Apresentação de aula de geotecnia · Estacas

Capacidade de carga de estaca em argila

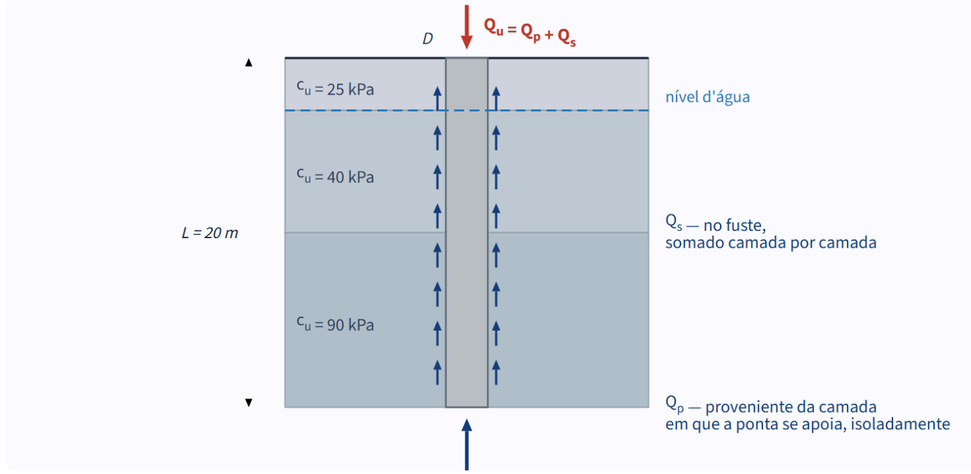
Aula: resistência de ponta não drenada, atrito lateral pelos métodos α, λ e β, estaca escavada. A teoria de cada método, seguida de um exemplo resolvido.

Meyerhof · Vesic

Métodos α · λ · β

Estaca escavada

Exemplos resolvidos



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

Introdução

O que veremos nesta aula?

- Poder explicar por que a argila é tratada como **não drenada** ($\varphi = 0$) e onde a tensão efetiva ainda entra em jogo
- Calcular a **resistência de ponta** por dois métodos: Meyerhof ($N^*_c = 9$) e Vesic (rigidez)
- Calcular o atrito lateral com **três abordagens**: α, λ e β
- Aplicar as regras específicas da **estaca escavada**: $\alpha^* = 0$ nos dois comprimentos, expressão própria para a base
- Chegar à **capacidade de carga admissível** e interpretar em conjunto os resultados das abordagens

ROTEIRO DA AULA

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

1 · **Teoria**: como o método funciona e por quê?

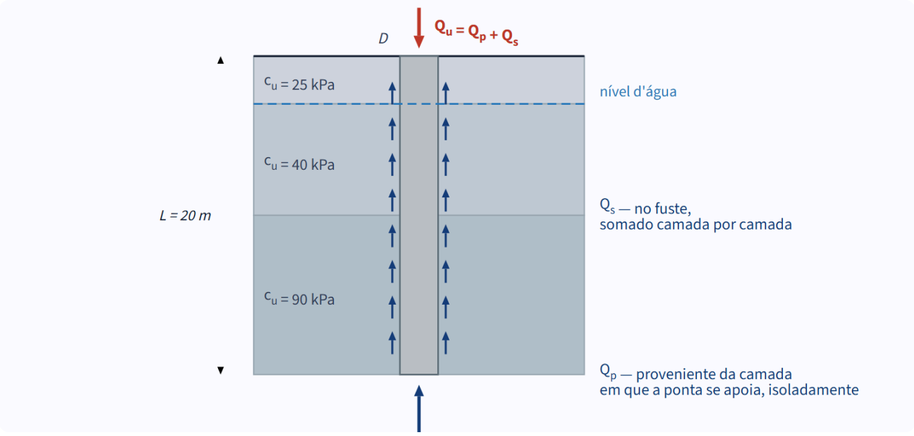
2 · **Enunciado**: dados e o que se pede

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

A maioria dos exemplos utiliza a mesma estaca: uma estaca tubular de 20 m de comprimento, que atravessa três camadas de argila.

A carga é transferida por dois caminhos

TEORIA



A estaca transfere a carga ao solo **simultaneamente por dois caminhos**: a argila abaixo da ponta resiste como uma fundação profunda, com **resistência de ponta** (Q_p), e a argila ao longo do fuste resiste por **adesão** (Q_s).

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

Na argila, a **resistência lateral** é somada camada a camada; a **resistência de ponta** provém apenas da camada em que a ponta se encontra.

Em um perfil típico, a ponta é uma parcela muito pequena do total: na estaca do exemplo, cerca de **um nono**; o fuste responde por cerca de oito nonos. A incerteza também está principalmente no fuste.

Nesta aula: **estaca isolada**, argila, cravada ou escavada, de seção constante.

Por que a argila é tratada com φ = 0?

TEORIA

Em argila saturada, a carga da estrutura chega **muito mais rápido** do que a água consegue drenar; a argila é cisalhada **sem variação de volume**. Nesse caso a resistência é um único número: a **resistência ao cisalhamento não drenada** c_u, e o ângulo de atrito é nulo.

$$\varphi = 0 \qquad \tau_f = c_u$$

Grande diferença em relação à areia: a resistência já não cresce em proporção à tensão efetiva. Uma estaca em argila não é “uma estaca em areia com outros números”.

Ainda assim, **dois métodos** usam a tensão efetiva: o método λ (a sua média ao longo do comprimento) e o método β (que depende inteiramente dela). Por isso o **nível do lençol freático** também é importante aqui; ele não afeta a resistência de ponta nem o método α.

