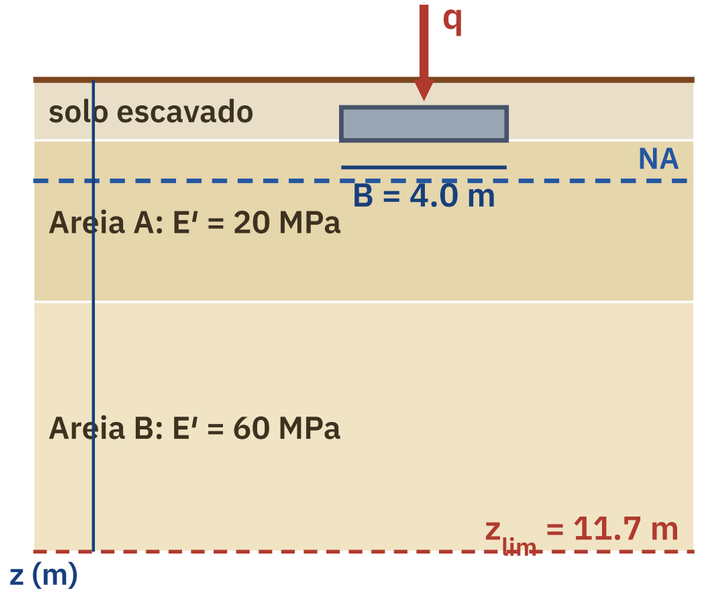
Apresentação de aula de geotecnia · Recalques

Recalque elástico: solo granular

Aula: da teoria da elasticidade aos coeficientes de Steinbrenner, do perfil em camadas à fundação flexível e rígida; as camadas de areia e pedregulho se comportam em condição drenada (E′, ν′); exemplo resolvido em cada tópico.

- Lei de Hooke
- Coeficientes de Steinbrenner
- Perfil estratificado
- Pressão líquida
- Sapata flexível e rígida
- Exemplos resolvidos



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

Introdução

O que veremos nesta aula?

- **Da lei de Hooke** à integral do recalque: $\varepsilon_z = [\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)]/E$ e $S = \int \varepsilon_z \, dz$
- Calcular os **coeficientes de Steinbrenner** (F_1, F_2, I_s) e obter o recalque no **centro** e no **canto** de uma sapata retangular
- Tratar as camadas granulares como **drenadas**: $E'/p_a = \alpha\, N_{60}$, $\nu' \approx 0.25–0.35$
- Somar o **perfil estratificado** pela diferença $I_s(z_{lower}) - I_s(z_{upper})$
- Determinar a **pressão líquida** (efeito da escavação) e a **profundidade de cálculo** (profundidade de influência)
- Distinguir o recalque de fundação **flexível** e **rígida** (rígida ≈ 0.93 × centro da flexível)

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

Sapata do exemplo: sapata retangular flexível de 4 m × 6 m, q = 180 kPa, profundidade de escavação de 1.5 m, nível do lençol freático a 2.5 m; camada de areia. Os recalques estão em mm.

O que este módulo calcula?

TEORIA

Este módulo considera **apenas camadas granulares** (areia, pedregulho) e calcula o **recalque elástico**: como a areia libera sua água imediatamente, todo o seu recalque é elástico.

A partir das tensões de **Boussinesq** do solo sob carga, a deformação específica é obtida pela **lei de Hooke**, e a integral da deformação específica é o recalque.

O recalque imediato das camadas de argila está no módulo Recalque elástico: solos coesivos; o adensamento, no módulo Adensamento; e a soma de todos, no módulo Recalque total.

A solução é **analítica**: fatores de influência em forma fechada e somatório camada por camada; não há elementos finitos.

Fora do escopo: método de Schmertmann, ábacos de SPT/CPT, módulo crescente com a profundidade (Mayne–Poulos), rigidez da fundação e interação solo–estrutura.

TIPO DE CAMADA

	Granular
Comportamento	drenado
E	E′ (p. ex., α N_{60})
v	0.25 – 0.35

Lei de Hooke e integral do recalque

TEORIA

Sob uma sapata **totalmente flexível** que transmite a pressão líquida q_{net}, o solo é um meio elástico homogêneo semi-infinito (tensões de Boussinesq). A lei de Hooke fornece a deformação vertical e a sua integral fornece o recalque:

$$S = \int \varepsilon_z \, dz = \int \frac{\Delta\sigma_z - \nu\,(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)}{E}\, dz$$

As tensões laterais dependem de v; por isso a deformação e o recalque variam **tanto com E quanto com v**.

À medida que v aumenta, as tensões laterais **reduzem** a deformação vertical: para o mesmo E, um solo com v = 0.5 recalca menos do que um com v = 0.3.

O recalque é **inversamente proporcional** a E: dobrar o módulo reduz o recalque à metade.

