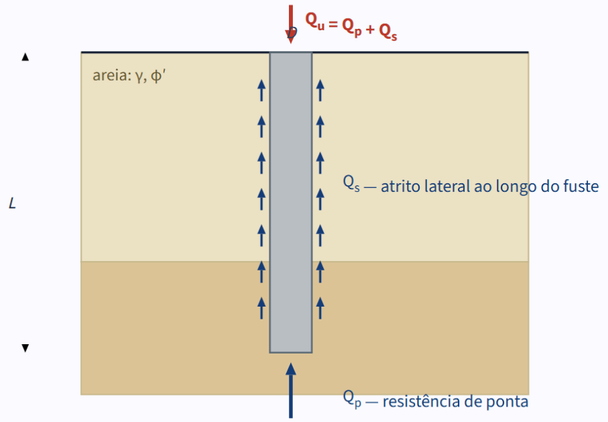
Apresentação de aula de geotecnia · Estacas

Capacidade de carga de estaca em areia

Aula: resistência de ponta, atrito lateral e profundidade crítica. A teoria de cada método, seguida de um exemplo resolvido.

Meyerhof (1976) · Vesic (1977) · Coyle e Castello (1981) · Exemplos resolvidos



Introdução

O que veremos nesta aula?

- Explicar como uma estaca transmite sua carga por **resistência de ponta** e por **atrito lateral**
- Saber construir o perfil de **tensão efetiva** na areia, incluindo o nível d'água
- Saber calcular a resistência de ponta por três métodos: **Meyerhof**, **Vesic**, **Coyle e Castello**
- Saber interpretar o atrito lateral e o papel da **profundidade crítica** (L′)
- Chegar à **capacidade de carga admissível** e avaliar em conjunto os resultados dos métodos

ROTEIRO DA AULA

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

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

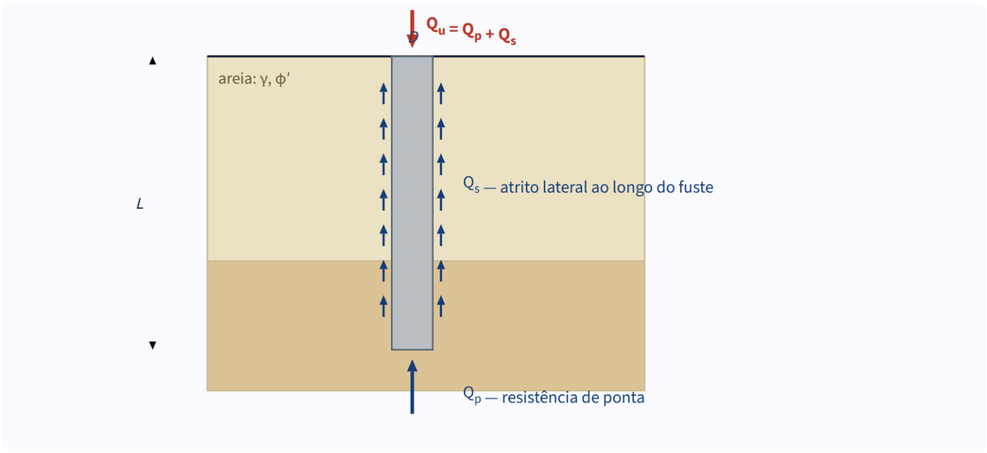
2 · **Enunciado**: dados e o que se pede

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

Todos os exemplos utilizam a mesma estaca: assim, os métodos podem ser comparados lado a lado.

A carga é transferida por dois caminhos

TEORIA



A estaca transmite a carga ao solo **simultaneamente por dois caminhos**: o solo abaixo da ponta resiste pela **resistência de ponta** (Q_p), e a areia ao longo do fuste, pelo **atrito lateral** (Q_s).

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

O atrito lateral atinge seu valor total com um deslocamento **pequeno**, enquanto a resistência de ponta o atinge com um deslocamento **muito maior**; as duas componentes não atingem o pico ao mesmo tempo.

Nesta aula: **estaca isolada**, **areia** ($c' = 0$), cravada ou escavada, de seção constante.

Na areia, tudo é proporcional à tensão efetiva

TEORIA

Em areia, tanto a **resistência de ponta** quanto o **atrito lateral unitário** são proporcionais à tensão vertical efetiva. O cálculo começa pela determinação correta dos valores de σ'_v no perfil.

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

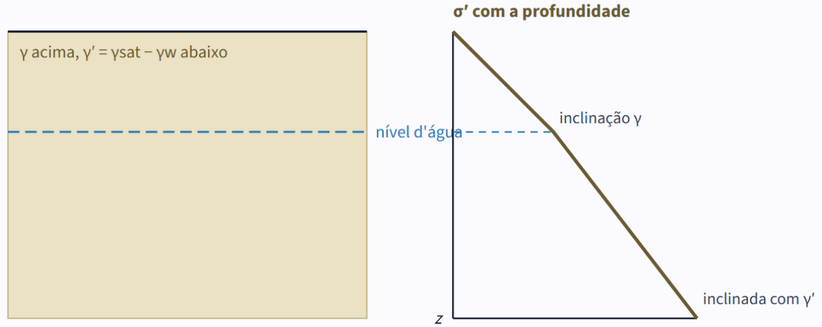
γ : peso específico úmido (acima do NA)

γ_{sat} : peso específico saturado (abaixo do NA)

$\gamma_w = 9.81$ kN/m³ : peso específico da água

NA: nível do lençol freático

> Abaixo do nível do lençol freático o gradiente de tensão **diminui**: $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$



Enunciado

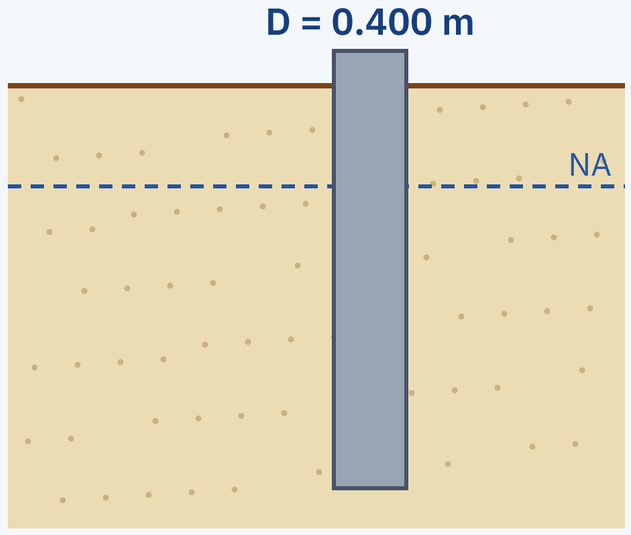
EXEMPLO

Dados

Areia, acima do NA	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$
Areia, abaixo do NA	$\gamma_{sat} = 19.5\ \mathrm{kN/m^3}$
Profundidade do nível do lençol freático	**2.0 m**
Peso específico da água	$\gamma_w = 9.81\ \mathrm{kN/m^3}$

PEDE-SE

Determinar, a **8 m de profundidade**, a tensão vertical total, a poropressão e a **tensão vertical efetiva**.



