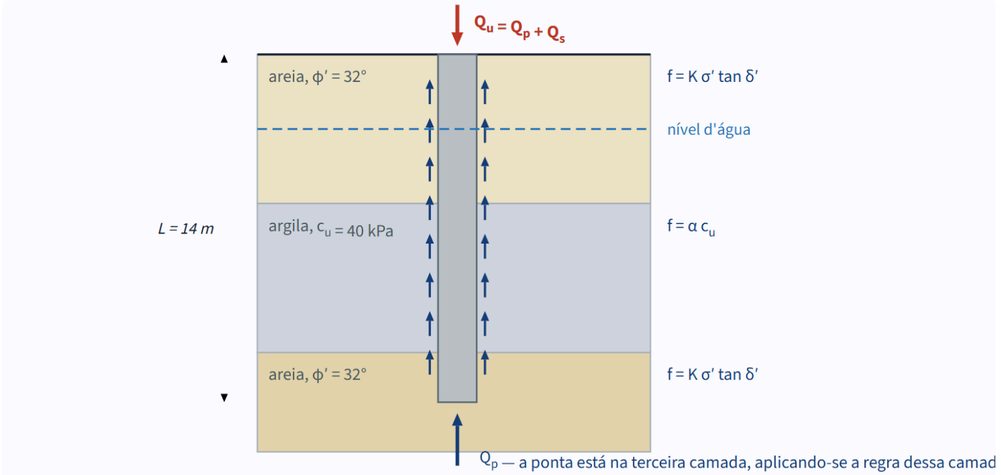
Apresentação de aula de geotecnia · Estacas

Capacidade de carga de estacas em solo estratificado

Aula: capacidade de carga de uma estaca que atravessa camadas de areia e argila. Qual regra vale onde, como a tensão efetiva se acumula ao longo das camadas; exemplo resolvido para cada tema.

- Cálculo camada a camada
- Ponta: camada da ponta
- Regras para areia + argila
- Estaca escavada
- Exemplos resolvidos



Baseia-se na página de teoria do GeoTerva · geoterva.com

Introdução

O que veremos nesta aula?

- O **acúmulo da tensão efetiva camada por camada**; como uma camada de argila, embora sua resistência própria não passe para a areia, influencia pelo seu peso a areia situada abaixo
- Saber que a **resistência de ponta** depende apenas da camada em que a ponta se encontra e é calculada pela regra dessa camada
- Aplicar a regra K–δ **na camada de areia** (a profundidade crítica L′ = 15D refere-se a toda a estaca) e as regras α, λ e β **na camada de argila**
- Somar a resistência do fuste **ao longo das camadas**; interpretar os saltos do atrito nos limites das camadas e o efeito do comprimento da estaca
- Compreender que, na **estaca escavada**, a janela de α^* e c_{ub} podem vir de várias camadas

ROTEIRO DA AULA

Cada tópico é tratado em **três etapas**:

1 · **Teoria**: qual é a regra e por que é assim?

2 · **Enunciado**: dados e o que se pede

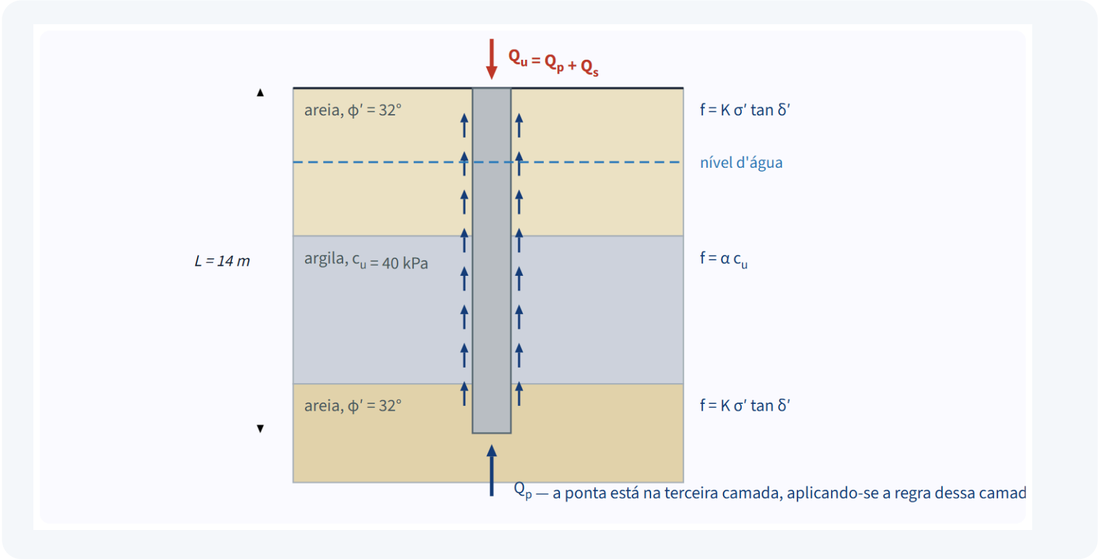
3 · **Solução**: passo a passo, com números

A maioria dos exemplos usa a mesma estaca: estaca de 0.4 m de diâmetro e 14 m de comprimento, atravessando um perfil areia–argila–areia.

Esta apresentação se baseia nas apresentações sobre **estacas em areia** e **estacas em argila**: as regras foram vistas nelas, e aqui se examina qual delas vale em cada caso.

Cada camada responde segundo sua própria regra

TEORIA



A estaca raramente penetra em um único solo. O perfil é composto por **várias camadas**; cada uma é definida como areia ou argila e aplica-se a **regra do seu próprio material**. A capacidade continua tendo duas parcelas, mas já não se obtém de uma única fórmula; é **montada parcela a parcela**:

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

Não há teoria nova: as regras para areia pertencem ao módulo de areia, e as regras para argila, ao módulo de argila.

O que há de novo é o **esquema de cálculo**: qual regra vale em qual trecho do fuste e como a tensão efetiva se acumula a partir das camadas superiores.

A resistência de ponta provém de **uma única camada**; a resistência lateral, da **soma de todas as camadas**.

