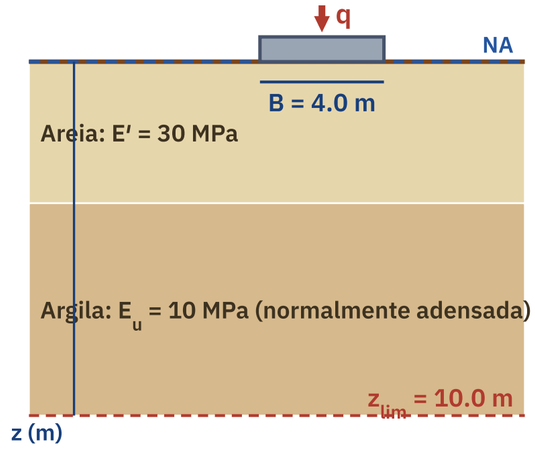
Apresentação de aula de geotecnia · Recalques

Recalque total: camadas de argila e de areia

Aula: no perfil composto por camadas de argila e areia, a soma do recalque imediato (elástico) com o adensamento da argila, centro, canto e sapata rígida, recalque total em função do tempo; exemplo resolvido em cada tópico.

- $S = S_e + S_c$
- Camadas de argila e areia
- Steinbrenner
- Trajetória de tensões
- Centro · canto · rígido
- Curva recalque–tempo



Introdução

O que veremos nesta aula?

- Separar o recalque conforme o tipo de camada: camada **coesiva** = recalque imediato + adensamento, camada **granular** = apenas recalque elástico
- Combinar, nas mesmas subcamadas, os cálculos de **Steinbrenner** (imediato) e de **trajetória de tensões** (adensamento)
- Ver o efeito da escavação: a **pressão líquida** governa o recalque imediato, enquanto o **levantamento e a recompressão** governam o adensamento
- Determinar o recalque no **centro** e no **canto** de uma sapata flexível, a sapata rígida e o recalque diferencial a partir do recalque total
- Construir a curva recalque–tempo $\mathbf{S(t) = S_e + \Sigma\, U_i(t)\, S_{c,i}}$
- Verificar que o resultado do módulo é igual à soma dos módulos de um único tipo (Elástico + Adensamento)

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

Perfil do exemplo: 6 m de argila normalmente adensada sobre 4 m de areia; sapata de 4 × 6 m, q = 150 kPa. Os recalques são dados em mm.

Recalque total = recalque imediato + recalque por adensamento

TEORIA

$$S = S_e + S_c \qquad \text{camada coesiva: } S_e(\text{não drenado}) + S_c \qquad \text{camada granular: } S_e(\text{drenado})$$

As duas componentes são calculadas **nas mesmas subcamadas**, com o mesmo acréscimo de tensão de Boussinesq, a mesma escavação e a mesma profundidade de cálculo. A solução é **analítica**: fatores de influência em forma fechada, trajetória de tensões subcamada a subcamada e teoria de Terzaghi; não há elementos finitos.

A argila saturada não muda de volume enquanto a carga é aplicada (v = 0.5): este é o seu recalque imediato. A água drena lentamente e a argila se comprime ao longo do caminho de tensões: isso é o adensamento. Como a areia libera a água imediatamente, todo o seu recalque é elástico.

> Em um perfil de um único tipo, o módulo fornece **o mesmo resultado** que o módulo Recalque Elástico ou Adensamento (Exemplo 6).

> O tipo de cada camada é selecionado na tabela de perfil geotécnico e determina quais parâmetros a camada exigirá.

TIPO DE CAMADA

Camada	Recalque imediato	Adensamento
Coesivo	E_u não drenado, v = 0.5	disponíveis: C_c, C_r, C_s, e_0, σ'_p (ou m_v), C_v
Granular	E', v' drenados	nenhum

Lei de Hooke e coeficientes de Steinbrenner

TEORIA

O recalque sob uma sapata totalmente flexível que transmite a pressão líquida q_{net} é a integral da deformação vertical (tensões de Boussinesq, semiespaço homogêneo):

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

Solução em forma fechada para o canto de um retângulo (Steinbrenner):

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

m′ = L′/B′, n′ = z/B′. **Centro**: α = 4, B′ = B/2; **canto**: α = 1, B′ = B.

