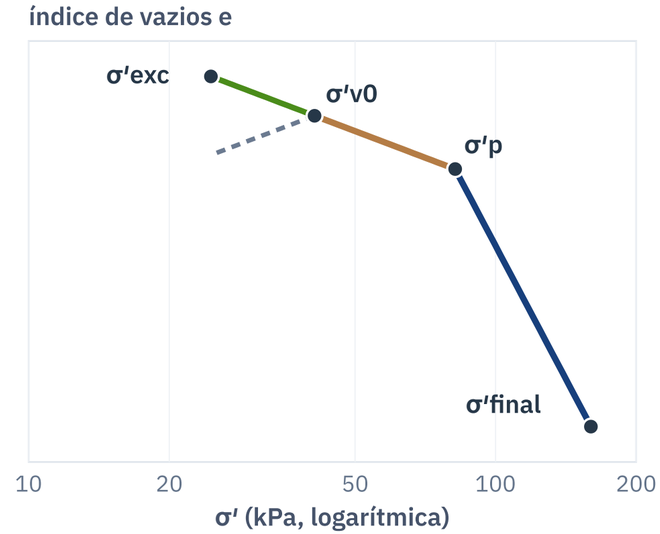
Apresentação de aula de geotecnia · Recalques

Recalque por adensamento

Aula: recalque por adensamento unidimensional de uma camada de argila; trajetória de tensões, pré-adensamento, escavação e expansão, tensões de Boussinesq, método do mv e tempo; exemplo resolvido em cada tópico.

- Trajetória de tensões
- $C_c \cdot C_r \cdot C_s$
- Escavação e levantamento
- Boussinesq
- Método de m_v
- Recalque ao longo do tempo



Introdução

O que veremos nesta aula?

- Acompanhar a **trajetória de tensões** da argila: $\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{p} \rightarrow \sigma'_{final}$ (C_s, C_r, C_c)
- Obter as tensões iniciais (σ_{v0}, u_0, σ'_{v0}) e a **tensão de pré-adensamento** ($\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$)
- Distinguir o efeito de descarregamento e expansão causado pela **escavação** e **a partir de qual referência** o recalque é medido
- Calcular o acréscimo de tensão de **Boussinesq** e a **profundidade de influência**
- Aplicar os **quatro regimes** de compressão da subcamada (recompressão, compressão virgem); comparar com o método $\mathbf{m_v}$
- Adensamento **dependente do tempo** (T_v, U, t_{50}, t_{90}) e traçado da curva recalque–tempo do perfil estratificado

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

Solo do exemplo: argila com 6 m de espessura, nível do lençol freático na superfície do terreno ($\sigma'_{v0} = 8.19\ z$), $e_0 = 1.0$, $C_c = 0.30$, $C_r = 0.06$; sapata de 4 × 6 m, q = 150 kPa. Os recalques estão em mm.

O que este módulo calcula?

TEORIA

Todas as camadas do perfil são de argila; nenhum outro solo pode ser inserido. O módulo calcula o **adensamento primário** da argila: quando a carga é aplicada, a água sai lentamente e a argila se comprime ao longo da trajetória de tensões.

O recalque imediato (elástico) está nos módulos Recalque Elástico; a soma dos dois está no módulo Recalque Total (2D).

A solução é **analítica**: acréscimo de tensão de Boussinesq, trajetória de tensões subcamada a subcamada e teoria de Terzaghi; poropressão hidrostática; não há elementos finitos.

Fora do escopo: camadas granulares, compressão secundária (C_α), recalque de areias por SPT/CPT, recalque em rocha, adensamento 2D/3D, capacidade de carga, liquefação.

CONVENÇÃO DE SINAIS

O recalque é **positivo**, o levantamento é **negativo**. Deformação líquida $S_{net} = S_c + S_{heave}$.

Não em uma única etapa, da tensão inicial à final

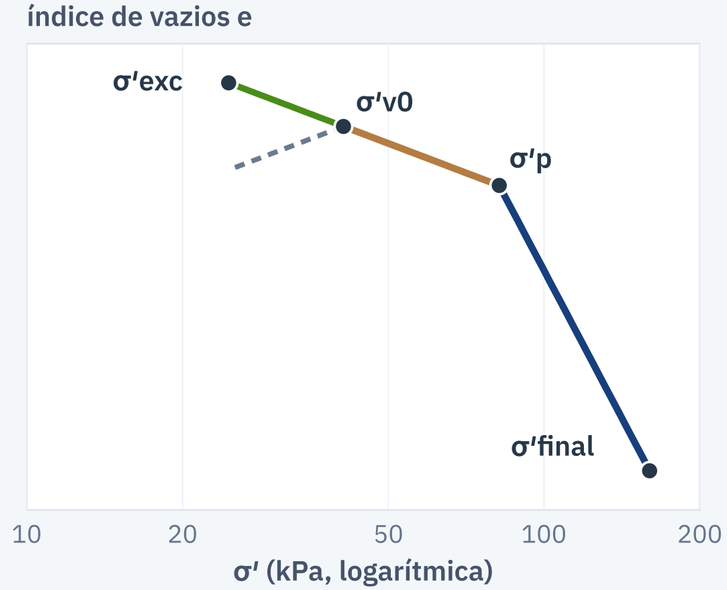
TEORIA

O cálculo nunca vai da tensão inicial à tensão final **em uma única etapa**. A escavação reduz a tensão efetiva e a argila **expande-se** ao longo da reta de descarregamento (C_s). Quando a estrutura a recarrega, a argila segue primeiro a mesma reta de volta até σ'_{v0} (o levantamento é revertido); em seguida recomprime-se com C_r até σ'_p e, se a tensão final ultrapassa σ'_p, comprime-se ao longo da reta virgem (C_c):

$$\sigma'_{v0} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{exc} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{v0} \xrightarrow{C_r} \sigma'_p \xrightarrow{C_c} \sigma'_{final}$$

σ'_p é a maior tensão do passado; **não é reduzida pela escavação**.

O ciclo de carregamento–descarregamento **fecha-se** em σ'_{v0}: uma carga que apenas devolve o solo sobrejacente removido não produz recalque em relação ao estado inicial, quaisquer que sejam C_s e C_r.