Tensão contínua, atrito em degraus

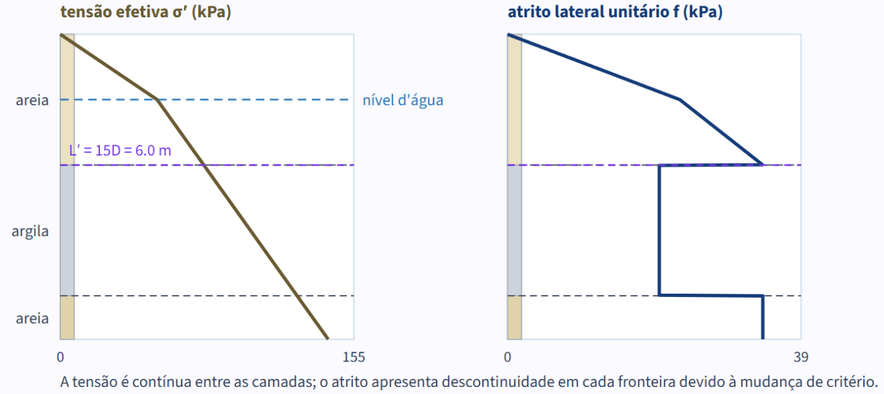
TEORIA

A tensão vertical efetiva é o que liga as camadas: acumula-se **o peso de cada camada superior**; acima do nível do lençol freático usa-se o peso específico úmido e, abaixo dele, o peso específico submerso.

$$\sigma'(z) = \sum \gamma_i h_i \qquad \text{(acima do NA)}$$
$$+ \sum (\gamma_{sat,i} - \gamma_w) h_i \qquad \text{(abaixo do NA)}$$

A camada de argila não transmite à areia a sua própria resistência; porém, **por seu peso**, altera a resistência oferecida pela areia subjacente.

O atrito, porém, não é contínuo: no limite areia–argila, **a própria regra muda** e o atrito unitário pode apresentar um grande salto. Esse salto não é um erro do cálculo, mas a **assinatura** do perfil estratificado.



A tensão é contínua entre as camadas; o atrito apresenta descontinuidade em cada fronteira devido à mudança de critério.

Enunciado

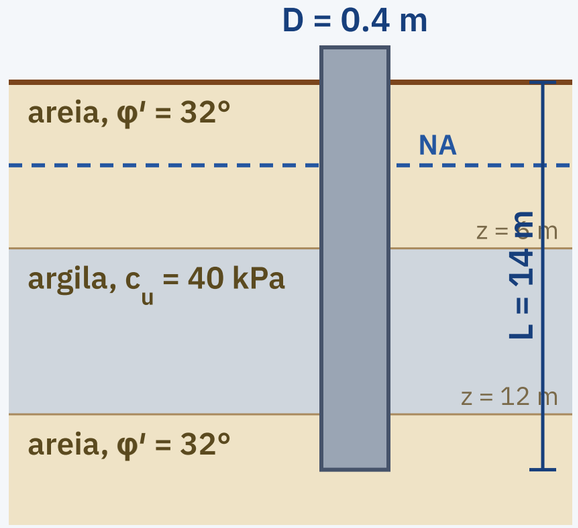
EXEMPLO

Dados

Areia 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Argila (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Areia 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Peso específico	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(três camadas)**
Água subterrânea	**a 3.0 m de profundidade**
Estaca	**cravada, D = 0.4 m, L = 14 m**
Peso específico da água	$\gamma_w = 9.81\ \mathrm{kN/m^3}$

PEDE-SE

Determinar a tensão vertical efetiva nas profundidades de **3, 6, 12 e 14 m** (14 m = ponta da estaca).



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Até o NA (3 m): toda a camada está úmida, γ = 17

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

2 6 m (limite areia–argila): abaixo do nível do lençol freático, γ′ = γ_{sat} − γ_w = 18 − 9.81

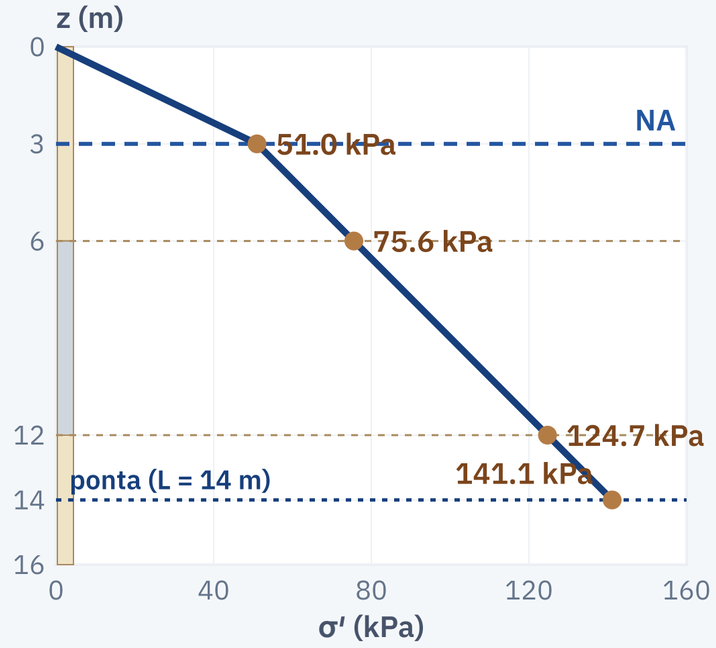
$$\sigma'(6) = 51.0 + (18 - 9.81)(3) = \mathbf{75.6}\ \text{kPa}$$

3 12 m (limite argila–areia): o γ_{sat} da argila também é 18

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

4 14 m (ponta da estaca)

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



Solução (2/2)

SOLUÇÃO

5 Em cada trecho, a área do diagrama de σ′ (trapézio); essas áreas fornecerão a tensão média no cálculo do 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′ é **contínua ao longo das camadas**: não há salto na fronteira areia–argila; a inclinação muda apenas no NA e onde γ′ muda. Essas três áreas serão usadas nos Exemplos 4 e 5 como a média $\bar{\sigma}'$.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

A ponta consulta apenas a sua camada

TEORIA

A resistência de ponta pertence a **uma única camada**: aquela em que se encontra a ponta da estaca. É calculada conforme o material dessa camada; as camadas superiores atuam apenas por meio de σ′ (**em ponta em areia**) e **não exercem nenhuma influência em ponta em argila**.