NOTAÇÕES

q_{net}: pressão líquida (aplicada após a escavação)

$\Delta\sigma_z$, $\Delta\sigma_x$, $\Delta\sigma_y$: acréscimos de tensão

E, v: constantes elásticas da camada

ε_z: deformação vertical (compressão +)

Enunciado

EXEMPLO

Dados

Acréscimo de tensão	$\Delta\sigma_z = 100\ \text{kPa},\ \Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y = 40\ \text{kPa}$
Solo	$E' = 20\ \text{MPa},\ \nu' = 0.30$
Fatia	**espessura 1.0 m**

PEDE-SE

Determinar a deformação vertical e a compressão da subcamada; comparar com a hipótese v = 0 (unidimensional).

Solução

SOLUÇÃO

1 Deformação vertical

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)}{E} = \frac{100 - 0.30(40 + 40)}{20{,}000} = \frac{76.0}{20{,}000} = \mathbf{0.00380}$$

2 Compressão da subcamada (H = 1.0 m)

$$\Delta S = \varepsilon_z H = 0.00380(1.0) = \mathbf{3.80}\ \text{mm}$$

3 Comparação: v = 0

$$\varepsilon_z = \frac{100}{20{,}000} = 0.00500 \ \Rightarrow\ \Delta S = 5.00\ \text{mm}$$

As tensões laterais (v = 0.30) reduzem a deformação em **24%**: 3.80 mm, contra 5.00 mm no caso unidimensional.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Solução fechada para o canto

TEORIA

Para o **canto** de um retângulo uniformemente carregado, a integral tem solução em forma fechada (Steinbrenner):

$$S = q_{net}\,\alpha\,B'\,\frac{1-\nu^2}{E}\,I_s \qquad I_s = F_1 + \frac{1-2\nu}{1-\nu}\,F_2$$

$$F_1 = \frac{A_0 + A_1}{\pi} \qquad F_2 = \frac{n'}{2\pi}\tan^{-1} A_2$$

m′ = L′/B′ e n′ = z/B′ (B′ é o lado menor do retângulo de canto). O **centro** é o canto comum de quatro retângulos (B/2 × L/2): α = 4, B′ = B/2. O **canto** é o canto do retângulo inteiro: α = 1, B′ = B. Qualquer outro ponto é a soma algébrica dos quatro retângulos que têm um canto nesse ponto.

> Para v = 0.5, (1 − 2v) = 0: **$I_s = F_1$** e (1 − v²) = 0.75.

NOTAÇÕES

α: número de retângulos de canto (4 no centro, 1 no canto)

B′: lado menor do retângulo de canto

m′ = L′/B′, n′ = z/B′

z: profundidade a partir do nível da sapata

I_s: fator de forma

A_0, A_1, A_2 e o limite da faixa

TEORIA

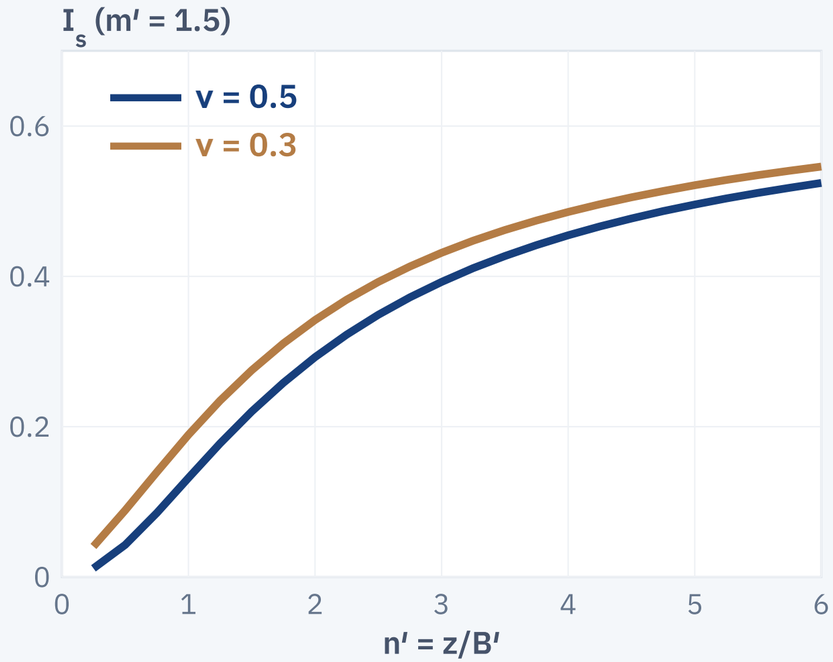
$$A_0 = m' \ln \frac{\left(1+\sqrt{m'^2+1}\right)\sqrt{m'^2+n'^2}}{m'\left(1+\sqrt{m'^2+n'^2+1}\right)}$$

$$A_1 = \ln \frac{\left(m'+\sqrt{m'^2+1}\right)\sqrt{1+n'^2}}{m'+\sqrt{m'^2+n'^2+1}} \qquad A_2 = \frac{m'}{n'\sqrt{m'^2+n'^2+1}}$$

Faixa ($m' \to \infty$): $F_1 = \ln(1+n'^2)/2\pi$ e $F_2 = (n'/2\pi)\tan^{-1}(1/n')$; na sua borda, $\alpha = 2$, $B' = B$.