Esquema: linha tracejada = descarregamento; linha verde = recarregamento (C_s); laranja = recompressão (C_r); azul = compressão virgem (C_c).

No ponto médio de cada fatia

TEORIA

Cada camada entre o nível da fundação e a profundidade de cálculo z_{lim} é dividida em **subcamadas** de espessura no máximo igual a Δz (truncadas no nível do lençol freático); cada tensão é calculada no ponto médio da subcamada:

$$\sigma_{v0} = \sum \gamma_i h_i \qquad u_0 = \gamma_w (z - z_w) \qquad \sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0$$

γ é usado acima do nível do lençol freático e γ_{sat} abaixo dele; γ_w = 9.81 kN/m³.

As tensões iniciais do terreno são a **referência** para cada etapa seguinte.

Quanto mais fina a subcamada, mais exato o resultado; no cálculo manual, uma única subcamada fornece um resultado aproximado.

NÍVEL DO LENÇOL FREÁTICO NA SUPERFÍCIE DO TERRENO

Para γ_{sat} = 18, γ′ = 18 − 9.81 = 8.19 kN/m³ e σ'_{v0} = 8.19 z. Todos os exemplos seguintes usam este solo.

Enunciado

EXEMPLO

Dados

Solo	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$ **(acima do nível do lençol freático),** $\gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(abaixo)**
NA	**a 1.5 m da superfície do terreno**
Profundidades	**z = 1.5; 3.0; 4.5; 6.0 m**

PEDE-SE

Determinar os valores de **σ_{v0}, u_0, σ'_{v0}** em cada profundidade.

Solução

SOLUÇÃO

1 z = 3.0 m (NA a 1.5 m)

$$\sigma_{v0} = 17(1.5) + 18(1.5) = 52.50 \text{ kPa}$$

$$u_0 = 9.81(3.0 - 1.5) = 14.715 \text{ kPa} \qquad \sigma'_{v0} = 52.50 - 14.715 = \mathbf{37.785} \text{ kPa}$$

z (m)	σ_{v0} (kPa)	u_0 (kPa)	σ'_{v0} (kPa)
1.5	25.50	0.00	**25.50**
3.0	52.50	14.71	**37.78**
4.5	79.50	29.43	**50.07**
6.0	106.50	44.15	**62.35**

Abaixo do nível do lençol freático, σ'_{v0} aumenta mais **lentamente** (inclinação γ' = 8.19 kN/m³): em z = 6 m, a tensão total é 106.5 e a tensão efetiva, apenas 62.4 kPa.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

σ'_p = OCR · σ'_{v0} ou o valor de laboratório

TEORIA

Para cada modelo usa-se uma **única definição**: ou a razão de sobre-adensamento OCR ou o valor de laboratório σ'_p:

$$\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0} \qquad \text{ou} \qquad \sigma'_p = \sigma'_{p,lab} \ \ (\geq \sigma'_{v0})$$

OCR = 1: argila normalmente adensada; $\sigma'_p = \sigma'_{v0}$ e qualquer carregamento além da tensão inicial é compressão virgem.

Se o valor de laboratório de σ'_p for inferior a σ'_{v0}, ele é elevado a σ'_{v0} com um aviso: **argila subadensada está fora do escopo**.

σ'_p representa a maior tensão do passado e não diminui com a escavação.

O QUE O OCR INDICA?

OCR = σ'_p/σ'_{v0}. Um OCR grande significa uma ampla região de recompressão, na qual a argila primeiro se comprimirá sob carga com um **C_r pequeno**.

Enunciado

EXEMPLO

Dados

Fatia	**ponto médio** $z = 3\ \mathrm{m}$**:** $\sigma'_{v0} = 24.57\ \mathrm{kPa}$ **(NA na superfície,** $\gamma_{sat} = 18$**)**
Casos	**(a)** $OCR = 3$ **· (b) laboratório** $\sigma'_p = 60\ \mathrm{kPa}$ **· (c) laboratório** $\sigma'_p = 20\ \mathrm{kPa}$

PEDE-SE

Em cada caso, **σ′p** e **OCR**; interpretar a condição.

Solução

SOLUÇÃO

1 (a) OCR dado e (b) valor de laboratório

$$\text{(a)}: \ \sigma'_p = 3(24.57) = \mathbf{73.71}\ \text{kPa} \qquad \text{(b)}: \ OCR = \frac{60}{24.57} = \mathbf{2.44}$$

2 (c) valor de laboratório abaixo de σ′v0

$$\sigma'_{p,lab} = 20 < \sigma'_{v0} \ \Rightarrow \ \sigma'_p = \mathbf{24.57}\ \text{kPa},\ OCR = 1$$

(a) e (b) argila sobre-adensada (σ′p > σ′v0); para (c) o módulo emite um aviso e trata a argila como **normalmente adensada** (σ′p = σ′v0 = 24.57 kPa): argila subadensada está fora do escopo.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Descarregamento e expansão

TEORIA

A carga removida é a **tensão efetiva de sobrecarga inicial** no fundo da escavação (nível do lençol freático inalterado; abaixo da água, o peso removido é calculado com γ′). O descarregamento se distribui com a influência de Boussinesq da planta da escavação, I_{exc} (I_{exc} = 1 para escavação larga):

$$q_{lift} = \sigma'_{v0}(D_{exc}) \qquad \Delta\sigma_{exc} = -q_{lift}\, I_{exc}(z') \qquad \sigma'_{exc} = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma_{exc}$$

$$\Delta H_{heave} = -\frac{C_s\,\Delta H}{1+e_0}\,\log_{10}\frac{\sigma'_{v0}}{\sigma'_{exc}}$$

A expansão é **negativa** (recalque +, expansão –). Se C_s não for fornecido, adota-se $C_s = C_r$, o que é indicado no relatório.

A pressão líquida $q_{net} = q_{gross} - q_{uplift}$ é apenas informada no relatório; o cálculo não é feito em uma única etapa com a pressão líquida, mas segue a trajetória de tensões.

NEDEN KABARMA?

A escavação reduz a tensão efetiva e a argila expande. Quando a estrutura recarrega, a expansão é recuperada: trata-se da **recompressão do solo expandido**.

