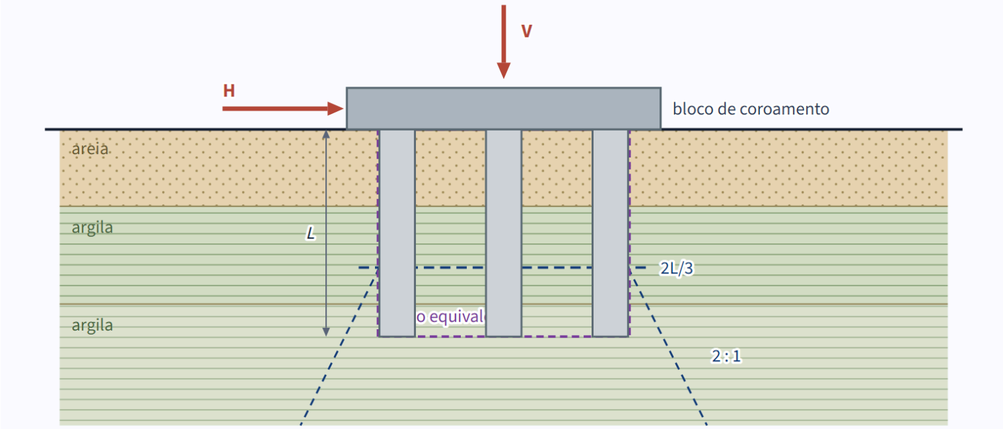
Apresentação de aula de geotecnia · Estacas

Análise do grupo de estacas

Aula: a carga sobre cada estaca de um grupo sob um bloco de coroamento, sua capacidade, seu recalque e seu comportamento sob carga horizontal; exemplo resolvido para cada tópico.

- Bloco de coroamento rígido
- Eficiência do grupo · bloco
- Recalque
- Carga horizontal: multiplicadores p
- Exemplos resolvidos



Introdução

O que veremos nesta aula?

- Determinar a **carga em cada estaca** sob um bloco de coroamento rígido e reconhecer a estaca sujeita a tração
- Construir, camada por camada, a capacidade da **estaca isolada** como base da capacidade do grupo
- Aplicar a **eficiência do grupo** (Converse–Labarre, Los Angeles, Seiler–Keeney; regras de estaca cravada e escavada em areia) camada por camada
- Verificar a **ruptura em bloco** do grupo e escolher **o menor valor**
- Calcular os recalques elástico (Vesic) e por **adensamento** (espraiamento 2:1)
- Interpretar os multiplicadores p e as parcelas desiguais das fileiras sob **carga horizontal**

ROTEIRO DA AULA

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

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

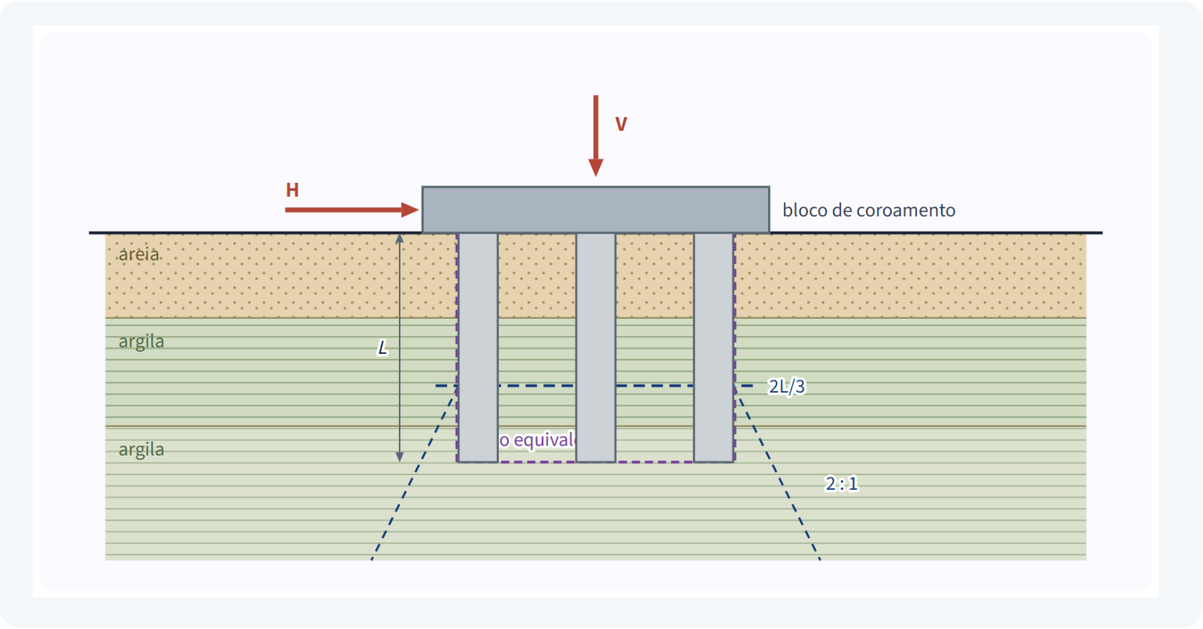
2 · **Enunciado**: dados e o que se pede

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

Esta apresentação baseia-se na apresentação sobre **estaca em solo estratificado**: o cálculo camada a camada da estaca isolada foi tratado naquela apresentação; aqui, examina-se o seu papel dentro do grupo.

O que muda quando as estacas atuam em conjunto?

TEORIA



As estacas dispõem-se em fileiras sob um **bloco de coroamento**; quando estão próximas, o solo entre elas e ao redor tem de servir a todas de uma só vez. Três aspectos mudam, e o módulo trata cada um como uma verificação distinta:

Capacidade: o solo entre as estacas é solicitado pelo fuste de cada estaca; cada estaca suporta menos do que suportaria isolada (eficiência $\eta < 1$). Se o solo é fraco e as estacas estão próximas, o grupo e o solo entre elas podem também romper como um único **bloco**.

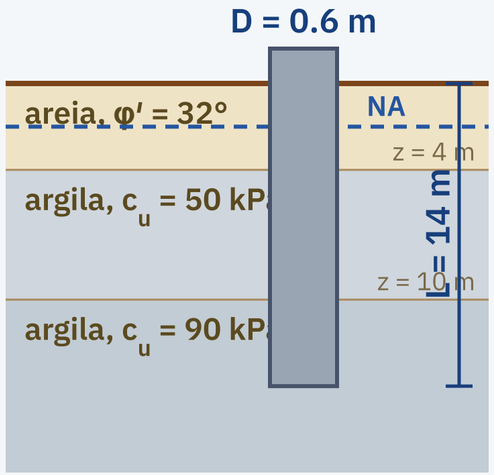
Recalque: a carga do grupo se distribui sobre **a área de todo o grupo**, e não sobre a de uma estaca isolada, e atinge as camadas de argila muito abaixo das pontas; o grupo sofre recalque muito maior que o de uma estaca isolada.

Carga horizontal: as fileiras de trás trabalham em solo empurrado e deformado pelas estacas precedentes; a fileira da frente recebe mais carga e as demais, menos.

O grupo utilizado ao longo da aula

Grupo de exemplo (modelo inicial do módulo)

Estacas	**9 estacas escavadas (diâmetro D = 0.60 m, comprimento L = 14 m), 3 fileiras × 3 estacas, base do bloco de coroamento no terreno**
Espaçamento	$s_x = s_y = 1.80\ \mathrm{m}\ (3.0\,D)$
Solo	**areia de 0–4 m (φ′ = 32°), argila de 4–10 m (c_u = 50), argila de 10–18 m (c_u = 90 kPa); γ = 18, γ_{sat} = 19 kN/m³**
Água subterrânea	**a 2.0 m de profundidade**
Cargas	$V = 1\,600\ \mathrm{kN},\ H = 900\ \mathrm{kN},\ M_y = 900\ \mathrm{kN\cdot m}$
Material, segurança	$E_p = 30\,000\ \mathrm{MPa},\ E_s = 30\ \mathrm{MPa},\ \nu_s = 0.30;\ FS = 3$



A maioria dos exemplos usa este grupo; os resultados coincidem com os números da aba **Modelo** do módulo.