Solução

SOLUÇÃO

1 Tensão vertical total (acima do nível do lençol freático, peso específico úmido; abaixo, peso específico saturado)

$$\sigma_v = 17(2) + 19.5(6) = 34 + 117 = \mathbf{151.0}\ \text{kPa}$$

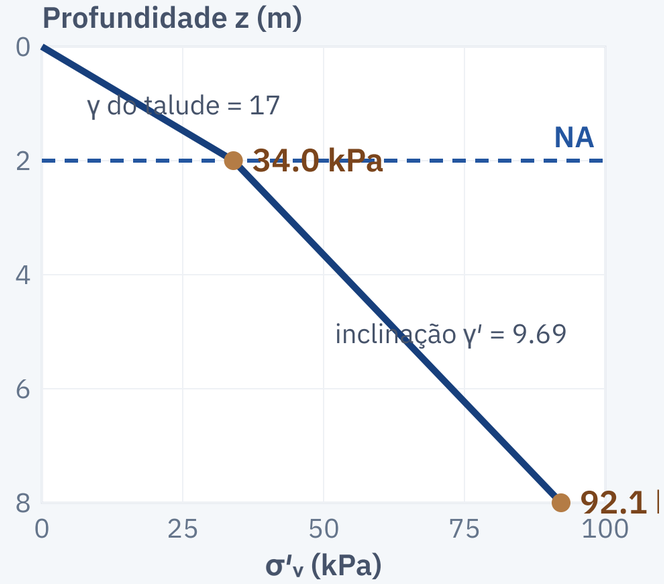
2 Poropressão (coluna d'água de 6 m abaixo do nível do lençol freático)

$$u = \gamma_w\, h_w = 9.81\,(6) = \mathbf{58.9}\ \text{kPa}$$

3 Tensão vertical efetiva

$$\sigma'_v = \sigma_v - u = 151.0 - 58.9 = \mathbf{92.1}\ \text{kPa}$$

Mesmo resultado: σ′$_v$ = 17(2) + (19.5 – 9.81)(6) = **92.1 kPa**. Abaixo do nível do lençol freático, o peso específico submerso é 9.69 kN/m³.



Verificar a solução no GeoTerva ↗

Resistência de ponta: expressão geral

TEORIA

A areia abaixo da ponta rompe por **ruptura por capacidade de carga**, como sob uma fundação; entretanto, na profundidade da ponta, a **tensão de sobrecarga** confina fortemente a areia.

Na areia, como $c' = 0$, resta apenas o termo de profundidade (sobrecarga). Como o diâmetro da estaca é pequeno, o termo de largura ($0.5\gamma' D N_\gamma$) é desprezado:

$$q_p = \sigma'_v \, N^*_q \qquad Q_p = A_p \, q_p$$

σ'_v : tensão vertical efetiva na profundidade da ponta

N^*_q : fator de capacidade de carga para o problema de estaca

A_p : área da ponta da estaca

DE ONDE VEM N^*_q? TRÊS ABORDAGENS

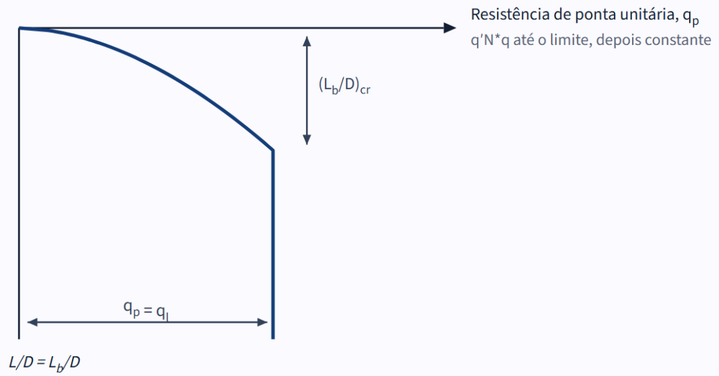
Meyerhof (1976): N^*_q depende apenas de φ'; q_p é limitado por um **valor-limite**

Vesic (1977): teoria da expansão de cavidade; a **rigidez** da areia também é considerada

Coyle e Castello (1981): ajustado a 24 provas de carga reais; N^*_q depende também de L/D

A resistência de ponta não aumenta indefinidamente

TEORIA



Em areia homogênea, a resistência de ponta unitária aumenta com a razão de embutimento e atinge o **pico** em $\mathbf{(L_b/D)_{cr}}$; a partir daí permanece constante (q_l).

VESIC (1970) · ENSAIO DE ESTACA NO RIO OGEECHEE (D = 0.457 m)

L (m)	L/D	q_p (kN/m²)
3.02	6.61	3 304
6.12	13.39	9 365
8.87	19.40	11 472
12.00	26.26	11 587
15.00	32.82	13 971

O valor máximo de q_p é de aproximadamente **12 000 kN/m²**

$(L/D)_{cr}$ de cerca de **16 – 18**

Para N_{60} médio ≈ 30, $4p_aN_{60} = 4(100)(30) = 12\,000$ kN/m²: **a correlação coincide com o patamar medido**

Meyerhof: N*q a partir de φ′, com um limite

TEORIA

Meyerhof obtém N^*_q apenas a partir do **ângulo de atrito** (ábaco próprio, abaixo). O q_p calculado não pode ultrapassar um **valor-limite**:

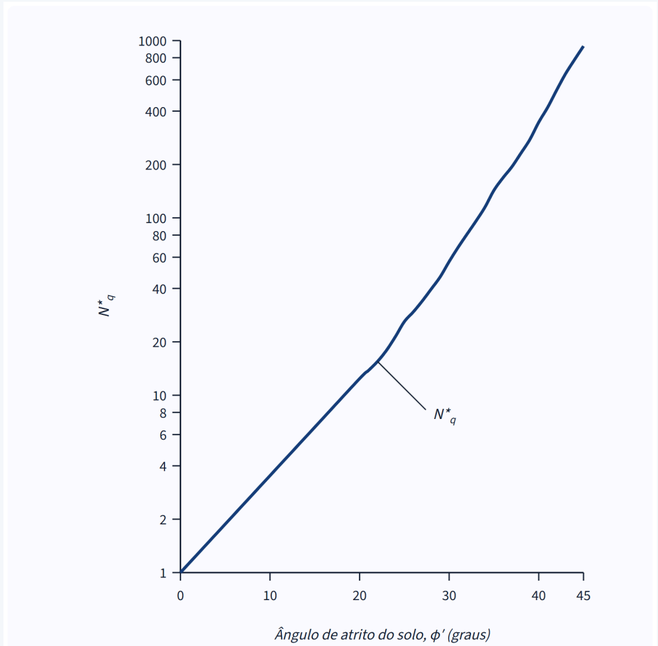
$$q_p = \sigma'_v N^*_q \;\leq\; q_l \qquad q_l = 0.5\, p_a\, N^*_q \tan\varphi'$$

p_a = 100 kN/m² : pressão atmosférica

φ′ : ângulo de atrito efetivo da areia no nível da ponta

VALORES DE N^*_q (ÁBACO DE MEYERHOF; SÉRIE LIDA PELO MÓDULO)

φ′ (°)	20	25	30	32	34	35	36	38	40	42	45
N^*_q	12.4	26.0	56.7	81.0	115.0	143.0	168.0	231.0	346.0	525.0	930.0



Para φ′ = 35°, N^*_q = 143.0 e q_l = 5,006 kPa; em areia com γ = 18 kN/m³, esse limite é atingido a uma profundidade de cerca de **1.9 m**