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

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

A estaca cuja ponta coincide **exatamente com um limite** é considerada apoiada na camada **abaixo** do limite.

Coyle–Castello é uma correlação para **areia**; não tem significado na ponta em argila e, mesmo que seja selecionada, a regra da argila continua valendo.



Na ponta em areia, σ′ e N^*_q são determinantes; na ponta em argila, apenas o valor de c_u dessa camada.

Enunciado

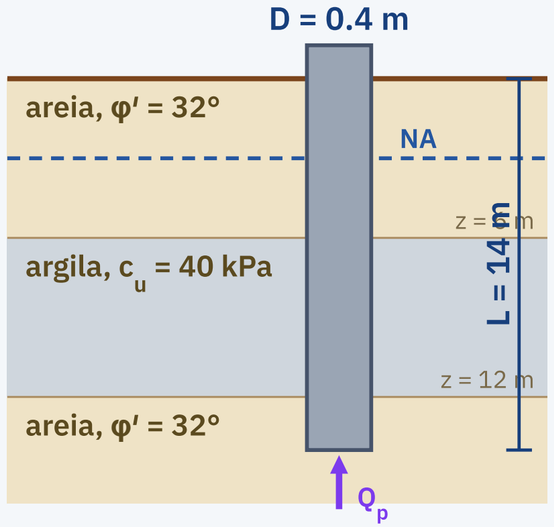
EXEMPLO

Dados

Areia 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Argila (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Areia 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Peso específico	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(três camadas)**
Água subterrânea	**a 3.0 m de profundidade**
Estaca	**cravada, seção circular, D = 0.4 m, L = 14 m**
Método da ponta	**Meyerhof**
Pressão atmosférica	$p_a = 100\ \mathrm{kPa}$
Tensão efetiva na ponta	$q' = \sigma'(14) = 141.1\ \mathrm{kPa}$ **(Exemplo 1)**

PEDE-SE

Identificar a camada em que a ponta se encontra e determinar a **resistência de ponta** Q_p.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

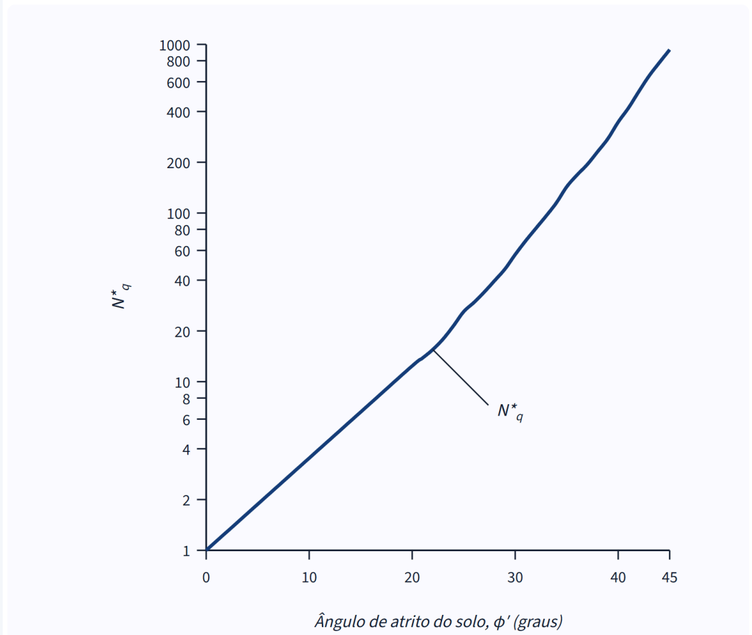
1 Camada da ponta: L = 14 m, na areia entre 12–16 m → regra da areia (a argila acima não influencia a ponta)

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

2 N^*_q, do ábaco de Meyerhof, para $\varphi' = 32°$; depois os dois valores lado a lado

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

O valor de N^*_q no ábaco (ao lado) é 81; $q'N^*_q$ = 11,428 kPa, muito maior que o valor-limite q_l = 2,531 kPa: **o limite governa**.



Solução (2/2)

SOLUÇÃO

3 Resistência de ponta unitária: o menor dos dois

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

4 Área da ponta da estaca e resistência de ponta

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

Resistência de ponta de **318.0 kN**. Como a ponta da estaca está em areia, vale a regra da areia; como o limite está ativo, o valor de σ′ não altera o resultado neste exemplo.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Enunciado

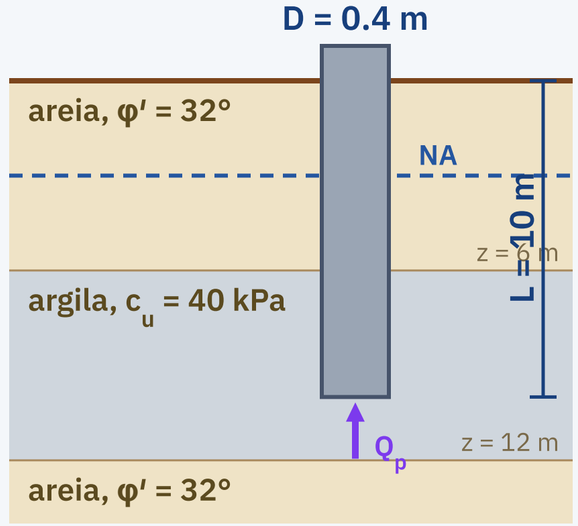
EXEMPLO

Dados

Areia 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Argila (6–12 m)	$c_u = 40\ \text{kPa}$
Areia 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Peso específico	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \text{kN/m}^3$ **(três camadas)**
Água subterrânea	**a 3.0 m de profundidade**
Estaca	**mesma estaca, mas L = 10 m**
Métodos de ponta	**Meyerhof e Vesic**
Pressão atmosférica	$p_a = 100\ \text{kPa}$

PEDE-SE

Se a estaca for encurtada para 10 m, determinar em qual camada a ponta permanece e obter a **resistência de ponta** por dois métodos.