Bloco de coroamento rígido: as estacas são molas idênticas

TEORIA

Admite-se que o bloco de coroamento é rígido e que as estacas são molas verticais idênticas. Um bloco rígido move-se como um **plano**: seu recalque e suas rotações são as únicas incógnitas. Por isso, a carga em cada estaca é uma função **linear** de sua posição (regra do grupo de parafusos):

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

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

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

Se M_y é positivo, acrescenta pressão ao lado **+x** (o lado empurrado pela carga horizontal, o lado da frente). Os momentos são tomados **na base do bloco de coroamento**: uma carga H à altura h acima da base resulta em M_y = H h.

Se as estacas estiverem dispostas em quincôncio (triangular), Σxy não é nulo; o módulo toma os somatórios a partir das posições das estacas e resolve as duas equações em conjunto.

A maior carga vai para as estacas da frente e a menor para as de trás; **se o momento é grande**, a estaca posterior pode tender a ser tracionada.

Enunciado

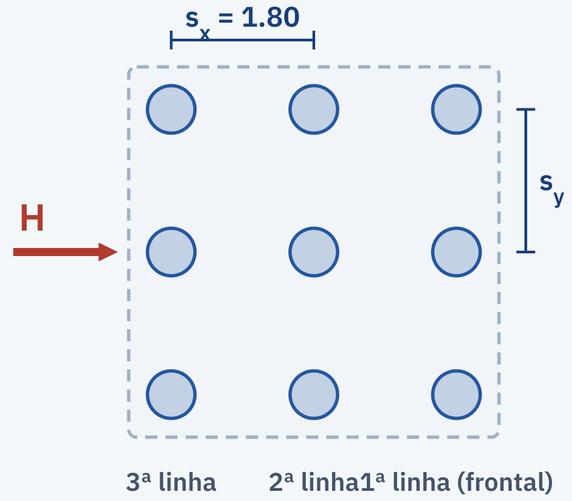
EXEMPLO

Dados

Grupo	**9 estacas escavadas, 3 fileiras × 3 estacas, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Solo	**areia 0–4 m (φ′ = 32°) · argila 4–10 m (c_u = 50) · argila 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Cargas	$V = 1\,600\ \mathrm{kN},\ M_y = 900\ \mathrm{kN\cdot m}$ **(na base do bloco de coroamento)**
Título	**rígido; estacas idênticas**

PEDE-SE

Determinar a carga em **cada estaca**. As fileiras são numeradas **a partir da frente** (frente = lado empurrado pela carga lateral, +x).



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Divisão igual

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

2 Σx² (grupo simétrico, forma fechada)

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

3 Coeficiente de momento (C = 0, pois $M_x = 0$)

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

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

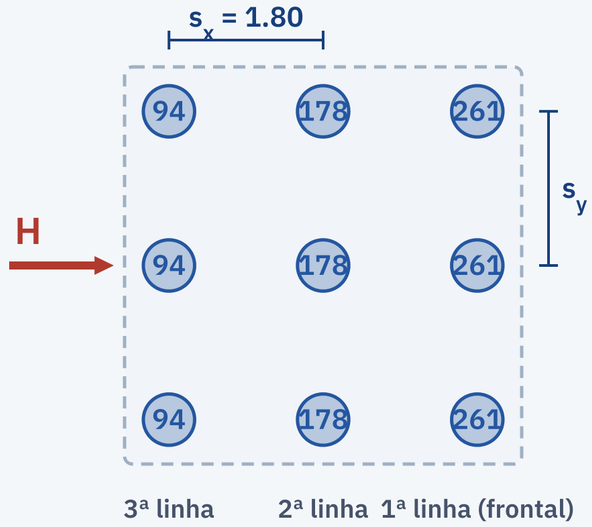
4 Cargas das fileiras: P = V/n + B x (x = +1.8; 0; −1.8 m)

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

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

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

Total: 3(261.1 + 177.8 + 94.4) = **1,600 kN** = V. A maior carga está nas estacas da frente (261.1 kN), a menor nas de trás (94.4 kN); **nenhuma estaca está sob tração**.



Verificar a solução no GeoTerva ↗

Se o momento é grande, as estacas posteriores ficam tracionadas

TEORIA

Se o momento é grande em relação à carga vertical, as estacas do lado oposto ao do momento são **descarregadas** e podem ficar tracionadas. A estaca resiste à tração **apenas pelo fuste**: na camada de argila, com o valor integral; na camada de areia, com **três quartos** da sua resistência à compressão; a ponta nada contribui.

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

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

Estaca isolada em tração: $T_{max} \le T_u/FS$. Estacas tracionadas **em conjunto**: $\Sigma T \le T_g/FS$; o bloco é retido pelo seu peso próprio e pelo cisalhamento nas faces laterais.

VERIFICAÇÃO À COMPRESSÃO

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

A maior carga em estaca é comparada com a carga admissível da **estaca isolada**; o efeito de grupo não é considerado aqui. Sob momento, a estaca mais carregada recebe mais do que V/n e pode ultrapassar a sua parcela **mesmo quando o grupo está dentro da sua própria capacidade**.

Enunciado

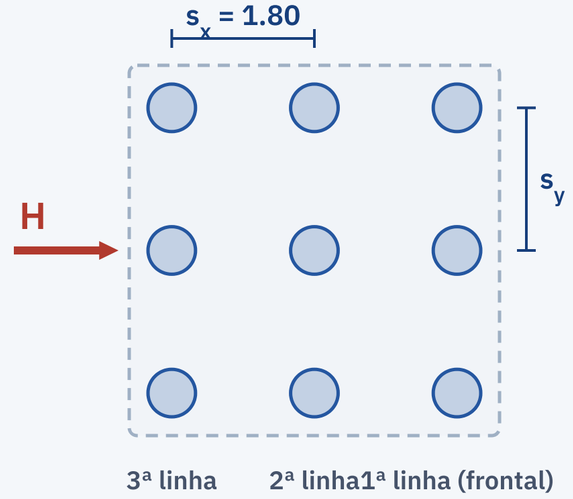
EXEMPLO

Dados

Grupo	**9 estacas escavadas, 3 fileiras × 3 estacas, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Solo	**areia 0–4 m (φ′ = 32°) · argila 4–10 m (c_u = 50) · argila 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Carga	$V = 1\,600$ kN, **momento aumentado:** $M_y = 2\,400$ kN·m
Estaca isolada	**Contribuições de Q_s (Exemplo 3): areia 49.8, argila 311.0, argila 317.2 kN**
Eficiência	**areia 0.767, argila 0.727 (Exemplo 5–6)**

PEDE-SE

Determinar as cargas; verificar com FS = 3 a capacidade da estaca tracionada e das estacas tracionadas **em conjunto**.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

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

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

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

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

2 Capacidade de uma estaca isolada à tração (areia × 0.75, argila × 1)

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

Estaca tracionada: T_{max} = **44.4 kN** ≤ T_u/FS = 221.9 kN → **adequada**. O número de estacas tracionadas é 3 (fileira posterior), tração total ΣT = 133.3 kN; a verificação do grupo é feita na etapa seguinte.

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

3 Capacidade conjunta das 3 estacas à tração: soma dos fustes efetivos × 3

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

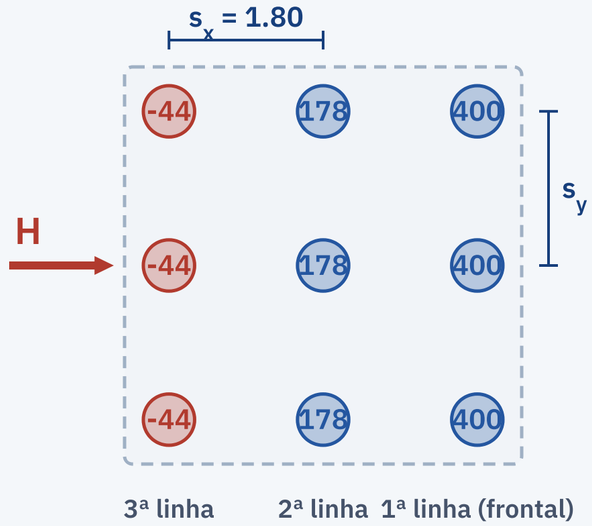
4 Bloco de tração (3 estacas, L_t = D = 0.6 m, B_t = 4.2 m): cisalhamento lateral + peso do bloco