Meyerhof: passo a passo e o significado do limite

TEORIA

ETAPAS DO CÁLCULO

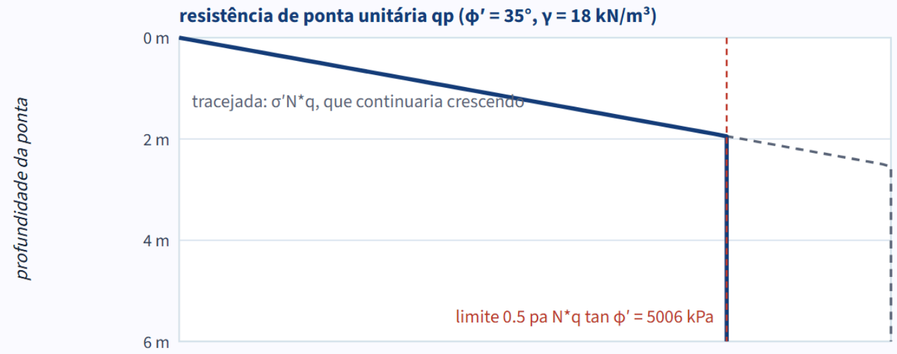
1. Calcular σ'_v no nível da ponta

2. Ler o valor de N^*_q para φ' no ábaco/tabela

3. $q_p = \sigma'_v N^*_q$

4. $q_l = 0.5\ p_a\ N^*_q\ \tan\varphi'$

5. $q_p = \min(\sigma'_v N^*_q, q_l)$ e $Q_p = A_p q_p$



A curva segue a reta $\sigma' N^*_q$ **até que o valor limite passe a governar**; depois, permanece horizontal. Sem o limite, q_p cresceria indefinidamente com a profundidade, o que os ensaios de campo não mostram.

Enunciado

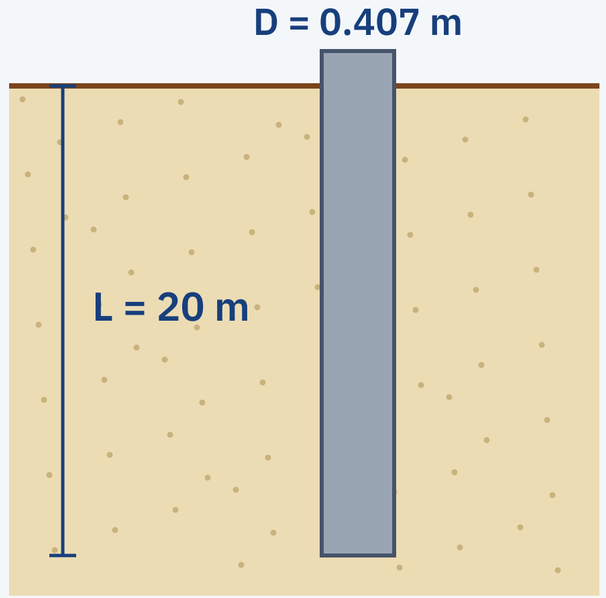
EXEMPLO

Dados

Estaca	**concreto armado, cravada, seção quadrada**
Dimensão da seção	**D = 0.407 m**
Comprimento	**L = 20 m**
Areia (homogênea)	$\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi' = 35°$
Água subterrânea	**nenhum**

PEDE-SE

Determinar a **resistência de ponta** Q_p da estaca pelo método de **Meyerhof (1976)**.



Solução

SOLUÇÃO

1 Área da seção transversal e tensão efetiva na ponta

$$A_p = 0.407^2 = 0.1656\ \text{m}^2 \qquad \sigma'_v = \gamma L = 18(20) = 360\ \text{kPa}$$

2 Valor de N*q (φ′ = 35°, tabela de Meyerhof) e σ′N*q

$$N_q^* = 143.0 \qquad \sigma'_v N_q^* = 360(143.0) = 51{,}480\ \text{kPa}$$

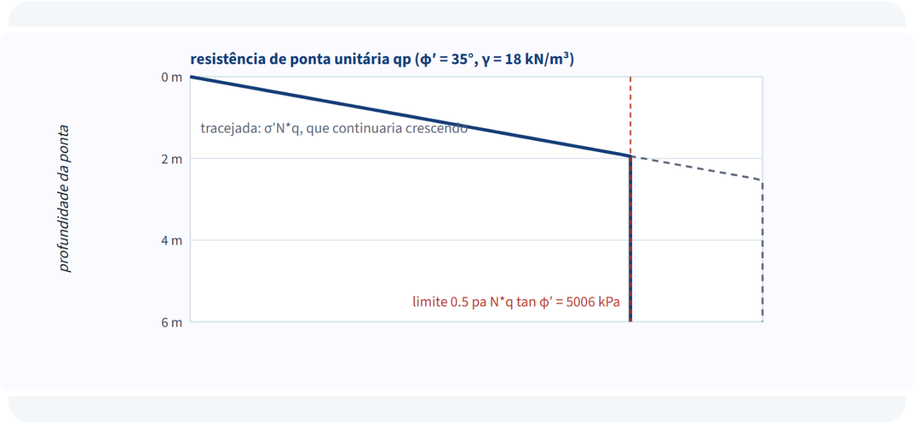
3 Valor-limite

$$q_l = 0.5\, p_a N_q^* \tan\varphi' = 0.5(100)(143.0)\tan 35^\circ = 5{,}006\ \text{kPa}$$

4 Resistência de ponta unitária: a menor das duas; o limite governa

$$q_p = \min(51{,}480;\ 5{,}006) = \mathbf{5{,}006}\ \text{kPa}$$

$Q_p = A_p\, q_p = 0.1656 \times 5{,}006 =$ **829 kN**. Sem o limite, resultariam cerca de 8,528 kN.



Verificar a solução no GeoTerva ↗

Vesic: a areia abaixo da ponta expande-se como uma cavidade

TEORIA

Vesic deduz a resistência de ponta a partir da **teoria da expansão de cavidade**: a ponta expande uma cavidade no solo circundante; por isso, a resposta envolve não só a **resistência** da areia, mas também a sua **rigidez**.

$$Q_p = A_p \, \bar{\sigma}'_o \, N^*_\sigma$$

Aqui, $\bar{\sigma}'_o$ não é a tensão **vertical**, mas a **tensão normal efetiva média** no nível da ponta:

$$\bar{\sigma}'_o = \frac{1 + 2K_o}{3} \, q' \qquad K_o = 1 - \sin\varphi'$$

K_o: coeficiente de empuxo de terra em repouso

q': tensão vertical efetiva no nível da ponta ($= \sigma'_v$)

RELAÇÃO COM MEYERHOF

$$N^*_\sigma = \frac{3 \, N^*_q}{1 + 2K_o}$$

A forma é a mesma de Meyerhof; os dois métodos diferem em **de que o coeficiente é derivado**, e não na forma da equação.

Vesic: índice de rigidez reduzido

TEORIA

N^*_σ depende do **índice de rigidez reduzido** I_{rr} da areia e de φ'; I_{rr} também considera a variação volumétrica na zona plástica:

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r\,\Delta} \qquad I_r = \frac{E_s}{2(1+\mu_s)\,q'\tan\varphi'} = \frac{G_s}{q'\tan\varphi'}$$

E_s : módulo de elasticidade do solo, μ_s : coeficiente de Poisson, G_s : módulo de cisalhamento

Δ : deformação específica volumétrica média na zona plástica abaixo da ponta

ABORDAGENS PRÁTICAS (CHEN E KULHAWY, 1994; 25° ≤ φ′ ≤ 45°)

$$\frac{E_s}{p_a} = m \quad \mu_s = 0.1 + 0.3\,\frac{\varphi' - 25}{20} \quad \Delta = 0.005\left(1 - \frac{\varphi' - 25}{20}\right)$$

ENTRADA ÚNICA: m = E_s / p_a

Areia	m
fofa	100 – 200
medianamente compacta	200 – 500
compacta	500 – 1000

O índice de rigidez situa-se em geral entre **75 – 150** (areia com densidade relativa de 50 – 80%)

Se houver CPT: I_r = 300/F_r(%) (mecânico), 170/F_r(%) (cone elétrico)