TENSÃO EFETIVA (PARA λ E β)

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

γ_W = 9.81 kN/m³

Em solo estratificado, a inclinação de σ′ muda em cada camada e no nível do lençol freático

Enunciado

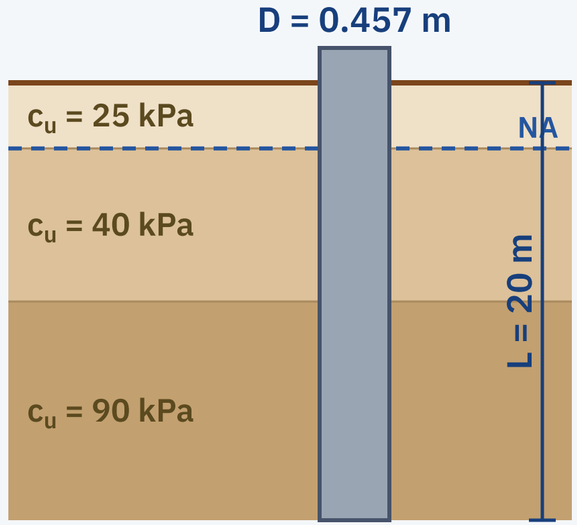
EXEMPLO

Dados

Argila 1 (0–3 m)	$c_u = 25\ \text{kPa},\ \gamma = 16\ \text{kN/m}^3$
Argila 2 (3–10 m)	$c_u = 40\ \text{kPa},\ \gamma = 17\ \text{kN/m}^3$
Argila 3 (10–20 m)	$c_u = 90\ \text{kPa},\ \gamma = 18\ \text{kN/m}^3$
Lençol freático (NA)	**a 3.0 m de profundidade**
Estaca	**estaca tubular, D = 0.457 m, L = 20 m**
Peso específico da água	$\gamma_w = 9.81\ \text{kN/m}^3$

PEDE-SE

Determinar a **tensão vertical efetiva** nos limites das camadas (3, 10 e 20 m) e, ao longo do comprimento, a **tensão efetiva média** $\bar{\sigma}'_0$.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 3 m (nível do lençol freático) e limites das camadas: abaixo do nível do lençol freático, $\gamma' = \gamma - \gamma_w$

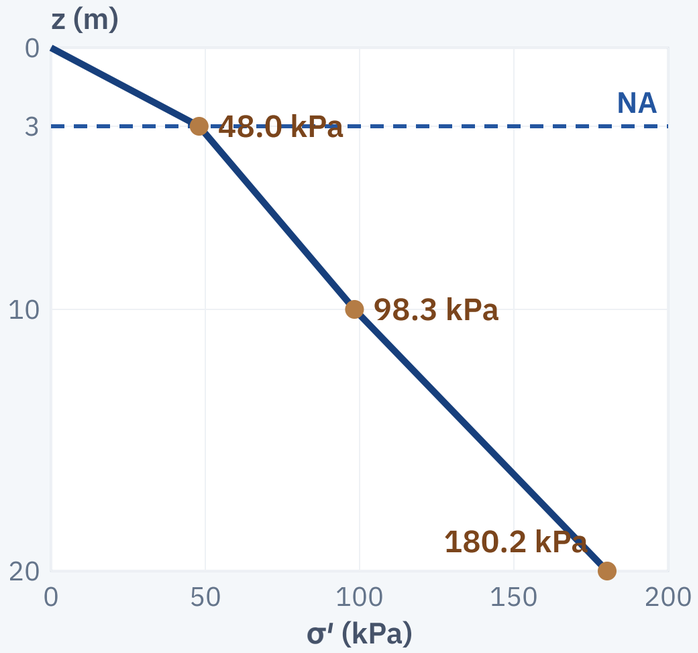
$$\sigma'(3) = 16(3) = \mathbf{48.0}\ \text{kPa}$$

2 profundidade de 10 m (fim da segunda camada)

$$\sigma'(10) = 48.0 + (17 - 9.81)(7) = \mathbf{98.3}\ \text{kPa}$$

3 Profundidade de 20 m (ponta da estaca)

$$\sigma'(20) = 98.3 + (18 - 9.81)(10) = \mathbf{180.2}\ \text{kPa}$$



Solução (2/2)

SOLUÇÃO

4 Área do diagrama de σ′ em cada camada (trapézio)

$$A_1 = \tfrac{1}{2}(0 + 48.0)(3) = 72.0$$
$$A_2 = \tfrac{1}{2}(48.0 + 98.3)(7) = 512.2$$
$$A_3 = \tfrac{1}{2}(98.3 + 180.2)(10) = 1{,}392.8$$

5 Tensão efetiva média: área total / comprimento

$$\bar{\sigma}'_o = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{L} = \frac{1{,}977.0}{20} = \mathbf{98.85}\ \mathrm{kPa}$$

A média é menor que a metade do valor na extremidade (98.8 < 90.1): a tensão não aumenta linearmente com a profundidade; a inclinação muda no nível do lençol freático. Este valor de $\bar{\sigma}'_o$ será usado no método λ.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Resistência de ponta: argila abaixo da ponta da estaca

TEORIA

Na argila saturada não drenada, o ângulo de atrito é nulo; a **resistência de ponta última líquida** da estaca é o produto da coesão não drenada da argila abaixo da ponta por um coeficiente:

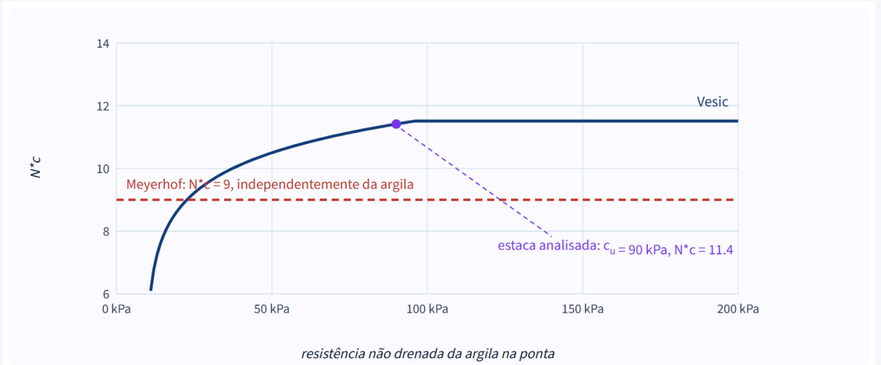
$$Q_p = A_p\, q_p = A_p\, c_u\, N_c^*$$

c_u : resistência ao cisalhamento não drenada da argila **abaixo da ponta**

N^*_c : fator de capacidade de carga (duas abordagens a seguir)

A_p : área da ponta da estaca

> A resistência da argila que a estaca **atravessa** não atua na ponta: essa resistência pertence ao fuste.



Duas abordagens: Meyerhof adota o coeficiente **9**; Vesic relaciona o coeficiente com a **rigidez** da argila.

Meyerhof: constante igual a nove

TEORIA

Em argila saturada, em condição não drenada, a carga de ruptura líquida, na forma de Meyerhof, é dada pelo **clássico coeficiente nove**:

$$Q_p \approx N_c^* \, c_u \, A_p = 9 \, c_u \, A_p$$

c_u : coesão não drenada do solo abaixo da ponta da estaca

Não requer outros dados de entrada; desde que a estaca seja profunda (poucos diâmetros bastam), não depende da profundidade.