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

5 Verificação: o menor valor e FS

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

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



Verificar a solução no GeoTerva ↗

A capacidade do grupo parte da capacidade da estaca isolada

TEORIA

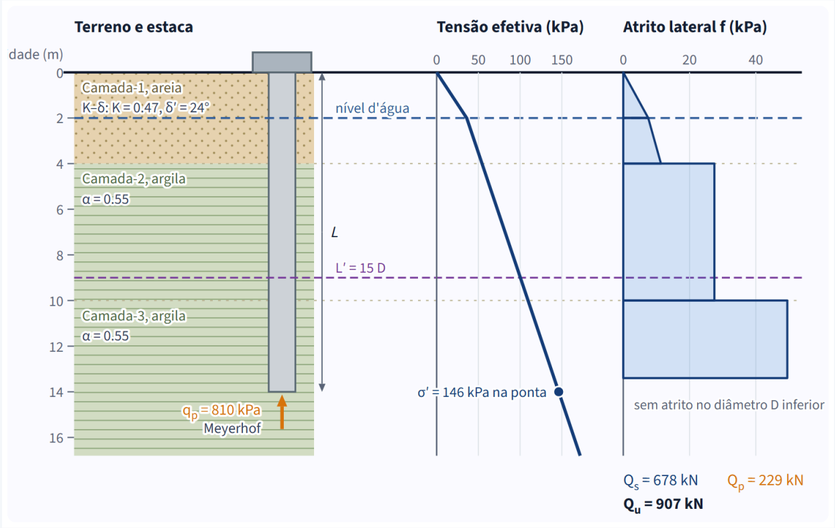
Primeiro, calcula-se a resistência **isolada** de uma estaca do grupo: cada camada pela regra do seu próprio material, **sem resistência informada**. As regras são as da apresentação *estaca em solo estratificado*:

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

Areia: f = Kσ′tanδ′ (profundidade crítica L′ = 15D). Em estaca escavada, **K = K₀ = 1 − sinφ′**, δ′ = 0.75φ′; em estaca cravada, K = 1.4K₀.

Argila: α, λ ou β. Em estaca escavada, **α* = 0.55** ($c_u/p_a \le 1.5$) e α* = 0 ao longo dos **1.5 m superiores e de 1D inferior**.

Ponta: regra da camada em que a ponta se encontra: em areia, $q'N^*_q \le q_l$; em argila, $9c_u$ (em estaca escavada pode-se selecionar Reese–O'Neill).



Enunciado

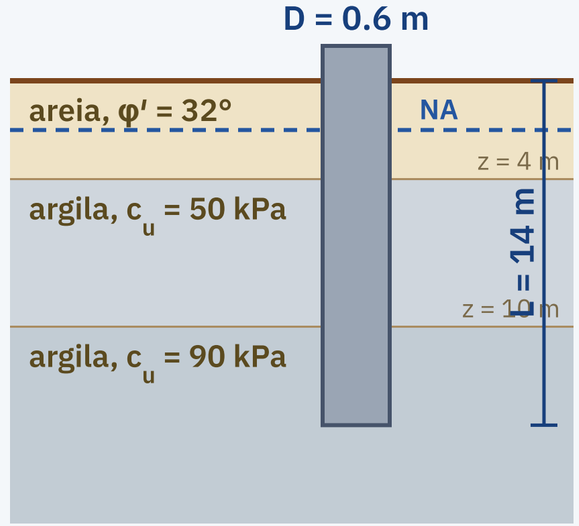
EXEMPLO

Dados

Grupo	**9 estacas escavadas, 3 fileiras × 3 estacas, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Solo	**areia 0–4 m (φ′ = 32°) · argila 4–10 m (c_u = 50) · argila 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Formulação	**estaca escavada: K = K_0 = 0.47, δ′ = 0.75φ′ = 24°, α* = 0.55; ponta: Meyerhof**
Água subterrânea	**2.0 m**
Peso específico	$\gamma = 18,\ \gamma_{sat} = 19\ \mathrm{kN/m^3}$

PEDE-SE

Determinar, camada por camada, a resistência de **fuste** de uma estaca isolada, a resistência de **ponta** e o valor de **Q_u**; verificar $P_{max} \le Q_u/FS$.



Solução (1/3)

SOLUÇÃO

1. Areia (0–4 m): L′ = 15D = 9 m > 4 m, sem limitação; σ′(2) = 18(2) = 36.0 e σ′(4) = 36.0 + (19 − 9.81)(2) = 54.4 kPa

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

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

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

Solução (2/3)

SOLUÇÃO

2 Argila (4–10 m): α* = 0.55 (c_u/p_a = 0.5 ≤ 1.5); a janela de 1.5 → L − D = 13.4 m cobre a camada por inteiro

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

3 Argila (10–14 m): a janela termina em 13.4 m → desconsidera-se o 1D inferior = 0.6 m; comprimento efetivo 13.4 − 10 = 3.4 m

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

Solução (3/3)

SOLUÇÃO

4 Soma do fuste e ponta (camada da ponta: argila, c_u = 90 kPa, N^*_c de Meyerhof = 9)

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

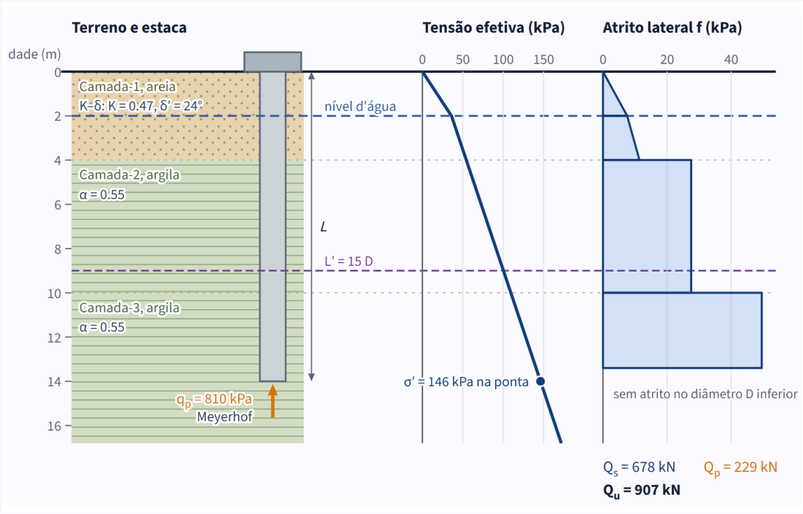
$$q_p = 9(90) = 810\ \text{kPa}$$

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

5 Capacidade de uma estaca isolada e verificação

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

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



Verificar a solução no GeoTerva ↗

Estacas muito próximas suportam menos do que quando isoladas

TEORIA

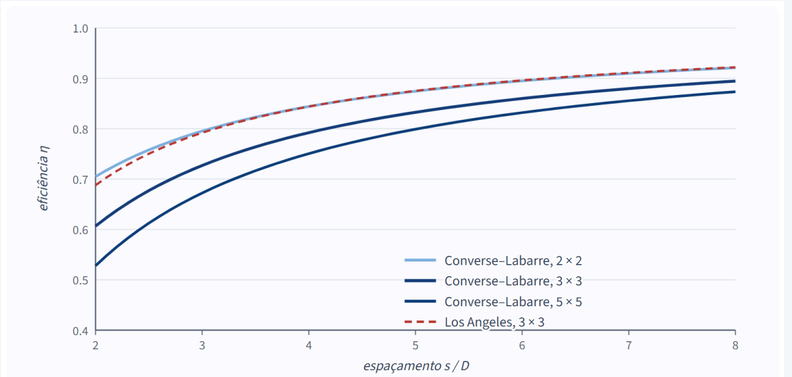
À medida que as estacas se aproximam, os solos cisalhados e tensionados por cada uma delas se sobrepõem. A **eficiência do grupo** é a razão entre a capacidade do grupo e a soma das capacidades das estacas isoladas. A fonte apresenta três equações empíricas para um grupo de $n_1 \times n_2$ estacas de diâmetro D e espaçamento d:

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

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

Converse–Labarre conta os **pares de estacas vizinhas**: $(n_1 - 1)n_2$ pares em linha e $(n_2 - 1)n_1$ pares lado a lado, cada um com o ângulo $\theta = \tan^{-1}(D/d)$ da respectiva distância.