Vesic: passo a passo

TEORIA

ETAPAS DO CÁLCULO

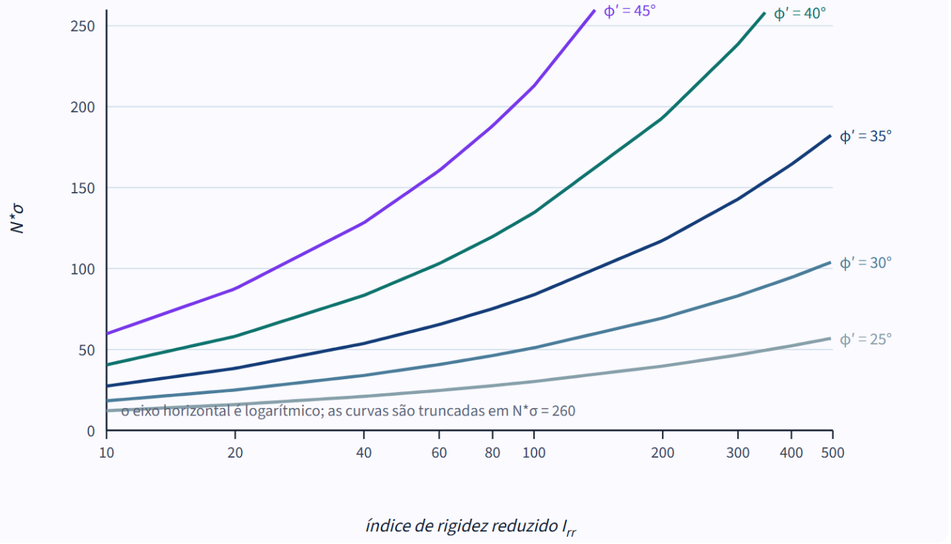
1. $K_o = 1 - \sin\varphi'$ ve $\bar{\sigma}_o = (1 + 2K_o)q'/3$

2. $E_s = m \cdot p_a$, μ_s, I_r

3. Δ e $I_{rr} = I_r/(1 + I_r\Delta)$

4. N^*_σ a partir de φ' e I_{rr} (da tabela, interpolação logarítmica)

5. $q_p = \bar{\sigma}_o N^*_\sigma$ e $Q_p = A_p q_p$



Uma curva para cada φ': **N^*_σ aumenta com a rigidez**; areia compacta e rígida fornece resistência de ponta muito maior que areia fofa.

Enunciado

EXEMPLO

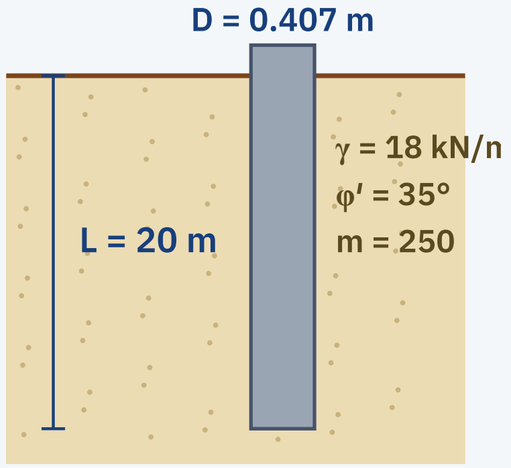
Dados

Estaca	**Igual ao Exemplo 2: D = 0.407 m, L = 20 m**
Areia	$\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi' = 35^\circ$
Água subterrânea	**nenhum**
Razão do módulo de elasticidade	$m = E_s/p_a = 250$ **(medianamente compacta – compacta)**
Pressão atmosférica	$p_a = 100\ \mathrm{kPa}$

PEDE-SE

Determinar a **resistência de ponta** Q_p da estaca pelo método de **Vesic (1977)**.

Tensão efetiva na ponta: q′ = 18(20) = 360 kPa



Solução (1/3)

SOLUÇÃO

1 Coeficiente em repouso e tensão normal efetiva média

$$K_o = 1 - \sin 35^\circ = 0.426 \qquad \bar{\sigma}'_o = \frac{1 + 2(0.426)}{3}(360) = \mathbf{222.3}\ \text{kPa}$$

2 Propriedades do solo

$$E_s = m\, p_a = 250(100) = 25{,}000\ \text{kPa} \quad \mu_s = 0.1 + 0.3\frac{35 - 25}{20} = 0.25$$

3 Índice de rigidez e deformação específica volumétrica

$$I_r = \frac{25{,}000}{2(1 + 0.25)(360)\tan 35^\circ} = \mathbf{39.7} \qquad \Delta = 0.005\left(1 - \frac{35 - 25}{20}\right)\frac{360}{100} = 0.0090$$

Solução (2/3)

SOLUÇÃO

4 Índice de rigidez reduzido

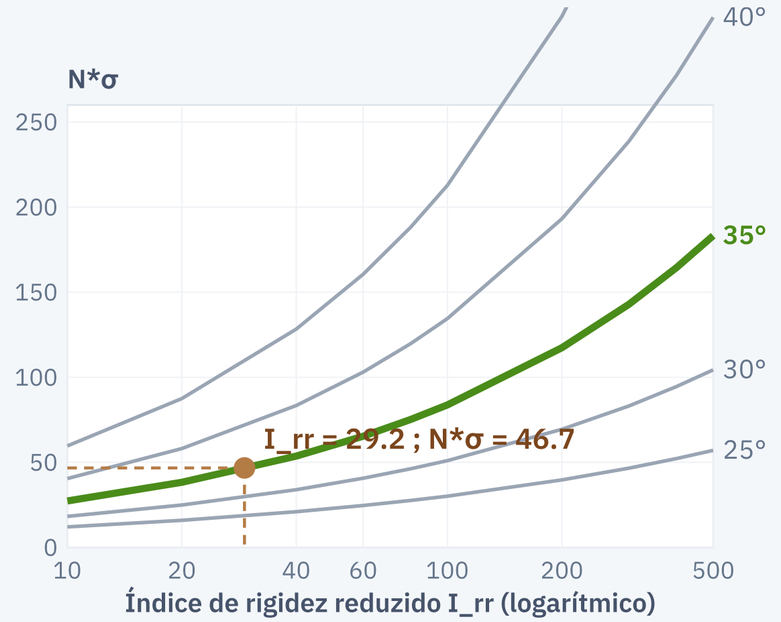
$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r \Delta} = \frac{39.7}{1 + (39.7)(0.0090)} = \mathbf{29.2}$$

5 N*σ: na tabela, interpolação logarítmica entre 20 e 40 para a linha φ′ = 35° e I_{rr} = 29.2

$$N^*_\sigma = 38.32 + \frac{\log 29.2 - \log 20}{\log 40 - \log 20}(53.67 - 38.32)$$

$$= \mathbf{46.7}$$

No gráfico, a curva verde φ′ = 35°: na interseção com a linha vertical I_{rr} = 29.2, **$N^*_\sigma \approx 46.7$**.