A simplicidade é a sua força; a sua fraqueza é a mesma: não considera a rigidez da argila.

A resistência de ponta é pequena em relação à do fuste, de modo que afeta muito pouco a capacidade de carga total; por isso, um valor simples costuma ser suficiente.

Enunciado

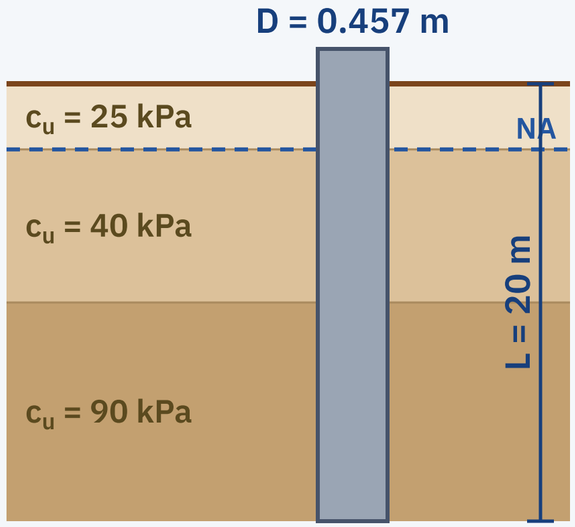
EXEMPLO

Dados

Estaca	**estaca tubular, cravada**
Diâmetro	**D = 0.457 m**
Comprimento	**L = 20 m**
Argila abaixo da ponta	$c_u = 90\ \mathrm{kPa}$

PEDE-SE

Determinar a **resistência de ponta** Q_p da estaca pelo método de **Meyerhof**.



Solução

SOLUÇÃO

1 Área da ponta da estaca

$$A_p = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.457)^2}{4} = \mathbf{0.1640}\ \mathrm{m^2}$$

2 Resistência de ponta unitária (N*c = 9)

$$q_p = 9\, c_u = 9(90) = \mathbf{810}\ \mathrm{kPa}$$

3 Resistência de ponta

$$Q_p = A_p\, q_p = 0.1640(810) = \mathbf{132.9}\ \mathrm{kN}$$



O método não exigiu outros dados de entrada: apenas c_u abaixo da ponta. Q_p = **132.9 kN**.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Vesic: a rigidez entra em N*c

TEORIA

Vesic, a partir da teoria da **expansão de cavidade**: o coeficiente para o caso φ = 0 deriva do índice de rigidez reduzido da argila. Em argila saturada, a variação de volume na zona plástica é nula; a redução desaparece e **$I_{rr} = I_r$**:

$$N_c^* = \frac{4}{3}\left(\ln I_{rr} + 1\right) + \frac{\pi}{2} + 1 \qquad I_r = \frac{E_s}{3\,c_u}$$

ÚNICO DADO DE ENTRADA: c_u abaixo da ponta

O'Neill e Reese (1999): $I_r \approx 50$ ($c_u/p_a = 0.24$), 150 (0.48), 250 – 300 (≥ 0.96). O módulo aproxima isso da seguinte forma:

$$I_r = 347\,\frac{c_u}{p_a} - 33 \;\le\; 300$$

RELAÇÃO N^*_c — I_{rr}

I_{rr}	N^*_c
10	6.97
20	7.90
40	8.82
60	9.36
80	9.75
100	10.04
200	10.97
300	11.51

À medida que I_{rr} aumenta, o coeficiente cresce lentamente: logaritmo

Enunciado

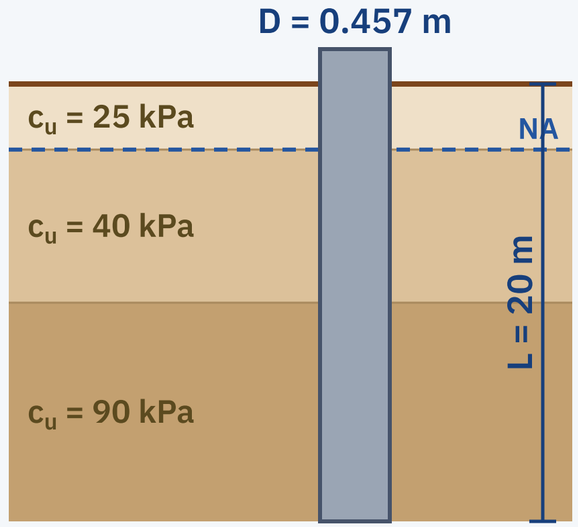
EXEMPLO

Dados

Estaca	**Igual ao Exemplo 2: D = 0.457 m, L = 20 m**
Argila abaixo da ponta	$c_u = 90\ \text{kPa}$
Pressão atmosférica	$p_a = 100\ \text{kPa}$

PEDE-SE

Determinar, pelo método de **Vesic (1977)**, a **resistência de ponta** Q_p da estaca e compará-la com a de Meyerhof.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

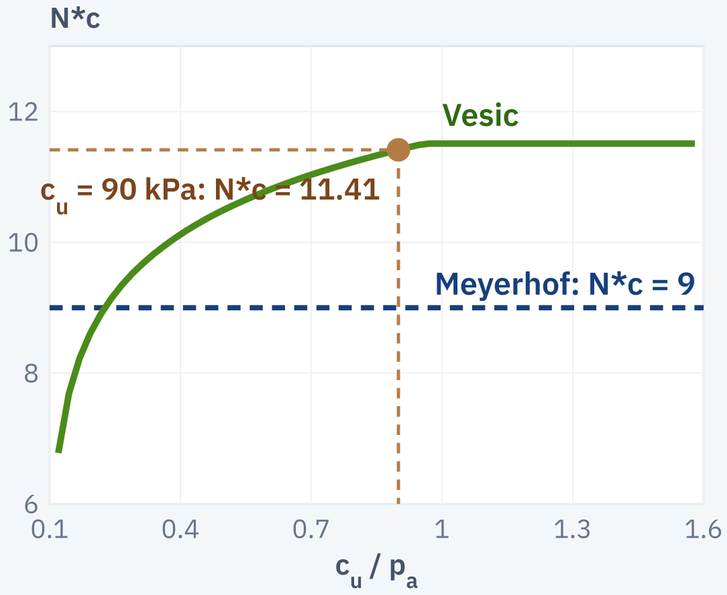
1 Índice de rigidez ($I_{rr} = I_r$, pois não há variação de volume na argila)

$$I_{rr} = I_r = 347\,\frac{90}{100} - 33 = \mathbf{279.3} \quad (\leq 300)$$

2 Fator N*c

$$N_c^* = \frac{4}{3}\,(\ln 279.3 + 1) + \frac{\pi}{2} + 1 = \mathbf{11.41}$$

A curva verde do gráfico é o fator de Vesic: para c_u = 90 kPa, **N^*_c = 11.41**, cerca de 27% maior que o valor 9 de Meyerhof.