O módulo usa esta equação na argila; com ela reduz o fuste das camadas de argila e a base da estaca cuja ponta está na argila.



À medida que o espaçamento aumenta, a eficiência tende a 1; em um grupo 3 × 3, cerca de 0.7 – 0.8 a 3D.

As outras duas equações e os limites

TEORIA

As outras duas equações da fonte também se referem a grupos retangulares. A equação de **Los Angeles** e a equação de **Seiler–Keeney** (com d em **ft**):

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

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

Seiler–Keeney tem um polo em 1 ft e não faz sentido abaixo de 2 ft; o módulo o fornece **a partir de 2 ft**.

Um espaçamento inferior a 2.5D é **sinalizado**: é o menor espaçamento que a fonte indica para estacas de atrito, e as equações foram escritas para espaçamentos maiores.

Para disposição triangular, Converse–Labarre é escrita contando os pares adjacentes; esta é uma **extensão do módulo** e fornece eficiência menor que a da malha com o mesmo espaçamento.

Enunciado

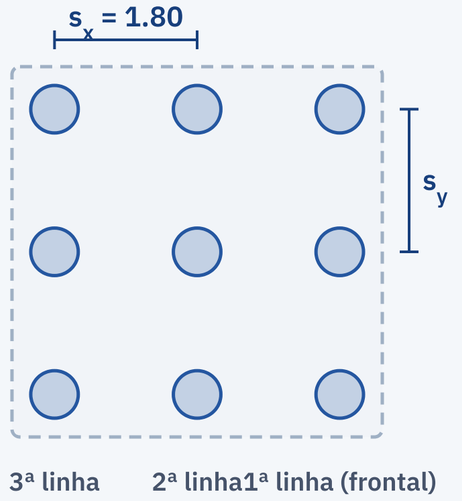
EXEMPLO

PEDE-SE

Determinar a eficiência do grupo pelas equações de **Converse–Labarre**, **Los Angeles** e **Seiler–Keeney**.

Dados

Grupo	**3 × 3 estacas, D = 0.60 m, espaçamento d = 1.80 m (nas duas direções)**
Seiler–Keeney	**d em pés: 1.80 m = 5.906 ft**



Solução

SOLUÇÃO

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

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

2 Los Angeles

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

3 Seiler–Keeney (d = 5.906 ft)

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

As três equações resultam no intervalo 0.727 – 0.831. Em argila, o módulo utiliza **Converse–Labarre** (0.727).

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Eficiência em areia: não uma equação, mas uma regra

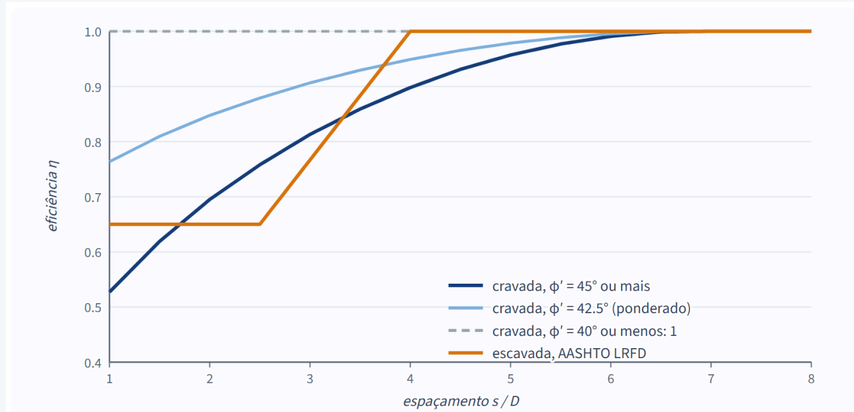
TEORIA

A estaca cravada **compacta** a areia fofa ou medianamente compacta; nessa areia o grupo suporta tanto quanto a soma das estacas (nos ensaios, até mais). Somente em areia compacta (φ′ > cerca de 40°) o espaçamento pequeno reduz a capacidade. Para estaca cravada, o módulo adota o ábaco da fonte e **nunca eleva a eficiência acima de 1**:

- φ′ ≤ 40°: **η = 1**
- 40° < φ′ < 45°: **interpolação linear** entre 1 e a curva de 45°
- φ′ ≥ 45°: curva de 45° (1.0 em s/D = 7; 0.53 em s/D = 1)

A **estaca escavada** não compacta o solo e pode até afrouxá-lo. A AASHTO LRFD multiplica a resistência de cada estaca escavada do grupo por **0.65** para s/D = 2.5 e por **1.0** para 4:

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



A eficiência do grupo na camada de areia é aplicada ao fuste dessa camada e à resistência de ponta da estaca cuja base está na areia. Espaçamento: **a menor distância entre duas estacas**.

Enunciado

EXEMPLO

Dados

Espaçamento	**s = 1.80 m, D = 0.60 m: s/D = 3.0**
Estaca escavada	**regra da AASHTO em areia**
Estaca cravada	**areia, $\varphi' = 42^\circ$ (curva de 45° em s/D = 3: $\eta_{45} = 0.813$)**

PEDE-SE

Determinar a eficiência da camada de areia para uma estaca **escavada** e para uma estaca **cravada** em areia com φ′ = 42°; o que ocorre para φ′ = 35°?

Solução

SOLUÇÃO

1 Estaca escavada (AASHTO): s/D = 3.0

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

2 Estaca cravada, φ′ = 42°: peso w = (φ′ – 40)/5 e a curva de 45°

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

3 Estaca cravada, φ′ = 35°

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

Na mesma faixa, a estaca **escavada** em areia assume 0.767, enquanto a estaca **cravada** (em areia fofa a medianamente compacta) assume 1.00: a cravação compacta o solo, a perfuração não.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

O módulo de cada camada é o módulo do respectivo solo

TEORIA

O fuste da estaca é seccionado nos limites das camadas e cada trecho é calculado pelo seu próprio método. O efeito de grupo relativo ao solo também deve ser aplicado **trecho a trecho**: a eficiência de uma camada é a eficiência desse solo, enquanto a **base** adota a eficiência do solo sobre o qual se apoia:

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

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

Camadas de **argila** e base da estaca com a ponta na argila: Converse–Labarre.

Camada de **areia**: ábaco para estacas cravadas, regra da AASHTO para estacas escavadas.

A eficiência do grupo **não é um dado de entrada**, mas uma **média ponderada** das contribuições das camadas: a estaca que recebe a maior parte da carga da areia reflete o efeito de grupo dessa areia, ao passo que a estaca suspensa na argila reflete o efeito de grupo da argila.

Enunciado

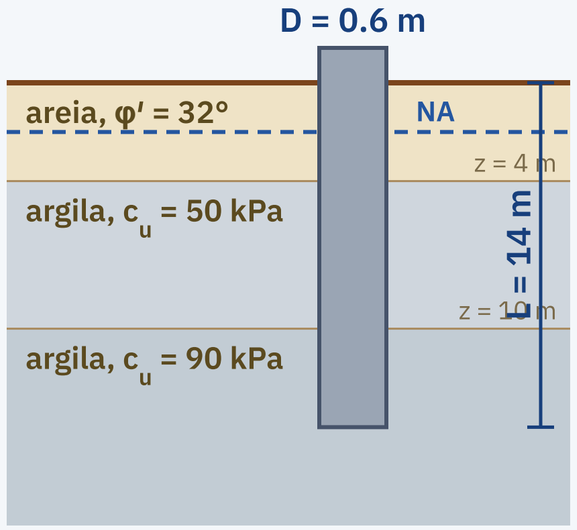
EXEMPLO

Dados

Estaca isolada (Exemplo 3)	Q_{s1} = 49.8 (areia), Q_{s2} = 311.0, Q_{s3} = 317.2 (argila), Q_p = 229.0 kN
Eficiências	areia (escavada, s/D = 3): 0.767; argila: 0.727; base (argila): 0.727
Grupo	9 estacas

PEDE-SE

O que são Q_{ind} e a **eficiência do grupo** $\eta = Q_{ind}/\Sigma Q_u$?



Solução

SOLUÇÃO

1 Contribuição efetiva de cada parte (η Q): fuste na areia, fuste na argila 1, fuste na argila 2, base

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

2 Capacidade efetiva de uma estaca e do grupo

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

3 Eficiência do grupo

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

O grupo suporta **73%** da soma das estacas atuando isoladamente (areia η = 0.767, argila η = 0.727).