O motor de cálculo calcula as fórmulas diretamente; não são necessários ábacos nem tabelas arredondadas.

I_s aumenta com a profundidade e **satura lentamente**: a contribuição das camadas profundas é limitada (ao lado, $m' = 1.5$).



Enunciado

EXEMPLO

Dados

Fundação	**B × L = 4 × 6 m, na profundidade z′ = 4 m abaixo do centro (a partir do nível da fundação)**
Retângulo de canto	**B/2 × L/2 = 2 × 3 m ⇒ B′ = 2 m, m′ = 1.5, n′ = z′/B′ = 2.0**
Solo	$\nu' = 0.30$

PEDE-SE

Determinar os valores de **A_0, A_1, A_2, F_1, F_2** e **I_s**.

Solução

SOLUÇÃO

1 A_0, A_1, A_2 (raízes quadradas: $\sqrt{(m'^2+1)} = 1.8028$; $\sqrt{(m'^2+n'^2)} = 2.5000$; $\sqrt{(m'^2+n'^2+1)} = 2.6926$)

$$A_0 = 1.5 \ln \frac{(1+1.8028)(2.5000)}{1.5(1+2.6926)} = \mathbf{0.3527} \qquad A_1 = \ln \frac{(1.5+1.8028)\sqrt{5}}{1.5+2.6926} = \mathbf{0.5662}$$

$$A_2 = \frac{1.5}{2(2.6926)} = \mathbf{0.2785}$$

2 F_1, F_2 e I_s

$$F_1 = \frac{0.3527+0.5662}{\pi} = \mathbf{0.2925} \qquad F_2 = \frac{2}{2\pi}\tan^{-1}(0.2785) = \mathbf{0.0865}$$

$$I_s = F_1 + \frac{1-2(0.30)}{1-0.30}F_2 = \mathbf{0.3419}$$

$I_s = F_1 + 0.5714\,F_2 =$ **0.3419**; se $\nu' = 0.5$, restaria $F_1 = 0.2925$ (14% menos).

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Módulo drenado E′ e ν′

TEORIA

Como a areia libera a água imediatamente, comporta-se de forma drenada; todo o seu recalque é elástico. Na referência (Das), o módulo de deformabilidade da areia é obtido a partir do SPT por **$E'/p_a = \alpha\, N_{60}$** ($p_a \approx 100$ kPa):

$$\frac{E'}{p_a} = \alpha\, N_{60} \qquad \alpha = 5\ (\text{areia fina})\ \ 10\ (\text{limpa NC})\ \ 15\ (\text{limpa OC})$$

O módulo da areia **aumenta** com a profundidade: dividir uma camada espessa em várias camadas com E′ crescente.

ν′ costuma ser 0.25–0.35; é necessário ν′ < 0.5 (em camada granular, não é possível informar ν′ ≥ 0.5).

O recalque elástico também varia com ν′: diminui à medida que ν′ aumenta.

α PARA AREIA

α	E′ (N_{60} = 20)
5	10 MPa
10	20 MPa
15	30 MPa

Enunciado

EXEMPLO

Dados

Areia	$N_{60} = 20$, $p_a = 100\ \text{kPa}$; $\alpha = 5,\ 10,\ 15$
Coeficiente de Poisson	$\nu' = 0.25;\ 0.30;\ 0.35$ **(E′ = 20 MPa)**
Referência	**Recalque de camada única para α = 10, ν′ = 0.30: S = 29.0 mm (Exemplo 6)**

PEDE-SE

Para cada α, **E′**; recalque para ν′ = 0.25, 0.30, 0.35 e 0.5.

Solução

SOLUÇÃO

1 $E' = \alpha N_{60} p_a$ ($N_{60} = 20$; $p_a = 100$ kPa)

$$E' = \alpha N_{60} p_a: \quad 5(20)(0.1) = \mathbf{10}\ \text{MPa},\ \ 10(20)(0.1) = \mathbf{20},\ \ 15(20)(0.1) = \mathbf{30}\ \text{MPa}$$

v′	0.25	0.30	0.35	0.50
S (mm)	30.1	29.0	27.7	22.8
$S / S_{v'=0.30}$	1.038	1.000	0.955	0.786

Quando E′ passa de 10 para 30 MPa, o recalque cai de 58 para 19 mm (inversamente proporcional). Com v′ de 0.25 para 0.35, o recalque muda apenas 8%; com v′ = 0.5, seria 21% menor.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

A escavação remove primeiro a carga

TEORIA

A escavação remove a **tensão efetiva de sobrecarga** no nível da base (nível do lençol freático inalterado). Quando um único módulo é usado tanto para o descarregamento quanto para o recarregamento, o levantamento elástico da escavação é recuperado no recarregamento; o recalque imediato é governado pela **pressão líquida**:

$$q_{net} = q_{gross} - \sigma'_{v0}(D_{exc})$$

$\sigma'_{v0}(D_{exc})$: tensão efetiva inicial na base da escavação (γ acima do nível do lençol freático, $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ abaixo dele).