Como v = 0.5 na camada coesiva, $I_s = F_1$ e $(1 - v^2) = 0.75$.

MÓDULOS DE DEFORMABILIDADE PARA O RECALQUE ELÁSTICO

As fórmulas de F_1, F_2, A_0, A_1, A_2 e os exemplos detalhados encontram-se nas apresentações de Recalque elástico; aqui apenas os resultados são utilizados para a soma.

Perfil estratificado e tensão líquida

TEORIA

Uma camada entre as profundidades z_{top} e z_{bottom} do nível da fundação contribui com a diferença de I_s, com seus próprios E e v:

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

A escavação remove a tensão efetiva de sobrecarga no nível da base; em solo elástico de módulo único, o descarregamento é recuperado no recarregamento, e o recalque imediato é determinado pela **pressão líquida**:

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

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

O resultado não depende da espessura da subcamada; as subcamadas servem apenas às tabelas e às zonas coloridas.

NEDEN FARKLI?

O recalque imediato é calculado com a **pressão líquida** e o adensamento, com o **acréscimo de tensão efetiva** ao longo da trajetória de tensões; a escavação afeta os dois de maneiras distintas.

Trajetória de tensões e compressão das subcamadas

TEORIA

Nas subcamadas coesivas, o adensamento é calculado ao longo da **trajetória de tensões**, e não em uma única etapa da tensão inicial à final: expansão por escavação (C_s); no recarregamento, primeiro a reversão do levantamento; recompressão com C_r até σ'_p; e, além dela, compressão virgem com C_c:

$$\sigma'_{v0} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{exc} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{v0} \xrightarrow{C_r} \sigma'_p \xrightarrow{C_c} \sigma'_{final} \qquad \sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$$

$$S_c = \sum (S_b + S_r + S_v)\,, \quad f = \frac{\Delta H}{1 + e_0} \qquad \Delta\sigma_{load} = q\, I_z(z') \qquad \sigma'_{final} = \sigma'_{exc} + \Delta\sigma_{load}$$

Em argila normalmente adensada (OCR = 1): $S = C_c\, f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{v0})$ (sem escavação).

O levantamento é negativo; $S_{net} = S_c + S_{heave}$. Na opção **Preservado**, o recalque é medido a partir do terreno original, e na opção **Zerado**, a partir do fundo levantado.

Profundidade de cálculo: $I_Z(z') = p$ (usualmente 10%) ou a base do perfil; o método m_v é uma opção linear.

DETALHE

A exposição completa da trajetória de tensões, dos regimes, da escavação e da curva de tempo encontra-se na apresentação de Adensamento.

Enunciado

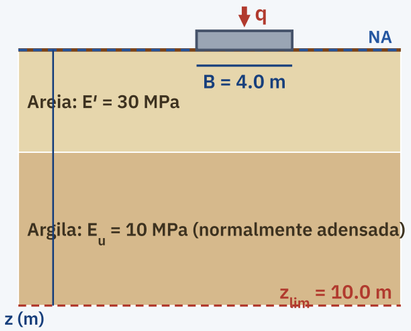
EXEMPLO

Dados

Perfil	**areia 0–4 m:** $E' = 30\ \mathrm{MPa},\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$ · **argila 4–10 m (NC):** $E_u = 10\ \mathrm{MPa},\ \nu = 0.5,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_v = 2\ \mathrm{m^2/ano},\ \gamma_{sat} = 18$
Fundação	**Retângulo flexível de 4 × 6 m, $q = 150\ \mathrm{kPa}$, na superfície do terreno; nível do lençol freático na superfície; profundidade de cálculo de 10 m (base do perfil)**
Escavação	**nenhuma (q_{net} = 150 kPa)**

PEDE-SE

Recalque imediato S_e no **centro** e no **canto** de cada camada.



Solução

SOLUÇÃO

1. Areia (0–4 m): k = q(1 – ν′²)/E′ = 150(0.91)/30 000 = 0.004550; 8 I_s(4) = 2.7351

$$\Delta S_e = k\,[(\alpha B' I_s)_4 - 0] = 0.004550(2.7351) = \mathbf{12.4\ mm}$$

2. Argila (4–10 m): k = 150(0.75)/10,000 = 0.011250; 8 I_s(4) = 2.3398; 8 I_s(10) = 3.9643

$$\Delta S_e = 0.011250(3.9643 - 2.3398) = \mathbf{18.3\ mm}$$

No centro, S_e = 12.4 + 18.3 = **30.7 mm**; no canto, 3.4 + 9.8 = **13.2 mm** (no canto, α = 1, B′ = B).