Verificar a solução no GeoTerva ↗

O grupo pode romper como uma fundação profunda

TEORIA

Se as estacas estão próximas, o grupo e o solo entre elas podem descer **em conjunto**: uma fundação profunda de dimensões $L_g \times B_g$ e profundidade L. Sua capacidade é o **cisalhamento** nas quatro faces mais a **capacidade de carga** sob a base:

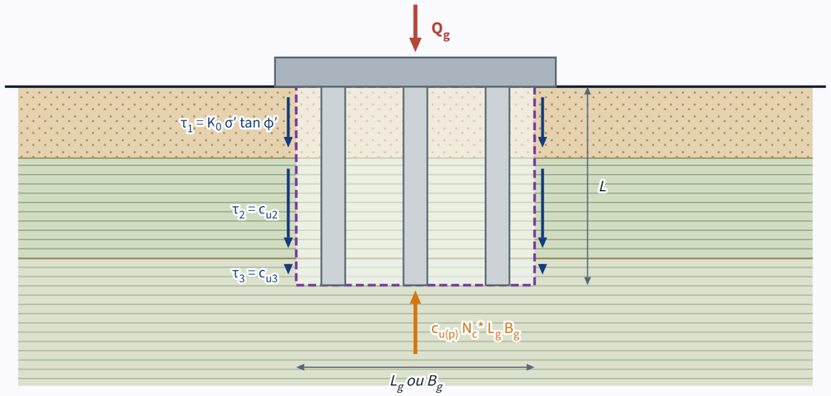
$$Q_{block} = \sum_i \tau_i \, P_b \, \Delta L_i + q_b \, L_g B_g \qquad P_b = 2(L_g + B_g)$$

Face lateral da argila: $\tau = c_u$ (solo desliza contra solo, não reduzida por α).

Face lateral na areia (extensão do módulo em relação à fonte): $\tau = K_0 \sigma' \tan\varphi'$, $K_0 = 1 - \sin\varphi'$.

Base em argila: $q_b = c_u N^*_c$; N^*_c obtido do ábaco, em função de L/B_g e L_g/B_g.
Base em areia: nQ_p.

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



Enunciado

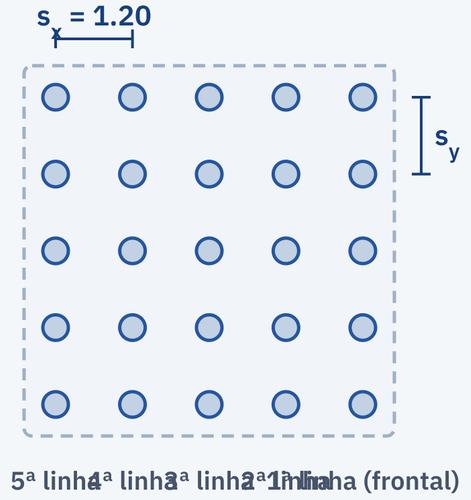
EXEMPLO

Dados

Grupo	**9 estacas escavadas, 3 fileiras × 3 estacas, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Solo	**areia 0–4 m ($\varphi' = 32°$) · argila 4–10 m (c_u = 50) · argila 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Bloco	**$L_g = B_g = (3 - 1)(1.8) + 0.6$**
Faces laterais	**areia: $\tau = K_0\sigma'_v\tan\varphi'$ (σ'_v = 31.6 kPa); argila: $\tau = c_u$**
Base	**argila, c_u = 90 kPa; N^*_c obtido do ábaco ($L_g/B_g = 1$)**
Individual	**Q_{ind} = 5,952 kN (Exemplo 6); V = 1,600 kN, FS = 3**

PEDE-SE

Determinar o valor de Q_{block}, a capacidade do grupo e sua carga admissível.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Dimensões do bloco e perímetro

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

2 Cisalhamento nas faces laterais ($\tau\ P_b\ \Delta L$)

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

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

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

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

3 Base: N^*_c obtido do ábaco para $L/B_g = 14/4.2 = 3.33$ e $L_g/B_g = 1$

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

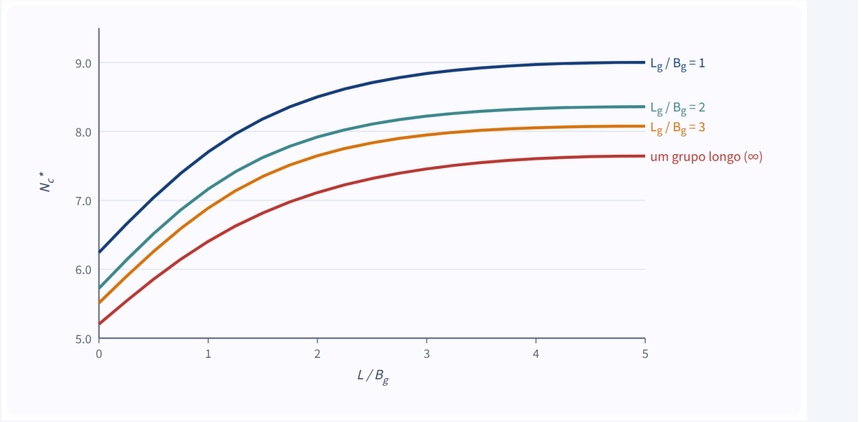
4 Capacidade do bloco, capacidade do grupo e carga admissível

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

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

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

A capacidade em bloco é **mais de 4 vezes** a soma das capacidades individuais: neste grupo, **as estacas individuais governam** (individual). O bloco entra em jogo em grupos com estacas muito próximas e em grande número; ao lado, o ábaco.



Verificar a solução no GeoTerva ↗

Enunciado

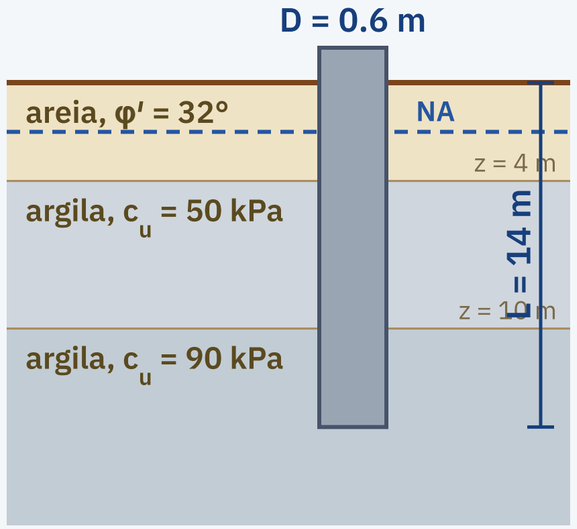
EXEMPLO

Dados

Grupo	**5 × 5 estacas cravadas, D = 0.40 m, s = 1.20 m (3D), L = 12 m**
Solo	**areia única, φ′ = 32°, γ = 18, γ_{sat} = 19 kN/m³, lençol freático a 3 m**
Estaca isolada	**Q_s = 285.7, Q_p = 318.0 kN (cravada, K–δ e Meyerhof)**
Eficiência	**estaca cravada, em areia com φ′ < 40°: η = 1**

PEDE-SE

Comparar os valores de Q_{ind} e Q_{block} e determinar a capacidade do grupo.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Estacas individuais (η = 1)

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

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

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

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

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

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

3 Base do bloco em areia: a base é a soma das resistências de ponta das estacas

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

4 Capacidade e eficiência do grupo

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

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

Aqui **o bloco é determinante**: em um grupo grande, a soma dos fustes das estacas supera a capacidade de cisalhamento do perímetro externo do grupo. Embora as estacas, individualmente, resultem em η = 1.00, a capacidade do grupo é **91%** da soma individual.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Vesic: três parcelas, depois o grupo

TEORIA

A estaca isolada recalca pelo encurtamento do seu próprio comprimento, pela compressão do solo sob a base e pela compressão do solo carregado ao longo do fuste. Vesic (1969) soma essas três parcelas para a carga de trabalho Q_W (Q_{ws} é a parcela do fuste e Q_{wp}, a da base):

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

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

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

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

A carga de trabalho $Q_W = V/n$; o módulo a divide entre o fuste e a ponta na razão **Q_s : Q_p**.