Se $q_{net} \leq 0$, não ocorre recalque (um valor negativo corresponde a levantamento elástico).

Se não há escavação, $q_{net} = q_{gross}$ (a pressão é aplicada na superfície do terreno).

NEDEN NET?

A carga correspondente ao peso do solo removido na escavação é **devolvida** quando a fundação é executada. O recalque do solo decorre apenas da pressão **adicionada além** dessa carga.

Enunciado

EXEMPLO

Dados

Carga	$q_{gross} = 180\ \mathrm{kPa}$; **profundidade de escavação** $D_{exc} = 1.5\ \mathrm{m}$
Solo	$\gamma = 18.5\ \mathrm{kN/m^3},\ \gamma_{sat} = 19.5\ \mathrm{kN/m^3}$
NA	**(a) 2.5 m (abaixo da base da escavação) · (b) 1.0 m (acima da base da escavação)**

PEDE-SE

Em cada caso, determinar os valores de $\sigma'_{v0}(D_{exc})$ e q_{net}.

Solução

SOLUÇÃO

1. (a) nível do lençol freático 2.5 m > 1.5 m: sem água no fundo da escavação

$$\sigma'_{v0} = \gamma D_{exc} = 18.5(1.5) = 27.75\ \text{kPa} \ \Rightarrow\ q_{net} = 180 - 27.75 = \mathbf{152.25}\ \text{kPa}$$

2. (b) Nível do lençol freático a 1.0 m: a base da escavação fica 0.5 m abaixo da água (γ′ = 19.5 – 9.81 = 9.69 kN/m³)

$$\sigma'_{v0} = 18.5(1.0) + 9.69(0.5) = 23.345\ \text{kPa} \ \Rightarrow\ q_{net} = 180 - 23.345 = \mathbf{156.66}\ \text{kPa}$$

Se a água estiver acima da base da escavação, a tensão efetiva removida diminui e a pressão líquida **aumenta** de 152.2 para 156.7 kPa: um nível do lençol freático elevado amplia o recalque imediato.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Profundidade de influência: Δσ = p · q

TEORIA

O acréscimo de tensão sob a carga diminui com a profundidade, mas não se anula; é necessário um limite inferior para o somatório: a **profundidade de cálculo z_{lim}**. O módulo oferece duas regras:

Profundidade de influência: profundidade, abaixo do centro, em que o acréscimo de tensão de Boussinesq cai para a fração **p** da pressão aplicada (usualmente p = 10%): I(z′) = p e $z_{lim} = D_f + z'$.

Base do perfil: o cálculo termina na última camada (base rígida, como rocha ou pedregulho compacto; camada de Steinbrenner com base rígida).

Se o perfil terminar acima de z_{lim}, a última camada continua até z_{lim} com as mesmas propriedades.

$$I = \frac{\Delta\sigma_z}{q} = 4\, I_{corner}(m, n) \qquad m = \frac{B}{2z'},\ n = \frac{L}{2z'}$$

z′/B (p = %10 | %20)

L/B	p = %10	p = %20
1.0	2.09 B	1.40 B
1.5	2.55 B	1.70 B
2.0	2.92 B	1.94 B
5.0	4.33 B	2.68 B
faixa	6.34 B	3.13 B

Enunciado

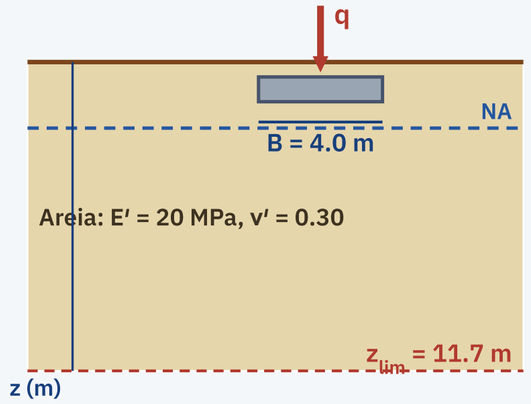
EXEMPLO

Dados

Fundação	**B × L = 4 × 6 m (L/B = 1.5), no fundo da escavação; D_f = 1.5 m**
Regra	**profundidade de influência, p = 10% (I = 0.10)**
Fórmula	$I = 4\,I_{corner}(m,n),\ m = B/2z',\ n = L/2z'$

PEDE-SE

z′ e **z_{lim}**; valor de I para z′ = 4 m e 10.19 m.