Δσ sob o centro da sapata

TEORIA

$$\Delta\sigma_{load} = q_{gross}\, I_z(z') \qquad z' = z - D_f$$

Retângulo B × L, sob o seu centro: com o coeficiente de canto de Newmark, $I_z = 4 \cdot I_{corner}$(m = B/2z′, n = L/2z′):

$$I_{köşe} = \frac{1}{4\pi}\left[\frac{2mn\sqrt{V}}{V + m^2n^2}\cdot\frac{V+1}{V} + \tan^{-1}\frac{2mn\sqrt{V}}{V - m^2n^2}\right] \qquad V = m^2 + n^2 + 1$$

(Se $V < m^2n^2$, o termo do arco tangente é acrescido de π). **Faixa** (largura B), sob a sua linha central: $I_z = (\alpha + \sin\alpha)/\pi$, $\alpha = 2\tan^{-1}(B/2z')$. Em $z' = 0$, $I_z = 1$.

$$\sigma'_{final} = \sigma'_{exc} + \Delta\sigma_{load}$$

NOTA

O acréscimo de tensão é tomado ao longo da vertical abaixo do centro da sapata (subcamadas e análise no tempo); nas áreas das faixas de cores, para pontos fora da sapata, é decomposto em retângulos de canto.

Enunciado

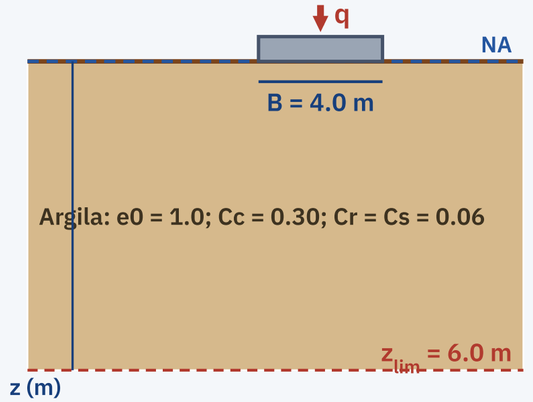
EXEMPLO

Dados

Fundação	**retângulo 4 × 6 m, $q = 150\ \mathrm{kPa}$, na superfície do terreno ($D_f = 0$)**
Ponto	**ponto médio da subcamada z′ = 3 m, sob o centro**
Comparação	**Faixa de largura B = 4 m**

PEDE-SE

I_z e **Δσ**; os mesmos valores valem para a sapata corrida.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Retângulo: m = B/2z′ = 2/3 = 0.667; n = L/2z′ = 1.0

$$V = m^2 + n^2 + 1 = 2.4444, \quad m^2 n^2 = 0.4444, \quad \sqrt{V} = 1.5635$$

$$T_1 = \frac{2mn\sqrt{V}}{V + m^2 n^2} \cdot \frac{V+1}{V} = \frac{2.0846}{2.8889} \cdot \frac{3.4444}{2.4444} = 1.0168$$

$$T_2 = \tan^{-1} \frac{2.0846}{2.0000} = 0.8061 \qquad I_{köşe} = \frac{T_1 + T_2}{4\pi} = 0.1451$$

2 Sapatas retangular e corrida

$$\text{retangular} : I;_z = 4(0.1451) = \mathbf{0.5803} \;\Rightarrow\; \Delta\sigma = 150(0.5803) = \mathbf{87.04}\ \text{kPa}$$

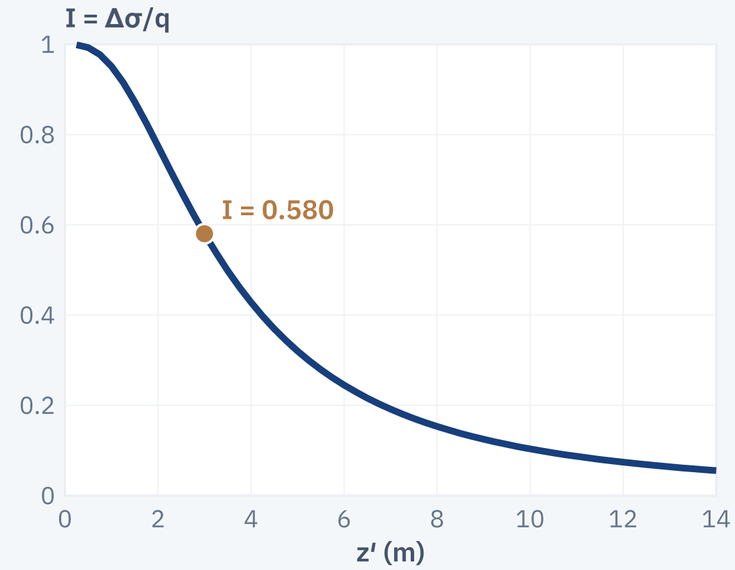
$$\text{faixa} : \alpha = 2\tan^{-1}\tfrac{4}{6} = 1.1760 \;\Rightarrow\; I_z = \frac{1.1760 + 0.9231}{\pi} = 0.6682$$

$$\Delta\sigma = 150(0.6682) = \mathbf{100.22}\ \text{kPa}$$

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

z′ (m)	I_z	Δσ (kPa)
0.5	0.9927	148.9
1.0	0.9513	142.7
2.0	0.7746	116.2
3.0	0.5803	87.0
4.0	0.4283	64.2
6.0	0.2449	36.7
8.0	0.1532	23.0
10.0	0.1034	15.5



No meio da subcamada, Δσ = **87.0 kPa** (58% de q); uma faixa estreita (mesmo B) fornece 100.2 kPa: **uma fundação longa atua mais profundamente**. O acréscimo de tensão ainda é de 10% mesmo em z′ = 10 m.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Profundidade de influência: I(z′) = p

TEORIA

O acréscimo de tensão diminui com a profundidade, mas nunca se anula; a soma das compressões das subcamadas exige um limite inferior: a **profundidade de cálculo z_{lim}**. Na regra da profundidade de influência, a argila comprime-se até que o acréscimo de Boussinesq sob o centro caia à fração **p** da tensão aplicada (usualmente p = 10%):

$$I_z(z') = p \;\Rightarrow\; z_{lim} = D_f + z'$$

O mesmo fator de influência também governa o descarregamento de uma escavação com a mesma planta; por isso a profundidade é a mesma, quer seja lida em termos de q_{gross} ou de q_{net}.