O grupo recalca **$\sqrt{(B_g/D)}$** vezes mais que a estaca isolada, sob a mesma carga por estaca (relação empírica de Vesic para estacas em areia).

ξ: distribuição da resistência lateral, entre 0.5 (uniforme) e 0.67 (crescente com a profundidade); $I_{wp} = 0.85$.

Enunciado

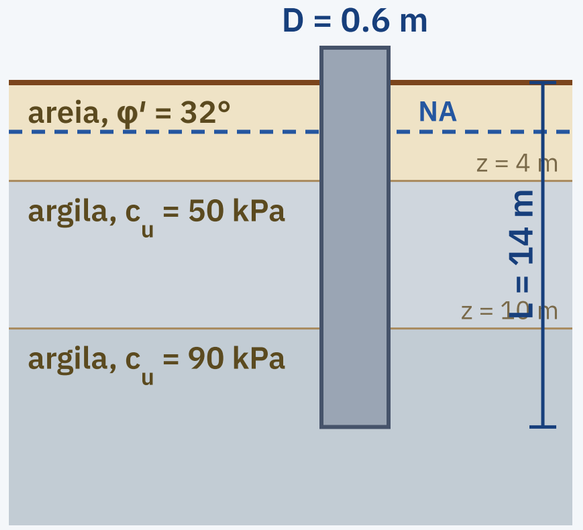
EXEMPLO

Dados

Grupo	**9 estacas escavadas, 3 fileiras × 3 estacas, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Solo	**areia 0–4 m (φ′ = 32°) · argila 4–10 m (c_u = 50) · argila 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Carga de trabalho	**Q_w = V/n = 177.8 kN; Q_s : Q_p = 678.1 : 229.0 (Exemplo 3)**
Material	$E_p = 30\,000$ MPa, $E_s = 30$ MPa, $\nu_s = 0.30$, $\xi = 0.6$, $I_{wp} = 0.85$

PEDE-SE

Determinar o recalque elástico de uma estaca isolada em três parcelas e o recalque elástico do **grupo**.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Distribuição da carga de trabalho

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

2 Encurtamento da estaca

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

3 Base

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

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

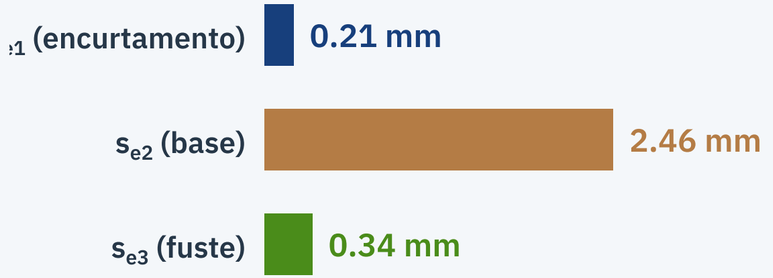
4 Fuste: $I_{ws} = 2 + 0.35\sqrt{(14/0.6)} = 3.69$

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

5 Estaca isolada e grupo

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

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



82% do recalque provém da parcela da base (s_{e2}); o recalque elástico total é de **7.9 mm**. O recalque principal das camadas de argila vem na etapa seguinte: adensamento.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Recalque lento e grande das camadas de argila

TEORIA

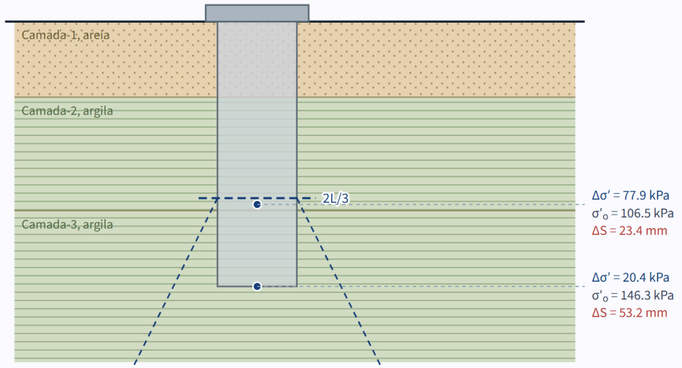
As argilas sob o bloco de coroamento recalcam lentamente e, em grande parte, por **adensamento**. A fonte aplica a carga do grupo, a partir do nível do bloco, a uma fundação equivalente situada **2L/3 abaixo** (as estacas transferiram parte da carga ao solo superior) e a espalha abaixo segundo **2 vertical : 1 horizontal**. No meio de uma camada de argila, situada a z abaixo do nível 2L/3, a tensão acrescida é:

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

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

Em argila sobre-adensada, utiliza-se C_s ($C_c/5$ se não for fornecido) até a tensão de pré-adensamento e, além dela, C_c.

Entra no cálculo a parte da camada de argila situada **abaixo** de 2L/3; σ'_o é tomada no meio dessa parte, conforme a camada e o nível d'água. $S_c = \Sigma\Delta S_i$.



Enunciado

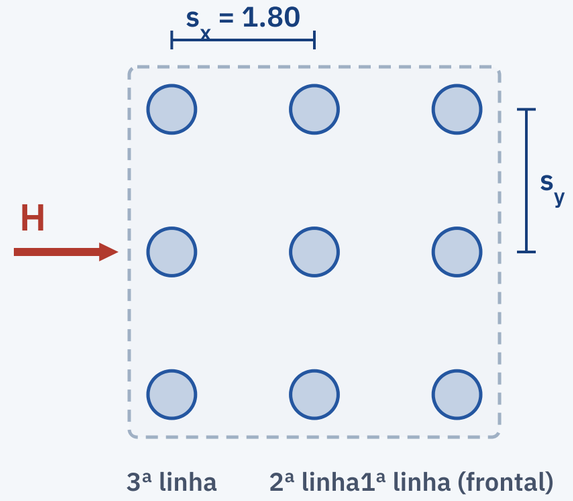
EXEMPLO

Dados

Grupo	**9 estacas escavadas, 3 fileiras × 3 estacas, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Solo	**areia 0–4 m (φ′ = 32°) · argila 4–10 m (c_u = 50) · argila 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Carga	$Q_g = V = 1\,600$ kN; **bloco** $L_g = B_g = 4.2$ m
Argila 1 (4–10 m)	$e_0 = 0.90,\ C_c = 0.28$ **(NC)**
Argila 2 (10–18 m)	$e_0 = 0.70,\ C_c = 0.20$ **(NC)**

PEDE-SE

Determinar o nível 2L/3 e calcular o recalque de **cada camada de argila** (a parte abaixo de 2L/3) e o recalque total por adensamento.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Nível 2L/3 (a partir da base do bloco de coroamento)

$$z_0 = \frac{2L}{3} = \frac{2(14)}{3} = \mathbf{9.33}\ \text{m} \ \Rightarrow\ \text{argila 1 (9.33–10 m) e toda a argila 2 entram no cálculo}$$

2 Argila 1 (4–10 m): 9.33–10 m, H = 0.67 m; ponto médio 9.67 m, z = 0.33 m

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

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

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

3 Argila 2 (10–18 m): 10.00–18 m, H = 8.00 m; ponto médio 14.00 m, z = 4.67 m

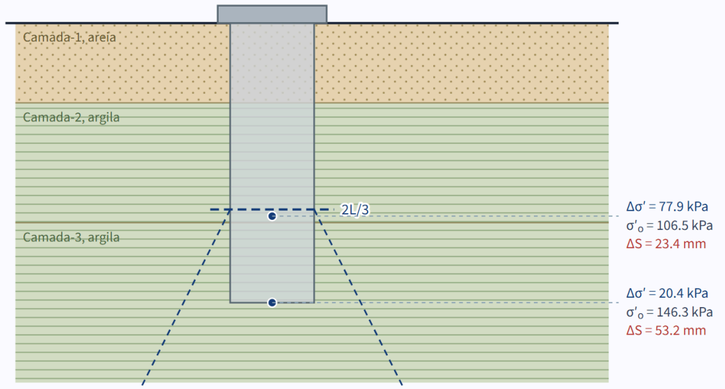
$$\Delta\sigma' = \frac{1\,600}{(4.2+4.67)(4.2+4.67)} = 20.4\ \text{kPa} \qquad \sigma'_o = 146.3\ \text{kPa}$$