Solução

SOLUÇÃO

1 Camada da ponta: L = 10 m, na argila entre 6–12 m → regra da argila (a areia e σ′ deixam de entrar no 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: $I_{rr} = I_r = 347(c_u/p_a) - 33$

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

Na estaca com a ponta em areia, Q_p era de **318 kN**; ao ficar na argila, passa a **45 – 51 kN**: cerca de um sétimo. Prolongar a mesma estaca em 2 m, de modo que a ponta penetre na areia, aumenta bruscamente a resistência de ponta.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

K–δ: a profundidade crítica pertence à estaca inteira

TEORIA

Na camada de areia, o fuste resiste por atrito contra a tensão efetiva horizontal. Cada camada de areia adota **os seus** valores de K e δ′:

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

L′ refere-se à **estaca inteira**, e não à camada: abaixo de L′, o valor de σ′ é mantido igual ao valor em L′.

Uma camada de areia profunda fornece atrito lateral unitário **constante ao longo da camada**, qualquer que seja a posição de seu limite.

Opção: **Coyle–Castello**. K próprio da camada (do ábaco), δ′ = 0.8φ′ e o valor médio de σ′ da camada; não há profundidade crítica, a média cumpre essa função.

COYLE–CASTELLO (POR CAMADA)

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

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

No método K–δ, δ′ costuma ser tomado no intervalo de 0.75φ′ – 0.8φ′; nesta apresentação, serão usados **δ′ = 0.8φ′ = 25.6°** e **K = 1.0**.

Enunciado

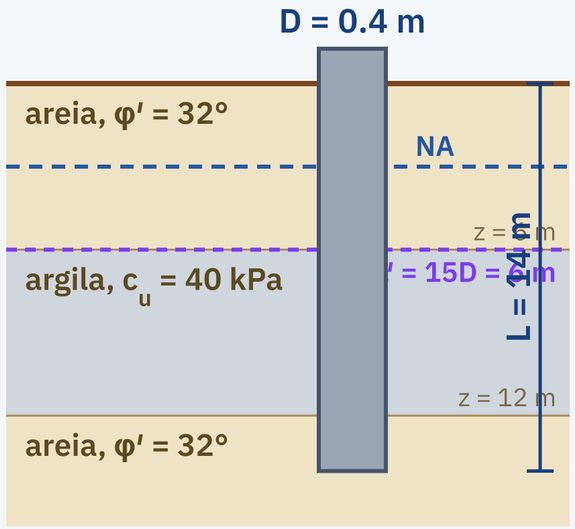
EXEMPLO

Dados

Areia 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Argila (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Areia 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Peso específico	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(três camadas)**
Água subterrânea	**a 3.0 m de profundidade**
Estaca	**cravada, D = 0.4 m, L = 14 m**
Perímetro	$p = \pi D = 1.257\ \mathrm{m}$
Nas camadas de areia	$K = 1.0,\ \delta' = 0.8\varphi' = 25.6^\circ$ **(inserir estes valores no módulo; o módulo abre com K = 0.66 e δ′ = 24°)**

PEDE-SE

Determinar a resistência lateral das **camadas de areia** (0–6 m e 12–14 m) pelo método K–δ. Profundidade crítica L′ = 15D.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Profundidade crítica (única para toda a estaca)

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

2 Areia 1 (0–6 m): a camada está inteiramente dentro de L′, sem limitação; σ′ médio = área / espessura

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

3 Atrito unitário e resistência

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

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

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

4 Areia 2 (12–14 m): inteiramente abaixo de L′ → o valor de σ′ é mantido no valor que tem em L′

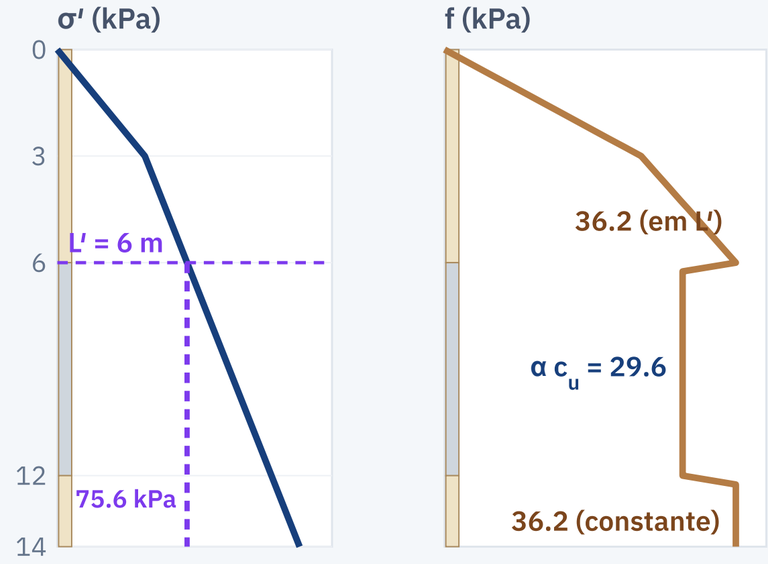
$$\sigma' = \sigma'(L') = 75.6\ \text{kPa}$$

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

5 Resistência (espessura 14 − 12 = 2 m)

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

Sem a profundidade crítica, este trecho resultaria em σ′ = 132.9 kPa, f = 63.7 kPa e Q_{s3} = 160 kN. O **limitador L′** reduz em **69 kN** o trecho profundo da areia.



Verificar a solução no GeoTerva ↗

Também na argila, cada camada escolhe o seu método

TEORIA

Na camada de argila, o fuste resiste por **adesão** ou por **tensão efetiva**; os três métodos do módulo de argila podem ser usados por camada:

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

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

α: **não depende** da profundidade dentro da camada; o atrito é constante ao longo da camada (uniforme).

λ e β restabelecem a tensão efetiva; produzem um **degrau**, dependendo das camadas sobrejacentes.