Solução (3/3)

SOLUÇÃO

6 Resistência de ponta unitária

$$q_p = \bar{\sigma}'_o N^*_\sigma = 222.3(46.7) = \mathbf{10{,}389}\ \text{kPa}$$

7 Resistência de ponta

$$Q_p = A_p\, q_p = 0.1656(10{,}389) = \mathbf{1{,}721}\ \text{kN}$$

Para a mesma estaca, **Meyerhof: 829 kN**, **Vesic: 1,721 kN**. Como Vesic considera a rigidez da areia (m = 250), o resultado é cerca de 2.1 vezes o valor limitado de Meyerhof.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Coyle e Castello: N*q empírico

TEORIA

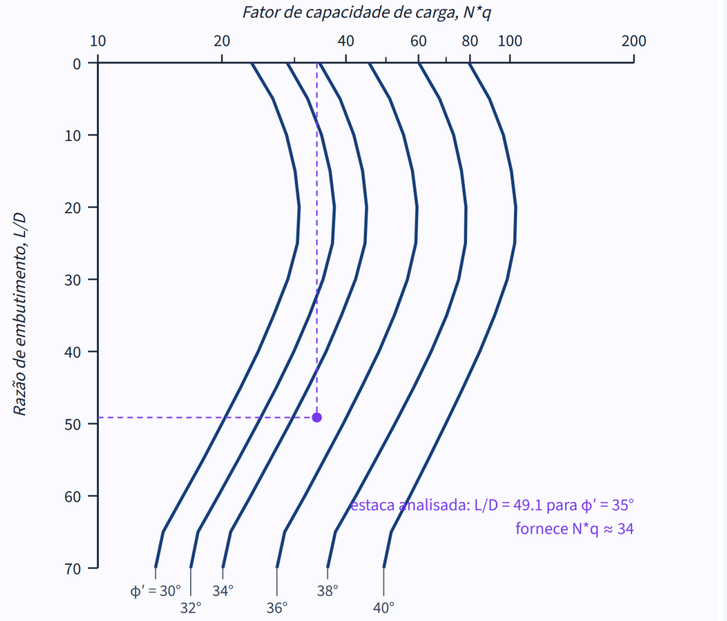
Coyle e Castello examinaram **24 provas de carga de campo em grande escala em estacas cravadas** e propuseram a seguinte relação para areia:

$$Q_p = q' \, N_q^* \, A_p$$

q′ é a tensão vertical efetiva na ponta; N^*_q depende, além de φ′, da **relação de embutimento L/D** (ábaco, ao lado).

O coeficiente é **muito menor** que o de Meyerhof: cerca de **34** para φ′ = 35° e estaca profunda, contra **143** em Meyerhof. Isso ocorre porque ele foi ajustado a **capacidades medidas**, e não a um mecanismo de ruptura.

Quando a razão de embutimento ultrapassa cerca de 20, o coeficiente **diminui**: uma estaca mais longa, de mesmo diâmetro, recebe um N^*_q menor.



Enunciado

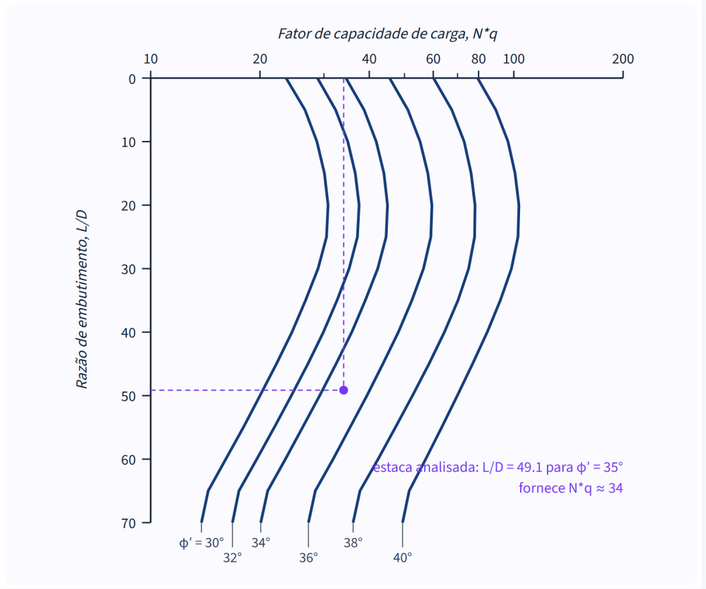
EXEMPLO

Dados

Estaca e areia	**Igual ao Exemplo 2: L = 20 m, D = 0.407 m, φ′ = 35°, γ = 18 kN/m³**
Razão de embutimento	$L/D = 20/0.407 = 49.1$
Coeficiente lido no ábaco	$N_q^* \approx 34$ **(Figura 7; φ′ = 35°, L/D ≈ 49)**

PEDE-SE

Pelo método de **Coyle e Castello (1981)**, determinar a **resistência de ponta** Q_p da estaca.



Solução

SOLUÇÃO

1 Tensão efetiva na ponta e coeficiente (do ábaco, leitura aproximada)

$$q' = \gamma L = 18(20) = 360\ \text{kPa} \qquad N_q^* \approx 34$$

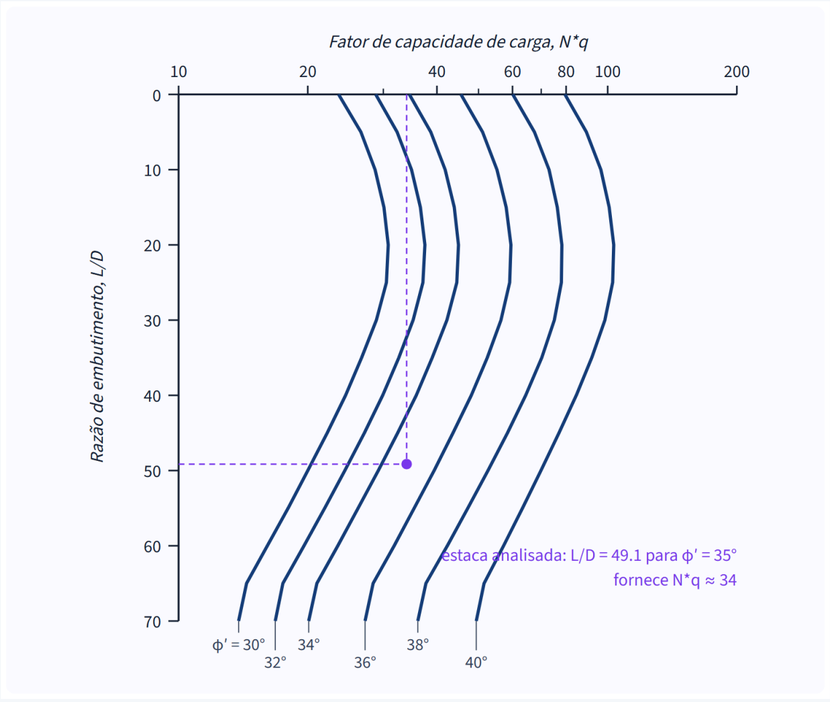
2 Resistência de ponta unitária

$$q_p = q' N_q^* = 360(34) = 12{,}240\ \text{kPa}$$

3 Resistência de ponta

$$Q_p = A_p q_p = 0.1656(12{,}240) = \mathbf{2{,}028}\ \text{kN}$$

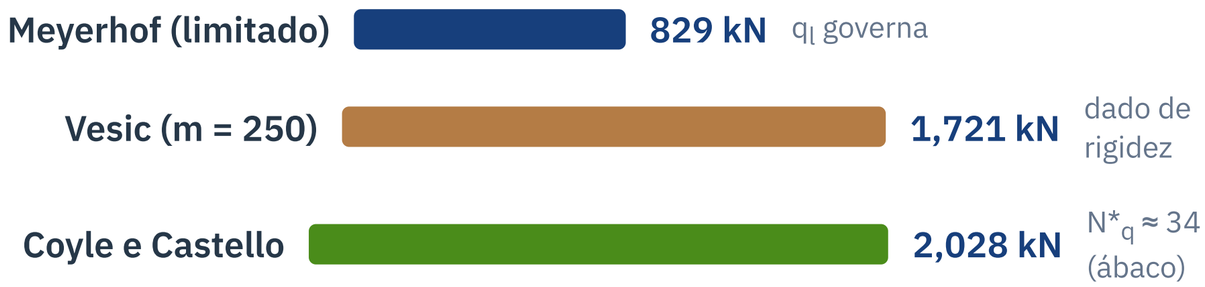
O N^*_q lido no ábaco é um valor aproximado; pode variar ±1 – 2 unidades conforme φ′ e L/D. O resultado é o maior dos três métodos: **2,028 kN**.