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

4 Recalque total por adensamento e sua combinação com a parcela elástica

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

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



91% do recalque provém do adensamento, e 69% disso provém das argilas de 10–18 m: o recalque do grupo é governado pela argila espessa **bem abaixo** das pontas; o recalque de uma estaca isolada não revela isso.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

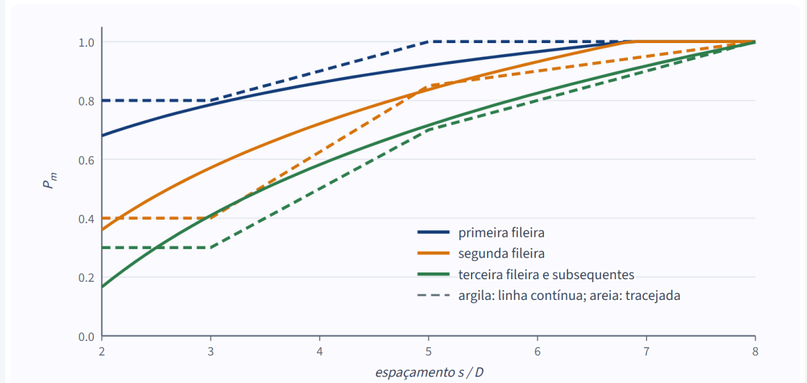
As fileiras de trás estão na sombra das da frente

TEORIA

Sob carga horizontal, a estaca empurra o solo e o solo reage ao longo da estaca (curva p–y do módulo de carga horizontal). Quando as estacas ficam **alinhadas uma atrás da outra** na direção da carga, cada uma trabalha no solo deformado e empurrado pela estaca à sua frente. Os ensaios (Brown et al. 1988; McVay et al. 1995; Rollins et al. 2006) mostram que a curva p–y do grupo mantém a forma, mas é reduzida por um **multiplicador-p P_m**; o multiplicador depende da fila e do espaçamento:

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

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



Areia: multiplicadores da AASHTO LRFD (a 3D e 5D: 0.8·0.4·0.3 e 1.0·0.85·0.7; variação linear entre eles).

Em solo estratificado, a curva p–y de **cada camada** é escalonada pelo multiplicador correspondente ao tipo de solo dessa camada. Se a carga for **reversível**, cada linha adota a média dos multiplicadores de linha do grupo.

Enunciado

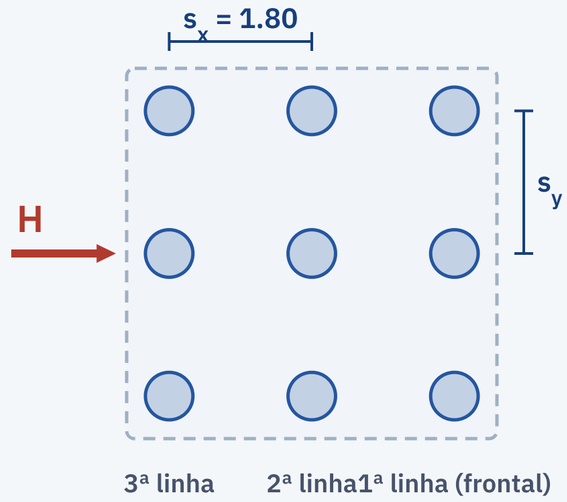
EXEMPLO

Dados

Espaçamento (na direção da carga)	s_x = 1.80 m, D = 0.60 m: s/D = 3
Argila	Equações de Rollins et al. (2006)
Areia	AASHTO LRFD: em 3D, $P_m = 0.8 \cdot 0.4 \cdot 0.3$

PEDE-SE

Determinar os **multiplicadores p** das três fileiras para a camada de argila; se a carga for **invertida**, qual é o multiplicador médio das fileiras para a argila e para a areia?



Solução

SOLUÇÃO

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

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

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

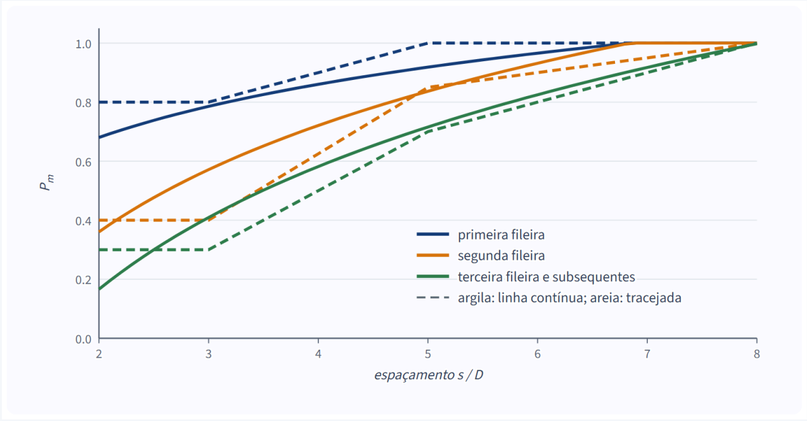
$$P_{m3} = 0.60(1.099) - 0.25 = \mathbf{0.409}$$

2 Carga reversível: média das fileiras

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

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

A fila frontal retém cerca de 79% da curva, e a terceira fila e as seguintes apenas 41% (em argila); em areia, 80% e 30%. À medida que o espaçamento aumenta, os multiplicadores se aproximam de 1 (a 5D, areia 1.0 · 0.85 · 0.7).



Verificar a solução no GeoTerva ↗

O bloco de coroamento sofre um único deslocamento

TEORIA

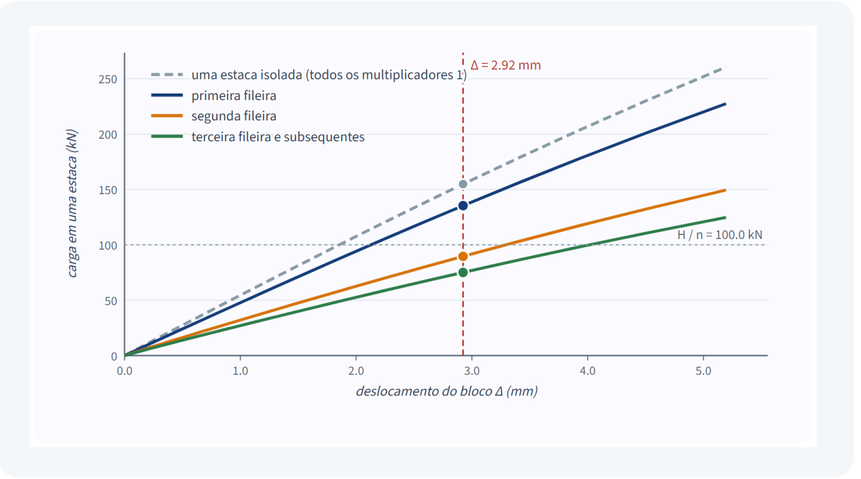
O bloco de coroamento é rígido e a sua rotação é impedida: **todas as cabeças de estacas se deslocam do mesmo valor Δ**; mas, como as curvas p–y são escaladas de forma diferente, as fileiras suportam cargas diferentes. O módulo encontra o Δ para o qual a soma das cargas das fileiras é igual à carga no bloco de coroamento:

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

A estaca da fileira k é a estaca isolada do **módulo de estaca sob carga horizontal** (elementos finitos + Newton); suas curvas são ajustadas pelos multiplicadores da respectiva fileira.

O deslocamento é **controlado**: a cabeça da estaca é mantida em Δ e sua reação é lida; assim, também se pode acompanhar o ponto de pico da curva com amolecimento (argila sob carregamento cíclico).

A carga máxima que o grupo pode suportar é o **primeiro pico** da soma por fileira; se a carga solicitada for maior que esse valor, o módulo o indica.



Enunciado

EXEMPLO

Dados

Solução (módulo)	**Δ = 2.92 mm; carga por estaca: 1ª fileira 135.3, 2ª fileira 89.6, 3ª fileira 75.1 kN**
Estaca isolada	**Suporta 154.8 kN em Δ; desloca-se 1.85 mm sob 100 kN**
Carga	**H = 900 kN, n = 9: parcela igual H/n = 100 kN**

PEDE-SE

Verificar o equilíbrio; determinar a razão entre o deslocamento do bloco de coroamento e o de uma estaca isolada e a **eficiência do grupo sob carga horizontal**.