UMA NOTA FRANCA

Vijayvergiya e Focht escreveram λ como **uma única média para todo o comprimento embutido**. Aplicá-lo separadamente a cada camada de argila em um perfil estratificado (λ no comprimento L, com os valores médios de σ′ e c_u dessa camada) é **uma extensão do método específica deste programa**; o módulo a indica em toda parte.

φ'_R e OCR são **informados**, não obtidos do solo por correlação (o módulo abre com 30° e 1).

Enunciado

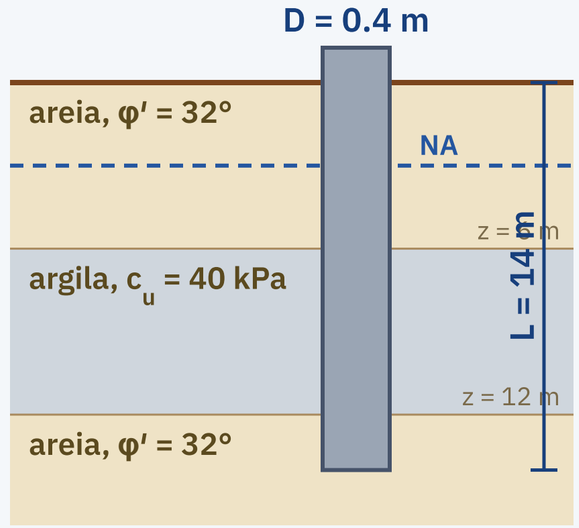
EXEMPLO

Dados

Areia 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Argila (6–12 m)	$c_u = 40\ \text{kPa}$
Areia 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Peso específico	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \text{kN/m}^3$ **(três camadas)**
Água subterrânea	**a 3.0 m de profundidade**
Estaca	**cravada, D = 0.4 m, L = 14 m, p = 1.257 m**
σ′ médio da argila	$\bar{\sigma}'_2 = A_{6-12}/6 = 100.1\ \text{kPa}$ **(Exemplo 1)**
para β	$\varphi'_R = 30^\circ,\ OCR = 1$
para α	$p_a = 100\ \text{kPa}$**, α da tabela**

PEDE-SE

Determinar a resistência lateral da camada de argila (6–12 m) pelos métodos **α, λ e β**.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Método α: α obtido da tabela 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 obtido na tabela em função do **comprimento da estaca** (L = 14 m) ($\lambda_{10} = 0.245$; $\lambda_{15} = 0.200$)

$$\lambda = 0.209$$

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

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

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

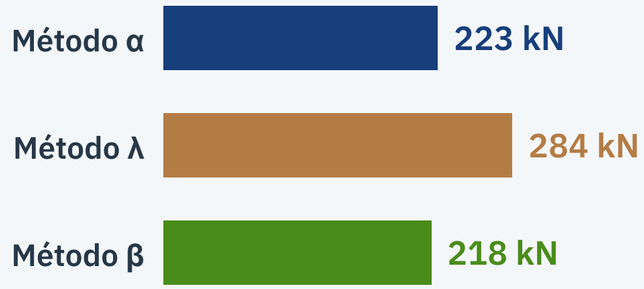
3 Método β: $\varphi'_R = 30°$, OCR = 1

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

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

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

Os três métodos fornecem **223**, **284** e **218 kN** para a mesma camada de argila: α e β são próximos entre si, enquanto λ é cerca de 27% maior. A diferença decorre das hipóteses em que os métodos se baseiam; o uso de λ por camada é, além disso, uma extensão.



Verificar a solução no GeoTerva ↗

Uma única integral: ao longo da estaca

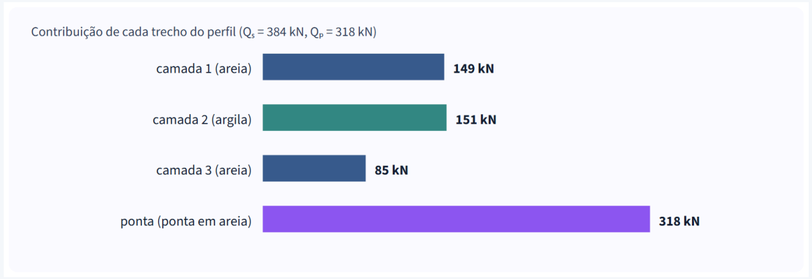
TEORIA

A resistência lateral é a integral do atrito ao longo da estaca multiplicada pelo perímetro. O cálculo é numérico; o limite pode estar **em qualquer ponto**, e uma estaca que termina no meio de uma camada não requer tratamento especial:

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

Visto assim, a estratificação deixa de ser um problema e passa a ser uma **questão de projeto**: **qual trecho** do perfil sustenta a estaca?

Como varia a capacidade se a estaca for prolongada além do próximo limite de camada ou encurtada?



Contribuição de cada trecho da estaca do exemplo (Q_s = 475 kN, Q_p = 318 kN).

Enunciado

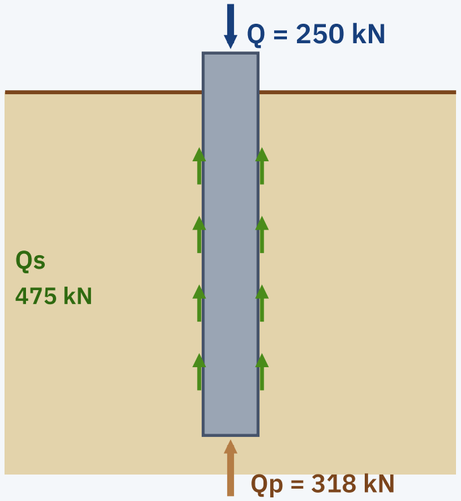
EXEMPLO

Dados

Resistência de ponta	Q_p = 318.0 kN (Exemplo 2)
Areia 1 (0–6 m)	Q_{s1} = 160.4 kN (Exemplo 4)
Argila (6–12 m)	Q_{s2} = 223.2 kN (método α, Exemplo 5)
Areia 2 (12–14 m)	Q_{s3} = 91.0 kN (Exemplo 4)
Fator de segurança	FS = 3
Carga de trabalho na estaca	Q = 250 kN

PEDE-SE

Determinar a capacidade de carga **última** e **admissível** da estaca; a carga de trabalho é suficiente?