Solução

SOLUÇÃO

1 z′ = 4 m: m = 2/4 = 0.5; n = 3/4 = 0.75

$$I = 4\,I_{corner}(0.5;\,0.75) = 4(0.1071) = \mathbf{0.4283}$$

2 Condição I = 0.10: pelo método da bissecção

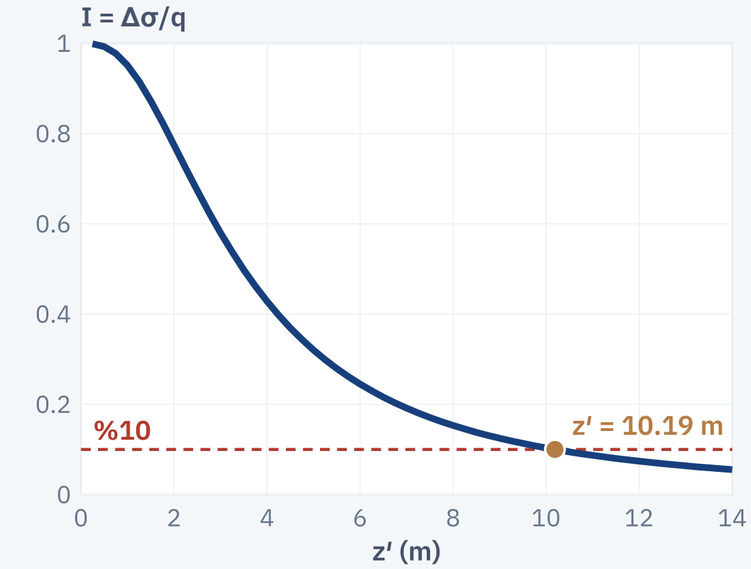
$$z' = \mathbf{10.19}\ \mathrm{m} \quad (= 2.55\,B)$$

$$z_{lim} = D_f + z' = 1.5 + 10.19 = \mathbf{11.69}\ \mathrm{m}$$

3 Verificação: z′ = 10.19 m ⇒ m = 2/z′, n = 3/z′

$$m = 0.1963,\ n = 0.2945$$

$$I = 4(0.0250) = \mathbf{0.1000}$$



O somatório é feito até a profundidade de 10.19 m (2.55 B); além dela situa-se a zona de pressão inferior a 10%. Na sapata quadrada, 2.09 B; na sapata corrida, 6.34 B: **uma sapata larga atua em maior profundidade**.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Contribuição da camada: diferença de I_s

TEORIA

Uma camada entre z_{top} e z_{bottom} (a partir do nível da fundação) contribui com a solução do meio semi-infinito **pela diferença entre duas profundidades**, com E e v próprios:

$$\Delta S = q_{net}\,\alpha\,B'\,\frac{1-\nu^2}{E}\,\left[I_s(z_{bottom}) - I_s(z_{üst})\right]$$

Esta é a integral da deformação de Hooke ao longo da camada (com as tensões do semiespaço homogêneo): para essa hipótese, é **exata**; o resultado não depende da espessura da subcamada Δz (as subcamadas servem apenas para as tabelas e os campos de cores).

Substitui o **módulo médio ponderado** da fórmula de camada única.

Uma camada cuja rigidez aumenta com a profundidade deve ser dividida em várias camadas.

TOTAL

O recalque do perfil é a **soma** das contribuições das camadas até z_{lim}: S = Σ ΔS_i. Considera-se apenas a parte de cada camada compreendida entre o nível da fundação e z_{lim}.

Enunciado

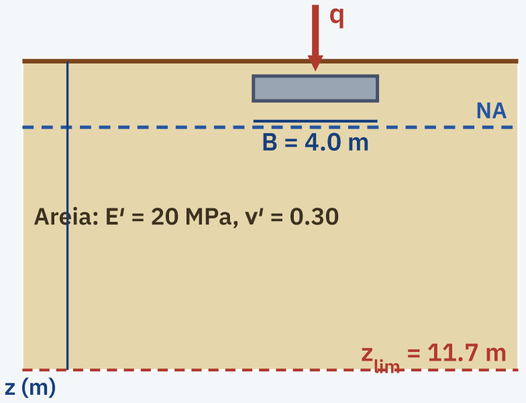
EXEMPLO

Dados

Fundação	**retangular, B × L = 4 × 6 m, profundidade da base D_f = 1.5 m (fundo da escavação)**
Carga	$q_{gross} = 180\ \mathrm{kPa}$ **(sapata flexível, pressão uniforme)**
Solo	**areia em camada única:** $E' = 20\ \mathrm{MPa}$, $\nu' = 0.30$, $\gamma = 18.5\ \mathrm{kN/m^3}$; **nível do lençol freático a 2.5 m**
Profundidade de cálculo	**profundidade de influência, p = 10% (Exemplo 5): z′ = 10.19 m, z_{lim} = 11.69 m; a camada continua até essa profundidade**