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Boussinesq, profundidade de influência e método m_v

TEORIA

Sob o centro da sapata, para um retângulo B × L, com o coeficiente de canto de Newmark, e para uma faixa, com a solução fechada de α:

$$\Delta\sigma = q\, I_z(z') \qquad I_z = 4\, I_{köşe}(m,n)\ \ (m = \tfrac{B}{2z'},\ n = \tfrac{L}{2z'}) \qquad I_{z,\text{faixa}} = \frac{\alpha + \sin\alpha}{\pi}$$

Profundidade de influência: $I_z(z')$ = p (comumente 10%); sapata quadrada 2.09 B, 2.55 B para L = 1.5 B, sapata corrida 6.34 B. Se a base do perfil for selecionada, o cálculo termina na última camada (em rocha ou em pedregulho compacto).

Se o perfil termina acima de z_{lim}, a última camada continua até z_{lim}.

Método de m_v: $\Delta H = m_v\, \Delta\sigma'\, H$; linear, $C_c/C_r/C_s$ não se combinam.

NESTE PERFIL

A profundidade de cálculo é a base do perfil (10 m); admite-se uma base rígida. Para a subcamada de argila em z = 7 m, $I_z(z' = 7) = 0.1916$.

Enunciado

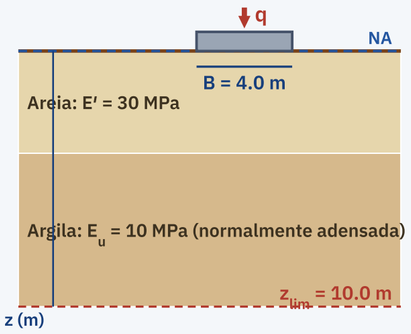
EXEMPLO

Dados

Perfil	**areia 0–4 m:** $E' = 30\ \text{MPa},\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$ · **argila 4–10 m (NC):** $E_u = 10\ \text{MPa},\ \nu = 0.5,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_v = 2\ \text{m}^2/\text{ano},\ \gamma_{sat} = 18$
Fundação	**Retângulo flexível de 4 × 6 m,** $q = 150\ \text{kPa}$**, na superfície do terreno; nível do lençol freático na superfície; profundidade de cálculo de 10 m (base do perfil)**
Fatia	**argila em subcamada única,** $H = 6$ **m, ponto médio** $z = 7$ **m;** $f = H/(1 + e_0) = 3$ **m**
Tensões	$\sigma'_{v0} = 9.19(4) + 8.19(3) = 61.33\ \text{kPa}$

PEDE-SE

I_z, $\Delta\sigma$, σ'_{final} e S_c.



Solução

SOLUÇÃO

1 Boussinesq (z′ = 7 m): m = 2/7 = 0.2857; n = 3/7 = 0.4286

$$I_z = 4\,I_{köşe}(0.2857;\,0.4286) = 4(0.0479) = \mathbf{0.1916} \qquad \Delta\sigma = 150(0.1916) = 28.75\ \text{kPa}$$

2 Tensão final e compressão (NC: $\sigma'_p = \sigma'_{v0}$)

$$\sigma'_{final} = 61.33 + 28.75 = 90.08\ \text{kPa}$$

$$S_c = C_c f \log\frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.30(3)\log\frac{90.08}{61.33} = \mathbf{150.2\ mm}$$

O recalque por adensamento da argila é de **150.2 mm**: cerca de **4.9 vezes** o recalque imediato (30.7 mm). Em argila mole normalmente adensada, o recalque principal provém do adensamento.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Centro, canto e sapata rígida

TEORIA

Para cada subcamada, somam-se as componentes imediata e (na camada coesiva) de adensamento; o total ao longo das camadas até z_{lim} fornece o recalque **central** da sapata flexível:

$$S = \sum \Delta S_e + \sum (\Delta S_b + \Delta S_r + \Delta S_v) \quad [+ S_{heave}]$$

$$S_{köşe} = S_{e,köşe} + S_c \qquad S_{rigid} = 0.93\, S_e + S_c \qquad S_{diff} = S_e - S_{e,köşe}$$

No canto, **apenas o recalque imediato** assume o valor do próprio retângulo de canto; o adensamento provém da trajetória de tensões na linha central e é considerado igual também no canto.