Se o perfil terminar acima de z_{lim}, a última camada prossegue com as mesmas propriedades até z_{lim}; se terminar abaixo, o solo abaixo de z_{lim} é considerado incompressível.

A regra alternativa é a **base do perfil**: admite-se uma base rígida. (O critério $\Delta\sigma = 0.2\,\sigma'_{v0}$ atinge maior profundidade em uma sapata pequena situada em profundidade; a regra do módulo depende apenas da geometria.)

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

Fundações	**(a) 4 × 6 m, p = 10% e 20% · (b) radier de 20 × 30 m, p = 10% e 20%**
Regra	**profundidade de influência; $D_f = 0$**

PEDE-SE

Em cada caso, **z'** e **z_{lim}**; verificação de $I(z')$ para 4 × 6 m.

Solução

SOLUÇÃO

1 Verificação: 4 × 6 m, p = 10% ⇒ z′ = 10.19 m

$$m = \frac{2}{10.19} = 0.1963,\ n = \frac{3}{10.19} = 0.2945 \ \Rightarrow\ I_z = 4(0.0250) = \mathbf{0.1000}$$

Fundação	p = %10: z′ (m)	p = %20: z′ (m)
4 × 6 m (L/B = 1.5)	10.19 (2.55 B)	6.82 (1.70 B)
Radier de 20 × 30 m	50.9 (2.55 B)	34.1 (1.70 B)

z′ é **proporcional às dimensões da sapata**: para uma sapata de 4 × 6 m, z_{lim} = 10.19 m; para um radier de 20 × 30 m, **50.9 m**. O radier considera a argila que se comprime até cerca de 51 m de profundidade.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Compressão da subcamada no recarregamento

TEORIA

$f = \Delta H/(1 + e_0)$ para a subcamada; com $\sigma'_{exc} \leq \sigma'_{v0} \leq \sigma'_p$, a compressão da subcamada conforme a posição da tensão final:

Condição	Compressão da subcamada no recarregamento
$\sigma'_{exc} \leq \sigma'_{final} \leq \sigma'_{v0}$	$S_b = C_s\, f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{exc})$: parte da expansão é recuperada
$\sigma'_{v0} < \sigma'_{final} \leq \sigma'_p$	$S_b = C_s\, f \log(\sigma'_{v0}/\sigma'_{exc}) + S_r = C_r\, f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{v0})$
$\sigma'_{v0} < \sigma'_p < \sigma'_{final}$	$S_b + S_r = C_r\, f \log(\sigma'_p/\sigma'_{v0}) + S_v = C_c\, f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_p)$
$\sigma'_p = \sigma'_{v0} < \sigma'_{final}$ (NC)	$S_b + S_v = C_c\, f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{v0})$
$\sigma'_{final} < \sigma'_{exc}$	Expansão adicional com C_s (negativa)

SE NÃO HOUVER ESCAVAÇÃO

$\sigma'_{exc} = \sigma'_{v0}$ e $S_b = 0$: recompressão clássica e compressão virgem, a partir da tensão inicial.

$$S_c = \sum (S_b + S_r + S_v) \qquad S_{net} = S_c + S_{heave}$$

Enunciado

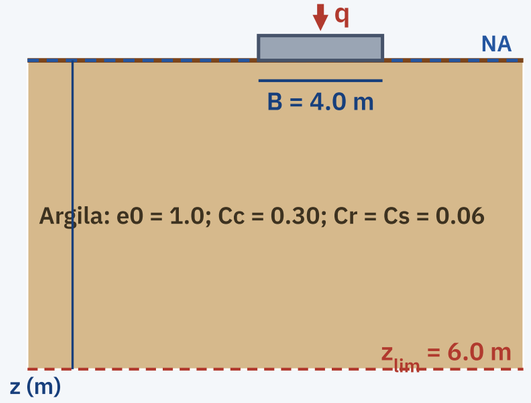
EXEMPLO

Dados

Solo	**camada única de argila, 6 m de espessura; $\gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$; nível do lençol freático na superfície do terreno;** $e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_r = C_s = 0.06$
Fundação	**Retângulo de 4 × 6 m, $q = 150\ \mathrm{kPa}$, na superfície do terreno (sem escavação)**
Fatia	**fatia única, H = 6 m, ponto médio $z = 3\ \mathrm{m}$:** $\sigma'_{v0} = 8.19\,z = 24.57\ \mathrm{kPa}$
Sobre-adensamento	**(a) OCR = 1 (NC) · (b) OCR = 6 · (c) OCR = 3**
Acréscimo de tensão	$\Delta\sigma = 150\,I_z(3) = 87.04\ \mathrm{kPa}$ **(Exemplo 3)** ⇒ $\sigma'_{final} = 111.61\ \mathrm{kPa}$

PEDE-SE

O **regime** e o recalque por adensamento **S_c** de cada argila.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Comum: f = H/(1 + e_0) = 6/2 = 3 m; log($\sigma'_{final}/\sigma'_{v0}$) = log(111.61/24.57) = 0.6573

$$\text{(a) NC}: \quad S_v = C_c f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.30(3)(0.6573) = \mathbf{591.6\ mm}$$

2 (b) OCR = 6: σ'_p = 6(24.57) = 147.4 kPa > σ'_{final} ⇒ apenas recompressão

$$S_r = C_r f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.06(3)(0.6573) = \mathbf{118.3\ mm}$$

Mesma argila, mesma carga: a argila normalmente adensada recalca **591.6 mm**, e a com OCR = 6, **118.3 mm**; a diferença vem da razão C_c/C_r = 5.

