regla K–δ o la de Coyle–Castello; K es del orden de $\mathbf{K_0 = 1 - \sin\varphi'}$, ya que en la perforación el terreno no se desplaza.

Si la **base** está en arcilla, Reese–O'Neill: $q_p = \min[6c_{ub}(1 + 0.2L/D_b), 9c_{ub}, 40p_a]$. c_{ub} es el valor medio de c_u a lo largo de $\mathbf{2D_b}$ bajo la base; si la zona abarca más de un estrato, se pondera por el espesor.

Esta zona debe ser **íntegramente arcilla**: si se extiende a la arena, el módulo se detiene y solicita seleccionar Meyerhof o Vesic.



Rojo: α* = 0 (1.5 m superiores). Verde: α* = 0.55. Azul: K–δ en arena. Rojo discontinuo: 1D inferior, sin ventana en arena.

Enunciado

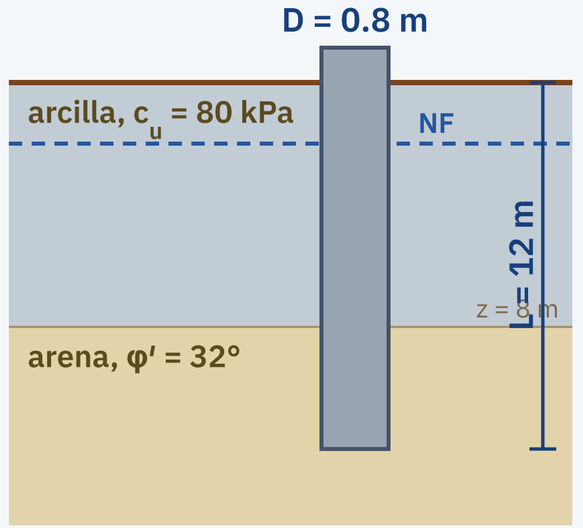
EJEMPLO

Datos

Pilote	**pilote perforado (excavado), sección circular, D = 0.8 m, L = 12 m**
Arcilla (0–8 m)	$c_u = 80\ \text{kPa},\ \gamma = \gamma_{sat} = 18\ \text{kN/m}^3$
Arena (8–20 m)	$\varphi' = 32°,\ \gamma = 18,\ \gamma_{sat} = 19\ \text{kN/m}^3$
Agua subterránea	**a 2.0 m de profundidad**
Para arena	$K = K_0 = 0.47,\ \delta' = 0.75\varphi' = 24°$
Punta	**Meyerhof; FS = 3**

SE PIDE

Determinar la **resistencia por punta**, la **resistencia por fuste** y la **carga admisible** del pilote perforado.



Solución (1/3)

SOLUCIÓN

1 Estrato de arcilla: α* y ventana (se descartan 1.5 m en la parte superior y 1D = 0.8 m en la inferior: 1.5 → 12 − 0.8 = 11.2 m)

$$\alpha^* = 0.55 \ (c_u/p_a = 0.8 \leq 1.5) \qquad L_{eff} = 8 - 1.5 = \mathbf{6.5}\ \mathrm{m}$$

2 Fricción unitaria y resistencia

$$f = \alpha^* c_u = 0.55(80) = 44.0\ \mathrm{kPa} \qquad Q_{s1} = \pi(0.8)(44.0)(6.5) = \mathbf{718.8}\ \mathrm{kN}$$

Solución (2/3)

SOLUCIÓN

3 Estrato de arena (8–12 m): su propia regla K–δ; L′ = min(15D; L) = min(12; 12) = 12 m, es decir, no hay tope dentro del estrato

$$\sigma'(8) = 85.1\ ;\ \sigma'(12) = 121.9\ \text{kPa} \qquad \bar{\sigma}' = \frac{414.1}{4} = 103.5\ \text{kPa}$$

4 Fricción unitaria y resistencia

$$f = K \tan\delta'\, \bar{\sigma}' = 0.47 \tan 24^\circ (103.5) = 21.7\ \text{kPa}$$

$$Q_{s2} = \pi(0.8)(21.7)(4) = \mathbf{217.8}\ \text{kN}$$

El tramo **inferior de 1D** de la ventana α (11.2 – 12 m) cae en el estrato de arena; como la ventana pertenece a α, la arena mantiene su rozamiento también a lo largo de estos 0.8 m.