Solução (2/2)

SOLUÇÃO

3 Resistência de ponta unitária

$$q_p = c_u\, N_c^* = 90(11.41) = \mathbf{1{,}027}\ \mathrm{kPa}$$

4 Resistência de ponta

$$Q_p = A_p\, q_p = 0.1640(1{,}027) = \mathbf{168.5}\ \mathrm{kN}$$

Meyerhof: 132.9 kN, **Vesic: 168.5 kN**; a diferença é de cerca de 27%. Como a ponta é uma pequena parcela do total, essa diferença altera muito pouco a capacidade total.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Atrito lateral: onde a capacidade é principalmente definida

TEORIA

Na argila, a resistência do fuste é a soma do atrito lateral unitário sobre a superfície do fuste:

$$Q_s = \sum f\, p\, \Delta L$$

Muitas das variáveis que determinam o atrito lateral unitário não podem ser medidas com facilidade; por isso existem **três abordagens**:

Método α: atrito apenas a partir da **resistência não drenada** (tensão total, curto prazo)

Método λ: combinação da **tensão efetiva média** ao longo do comprimento com a resistência média; um único coeficiente para toda a estaca

Método β: **tensão efetiva** e ângulo de atrito amolgado (drenado, longo prazo)

Na estaca do exemplo, o fuste responde por cerca de **nove décimos** do total; a incerteza também está aí.

α: uma fração da resistência

TEORIA

O atrito unitário é o produto da resistência não drenada por um **fator de adesão empírico α**:

$$f = \alpha\, c_u \qquad Q_s = \sum \alpha\, c_u\, p\, \Delta L$$

α : fator de adesão; **diminui** à medida que a argila se torna mais resistente (uma argila mais resistente mobiliza uma fração menor da sua resistência)

α é, na verdade, função também da **tensão efetiva**, além de c_u (propostas de Sladen, Randolph–Murphy/API, NGI-99)

> Este módulo interpola a **tabela (c_u/p_a – α)** desenhada ao lado; o α da camada também pode ser inserido manualmente.

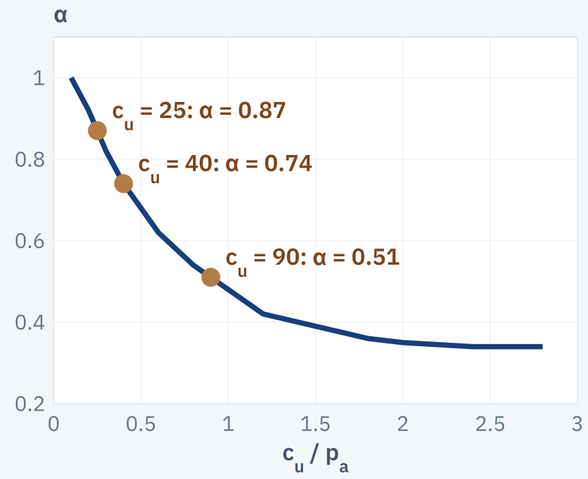


TABELA DE α (RESUMO)

c_u / p_a	α

Enunciado

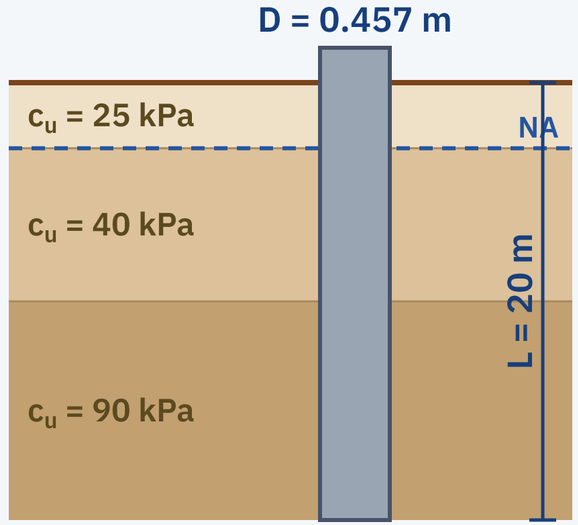
EXEMPLO

Dados

Argila 1 (0–3 m)	$c_u = 25\ \text{kPa},\ \gamma = 16\ \text{kN/m}^3$
Argila 2 (3–10 m)	$c_u = 40\ \text{kPa},\ \gamma = 17\ \text{kN/m}^3$
Argila 3 (10–20 m)	$c_u = 90\ \text{kPa},\ \gamma = 18\ \text{kN/m}^3$
Lençol freático (NA)	**a 3.0 m de profundidade**
Estaca	**estaca tubular, D = 0.457 m, L = 20 m**
Perímetro	$p = \pi D = \pi(0.457) = 1.436\ \text{m}$

PEDE-SE

Determinar o **atrito lateral** Q_s da estaca pelo **método α**. (α por interpolação linear a partir da tabela; p_a = 100 kPa)



Solução

SOLUÇÃO

1 Valores de α: para c_u/p_a = 0.25; 0.40; 0.90, obtidos da tabela

$$\alpha_1 = 0.87,\ \alpha_2 = 0.74,\ \alpha_3 = 0.51$$

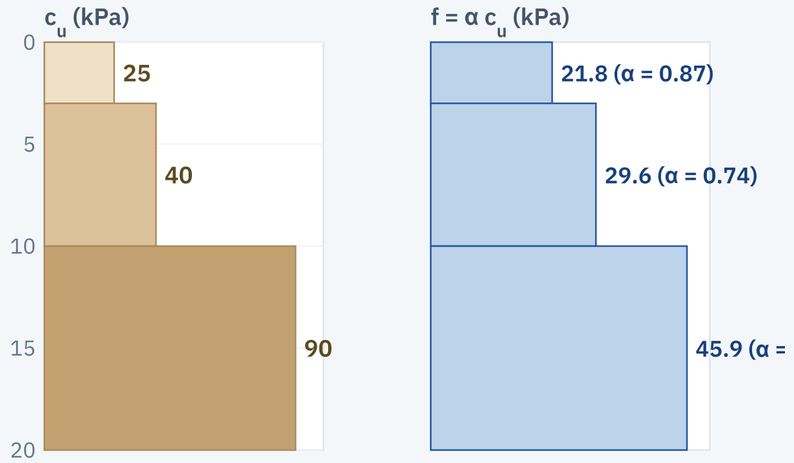
2 Atrito lateral unitário em cada camada $f = \alpha\, c_u$

$$f_1 = 21.8\ ,\ f_2 = 29.6\ ,\ f_3 = 45.9\ \text{kPa}$$

3 $Q_s = p\, \Sigma\, f\, H$

$$Q_s = 1.436\,[21.8(3) + 29.6(7) + 45.9(10)] = \mathbf{1{,}050}\ \text{kN}$$

Contribuições: 94 + 297 + 659 = **1,050 kN**. A argila mais resistente fornece o maior f, mas com uma fração menor de c_u (α = 0.51).