Solução (2/2)

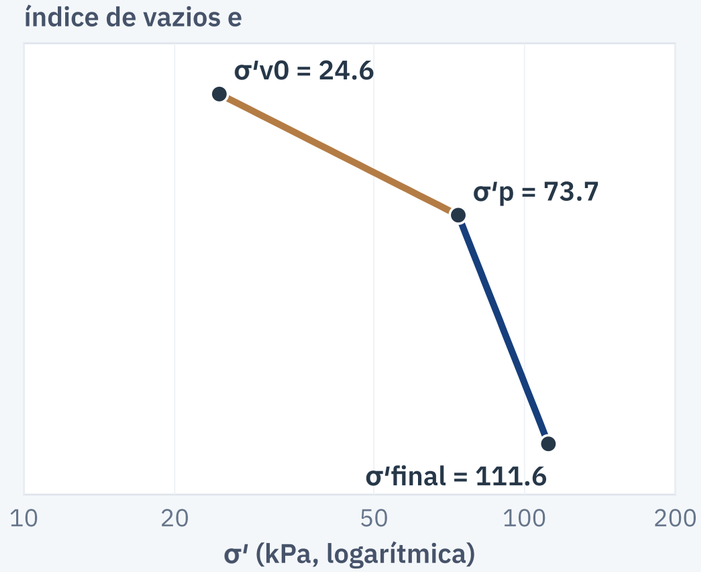
SOLUÇÃO

3 (c) OCR = 3: $\sigma'_p = 3(24.57) = 73.71$ kPa $< \sigma'_{final} = 111.61 \Rightarrow$ recompressão + compressão virgem

$$S_r = 0.06(3)\log\frac{73.71}{24.57} = 85.9\ \text{mm}$$

$$S_v = 0.30(3)\log\frac{111.61}{73.71} = 162.2\ \text{mm} \qquad S_c = \mathbf{248.0\ mm}$$

OCR	σ'_p (kPa)	regime	S_r (mm)	S_v (mm)	S_c (mm)
1	24.6	intacto	0	591.6	**591.6**
6	147.4	recompressão	118.3	0	**118.3**
3	73.7	recompressão + virgem	85.9	162.2	**248.0**



Verificar a solução no GeoTerva ↗

A partir do solo original ou do fundo levantado?

TEORIA

Após a escavação vem a fundação: o recalque depende de **qual referência** é usada para medir os deslocamentos (opção *deslocamentos após a escavação* na etapa de escavação):

Preservado – a partir do solo original (padrão): o levantamento também é mostrado separadamente; o recalque da fundação é a deformação líquida ao final do carregamento: $\mathbf{S = S_c + S_{heave}}$ = compressão total além de σ'_{v0}. Uma carga não maior que a sobrecarga removida resulta em S = 0; se for menor, o solo permanece acima do nível original (informado no relatório, recalque 0).

Zerado antes do carregamento: os deslocamentos da fase de escavação são zerados; o recalque é medido a partir do fundo da escavação levantado: $\mathbf{S = S_c = S_b + S_r + S_v}$. A recompressão do levantamento conta como recalque: uma fundação totalmente compensada recalca tanto quanto o fundo levantou. Se a escavação permaneceu aberta até a construção da estrutura e o levantamento se desenvolveu, esta é a resposta correta.

As duas medidas são sempre apresentadas; a escolha determina o que é relatado como recalque da sapata, a curva de tempo e o resultado.

RESUMO

Mantido: $S = S_c + S_{heave}$ (pequeno). Zerado: $S = S_c$ (grande).

Enunciado

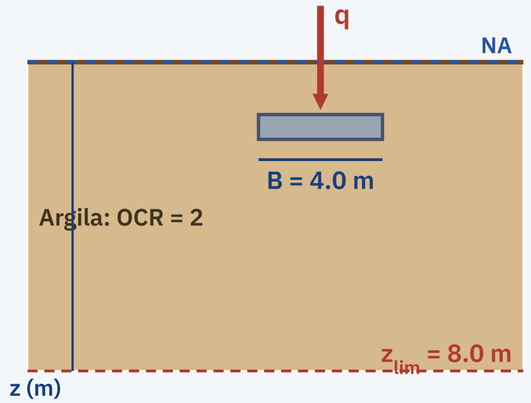
EXEMPLO

Dados

Solo	**argila de 0–8 m, $\gamma_{sat} = 18$, NA na superfície; $e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_r = C_s = 0.06$; $OCR = 2$**
Escavação	**escavação larga ($I_{exc} = 1$), profundidade de 2 m; fundação no fundo da escavação**
Fundação	**4 × 6 m, $q_{gross} = 100\ \mathrm{kPa}$**
Fatia	**subcamada única de 2–8 m, $H = 6$ m, $z = 5$ m, $f = 3$ m: $\sigma'_{v0} = 8.19(5) = 40.95\ \mathrm{kPa}$**

PEDE-SE

σ'_{exc}, levantamento, S_b, S_r, S_v, S_c; recalque da fundação (a partir do solo original e com o estado zerado).



Solução (1/3)

SOLUÇÃO

1 Escavação: carga removida, descarregamento e levantamento

$$q_{lift} = \sigma'_{v0}(2) = 8.19(2) = 16.38 \text{ kPa} \qquad \sigma'_{exc} = 40.95 - 16.38 = \mathbf{24.57} \text{ kPa}$$

$$\Delta H_{heave} = -0.06(3)\log\frac{40.95}{24.57} = -0.06(3)(0.2218) = -\mathbf{39.9 \text{ mm}}$$

2 Carregamento: $I_z(z' = 3) = 0.5803$ (Exemplo 3); $\sigma'_p = 2(40.95) = 81.9$ kPa

$$\Delta\sigma = 100(0.5803) = 58.03 \text{ kPa} \quad \sigma'_{final} = 24.57 + 58.03 = \mathbf{82.60} \text{ kPa}$$

Solução (2/3)

SOLUÇÃO

3 Regime: $\sigma'_{v0} < \sigma'_p = 81.9 < \sigma'_{final} = 82.60$

$$S_b = 0.06(3)\log\frac{40.95}{24.57} = 39.9\ \text{mm} \qquad S_r = 0.06(3)\log\frac{81.9}{40.95} = 54.2\ \text{mm}$$

$$S_v = 0.30(3)\log\frac{82.60}{81.9} = 3.3\ \text{mm} \qquad S_c = \mathbf{97.4\ mm}$$

No recarregamento, primeiro se recupera a expansão (S_b = 39.9 mm = toda a expansão); em seguida vêm 54.2 mm de recompressão com C_r e 3.3 mm de compressão virgem, que excede ligeiramente σ'_p.