PEDE-SE

Recalque no **centro** da fundação flexível, **S**.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Tensão líquida (Exemplo 4a) e coeficiente k = $q_{net}(1 - \nu^2)/E$

$$q_{net} = 152.25\ \text{kPa} \qquad k = \frac{q_{net}(1-\nu^2)}{E} = \frac{152.25(0.91)}{20{,}000} = 0.006927\ (\text{adimensional})$$

2 Centro: α = 4, B′ = B/2 = 2 m, m′ = 1.5; z′ = 10.19 m ⇒ n′ = z′/B′ = 5.094

$$A_0 = 0.6569,\ A_1 = 0.9097,\ A_2 = 0.0545$$

$$F_1 = 0.4986,\ F_2 = 0.0441 \ \Rightarrow\ I_s = \mathbf{0.5239}$$

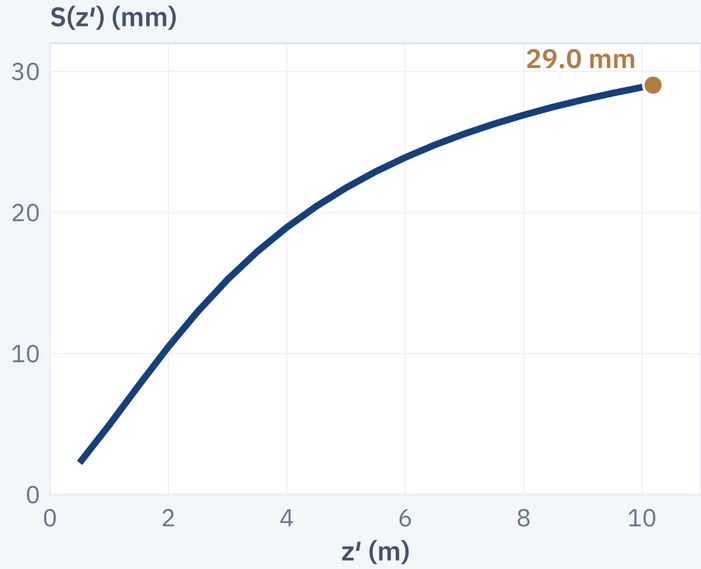
Solução (2/2)

SOLUÇÃO

3 Recalque: $S = k \cdot \alpha\, B' \cdot I_s$

$$S = 0.006927\,(4)(2)(0.5239) = 0.006927(4.1909)$$
$$= 0.02903\ \text{m} = \mathbf{29.0\ mm}$$

Recalque no centro de **29.0 mm**. No gráfico de S(z′): a maior parte do recalque ocorre nos 2B (8 m) superiores; a contribuição das camadas profundas é pequena.



Verificar a solução no GeoTerva ↗

Enunciado

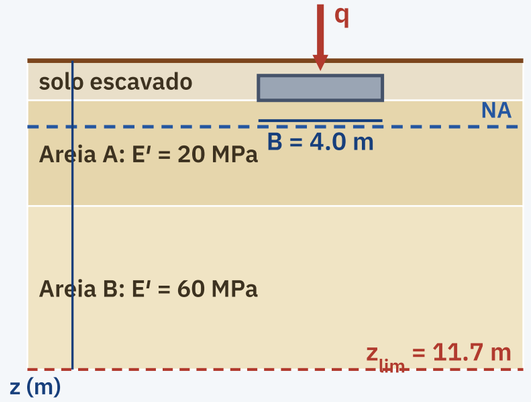
EXEMPLO

Dados

Fundação, carga	**B × L = 4 × 6 m, q_{gross} = 180 kPa, D_f = 1.5 m ⇒ q_{net} = 152.25 kPa**
Camada A	**espessura de 4 m a partir do nível da fundação:** $E' = 20$ MPa
Camada B	**abaixo, até z_{lim}:** $E' = 60$ MPa
Profundidade de cálculo	**z'_{lim} = 10.19 m**

PEDE-SE

Determinar o recalque **central** de cada camada e o total; comparar com o de camada única.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Coeficientes da camada $k = q_{net}(1 - \nu^2)/E$ e $\alpha\, B'\, I_s$ (centro; Exemplos 2 e 6)

$$k_A = \frac{152.25(0.91)}{20{,}000} = 0.006927 \qquad k_B = \frac{152.25(0.91)}{60{,}000} = 0.002309$$

$$8\, I_s(z' = 4) = 8(0.3419) = 2.7351 \qquad 8\, I_s(z'_{lim}) = 4.1909$$

Quando o perfil é dividido em duas camadas, cada camada é somada **com seu próprio módulo de deformabilidade**, pelo acréscimo de I_s em seu próprio intervalo.