Verificar a solução no GeoTerva ↗

Três métodos, mesma estaca

TEORIA



Como os métodos se apoiam em **hipóteses distintas**, os resultados também divergem. A faixa de variação é um indicador honesto de até que ponto a resistência de ponta pode ser conhecida.

Meyerhof: **conservador** em razão do valor limite

Vesic: adota explicitamente a compacidade da areia como dado de entrada, por meio de **m**

Coyle–Castello: baseia-se em medições em estacas cravadas; a leitura do ábaco é aproximada

Na prática: calculam-se pelo menos dois métodos, examina-se a faixa de resultados e, na falta de uma **prova de carga** ou de experiência local, adota-se um valor próximo ao extremo conservador.

Atrito lateral: f = K σ′ tanδ′

TEORIA

O atrito lateral é a soma do atrito unitário ao longo da superfície do fuste:

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

O atrito unitário f é escrito em função da profundidade como segue (L′: profundidade crítica):

$$f = K\,\sigma'_o \tan\delta' \quad (0 \le z \le L')$$
$$f = f_{z=L'} \quad (L' \le z \le L)$$

p : perímetro da seção da estaca, ΔL : comprimento em que p e f são tomados constantes

K : coeficiente de empuxo lateral efetivo, σ'_o : tensão vertical efetiva na profundidade considerada

δ′ : ângulo de atrito solo–estaca (geralmente 0.5φ′ – 0.8φ′)

VALORES DE K (SEGUNDO O TIPO DE ESTACA)

Tipo de estaca	K
Escavada ou cravada por jato de água	≈ Ko = 1 – sin φ′
Cravada de baixo deslocamento	≈ Ko a 1.4Ko = 1.4(1 – sin φ′)
Cravada de grande deslocamento	≈ Ko a 1.8Ko = 1.8(1 – sin φ′)

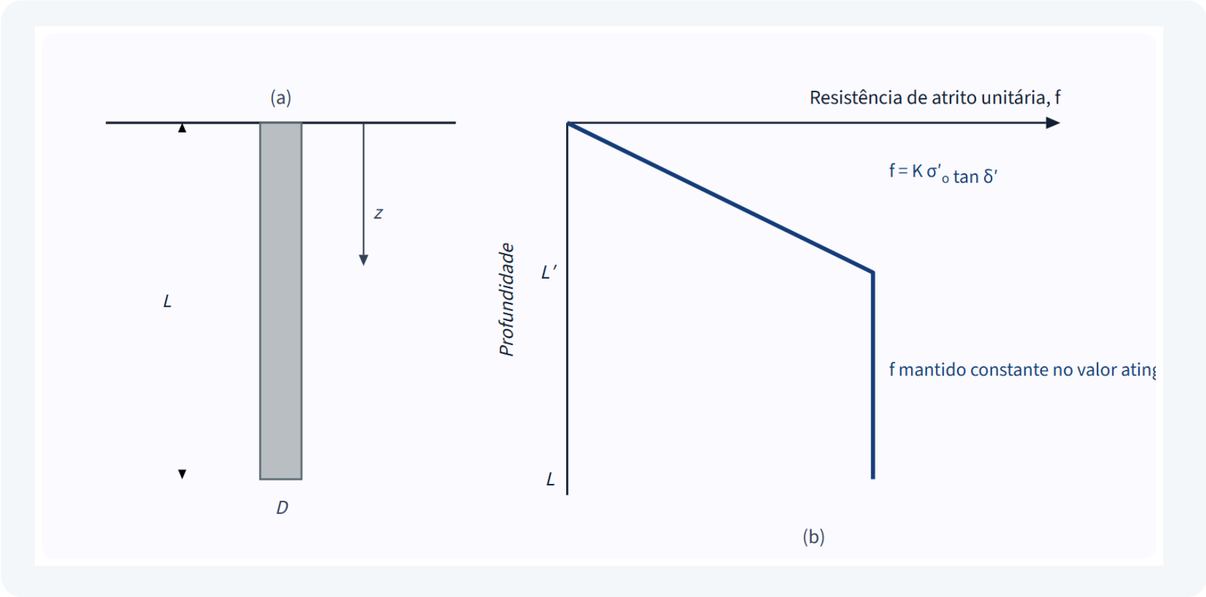
A **cravação** compacta a areia ao redor (até cerca de 2.5D)

A estaca de grande deslocamento recebe mais atrito do que a de pequeno deslocamento

As estacas **escavadas/jet** apresentam menor atrito que as estacas cravadas

Profundidade crítica: por que o atrito não aumenta?

TEORIA



O atrito medido não aumenta **indefinidamente** com a profundidade, como a tensão efetiva; aumenta até uma **profundidade crítica** aproximada e depois permanece constante.

$$L' \approx 15\,D$$

A explicação usual é o **arqueamento**: a areia não transfere à estaca toda a tensão de sobrecarga ao redor do fuste. O módulo **mantém abaixo de L′ a tensão efetiva no valor que ela tem na profundidade L′**; o atrito lateral unitário permanece constante até a ponta.

> Para L′, a fonte fornece 15D – 20D; valor conservador **15D**

Enunciado

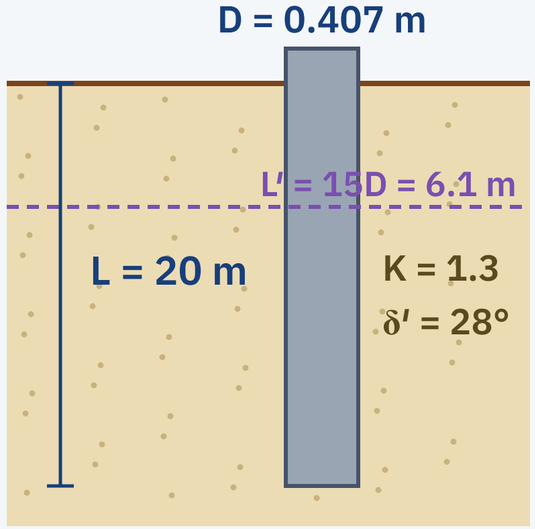
EXEMPLO

Dados

Estaca e areia	**Igual ao Exemplo 2: L = 20 m, D = 0.407 m, γ = 18 kN/m³**
Perímetro	$p = 4D = 4(0.407) = 1.628\ \text{m}$
Coeficientes	$K = 1.3$ **(cravação de alto deslocamento),** $\delta' = 28^\circ$ **(**$\approx 0.8\varphi'$**)**

PEDE-SE

Considerando a profundidade crítica (L′ = 15D), determinar o **atrito lateral** Q_s da estaca.