Solução (3/3)

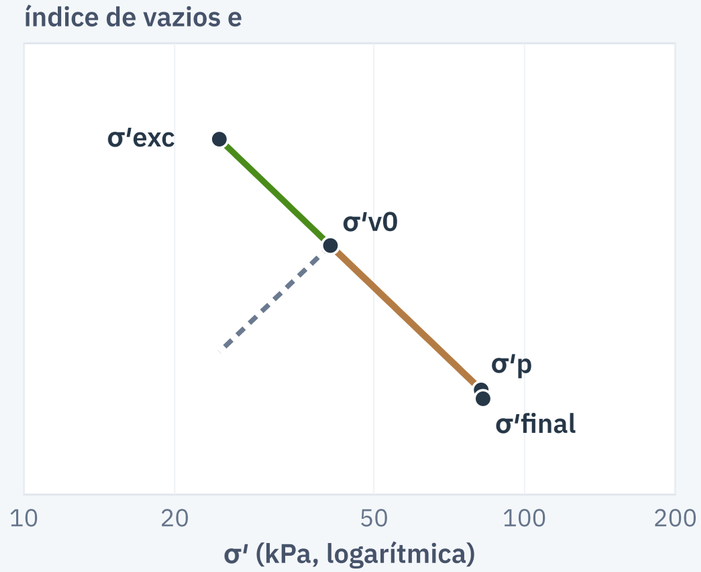
SOLUÇÃO

4 Recalque da sapata

$$\text{mantido}: \quad S = S_c + S_{heave} = 97.4 - 39.9 = \mathbf{57.5\ mm}$$

$$\text{zerado}: \quad S = S_c = \mathbf{97.4\ mm}$$

O recalque medido a partir da superfície original do terreno é de **57.5 mm**; medido a partir da base levantada, **97.4 mm**. A diferença é igual ao levantamento (39.9 mm): a escolha da referência altera o resultado em 69%.



Verificar a solução no GeoTerva ↗

Trajetória linear: $\Delta H = m_v\, \Delta\sigma'\, H$

TEORIA

É uma via de cálculo separada e **linear**: o mesmo m_v é usado tanto no descarregamento quanto no recarregamento; C_c, C_r, C_s e e_0 não intervêm:

$$\Delta H = m_v\, \Delta\sigma'\, H_{slice}$$

$$\text{heave} = -m_v\,(\sigma'_{v0} - \sigma'_{exc})\,H \qquad S_c = m_v\,\left(\sigma'_{final} - \sigma'_{exc}\right)H$$

A parcela de S_c até σ'_{v0} corresponde à expansão recuperada (S_b).

Por ser linear, o ciclo se fecha por si só.

A unidade de m_v é 1/kPa (coeficiente de compressibilidade volumétrica); o valor deve ser escolhido conforme o intervalo de tensões.

DIFERENÇA EM RELAÇÃO A e – log σ′

O método m_v não considera o nível de tensão (sem σ'_p): todo acréscimo de tensão produz a mesma compressão.

Enunciado

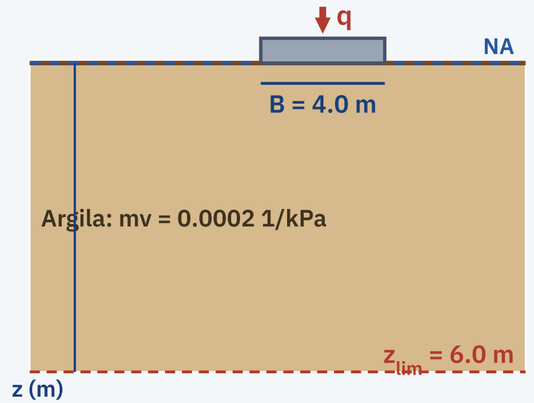
EXEMPLO

Dados

Solo	**6 m de argila, $m_v = 0.0002\ 1/\mathrm{kPa}$, nível do lençol freático na superfície**
Caso (a)	**sem escavação: 4×6 m, $q = 150$ kPa, $\Delta\sigma = 87.04$ kPa (Exemplo 3)**
Caso (b)	**A escavação e a fundação do Exemplo 6 (escavação de 2 m, $q = 100$ kPa, subcamada de 2–8 m)**

PEDE-SE

S_c em cada caso; para (b), levantamento, S_b e recalque líquido.



Solução

SOLUÇÃO

1 (a) Sem escavação

$$S_c = m_v\,\Delta\sigma'\,H = 0.0002(87.04)(6) = \mathbf{104.4\ mm}$$

2 (b) Escavado: σ'_{v0} = 40.95; σ'_{exc} = 24.57; $\Delta\sigma_{load}$ = 58.03; σ'_{final} = 82.60 kPa

$$\text{heave} = -0.0002(40.95 - 24.57)(6) = -19.7\ \text{mm} = -S_b$$

$$S_r = 0.0002(82.60 - 40.95)(6) = 50.0\ \text{mm} \qquad S_c = S_b + S_r = \mathbf{69.6\ mm}$$

Recalque líquido (em relação ao terreno original) S = S_c + expansão = **50.0 mm**; somente o acréscimo de 41.65 kPa que excede σ'_{v0} produz recalque. No caminho linear, o método e – log σ′ não sofre influência de σ'_p.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Terzaghi: T_v, U e t

TEORIA

$$T_v = \frac{C_v\, t}{H_{dr}^2} \qquad U(T_v) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \qquad M = \frac{\pi(2m+1)}{2}$$