Solución (3/3)

SOLUCIÓN

5 Punta en arena → regla de la arena (Meyerhof); sin reducción adicional por la perforación, se usa el φ′ introducido

$$q' = \sigma'(12) = 121.9\ \text{kPa} \qquad N_q^* = 81$$

$$q' N_q^* = 9{,}874 > q_l = 2{,}531\ \text{kPa} \ \Rightarrow\ q_p = 2{,}531\ \text{kPa}$$

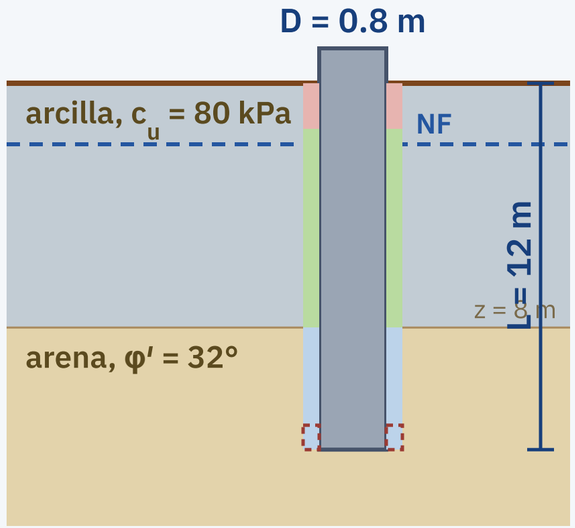
$$Q_p = A_p q_p = 0.5027(2{,}531) = \mathbf{1{,}272}\ \text{kN}$$

6 Capacidad portante total y admisible

$$Q_s = 718.8 + 217.8 = \mathbf{936.6}\ \text{kN}$$

$$Q_u = 1{,}272 + 937 = 2{,}209\ \text{kN}$$

$$Q_{all} = \frac{2{,}209}{3} = \mathbf{736}\ \text{kN}$$



Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Enunciado

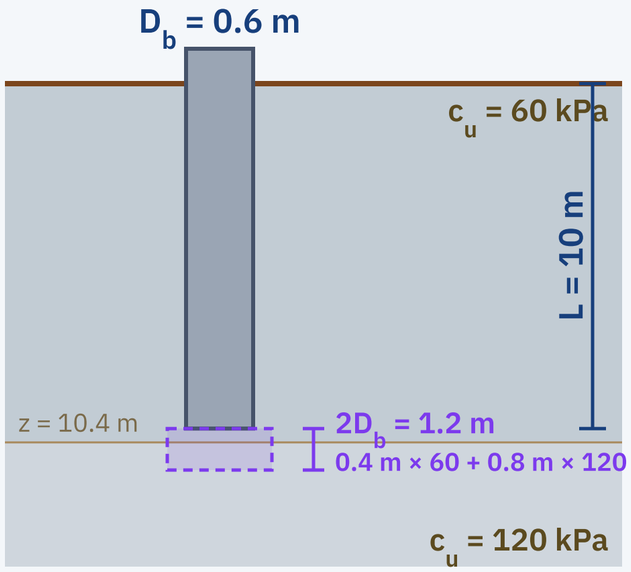
EJEMPLO

Datos

Pilote	**pilote perforado, $D_b = D = 0.6$ m, $L = 10$ m**
Arcilla 1 (0–10.4 m)	$c_u = 60$ kPa
Arcilla 2 (10.4–20 m)	$c_u = 120$ kPa
Base	**Reese–O'Neill; $p_a = 100$ kPa**

SE PIDE

Determinar **c_{ub}** en la zona de **$2D_b$** bajo la base, y los valores de **q_p** y **Q_p**.