Verificar a solução no GeoTerva ↗

λ: uma única média para todo o comprimento

TEORIA

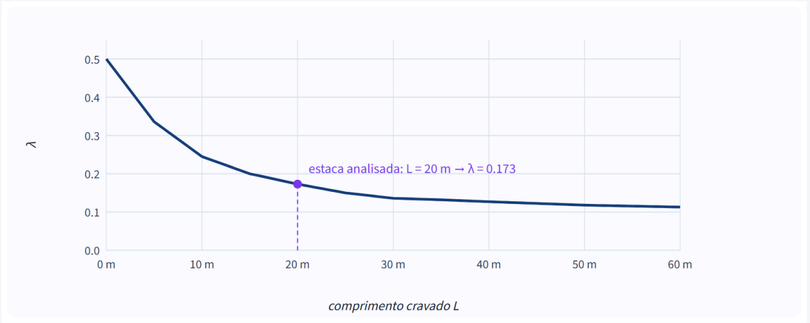
Vijayvergiya e Focht (1972): o **solo deslocado** pela estaca gera, em cada profundidade, uma pressão lateral passiva, e o atrito unitário médio decorre disso:

$$f_{av} = \lambda \left(\bar{\sigma}'_o + 2\,\bar{c}_u \right) \qquad Q_s = p\,L\,f_{av}$$

σ̄′$_o$: **tensão vertical efetiva média** ao longo do comprimento embutido (área do diagrama de σ′ / L)

$\bar{c}_u$: resistência não drenada média, **ponderada pela espessura**: ($c_{u1}L_1 + c_{u2}L_2$ + ...)/L

λ : coeficiente que depende do **comprimento** da estaca (ao lado)



λ — COMPRIMENTO EMBUTIDO

L (m)	λ
0	0.500
5	0.336
10	0.245
15	0.200
20	0.173
30	0.136
40	0.127

Enunciado

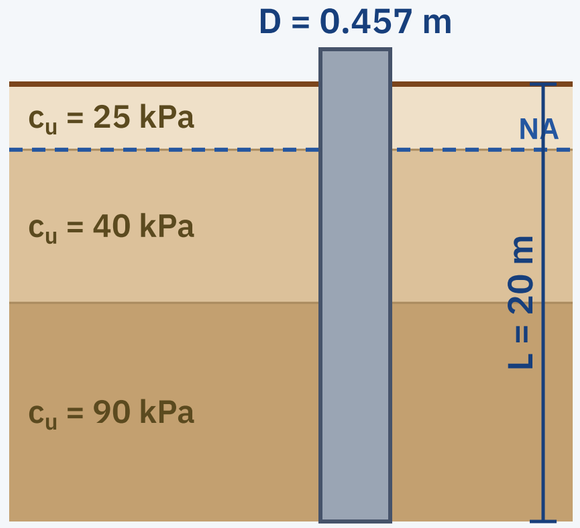
EXEMPLO

Dados

Argila 1 (0–3 m)	$c_u = 25\ \text{kPa},\ \gamma = 16\ \text{kN/m}^3$
Argila 2 (3–10 m)	$c_u = 40\ \text{kPa},\ \gamma = 17\ \text{kN/m}^3$
Argila 3 (10–20 m)	$c_u = 90\ \text{kPa},\ \gamma = 18\ \text{kN/m}^3$
Lençol freático (NA)	**a 3.0 m de profundidade**
Estaca	**estaca tubular, D = 0.457 m, L = 20 m**
Tensão efetiva média	$\bar{\sigma}'_o = 98.85\ \text{kPa}$ **(Exemplo 1)**

PEDE-SE

Determinar, pelo **método λ**, o **atrito lateral** Q_s da estaca.



Solução

SOLUÇÃO

1 Resistência média (ponderada pela espessura)

$$\bar{c}_u = \frac{25(3) + 40(7) + 90(10)}{20} = \mathbf{62.75}\ \text{kPa}$$

2 λ (L = 20 m, obtido da tabela) e atrito lateral unitário médio

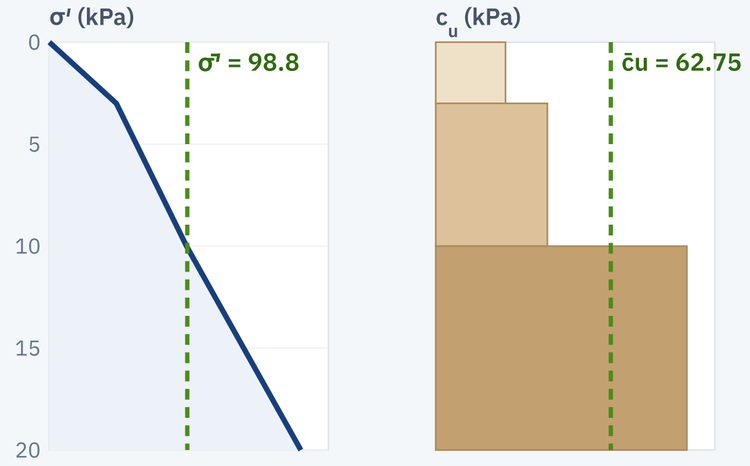
$$\lambda = 0.173$$

$$f_{av} = \lambda(\bar{\sigma}'_o + 2\bar{c}_u) = 0.173\,(98.85 + 2(62.75)) = \mathbf{38.81}\ \text{kPa}$$

3 Atrito lateral

$$Q_s = p\,L\,f_{av} = 1.436(20)(38.81) = \mathbf{1{,}114}\ \text{kN}$$

O método λ combina as duas médias: **1,114 kN**. No gráfico, a área à esquerda é σ'ₒ e a linha à direita é c̄ᵤ.