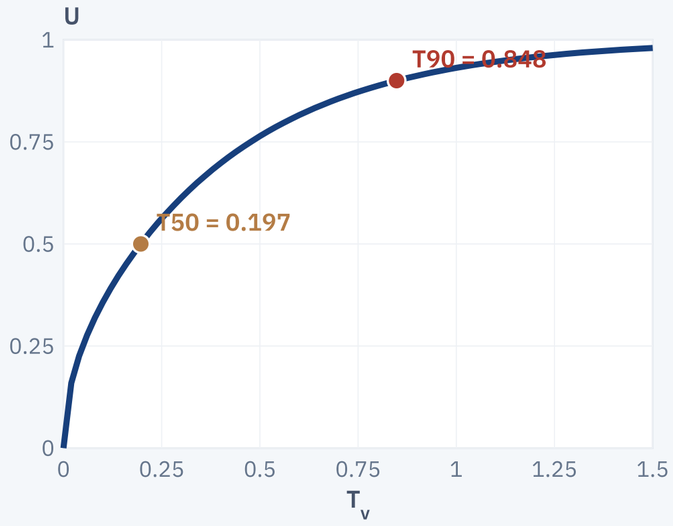
$$S_i(t) = U_i(t)\, S_{c,i} \qquad S(t) = \sum S_i(t) \qquad t = \frac{T_v\, H_{dr}^2}{C_v}$$

H_{dr} = H (drenagem simples) ou H/2 (drenagem dupla); H é a espessura da camada abaixo do nível da fundação (até z_{lim} para a última camada que ultrapassa o perfil).

$T_{v,50}$ = 0.197; $T_{v,90}$ = 0.848. Para T_v < 0.05, utiliza-se a solução para tempos iniciais $U = 2\sqrt{(T_v/\pi)}$.

Camadas com valores diferentes de C_v e H_{dr} adensam-se em velocidades diferentes: a curva do perfil é a **soma das curvas das camadas**; seus próprios valores de t_{50} e t_{90} são lidos nessa soma.

A curva corresponde ao recalque de carregamento S_c; admite-se que a expansão se complete antes do carregamento.



Enunciado

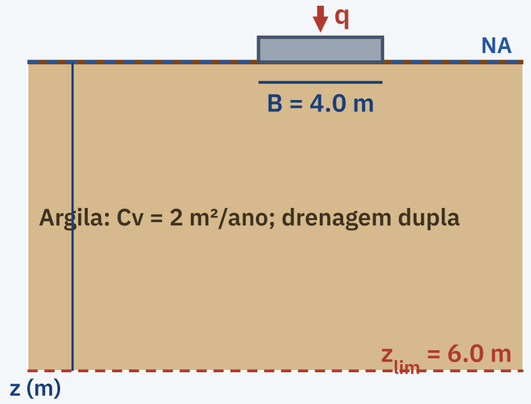
EXEMPLO

Dados

Argila	**6 m, normalmente adensada (Exemplo 5a): $S_c = 591.6$ mm**
Adensamento	**$C_v = 2\ \mathrm{m^2/ano}$; drenagem no topo e na base (dupla)**
Tempos	**t = 0.25; 0.5; 1; 2; 4; 8 anos**

PEDE-SE

H_{dr}, t_{50}, t_{90} e S(t); t_{90} com drenagem simples.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Caminho de drenagem e tempos característicos

$$H_{dr} = \frac{H}{2} = 3\ \text{m} \qquad t_{50} = \frac{0.197(3^2)}{2} = \mathbf{0.89}\ \text{ano} \qquad t_{90} = \frac{0.848(3^2)}{2} = \mathbf{3.82}\ \text{ano}$$

2 Drenagem simples (H_{dr} = 6 m)

$$t_{90} = \frac{0.848(6^2)}{2} = \mathbf{15.3}\ \text{ano}$$

Com drenagem dupla, o caminho de drenagem se reduz à metade e o tempo cai para **um quarto**: t_{90} = 3.82 anos, contra 15.3 anos na drenagem simples.

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

t (ano)	$T_v = C_v t/H_{dr}^2$	U	S(t) = U S_c (mm)
0.25	0.056	0.266	**157**
0.50	0.111	0.376	**222**
1.00	0.222	0.531	**314**
2.00	0.444	0.729	**431**
4.00	0.889	0.910	**538**
8.00	1.778	0.990	**586**

Em 1 ano, apenas 53% do recalque se completa; em 4 anos, 91% (S_c = 592 mm); em 8 anos, U = 0.990. Para valores pequenos de T_v (< 0.05), usa-se $U = 2\sqrt{(T_v/\pi)}$.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Enunciado

EXEMPLO

Dados

Fundação	**4 × 6 m, q = 150 kPa, na superfície do terreno; nível do lençol freático na superfície (γ_{sat} = 18)**
Camada A (0–4 m)	**mole, normalmente adensada: $e_0 = 1.10,\ C_c = 0.35,\ C_r = 0.07$; $C_v = 1$; drenagem dupla**
Camada B (4–8 m)	**rija, $OCR = 2$: $e_0 = 0.80,\ C_c = 0.20,\ C_r = 0.04$; $C_v = 3$; drenagem simples**
Cálculo	**base do perfil (8 m); cada camada como uma única subcamada (A: z = 2 m, B: z = 6 m)**

PEDE-SE

O valor de S_c, t_{50} e t_{90} de cada camada; a curva S(t) do sistema.

Solução (1/3)

SOLUÇÃO

1 A: z = 2 m, σ'_{v0} = 16.38; $I_z(2)$ = 0.7746 ⇒ Δσ = 116.19; σ'_{final} = 132.57; f = 4/2.10 = 1.9048 m; NC

$$S_{c,A} = C_c f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.35(1.9048) \log \frac{132.57}{16.38} = \mathbf{605.4\ mm}$$

2 B: z = 6 m, σ'_{v0} = 49.14; σ'_p = 98.28; $I_z(6)$ = 0.2449 ⇒ Δσ = 36.74; σ'_{final} = 85.88 < σ'_p; f = 4/1.80 = 2.2222 m

$$S_{c,B} = C_r f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.04(2.2222) \log \frac{85.88}{49.14} = \mathbf{21.6\ mm}$$

Recalque total por adensamento de **627.0 mm**: a camada superior mole, normalmente adensada, responde por 97% do total; a camada inferior rija, sobre-adensada, apenas 21.6 mm.