Solución

SOLUCIÓN

1 Zona 10 → 10 + 2D$_b$ = 11.2 m; límite en 10.4 m: promedio ponderado por el espesor

$$c_{ub} = \frac{60(0.4) + 120(0.8)}{1.2} = \mathbf{100}\ \mathrm{kPa}$$

2 El menor de los tres valores

$$6c_{ub}\left(1 + 0.2\frac{L}{D_b}\right) = 2{,}600\ ; \quad 9c_{ub} = 900\ ; \quad 40p_a = 4\,000 \ \Rightarrow \ q_p = \mathbf{900}\ \mathrm{kPa}$$

3 Área de la base y resistencia por punta

$$A_b = \frac{\pi(0.6)^2}{4} = 0.2827\ \mathrm{m}^2 \qquad Q_p = 0.2827(900) = \mathbf{254.5}\ \mathrm{kN}$$

Si se hubiera tomado solo el valor en la punta, c$_u$ = 60 kPa, resultaría Q$_p$ = 152.7 kN: la arcilla firme inferior proporciona un **67 %** más.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Un único factor de seguridad, pero con gran incertidumbre

TEORÍA

La capacidad última es la suma de las dos componentes; la capacidad admisible se obtiene aplicando **un único factor de seguridad a la suma completa**:

$$Q_{all} = \frac{Q_p + Q_s}{FS}$$

FS = 2.5 – 4 habitual para un pilote aislado.

Extremo superior: cuando el perfil se conoce con **pocos sondeos**. Un perfil estratificado es justamente este caso: entre sondeos, **los límites son lo más incierto**, y el ejemplo anterior mostró cuánto modifica la capacidad un solo metro de límite.

DOS ASUNTOS EXIGEN CÁLCULOS SEPARADOS

En un perfil estratificado, de forma independiente del cálculo de la capacidad:

- Un estrato blando que se asienta y cuelga del pilote como **fricción negativa**
- **Asentamiento** determinado por el estrato compresible situado debajo de la punta

Reglas según el estrato y el modo de instalación

TEORÍA

Estrato	Fuste (Q_s)	Punta (Q_p): estrato de la punta
Arena	K–δ ($L' = 15D$, un solo valor para todo el pilote) o Coyle–Castello (K $\bar{\sigma}'$ $\tan 0.8\varphi'$)	$q'N^*_q \le q_l$ (Meyerhof), Vesic, Coyle–Castello
Arcilla	$\alpha \cdot \lambda$ (por estrato: extensión) $\cdot \beta$	$9c_u$ (Meyerhof) · $N^*_c(I_{rr})$ (Vesic)
Perforado, arcilla	$\alpha^* = 0.55$; tramo superior de 1.5 m y tramo inferior de $1D = 0$	Reese–O'Neill: media de c_{ub} en $2D_b$
Perforado, arena	$K \approx K_0 = 1 - \sin\varphi'$; no se aplica la ventana	$q'N^*_q$ (φ' introducido)

Cada fila es una selección independiente para el estrato correspondiente; **en un mismo pilote** se emplean tanto la regla de arena como la de arcilla.

Resumen

Puntos clave

La tensión efectiva **se acumula a lo largo de los estratos** y es continua; el rozamiento unitario, en cambio, **presenta saltos en los límites**

La punta se calcula únicamente con la regla del estrato en que se halla; una punta que coincide con un límite se apoya en el estrato **inferior**

Arena: f = Kσ′tanδ′ y **L′ = 15D corresponde a todo el pilote** · **Arcilla**: α, λ (una extensión por estrato), β

La resistencia por **fuste** es la suma de los estratos: $Q_s = p\Sigma f_i \Delta z_i$; lo que determina la longitud es el estrato en el que termina la punta

Pilote perforado: la ventana α* es solo para arcilla/α; si la base está en arcilla, c_{ub} sobre $2D_b$ (puede haber varios estratos)

$Q_{all} = (Q_p + Q_s)/FS$, FS = 2.5 – 4; en obras importantes, **ensayo de carga**

Referencias bibliográficas

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.

Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd ed. Wiley — valores de α de la Tabla 2.

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.

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

O'Neill, M.W. and Reese, L.C. (1999). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-IF-99-025 — el coeficiente α de los pilotes perforados.

Reese, L.C. and O'Neill, M.W. (1989). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA — la expresión de la resistencia por punta de un pilote perforado en arcilla.

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

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.

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning, que reúne estos métodos en la forma que sigue esta página.

NOTA

Las figuras de esta presentación proceden de la página de teoría de GeoTerva; todos los ejemplos numéricos se han obtenido con las propias reglas de cálculo y la biblioteca del módulo, y el módulo da los mismos valores.

GeoTerva

Cálculos geotécnicos en línea

De la teoría a la práctica

Calcular paso a paso en GeoTerva el pilote 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