Solução

SOLUÇÃO

1 Resistência lateral: soma dos trechos

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

2 Capacidade de carga última

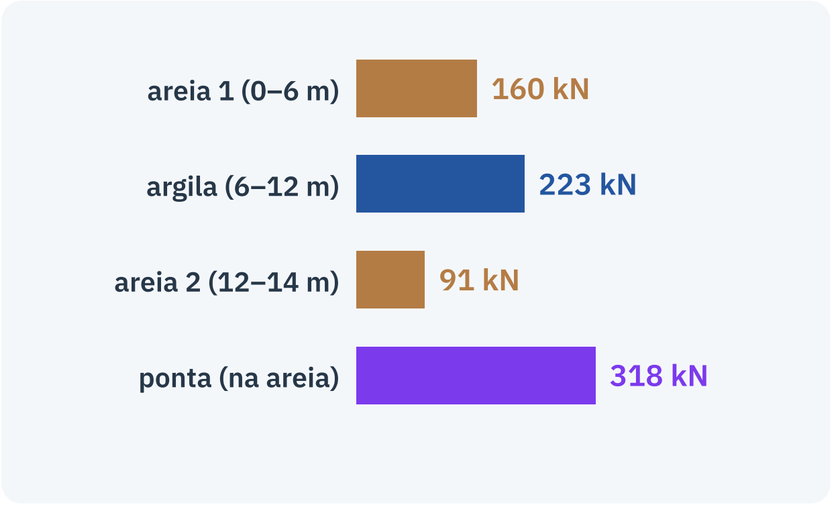
$$Q_u = Q_p + Q_s = 318.0 + 474.5 = \mathbf{792.6}\ \text{kN}$$

3 Capacidade de carga admissível e verificação

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

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

A taxa de utilização é 0.95. A camada de argila corresponde a apenas 43% do comprimento da estaca, mas fornece 47% da resistência do fuste: depois da profundidade crítica a areia deixa de ganhar σ′, enquanto a argila fornece o mesmo valor α c_u em qualquer profundidade.



Verificar a solução no GeoTerva ↗

Enunciado

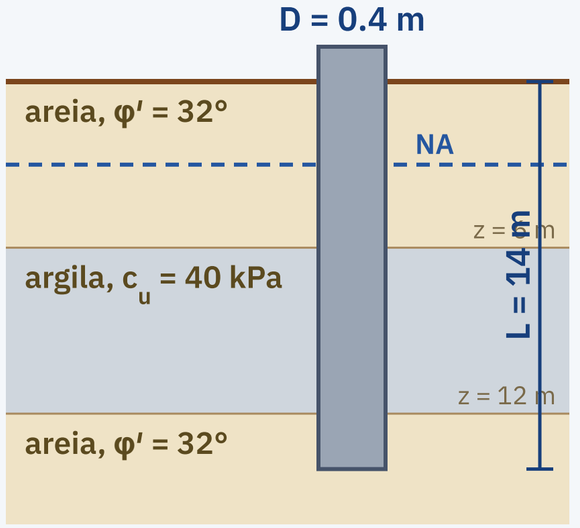
EXEMPLO

Dados

Areia 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Argila (6–12 m)	$c_u = 40\ \text{kPa}$
Areia 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Peso específico	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \text{kN/m}^3$ **(três camadas)**
Água subterrânea	**a 3.0 m de profundidade**
Métodos	**cravada, D = 0.4 m; Meyerhof, α, K–δ**
Comprimentos	**L = 10, 12, 14 e 16 m**
Dados conhecidos	**Exemplo 2–6 para L = 14 m**

PEDE-SE

Como varia Q_u se o comprimento da estaca for **10, 12 e 16 m**? Explicar a **razão** da variação.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1. L = 10 m: ponta na argila (Exemplo 3); o trecho em argila é somente 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: a ponta está exatamente no limite → **apoia-se na areia inferior**; a areia 2 ainda não entra no 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: a areia 2 entra no fuste com espessura de quatro metros (σ′ limitada: f constante)

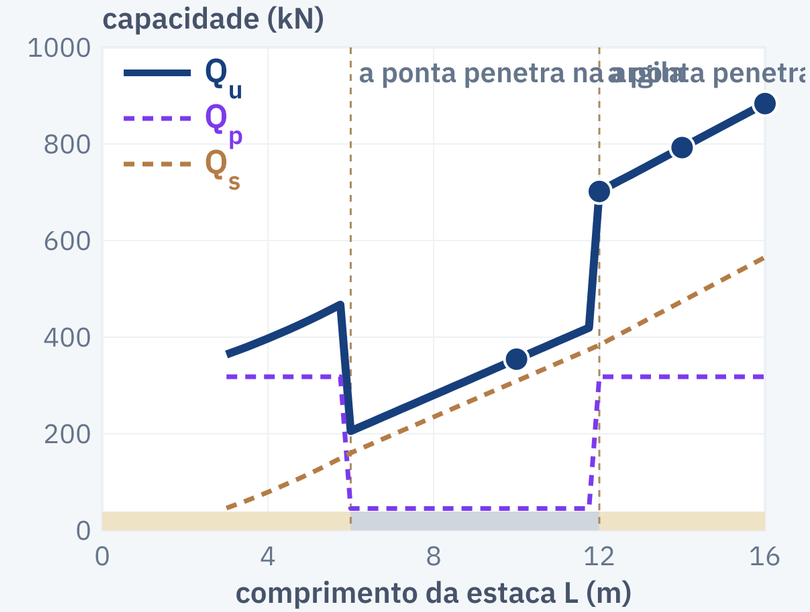
$$Q_p = 318.0\ ; \quad Q_s = 160.4 + 223.2 + 182.0 = 565.5\ ; \quad Q_u = \mathbf{883.6}\ \mathrm{kN}$$

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

L (m)	Camada da ponta	Q_p (kN)	Q_s (kN)	Q_u (kN)	Q_{all} (kN)
10	argila	45	309	**354**	118
12	areia	318	384	**702**	234
14	areia	318	475	**793**	264
16	areia	318	566	**884**	295

10 m → 12 m: a capacidade aumenta **347 kN** (98%): destes, 273 kN decorrem da **penetração da ponta na areia**. Além de 12 m, cada metro acrescenta apenas ≈ 45 kN. Em um perfil estratificado, o que determina o comprimento da estaca é **a camada em que a ponta termina**.