Verificar a solução no GeoTerva ↗

β: tensão efetiva e crosta amolgada

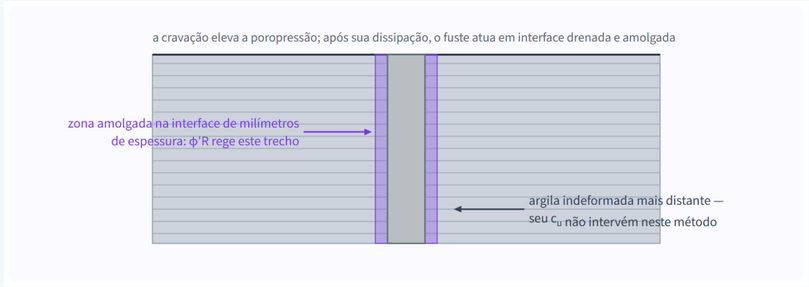
TEORIA

Abordagem de Burland em tensões efetivas (com a correção de sobre-adensamento de Meyerhof): não considera de modo algum a resistência não drenada; parte da **tensão vertical efetiva** e do ângulo de atrito drenado da argila **amolgada** (c′ = 0):

$$f = \beta\,\sigma'(z) \qquad \beta = K\tan\delta,\quad \delta = \varphi'_R$$

$$\beta = (1-\sin\varphi'_R)\tan\varphi'_R\sqrt{OCR}$$

K : coeficiente de empuxo lateral; adotado, de forma conservadora, **em repouso**, e aumenta com √OCR para argila sobre-adensada
Para OCR = 1, a expressão reduz-se por si só à forma normalmente adensada



φ′R e OCR são **informados**, não obtidos do terreno por correlação (o módulo é iniciado com φ′R = 30° e OCR = 1).

f, juntamente com σ′(z), **aumenta com a profundidade** dentro da camada; apresenta um degrau no limite em que β muda.

Enunciado

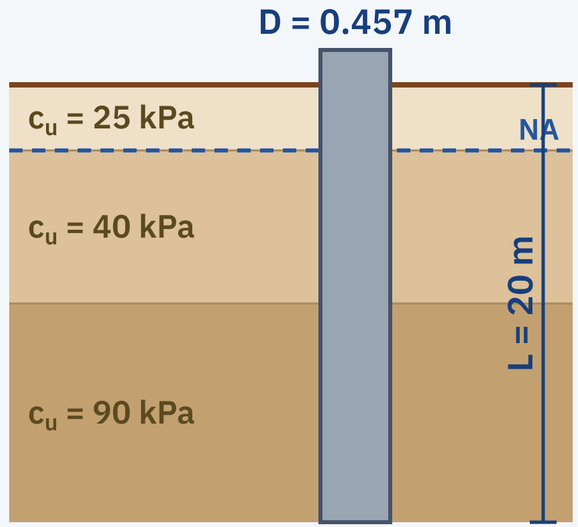
EXEMPLO

Dados

Argila 1 (0–3 m)	$c_u = 25\ \text{kPa},\ \gamma = 16\ \text{kN/m}^3$
Argila 2 (3–10 m)	$c_u = 40\ \text{kPa},\ \gamma = 17\ \text{kN/m}^3$
Argila 3 (10–20 m)	$c_u = 90\ \text{kPa},\ \gamma = 18\ \text{kN/m}^3$
Lençol freático (NA)	**a 3.0 m de profundidade**
Ângulo de atrito amolgado	$\varphi'_R = 30^\circ$ **(três camadas)**
Razão de sobre-adensamento	$OCR = 1;\ 1;\ 2$ **(camada 3 sobre-adensada)**
Estaca	**D = 0.457 m, L = 20 m**

PEDE-SE

Pelo **método β**, determinar o **atrito lateral** Q_S da estaca. (Valores médios de σ′ por camada, obtidos das áreas do Exemplo 1.)



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Coeficientes β

$$\beta_{1,2} = (1 - \sin 30^\circ)\tan 30^\circ = \mathbf{0.289} \qquad \beta_3 = 0.289\sqrt{2} = \mathbf{0.408}$$

2 Tensões efetivas médias das camadas (área / espessura)

$$\bar{\sigma}'_1 = \frac{72}{3} = 24.0, \quad \bar{\sigma}'_2 = \frac{512.2}{7} = 73.2, \quad \bar{\sigma}'_3 = \frac{1{,}392.8}{10} = 139.3\ \text{kPa}$$

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

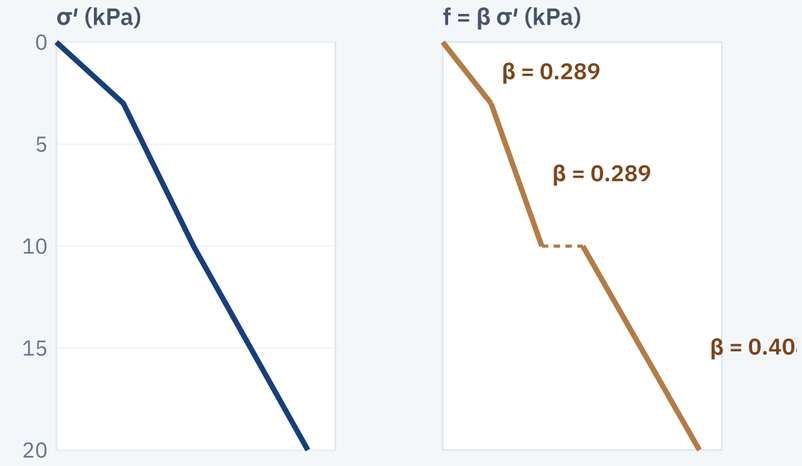
3 Atrito lateral unitário médio da camada $f = \beta\,\bar{\sigma}'$

$$\bar{f}_1 = 6.93, \quad \bar{f}_2 = 21.12, \quad \bar{f}_3 = 56.86\ \text{kPa}$$

4 Atrito lateral $Q_s = p\,\Sigma\,\bar{f}\,H$

$$Q_s = 1.436\,[6.93(3) + 21.12(7) + 56.86(10)] = \mathbf{1{,}058}\ \text{kN}$$

A média é a **integral real** da tensão na camada (não a média das duas extremidades): se o nível do lençol freático (NA) cortar a camada, as duas podem diferir em mais de 10%. O resultado é **1,058 kN**.



Verificar a solução no GeoTerva ↗

Três abordagens, mesma estaca

TEORIA



Neste perfil, os três ficam a **alguns pontos percentuais** uns dos outros. Mas **em princípio** não concordam; a concordância é uma particularidade deste perfil.