Solução

SOLUÇÃO

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

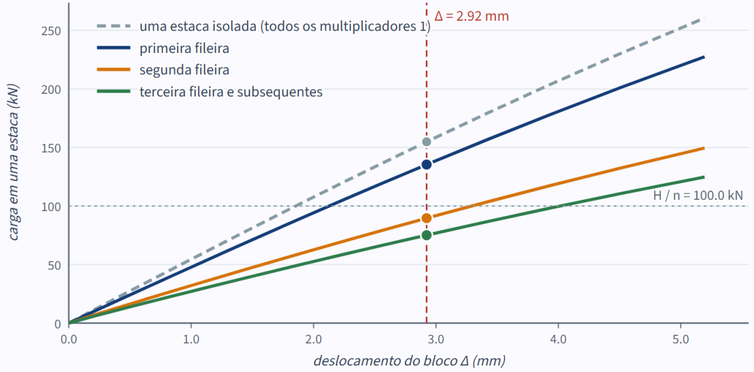
$$3(135.3 + 89.6 + 75.1) = \mathbf{900}\ \text{kN} = H\ \checkmark$$

2 Razão entre o deslocamento do bloco de coroamento e o da estaca isolada

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

3 Eficiência do grupo sob carga horizontal: carga média por estaca / carga da estaca isolada para o mesmo Δ

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



A fila frontal suporta **1.35 vez** a parcela igual, e a terceira fila, 0.75 vez; o bloco de coroamento se desloca **1.58 vez** mais que uma estaca isolada. O maior momento fletor ocorre na cabeça da estaca: 207 kN·m.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Qual valor vai para qual verificação?

TEORIA

Cargas nas estacas: $P_{max} \leq Q_u/FS$ (estaca isolada, sem efeito de grupo); estaca tracionada $T_{max} \leq T_u/FS$, e as estacas tracionadas em conjunto $\Sigma T \leq T_g/FS$

Capacidade do grupo: $V \leq Q_{all} = Q_{g(u)}/FS$; qual dos dois (individual ou bloco) governa

Recalque: elástico + adensamento, comparado com o valor admissível informado

Horizontal: deslocamento do bloco de coroamento, carga da fileira frontal, momento fletor máximo e eficiência lateral; comparados com o deslocamento admissível

A carga por estaca e o momento fletor são os esforços para o **projeto estrutural** da seção da estaca

GRUPO DE EXEMPLO: VERIFICAÇÕES

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

Enunciado

EXEMPLO

Dados

Grupo	**9 estacas escavadas, 3 fileiras × 3 estacas, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Solo	**areia 0–4 m (φ′ = 32°) · argila 4–10 m (c_u = 50) · argila 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Variável	**espaçamento das estacas s = 2.5D · 3D · 4D · 5D · 6D (nas duas direções)**
Cargas	**V = 1 600, H = 900 kN, M_y = 900 kN·m**

PEDE-SE

À medida que o espaçamento aumenta, como variam a capacidade do grupo, a eficiência e o deslocamento do bloco de coroamento?

Solução (1/2)

SOLUÇÃO

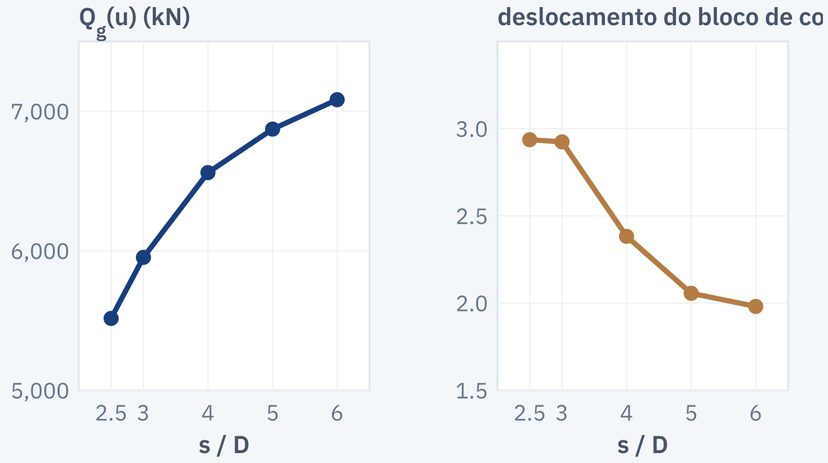
s / D	s (m)	η areia	η argila	$Q_{g(u)}$ (kN)	η grupo	Δ (mm)
2.5	1.50	0.65	0.677	5,515	**0.676**	2.94
3.0	1.80	0.77	0.727	5,952	**0.729**	2.92
4.0	2.40	1.00	0.792	6,560	**0.803**	2.38
5.0	3.00	1.00	0.832	6,871	**0.842**	2.06
6.0	3.60	1.00	0.860	7,083	**0.868**	1.98

s = 2.5D → 6D: capacidade **5,515 → 7,083 kN**, eficiência do grupo 0.68 → 0.87, deslocamento do bloco **2.94 → 1.98 mm**. À medida que o espaçamento aumenta, tanto a eficiência quanto os multiplicadores de p tendem a 1; 2.5D é o menor espaçamento dado pela fonte.

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

Comentário. Aumentar o espaçamento de 2.5D para 6D eleva a capacidade em 28% e reduz o deslocamento do bloco de coroamento em 33%; porém o bloco cresce e as estacas se dispersam mais. Na prática, trata-se de um compromisso entre 3D – 3.5D e 5D. No gráfico, $Q_{g(u)}$ à esquerda e Δ à direita.



Verificar a solução no GeoTerva ↗

Hipóteses de cálculo por trás dos números

TEORIA

Grupo: estacas verticais em malha retangular ou em arranjo triangular, de uma única seção e comprimento, sob bloco de coroamento rígido. O bloco transfere carga, mas não acrescenta resistência (a pressão passiva, o atrito sob ele e a capacidade de carga do solo sob o bloco são desconsiderados, a favor da segurança).

Estaca isolada: regras de solo estratificado, nenhuma resistência é informada.

Eficiência: equações empíricas de estacas cravadas em argila; em areia, um único espaçamento (a menor distância). Para disposição triangular, Converse–Labarre é uma **extensão**.

Bloco: a fundação da fonte na argila; o cisalhamento na areia e a base em areia são uma **extensão do módulo**.

Cargas: V inclui o peso do bloco de coroamento; a carga lateral e os momentos atuam na base do bloco. No arrancamento, considera-se apenas o fuste, areia ¾.

Recalque: é opcional; a parcela elástica com um único E_s e v_s, o adensamento pelo método 2:1, no meio de cada camada.

Lateral: os multiplicadores p provêm de ensaios em solos e espaçamentos específicos; os de espaçamento inferior a 3D são assinalados.

Resumo

Pontos-chave

Bloco de coroamento rígido: **P = V/n + Bx + Cy**; a maior carga está na estaca da frente e a menor, na de trás; se o momento é grande, a estaca de trás passa a trabalhar à **tração**

A **estaca isolada** é calculada camada por camada; a capacidade do grupo é construída sobre ela

A **eficiência** é aplicada camada a camada: Converse–Labarre na argila, o ábaco para cravação na areia ($\eta \leq 1$) e a regra da AASHTO para estacas escavadas

Capacidade = **min(individual, bloco)**; o bloco passa a governar em grupos com estacas pouco espaçadas e em grande número

Recalque: elástico (Vesic, com $\sqrt{(B_g/D)}$) + adensamento (espraiamento 2:1 a partir de 2L/3); o recalque do grupo é governado pela argila espessa

Lateral: os multiplicadores p diminuem da fileira da frente para a de trás; o bloco de coroamento sofre um único Δ, e as fileiras suportam cargas desiguais

Referências bibliográficas

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Reese, L.C. and O'Neill, M.W. (1989). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-HI-88-042, Federal Highway Administration, Washington; a base de uma estaca escavada em argila.

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

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

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

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

American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th ed.: os multiplicadores p para grupos de estacas e a resistência de grupos de estacas escavadas em solo não coesivo.

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

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

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

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

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

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

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

GeoTerva

Cálculos geotécnicos on-line

Da teoria à prática

Calcular, passo a passo no GeoTerva, o grupo 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.