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

2 Recalques das camadas e total

$$\Delta S_A = k_A (8I_s)_4 = 0.006927(2.7351) = 18.9 \text{ mm}$$

$$\Delta S_B = k_B \left[(8I_s)_{lim} - (8I_s)_4\right] = 0.002309(4.1909 - 2.7351) = 3.4 \text{ mm}$$

$$S = \Delta S_A + \Delta S_B = \mathbf{22.3 \text{ mm}}$$

O recalque total no centro é de **22.3 mm** (motor de cálculo: 22.3 mm). Com camada única (E = 20 MPa), resultava 29.0 mm: como a camada inferior é **mais rígida**, o recalque diminuiu **23%**; a camada A contribui com 85% do total.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Recalque no centro, no canto e rígido

TEORIA

As fórmulas fornecem o recalque de uma sapata **perfeitamente flexível**: **máximo no centro**, mínimo no canto; a diferença entre eles é o **recalque diferencial** da sapata flexível. Uma sapata rígida recalca **uniformemente**: cerca de 0.93 vez o valor do centro flexível:

$$S_{rigid} \approx 0.93\, S_{center} \qquad S_{diff} = S_{center} - S_{köşe}$$

Centro: α = 4, B′ = B/2. Canto: α = 1, B′ = B (canto do retângulo inteiro).

Embutimento: o fator de profundidade de Fox I_f (dependente de D_f/B, B/L e ν) reduz o recalque de uma fundação embutida. O módulo adota $I_f = 1$: sem correção, **a favor da segurança**.

NOTA

A sapata real situa-se entre o caso flexível e o rígido. O módulo fornece os dois valores extremos; a rigidez intermediária e a interação solo–estrutura estão fora do escopo.

Enunciado

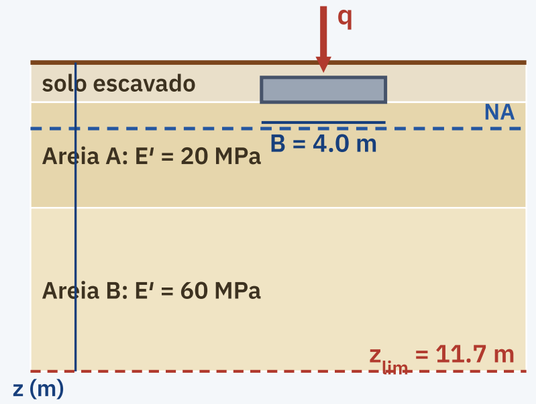
EXEMPLO

Dados

Perfil	**Exemplo 7: camada A (4 m) e camada B; z'_{lim} = 10.19 m**
Fundação	**flexível, 4 × 6 m**
Canto	**α = 1, B′ = B = 4 m ⇒ m′ = L/B = 1.5; n′ = z′/4**

PEDE-SE

Recalque de **canto**, recalque de sapata **rígida** e recalque **diferencial** de sapata flexível.



Solução

SOLUÇÃO

1 Valores de 4·I_s para o canto (n′ = z′/4)

$$z' = 4\ (n' = 1):\ 4\,I_s = 0.7565$$

$$z'_{lim} = 10.19\ (n' = 2.547):\ 4\,I_s = 1.5865$$

2 Recalque no canto

$$S_{köşe} = k_A(0.7565) + k_B(1.5865 - 0.7565) = 5.2 + 1.9 = \mathbf{7.2\ mm}$$

3 Rígido e diferencial

$$S_{rigid} = 0.93(22.3) = \mathbf{20.7\ mm} \qquad S_{diff} = 22.3 - 7.2 = \mathbf{15.2\ mm}$$

Centro 22.3, canto 7.2, rígido 20.7 mm; o recalque diferencial da sapata flexível é de **15.2 mm**. O canto recalca apenas 32% do valor do centro.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Enunciado

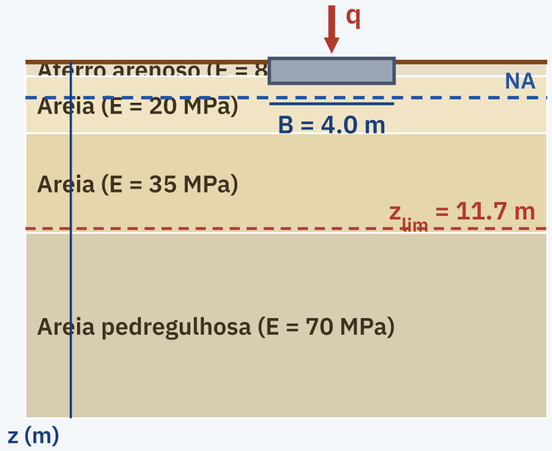
EXEMPLO

Dados

Fundação	**B × L = 4 × 6 m, q_{gross} = 180 kPa, profundidade da escavação 1.5 m, nível do lençol freático a 2.5 m**
Perfil	**Aterro, arenoso 0–1 m: E′ = 8 MPa; Areia 1–5 m: E′ = 20 MPa; Areia 5–12 m: E′ = 35 MPa; Areia pedregulhosa 12–25 m: E′ = 70 MPa**
Profundidade de cálculo	**profundidade de influência, p = 10%**