A sapata rígida recalca de modo uniforme: a parcela imediata equivale a cerca de 0.93 vez a do centro flexível, e a de adensamento, à do centro.

Escavação: a parcela imediata é calculada com q_{net} e a argila, com levantamento e recompressão; na opção “preservado”, $S = S_e + S_c + S_{heave}$.

SE A ARGILA FOR PREDOMINANTE

Como o adensamento é o mesmo no centro e no canto, em perfis nos quais predomina a argila o **recalque diferencial** corresponde apenas à diferença da componente imediata.

Enunciado

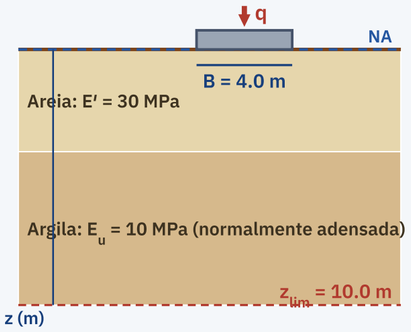
EXEMPLO

Dados

Perfil	**areia 0–4 m:** $E' = 30\ \mathrm{MPa},\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$ · **argila 4–10 m (NC):** $E_u = 10\ \mathrm{MPa},\ \nu = 0.5,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_v = 2\ \mathrm{m^2/ano},\ \gamma_{sat} = 18$
Fundação	**Retângulo flexível de 4 × 6 m, $q = 150\ \mathrm{kPa}$, na superfície do terreno; nível do lençol freático na superfície; profundidade de cálculo de 10 m (base do perfil)**
Exemplos anteriores	**S_e: centro 30.7, canto 13.2 mm; S_c = 150.2 mm (Exemplos 1 e 2)**

PEDE-SE

Recalque total **no centro, no canto, rígido**; recalque diferencial; parcela da componente imediata.



Solução

SOLUÇÃO

1 Totais

$$S_{center} = 30.7 + 150.2 = \mathbf{181.0\ mm} \qquad S_{köşe} = 13.2 + 150.2 = \mathbf{163.4\ mm}$$

$$S_{rigid} = 0.93(30.7) + 150.2 = \mathbf{178.8\ mm} \qquad S_{diff} = 30.7 - 13.2 = \mathbf{17.5\ mm}$$

	S_e (mm)	S_c (mm)	total (mm)
centro (flexível)	30.7	150.2	**181.0**
canto (flexível)	13.2	150.2	**163.4**
rígido	28.6	150.2	**178.8**

O recalque imediato é de apenas **17%** do total; o recalque diferencial é de 17.5 mm. Como o adensamento da argila é o mesmo no centro e no canto, o canto recalca 90% do valor do centro.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Enunciado

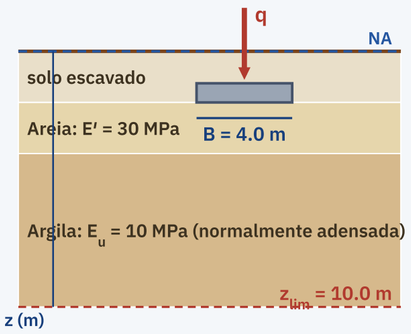
EXEMPLO

Dados

Perfil	**areia 0–4 m ($E' = 30,\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$) · argila 4–10 m (NC; $E_u = 10,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_s = C_r = 0.06,\ \gamma_{sat} = 18$); nível do lençol freático na superfície**
Escavação	**escavação larga (I_{exc} = 1), profundidade de 2 m; fundação no fundo da escavação**
Fundação	**4 × 6 m, $q_{gross} = 150\ \mathrm{kPa}$; profundidade de cálculo 10 m**
Fatias	**areia 2–4 m (H = 2 m), argila 4–10 m (z = 7 m, f = 3 m)**

PEDE-SE

q_{net}, S_e; expansão da argila e S_c; recalque total (mantido e zerado).