Em estaca muito **longa**, λ diminui por causa do coeficiente

Em argila **sobre-adensada**, β cresce com √OCR

Em argila **mole** normalmente adensada, α aumenta em direção à resistência total do solo

Leitura honesta: na argila, a resistência do fuste é conhecida, por cálculo, com uma incerteza de **cerca de um quinto**. Em grandes obras, a **prova de carga** compensa, por isso, o seu custo.

As estacas escavadas têm regras próprias

TEORIA

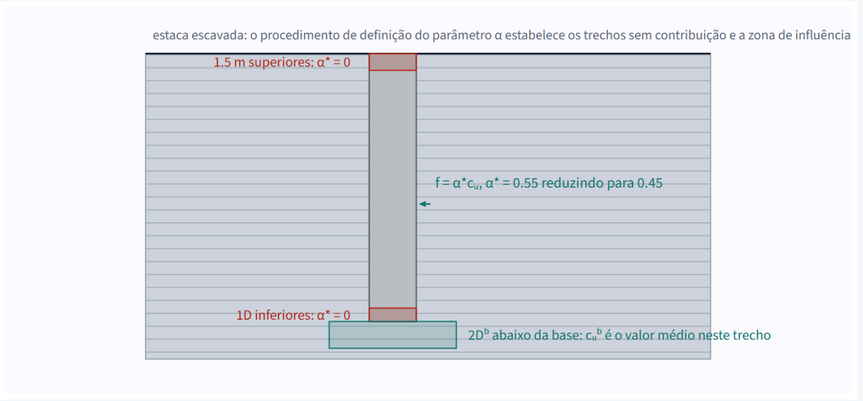
O furo é aberto e o concreto é lançado: o solo não é deslocado; a argila na parede do furo absorve água e **amolece**, material solto se acumula sob a base e é preciso **maior recalque** para mobilizar a resistência de ponta. O procedimento de O'Neill e Reese modifica ambas as parcelas.

$$\alpha^* = 0 \;\; (\text{topo } 1.5\text{ m e inferior } 1D) \qquad \alpha^* = 0.55 \;\; (\text{nos demais pontos})$$

α* = 0.55 ($c_u/p_a \le 1.5$), diminuindo para 0.45 em 2.5

Os 1.5 m superiores são o solo mais perturbado, mais propenso a se retrair em relação ao fuste; abaixo, o comprimento de um diâmetro é aquele em que a base já mobiliza o solo

As espessuras das camadas não mudam: a profundidade e σ′ permanecem como no perfil; muda apenas o comprimento que transmite atrito



$$q_p = \min\left[6c_{ub}\left(1 + 0.2\frac{L}{D_b}\right),\; 9c_{ub},\; 40p_a\right]$$

c_{ub}: c_u médio na zona de **$2D_b$** abaixo da base. Se D_b > 1.91 m, q_p é reduzido por um fator $F_r \le 1$.

Enunciado

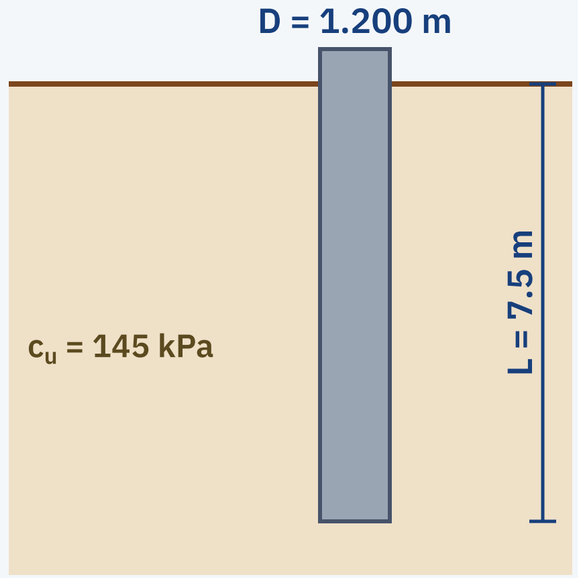
EXEMPLO

Dados

Estaca	**estaca escavada, seção circular**
Diâmetro e comprimento	**$D = D_b = 1.2$ m, $L = 7.5$ m**
Argila (homogênea)	$c_u = 145\ \mathrm{kPa}$, $\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$
Água subterrânea	**nenhum**
Fator de segurança	**FS = 3**

PEDE-SE

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



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Resistência média na zona de $2D_b$ abaixo da base e a expressão da base

$$c_{ub} = 145\ \text{kPa} \qquad 6c_{ub}\left(1 + 0.2\frac{7.5}{1.2}\right) = 1{,}957.5\ ; \quad 9c_{ub} = 1{,}305\ ; \quad 40p_a = 4\,000$$

2 q_p = o menor dos três; como $D_b = 1.2\ \text{m} \le 1.91\ \text{m}$, $F_r = 1$

$$q_p = \min(1{,}957.5;\ 1{,}305;\ 4\,000) = \mathbf{1{,}305}\ \text{kPa}$$

3 Área da base e resistência de ponta

$$A_b = \frac{\pi(1.2)^2}{4} = 1.131\ \text{m}^2 \quad Q_p = A_b\, q_p = \mathbf{1{,}476}\ \text{kN}$$

$9c_{ub}$ governa: a fórmula $6c_{ub}(1 + 0.2L/D_b)$ resultou em valor maior, mas o limite superior de $9c_u$ entrou em ação. Q_p = **1,476 kN**.

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

4 α* e o comprimento resistente por atrito (descartam-se 1.5 m no topo e 1D na base)

$$\alpha^* = 0.55 \quad (c_u/p_a = 1.45 \le 1.5)$$

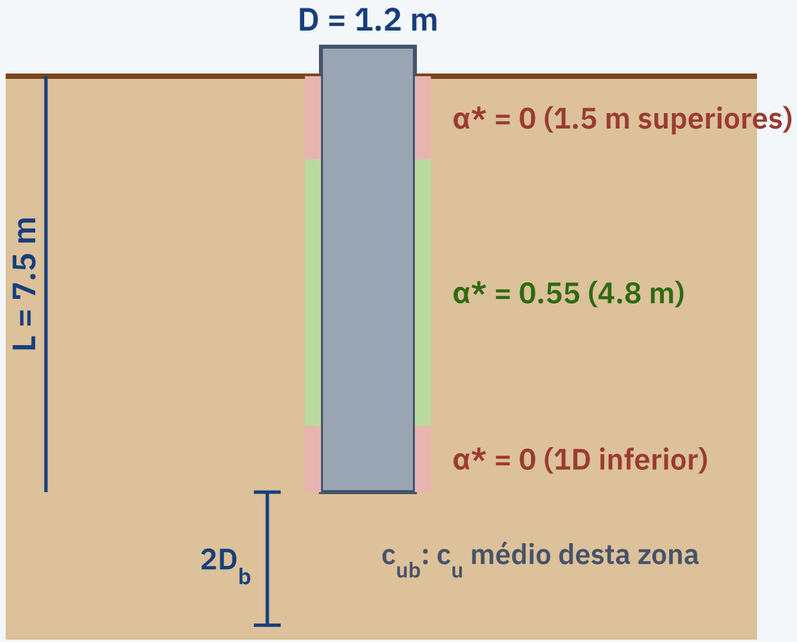
$$L_{eff} = 7.5 - 1.5 - 1.2 = \mathbf{4.8}\ \text{m}$$