Solução (2/3)

SOLUÇÃO

3 Caminho de drenagem e tempos ($t = 0.197\ H_{dr}^2/C_v$; $0.848\ H_{dr}^2/C_v$)

$$A:\ H_{dr} = 2\ \text{m}:\ t_{50} = \frac{0.197(4)}{1} = 0.788,\ t_{90} = \frac{0.848(4)}{1} = 3.39\ \text{ano}$$

$$B:\ H_{dr} = 4\ \text{m}:\ t_{50} = \frac{0.197(16)}{3} = 1.051,\ t_{90} = \frac{0.848(16)}{3} = 4.52\ \text{ano}$$

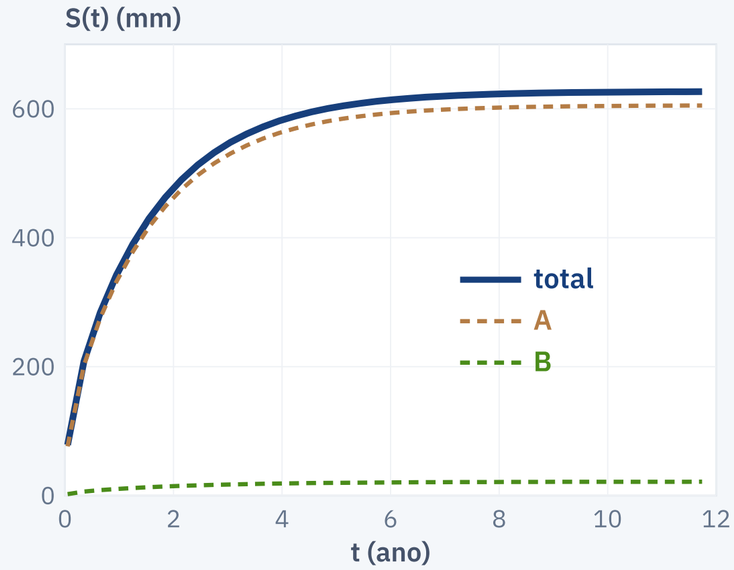
A curva do sistema é a soma $S(t) = U_A(t)\ S_A + U_B(t)\ S_B$; os tempos correspondentes são lidos dessa soma: **t_{50} = 0.794 ano, t_{90} = 3.43 anos** (próximos aos da camada dominante A).

Solução (3/3)

SOLUÇÃO

t (ano)	S_A (mm)	S_B (mm)	S(t) (mm)	U
0.5	242	7.4	**249**	0.397
1.0	340	10.5	**351**	0.560
2.0	463	14.6	**477**	0.761
5.0	583	19.8	**603**	0.961
10.0	604	21.4	**626**	0.998
20.0	605	21.6	**627**	1.000

Em 1 ano completam-se 56% do recalque e em 5 anos, 96%; o processo termina em cerca de 10 anos (627 mm). A curva é governada pela **camada mole A**.



Verificar a solução no GeoTerva ↗

Pontos de atenção ao ler os resultados

TEORIA

Nível da sapata = fundo da escavação (superfície do terreno, se não houver escavação); poropressão **hidrostática**; o nível do lençol freático não é afetado pela escavação.

O acréscimo de tensão é tomado **na vertical sob o centro da fundação** (subcamadas e análise no tempo); as zonas de cor seguem a mesma trajetória de tensões em cada ponto.

e_0 é o índice de vazios inicial em cada etapa; **não há compressão secundária (C_α)**.

O recalque é positivo e o levantamento é negativo; o seletor do cabeçalho inverte esse sinal e passa à exibição com positivo para cima (o motor de cálculo permanece clássico).

Faixas de cores: zonas que diminuem rapidamente com a profundidade, como recalque, expansão e deformação, são coloridas com as classes $1 \cdot 1.5 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \times 10^n$; faixas iguais comprimiriam a zona inferior em uma única cor.

Resumo

Pontos-chave

Caminho de tensões: $\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0}\ (C_s) \rightarrow \sigma'_{p}\ (C_r) \rightarrow \sigma'_{final}\ (C_c)$; $\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$, não diminui com a escavação

Compressão da subcamada $f = \Delta H/(1 + e_0)$: NC: $C_c\ f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{v0})$; OC e $\sigma'_{final} \leq \sigma'_p$: $C_r\ f \log(\ldots)$; $\sigma'_{final} > \sigma'_p$: parcelas $C_r + C_c$

Escavação: $q_{unload} = \sigma'_{v0}(D_{exc})$, levantamento = $-C_s\ f \log(\sigma'_{v0}/\sigma'_{exc})$; $S = S_c + S_{heave}$ (terreno original) ou S_c (zerado)

Boussinesq: $\Delta\sigma = q\ I_z(z')$; centro do retângulo 4 I_{corner}, faixa $(\alpha + \sin\alpha)/\pi$; $\mathbf{z_{lim}}$: $I(z') = p$ (quadrado 2.09 B; L = 1.5 B, 2.55 B; faixa 6.34 B)

Método $\mathbf{m_v}$: $\Delta H = m_v\ \Delta\sigma'\ H$, linear; levantamento = $-m_v(\sigma'_{v0} - \sigma'_{exc})\ H$

Tempo: $T_v = C_v\ t/H_{dr}^2$; $T_{v,50} = 0.197$, $T_{v,90} = 0.848$; $H_{dr} = H$ (drenagem simples) ou $H/2$ (drenagem dupla); $S(t) = \Sigma\ U_i\ S_{c,i}$

Referências bibliográficas

Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. Wiley.

Newmark, N.M. (1935). Simplified computation of vertical pressures in elastic foundations. Univ. of Illinois Bulletin 429.

Das, B.M. (2016). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage.

Holtz, R.D., Kovacs, W.D., Sheahan, T.C. (2011). An Introduction to Geotechnical Engineering, 2nd ed. Pearson.

Craig, R.F., Knappett, J.A. (2012). Craig’s Soil Mechanics, 8th ed. Spon.

NOTA

Todos os exemplos numéricos foram gerados com o próprio motor de cálculo do módulo, e o módulo fornece os mesmos valores (subcamadas do exemplo: dz = espessura da camada).

Cálculos geotécnicos on-line

Da teoria à prática

Calcular passo a passo os exemplos desta apresentação no GeoTerva; no módulo, o número de camadas e a escavação são definidos livremente.

Abrir o módulo →

Página de teoria →

Abrir no celular
Os módulos de teste não exigem cadastro.

Para utilização em aulas: info@geoterva.com