PEDE-SE

Recalque no **centro** e no **canto**, camada por camada; recalques flexível (centro, canto), rígido e diferencial.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Tensão líquida (fundo da escavação a 1.5 m)

$$\sigma'_{v0}(1.5) = 27.25\ \text{kPa} \quad \Rightarrow \quad q_{net} = 180 - 27.25 = \mathbf{152.75}\ \text{kPa}$$

2 Profundidade de cálculo e camadas

$z_{lim} = 1.5 + 10.19 = \mathbf{11.69}\ \text{m}$ a camada acima do fundo da escavação é removida

O fundo da escavação (1.5 m) está dentro da camada de Areia: somente a parte das camadas abaixo de 1.5 m é considerada. z_{lim} = 11.69 m, que permanece dentro da camada de Areia, de modo que essa camada é truncada.

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

Camada	z (m)	H (m)	E (MPa)	k (×10⁻³)	ΔS centro (mm)	ΔS no canto (mm)
Areia (SM, fofa–medianamente compacta)	1.50 – 5.00	3.50	20	6.950	17.3	4.6
Areia (SM, medianamente compacta)	5.00 – 11.69	6.69	35	3.972	6.8	3.7
Total					**24.1**	**8.3**

Centro **24.1 mm**, canto 8.3 mm, rígido 22.4 mm, diferencial 15.8 mm. O módulo fornece os mesmos valores.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Pontos de atenção ao ler os resultados

TEORIA

Hipóteses de cálculo:

- Nível da fundação = fundo da escavação; tensão uniforme em fundação totalmente flexível.
- Em cada camada, as tensões de um **semiespaço homogêneo** (com o ν da respectiva camada).
- Cada camada é granular e recalca em condição **drenada** (E′, ν′).
- Sem correção de embutimento; sapata rígida ≈ 0.93 × centro flexível.
- Convenção de sinais: o recalque é **positivo**; o seletor no cabeçalho alterna para a convenção em que o recalque para cima é positivo.

Fora do escopo: camadas de argila; Schmertmann, ábacos de SPT/CPT, módulo crescente com a profundidade, rigidez da fundação e interação solo–estrutura, elementos finitos.

ÁREAS DE COR

As vistas em corte mostram o acréscimo de tensão, o módulo de deformabilidade, a deformação e o recalque S(z) por meio de faixas coloridas; o valor no centro, no nível da sapata, é o recalque resultante.

Resumo

Pontos-chave

Hooke: $\varepsilon_z = [\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)]/E$; $\mathbf{S = \int \varepsilon_z\, dz}$; inversamente proporcional a E

Steinbrenner: $S = q_{net}\, \alpha\, B'\, (1 - \nu^2)/E \cdot I_s$; $I_s = F_1 + (1 - 2\nu)/(1 - \nu)\, F_2$; centro $\alpha = 4$, $B' = B/2$; canto $\alpha = 1$, $B' = B$

Areia: $E'/p_a = \alpha\, N_{60}$ ($\alpha = 5, 10, 15$), $\nu' \approx 0.25$–0.35; quanto maior ν', menor o recalque

Em camadas: $\Delta S = q_{net}\, \alpha\, B'\, (1 - \nu^2)/E \cdot [I_s(z_{bottom}) - I_s(z_{top})]$; independe da espessura da subcamada

Pressão líquida $q_{net} = q_{gross} - \sigma'_{v0}(D_{exc})$; **profundidade de cálculo** $I(z') = p$ (2.09 B para sapata quadrada, 2.55 B para L = 1.5 B, 6.34 B para sapata corrida)

Flexível: centro > canto (recalque diferencial); **rígida** ≈ 0.93 × centro; sem correção de embutimento ($I_f = 1$)

Referências bibliográficas

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

Steinbrenner, W. (1934). Tafeln zur Setzungsberechnung. Die Strasse, 1, 121–124.

Fox, E.N. (1948). The mean elastic settlement of a uniformly loaded area at a depth below the ground surface. Proc. 2nd ICSMFE, Rotterdam, 1, 129–132.

Bowles, J.E. (1996). Foundation Analysis and Design, 5th ed. McGraw-Hill.

Duncan, J.M. & Buchignani, A.L. (1976). An engineering manual for settlement studies. University of California, Berkeley.

Kulhawy, F.H. & Mayne, P.W. (1990). Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design. EPRI EL-6800.

NOTA

Todos os exemplos numéricos foram obtidos com o próprio motor de cálculo do módulo; o módulo fornece os mesmos valores.

Cálculos geotécnicos on-line

Da teoria à prática

Calcular passo a passo, no GeoTerva, o projeto do exemplo desta apresentação: o módulo abre com este modelo.

Abrir o módulo →

Página de teoria →

Abrir no celular
Os módulos de teste não exigem cadastro.