5 Atrito lateral

$$Q_s = \pi D\, \alpha^* c_u\, L_{eff} = \pi(1.2)(0.55)(145)(4.8) = \mathbf{1{,}443}\ \text{kN}$$

6 Capacidade de carga de ruptura e admissível

$$Q_u = 1{,}476 + 1{,}443 = 2{,}919\ \text{kN} \qquad Q_{all} = \frac{Q_u}{3} = \mathbf{973}\ \text{kN}$$



Verificar a solução no GeoTerva ↗

Total com um único fator de segurança

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 solo é conhecido por apenas algumas sondagens, quando a argila é **rija e fissurada** ou quando **não está prevista prova de carga**

Os métodos de ponta e de atrito lateral podem ser escolhidos **independentemente** um do outro; os resultados são interpretados em conjunto

Enunciado

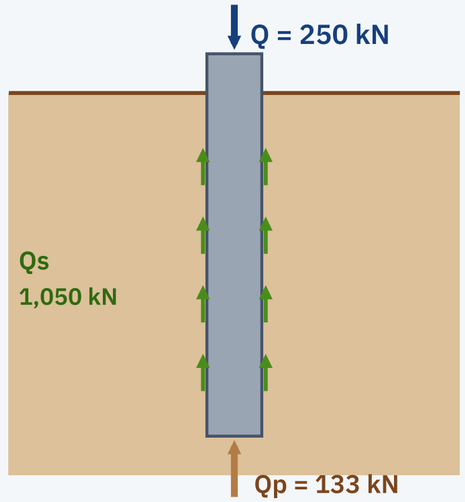
EXEMPLO

Dados

Resistência de ponta	**Q_p = 132.9 kN (Meyerhof, Exemplo 2)**
Atrito lateral	**Q_s = 1,050 kN (método α, Exemplo 4)**
Fator de segurança	**FS = 4**
Carga de trabalho na estaca	**Q = 250 kN**

PEDE-SE

Qual é a **capacidade de carga admissível** Q_{all} da estaca? A carga de trabalho é **suficiente**?



Solução

SOLUÇÃO

1 Capacidade de carga última

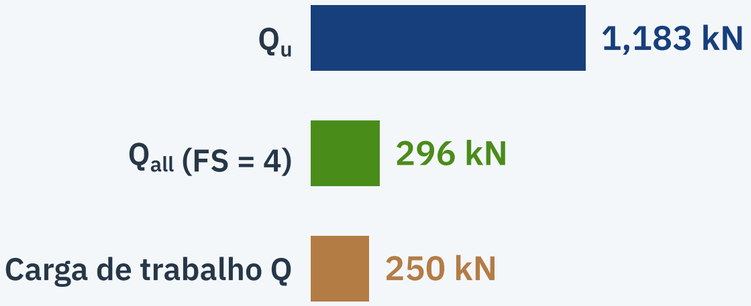
$$Q_u = Q_p + Q_s = 132.9 + 1{,}050.1 = \mathbf{1{,}183}\ \text{kN}$$

2 Capacidade de carga admissível

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FS} = \frac{1{,}183}{4} = \mathbf{296}\ \text{kN}$$

3 Verificação

$$Q = 250\ \text{kN} \ \leq \ Q_{all} = 296\ \text{kN} \ \Rightarrow \ \text{suficiente}$$



Taxa de utilização Q / Q_{all} = 250 / 296 = **0.85**. O fuste suporta cerca de 89% do total.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Mesma estaca: Q_u e Q_{all} (FS = 4)

TEORIA

Q_u · Q_{all} (kN)

	Q_s: α 1,050 kN	Q_s: λ 1,114 kN	Q_s: β 1,058 kN
Q_p: Meyerhof 132.9 kN	1,183 · **296**	1,247 · **312**	1,191 · **298**
Q_p: Vesic 168.5 kN	1,219 · **305**	1,283 · **321**	1,227 · **307**

Nas seis combinações, Q_u varia apenas entre **1,183 – 1,283 kN**: como a ponta é pequena, a escolha afeta muito pouco o total; a diferença real está no atrito lateral.

Interpretar o intervalo, sem confiar em um único valor

O atrito lateral é **cerca de nove décimos** do total

Em obras de grande porte, verificar com **prova de carga em estaca**

Resumo

Pontos-chave

A argila está em condição **não drenada** ($\varphi = 0$, $\tau_f = c_u$); a resistência não é proporcional à tensão efetiva

Ponta: Meyerhof $N^*_c = 9$; Vesic $N^*_c = f(I_{rr})$, $I_r \approx 347c_u/p_a - 33$; a ponta é uma pequena parcela do total

α: $f = \alpha c_u$ · **λ**: $f_{av} = \lambda(\bar{\sigma} + 2\bar{c}_u)$ · **β**: $f = \beta\sigma'$, $\beta = (1 - \sin\varphi'_R)\tan\varphi'_R\sqrt{OCR}$

Estaca escavada: $\alpha^* = 0$ (1.5 m superiores, 1D inferior), $q_p = \min[6c_{ub}(1 + 0.2L/D_b), 9c_{ub}, 40p_a]$

$Q_{all} = (Q_p + Q_s)/FS$, $FS = 2.5 - 4$

Referências bibliográficas

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning; esta página segue essa referência.

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

O'Neill, M.W. and Reese, L.C. (1999). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-IF-99-025 — o método α para estacas escavadas e o índice de rigidez da argila.

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.

Meyerhof, G.G. (1976). Bearing capacity and settlement of pile foundations. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 102(GT3), 197–228 — o ajuste por √OCR no método β.

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

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

NOTA

As figuras desta apresentação foram extraídas da página de Teoria do GeoTerva; todos os exemplos numéricos foram gerados com a própria biblioteca de cálculo do 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.