Solução

SOLUÇÃO

1 Profundidade crítica e a tensão nessa profundidade

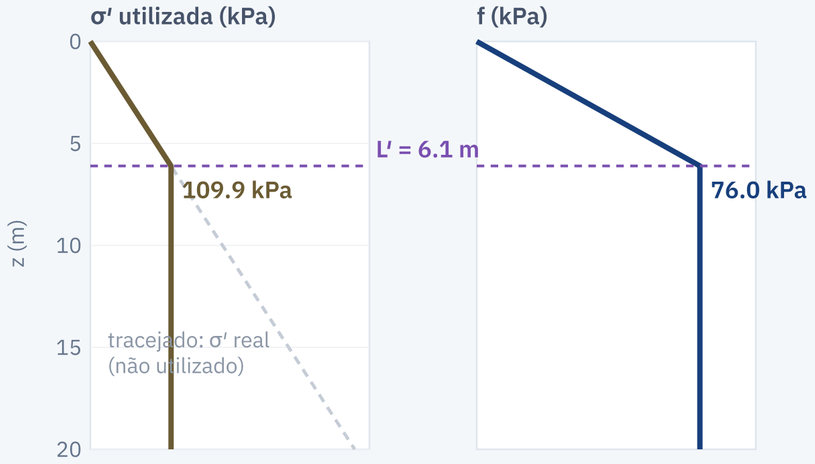
$$L' = 15D = 15(0.407) = \mathbf{6.105}\ \text{m} \qquad \sigma'(L') = 18(6.105) = 109.9\ \text{kPa}$$

2 L′ e atrito lateral unitário na ponta (constante abaixo de L′)

$$f_{L'} = K\,\sigma'(L')\tan\delta' = 1.3(109.9)\tan 28^\circ = \mathbf{76.0}\ \text{kPa}$$

3 Q_s: área do triângulo (0 – L′) + do retângulo (L′ – L), vezes o perímetro

$$Q_s = p\left[\tfrac{1}{2} f_{L'} L' + f_{L'}(L - L')\right]$$
$$= 1.628\left[\tfrac{1}{2}(76.0)(6.10) + (76.0)(13.89)\right]$$

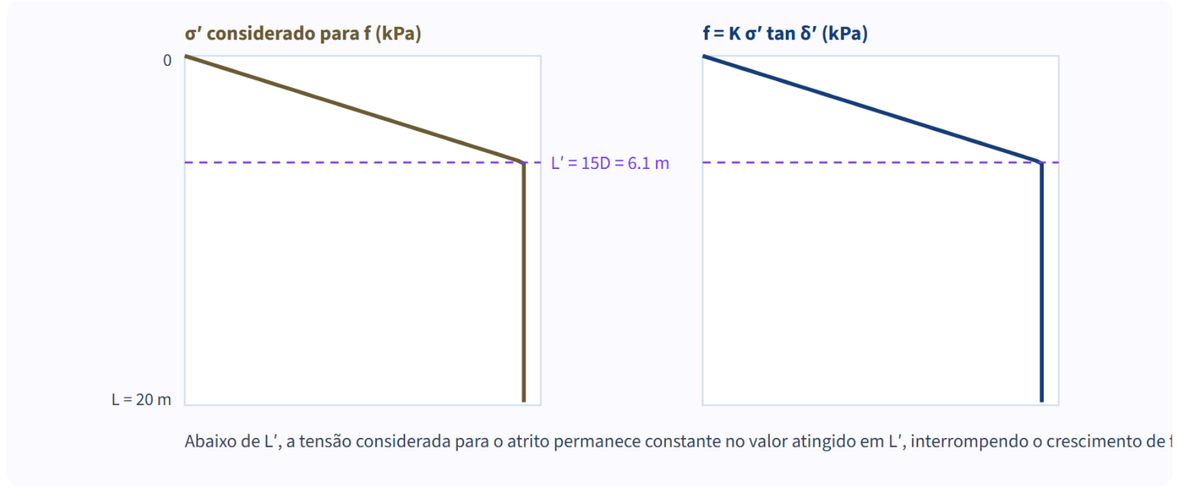


Q_S = 1,628 [231.9 + 1,055.4] = **2,096 kN**.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

O que ocorre se a profundidade crítica for ignorada?

TEORIA



Calcule-se a mesma estaca **sem considerar L′**, como se a tensão crescesse linearmente até a ponta:

$$f_L = 1.3(360)\tan 28^\circ = 248.8\ \text{kPa}$$
$$Q_s = p\,\tfrac{1}{2} f_L L = 4{,}051\ \text{kN}$$

2,096 kN em vez de **4,051 kN**: o segundo é cerca de **93% maior**. Desprezar a profundidade crítica em uma estaca longa gera um erro grande, contra a segurança.

Coyle e Castello: com uma única tensão média

TEORIA

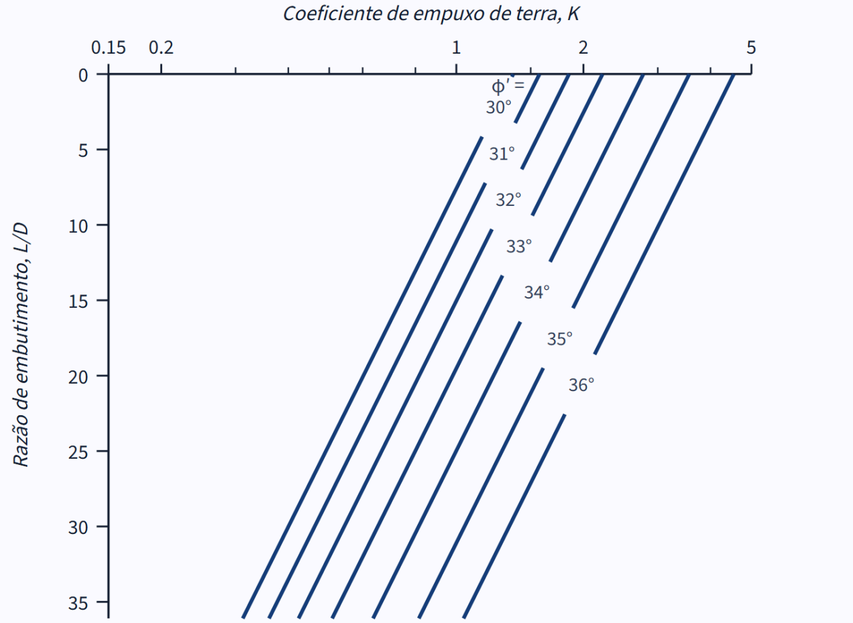
Coyle e Castello propuseram calcular o atrito lateral **em uma única etapa, com a tensão efetiva média ao longo do comprimento embutido**:

$$Q_s = f_{av}\, p\, L = (K\, \bar{\sigma}'_o \tan \delta')\, p\, L$$
$$\delta' = 0.8\varphi'$$

K é determinado a partir de ensaios e lido no ábaco (ao lado) em função de **L/D** e de φ′.

Não há uma profundidade crítica separada: o cálculo da média cumpre essa função

Por isso, os dois métodos de perímetro podem dar **grandes diferenças em estacas longas**



Enunciado

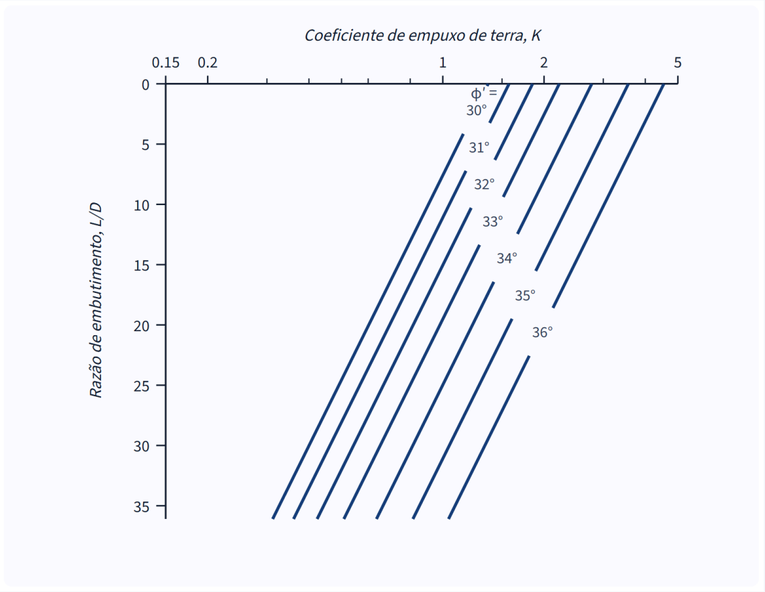
EXEMPLO

Dados

Estaca e areia	**Igual ao Exemplo 2: L = 20 m, D = 0.407 m, φ′ = 35°, γ = 18 kN/m³**
Coeficiente	$K \approx 0.41$ **(Figura 10; o ábaco está traçado até L/D = 36, e para L/D ≈ 49 a curva é lida por prolongamento; no módulo, inserir esse valor na caixa K, e o módulo preenche 0.48 com a própria leitura do ábaco)**
Ângulo de atrito	$\delta' = 0.8\varphi' = 0.8(35^\circ) = 28^\circ$

PEDE-SE

Determinar o **atrito lateral** Q_s da estaca pelo método de **Coyle e Castello (1981)**.