Verificar a solução no GeoTerva ↗

As regras da estaca escavada valem também em perfil misto

TEORIA

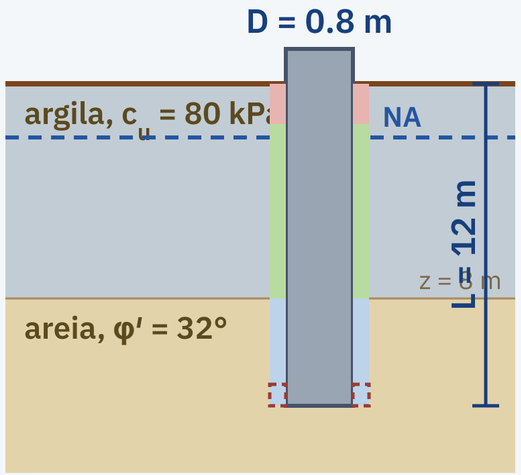
Abre-se o furo e lança-se o concreto: o solo não é deslocado, a argila amolece na parede do furo e pode haver acúmulo de material solto sob a base. Em perfil misto, cada metade do procedimento é aplicada **no trecho a que pertence**:

Camadas de argila (α): $\alpha^* = 0.55$ ($c_u/p_a \le 1.5$); ao longo dos **1.5 m superiores e de 1D inferior**, $\alpha^* = 0$. A janela pertence **apenas a α** e não se estende a λ e β.

As **camadas de areia** mantêm sua própria regra K–δ ou de Coyle–Castello; K é da ordem de **$K_0 = 1 - \sin\varphi'$**, pois na perfuração o solo não é deslocado.

Se a **base** estiver em argila, aplica-se Reese–O'Neill: $q_p = \min[6c_{ub}(1 + 0.2L/D_b), 9c_{ub}, 40p_a]$. c_{ub} é a média de c_u ao longo de **$2D_b$** abaixo da base; se a zona abrange mais de uma camada, a média é ponderada pela espessura.

Esta zona deve ser **inteiramente argila**: se atingir a areia, o módulo para e exige que se selecione Meyerhof ou Vesic.



Vermelho: α* = 0 (1.5 m superiores). Verde: α* = 0.55. Azul: K–δ na areia. Vermelho tracejado: 1D inferior, sem janela na areia.

Enunciado

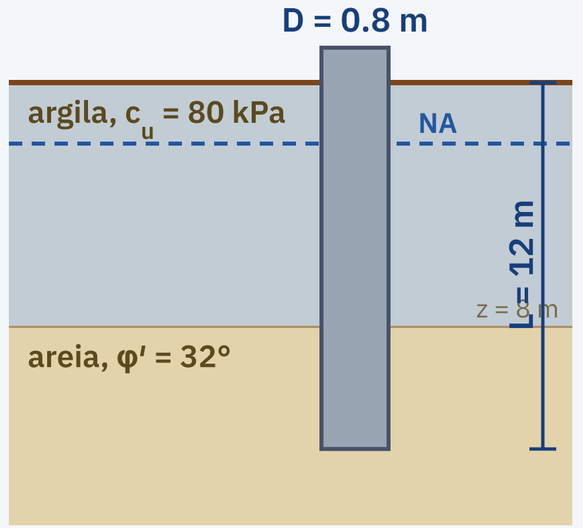
EXEMPLO

Dados

Estaca	**estaca escavada (perfurada), seção circular, D = 0.8 m, L = 12 m**
Argila (0–8 m)	$c_u = 80\ \mathrm{kPa},\ \gamma = \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$
Areia (8–20 m)	$\varphi' = 32^\circ,\ \gamma = 18,\ \gamma_{sat} = 19\ \mathrm{kN/m^3}$
Água subterrânea	**a 2.0 m de profundidade**
Para areia	$K = K_0 = 0.47,\ \delta' = 0.75\varphi' = 24^\circ$
Ponta	**Meyerhof; FS = 3**

PEDE-SE

Determinar a **resistência de ponta**, a **resistência lateral** e a **capacidade de carga admissível** da estaca escavada.



Solução (1/3)

SOLUÇÃO

1 Camada de argila: α* e janela (descartam-se os 1.5 m superiores e 1D = 0.8 m inferiores: 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 Atrito unitário e resistência

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

Solução (2/3)

SOLUÇÃO

3 Camada de areia (8–12 m): regra K–δ própria; L′ = min(15D; L) = min(12; 12) = 12 m, ou seja, não há limitação dentro da camada

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

4 Atrito unitário e resistência

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

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

O trecho **1D inferior** da janela de α (11.2 – 12 m) cai na camada de areia; como a janela pertence a α, a areia mantém seu atrito também ao longo desses 0.8 m.

Solução (3/3)

SOLUÇÃO

5 Ponta em areia → regra para areia (Meyerhof); sem redução adicional pela perfuração, utiliza-se o φ′ informado

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

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

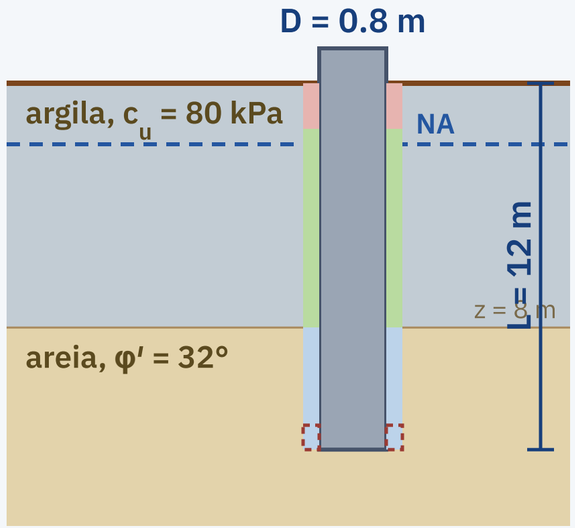
$$Q_p = A_p q_p = 0.5027(2{,}531) = \mathbf{1{,}272}\ \text{kN}$$