Solução

SOLUÇÃO

1 Tensão efetiva média ao longo do fuste (areia homogênea, sem nível do lençol freático)

$$\bar{\sigma}'_o = \frac{\gamma L}{2} = \frac{18(20)}{2} = \mathbf{180}\ \text{kPa}$$

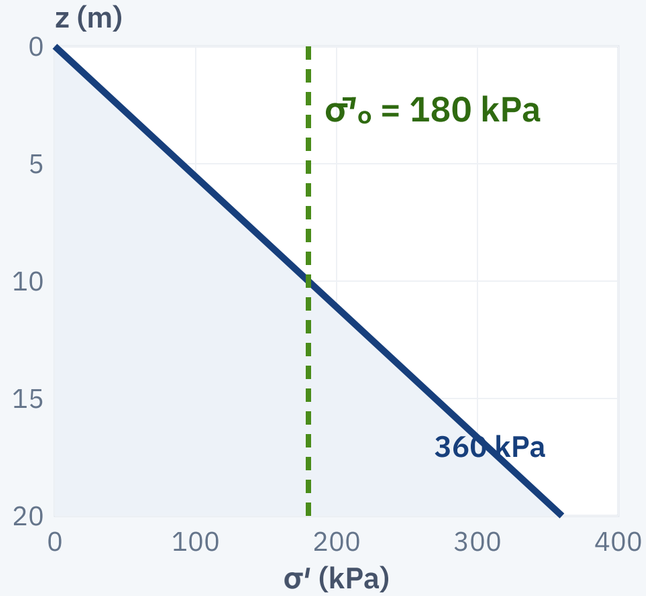
2 Atrito lateral unitário médio

$$f_{av} = K\,\bar{\sigma}'_o \tan\delta' = 0.41(180)\tan 28^\circ = \mathbf{39.2}\ \text{kPa}$$

3 Atrito lateral

$$Q_s = f_{av}\,p\,L = 39.2(1.628)(20) = \mathbf{1{,}278}\ \text{kN}$$

O método K–δ′ (com L′) resulta em **2,096 kN** e o de Coyle–Castello em **1,278 kN**: nesta estaca longa, há uma diferença de cerca de 64% entre os dois.



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**

Seleciona-se a extremidade superior se o solo é conhecido apenas por poucas sondagens ou se a capacidade depende principalmente da **ponta**

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

Enunciado

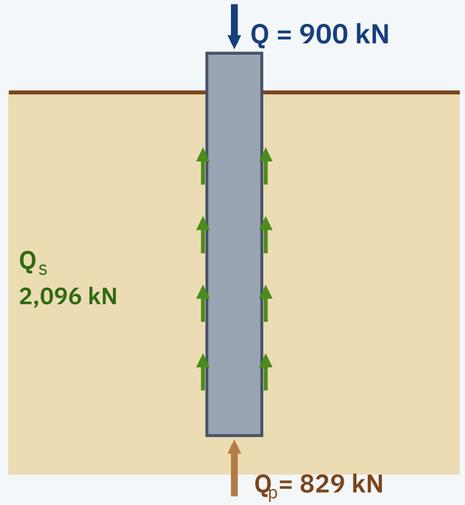
EXEMPLO

Dados

Resistência de ponta	**Q_p = 829 kN (Meyerhof, Exemplo 2)**
Atrito lateral	**Q_s = 2,096 kN (K–δ′, Exemplo 5)**
Fator de segurança	**FS = 3**
Carga de trabalho na estaca	**Q = 900 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

$$Q_u = Q_p + Q_s = 829 + 2{,}096 = \mathbf{2{,}925}\ \text{kN}$$

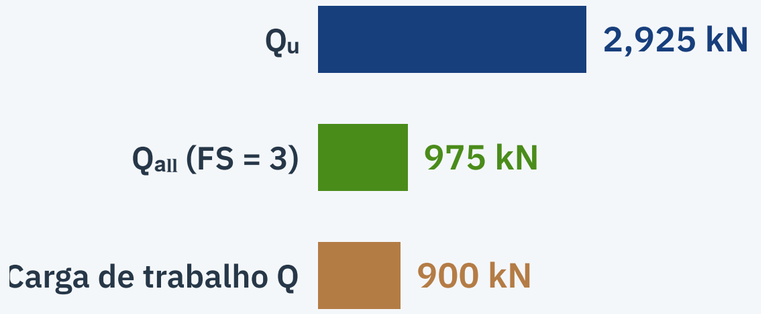
2 Capacidade de carga admissível

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FS} = \frac{2{,}925}{3} = \mathbf{975}\ \text{kN}$$

3 Verificação

$$Q = 900\ \text{kN} \ \leq \ Q_{all} = 975\ \text{kN} \quad \Rightarrow \quad \text{suficiente}$$

Taxa de utilização Q / Q_{all} = 900 / 975 = **0.92**.



Verificar a solução no GeoTerva ↗

Mesma estaca: Q_u e Q_{all} (FS = 3)

TEORIA

Q_u · Q_{all} (kN)

	Q_s: K–δ′ (com L′) 2,096 kN	Q_s: Coyle–Castello 1,278 kN
Q_p: **Meyerhof** 829 kN	2,925 · **975**	2,107 · **702**
Q_p: **Vesic** 1,721 kN	3,817 · **1,272**	2,999 · **1,000**
Q_p: **Coyle–Castello** 2,028 kN	4,123 · **1,374**	3,305 · **1,102**

Para uma estaca de vinte metros, dois métodos de atrito lateral e três de resistência de ponta fornecem seis valores diferentes de Q_u: **2,107 – 4,123 kN**. A escolha da combinação é uma **decisão de engenharia**.

Interpretar o intervalo, sem confiar em um único valor

O atrito lateral é a maior parte do total: a decisão sobre a **profundidade crítica** é determinante

Verificar com **prova de carga em estaca**, se possível

Resumo

Pontos-chave

$Q_u = Q_p + Q_s$; na areia, ambas as componentes dependem da **tensão efetiva**

Meyerhof: N^*_q a partir de φ', q_p limitado ($q_l = 0.5 p_a N^*_q \tan\varphi'$)

Vesic: $\bar{\sigma}'_o N^*_\sigma$; a rigidez da areia (m, I_{rr}) entra no cálculo

Coyle e Castello: $N^*_q(\varphi', L/D)$ e $K(\varphi', L/D)$ ajustados a capacidades medidas

Atrito lateral: $f = K\sigma'\tan\delta'$, constante abaixo de $\mathbf{L' \approx 15D}$

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

Referências bibliográficas

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

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.

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.

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.