6 Capacidade de carga total e admissível

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

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

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



Verificar a solução no GeoTerva ↗

Enunciado

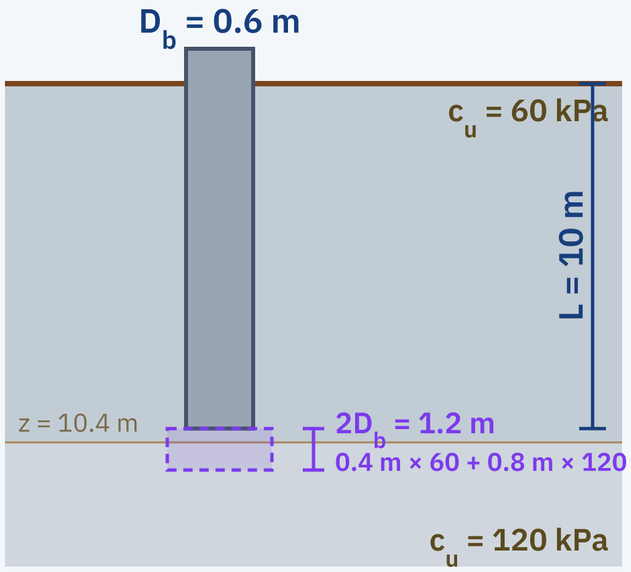
EXEMPLO

Dados

Estaca	**estaca escavada, $D_b = D = 0.6$ m, $L = 10$ m**
Argila 1 (0–10.4 m)	$c_u = 60\ \mathrm{kPa}$
Argila 2 (10.4–20 m)	$c_u = 120\ \mathrm{kPa}$
Base	**Reese–O'Neill; $p_a = 100$ kPa**

PEDE-SE

Determinar **c_{ub}** na zona de **$2D_b$** abaixo da base e os valores de **q_p** e **Q_p**.



Solução

SOLUÇÃO

1 Zona 10 → 10 + 2D$_b$ = 11.2 m; limite em 10.4 m: média ponderada pela espessura

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

2 O menor dos três 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 da base e resistência de ponta

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

Se apenas o valor da ponta, c$_u$ = 60 kPa, tivesse sido adotado, resultaria Q$_p$ = 152.7 kN: a argila mais rija abaixo fornece **67%** a mais.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Um único fator de segurança, mas a incerteza é grande

TEORIA

A capacidade última é a soma das duas componentes; a capacidade admissível obtém-se aplicando **um único fator de segurança sobre a soma total**:

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

Valor usual para estaca isolada: **FS = 2.5 – 4**.

Extremo superior: quando o perfil é conhecido a partir de **poucas sondagens**. Um perfil estratificado é exatamente esse caso: entre as sondagens, **os limites entre camadas são o ponto mais incerto**, e o exemplo acima mostrou o quanto um único metro de limite desloca a capacidade.

DUAS QUESTÕES EXIGEM CÁLCULOS SEPARADOS

Em perfil estratificado, separadamente do cálculo da capacidade:

- Uma camada mole que recalca e fica pendurada na estaca como **atrito lateral negativo**
- **Recalque** governado pela camada compressível abaixo da ponta

Regras por camada e tipo de instalação

TEORIA

Camada	Fuste (Q_s)	Ponta (Q_p): camada da ponta
Areia	K–δ (L′ = 15D, um único valor para toda a estaca) ou Coyle–Castello (K σ′ tan0.8φ′)	$q'N^*_q \le q_l$ (Meyerhof), Vesic, Coyle–Castello
Argila	α · λ (por camada: extensão) · β	$9c_u$ (Meyerhof) · $N^*_c(I_{rr})$ (Vesic)
Escavada, argila	α* = 0.55; 1.5 m superiores e 1D inferior = 0	Reese–O'Neill: média de $c_{ub} = 2D_b$
Escavada, areia	$K \approx K_0 = 1 - \sin\varphi'$; a janela não se aplica	$q'N^*_q$ (φ′ informado)

Cada linha é uma escolha independente para a camada correspondente; **na mesma estaca** usam-se tanto a regra da areia quanto a da argila.

Resumo

Pontos-chave

A tensão efetiva **se acumula ao longo das camadas** e é contínua; já o atrito unitário **salta nos limites**

A ponta é calculada apenas pela regra da camada em que se encontra; uma ponta que coincide com o limite assenta na camada **inferior**

Areia: f = Kσ′tanδ′ e **L′ = 15D vale para toda a estaca** · **Argila**: α, λ (uma extensão por camada), β

A resistência do **fuste** é a soma das parcelas das camadas: $Q_s = p\Sigma f_i \Delta z_i$; o que define o comprimento é a camada em que a ponta termina

Estaca escavada: a janela α* serve apenas para argila/α; se a base estiver em argila, c_{ub} ao longo de $2D_b$ (pode haver várias camadas)

$Q_{all} = (Q_p + Q_s)/FS$, FS = 2.5 – 4; em obras de grande porte, **prova de carga**

Referências 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. e Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice, 3ª ed. Wiley — valores de α da Tabela 2.

Coyle, H.M. e 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 — o α para estaca escavada.

Reese, L.C. e O'Neill, M.W. (1989). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA — a expressão base para estacas escavadas em argila.

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, 8ª ed. Cengage Learning, obra que consolida os métodos formulados nesta página.

NOTA

As figuras desta apresentação foram extraídas da página de Teoria do GeoTerva; todos os exemplos numéricos foram gerados com as regras e a biblioteca de cálculo do próprio módulo, e o módulo fornece os mesmos valores.

GeoTerva

Cálculos geotécnicos on-line

Da teoria à prática

Calcular, passo a passo no GeoTerva, a estaca do exemplo desta apresentação: os números são os mesmos.

Abrir o módulo →

Página de teoria →

Abrir no celular
Os módulos de teste não exigem cadastro.