Solução (1/3)

SOLUÇÃO

1 Pressão líquida: $q_{uplift} = \sigma'_{v0}(2\text{ m}) = 9.19(2) = 18.38$ kPa

$$q_{net} = 150 - 18.38 = \mathbf{131.62}\ \text{kPa}$$

2 Recalque imediato: areia (z′ 0–2 m) k = 0.003992; argila (z′ 2–8 m) k = 0.009872 ($k = q_{net}(1 - \nu^2)/E$)

$$\text{areia} : \Delta S_e = 0.003992(1.5131 - 0) = 6.0\ \text{mm}$$

$$\text{argila} : \Delta S_e = 0.009872(3.6370 - 1.0554) = 25.5\ \text{mm}$$

A escavação reduziu a pressão líquida de 150 para 131.6 kPa; o recalque imediato passou de 30.7 para **31.5 mm** (os 2 m superiores da areia foram escavados e a argila ficou menos carregada).

Solução (2/3)

SOLUÇÃO

3 Argila: trajetória de tensões (z′ = 5 m: I_z = 0.3204)

$$\sigma'_{exc} = 61.33 - 18.38 = 42.95\ \text{kPa} \qquad \Delta\sigma = 150(0.3204) = 48.05\ \text{kPa}$$

$$\text{heave} = -0.06(3)\log\frac{61.33}{42.95} = -27.8\ \text{mm} \qquad \sigma'_{final} = 42.95 + 48.05 = 91.00\ \text{kPa}$$

4 Argila normalmente adensada ($\sigma'_p = \sigma'_{v0}$): S_b recupera a expansão, S_v é a compressão virgem

$$S_b = 0.06(3)\log\frac{61.33}{42.95} = 27.8\ \text{mm} \qquad S_v = 0.30(3)\log\frac{91.00}{61.33} = 154.2\ \text{mm}$$

$$S_c = S_b + S_v = \mathbf{182.1\ mm}$$

Solução (3/3)

SOLUÇÃO

	S_e (mm)	S_c (mm)	levantamento (mm)	total (mm)
sem escavação (Exemplo 3)	30.7	150.2	0	**181.0**
escavado, **preservado** (do solo original)	31.5	182.1	-27.8	**185.8**
escavado, **zerado** (a partir do fundo levantado)	31.5	182.1	—	**213.6**

O recalque total medido a partir do terreno original é de **185.8 mm** (S_e + S_c + levantamento); medido a partir da base levantada, **213.6 mm**. A diferença é igual ao levantamento (27.8 mm).

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Recalque imediato de pronto, adensamento ao longo do tempo

TEORIA

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

$$S(t) = S_e + \sum_i U_i(t)\, S_{c,i} \;\; [+ S_{heave}] \qquad t = \frac{T_v\, H_{dr}^2}{C_v}$$

S_e ocorre **imediatamente** (t = 0^+); o adensamento progride em cada camada coesiva com os seus próprios C_v e H_{dr}: H_{dr} = H (drenagem simples) ou H/2 (drenagem dupla).

$T_{v,50}$ = 0.197; $T_{v,90}$ = 0.848; T_v < 0.05'te U = $2\sqrt{(T_v/\pi)}$.

A curva é a soma das curvas das camadas; os valores de t_{50} e t_{90} do sistema são lidos a partir dessa soma. Em um perfil sem camada coesiva não há curva de tempo: todo o recalque é imediato.

Na opção “preservado”, a curva parte de levantamento nulo e termina na deformação líquida.

AREIA + ARGILA

A areia recalca imediatamente; **é a argila que determina a forma da curva de tempo**.

Enunciado

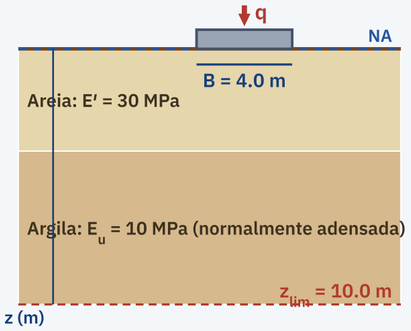
EXEMPLO

Dados

Perfil	**areia 0–4 m: $E' = 30\ \mathrm{MPa},\ \nu' = 0.30, \gamma_{sat} = 19$ · argila 4–10 m (NC): $E_u = 10\ \mathrm{MPa},\ \nu = 0.5, e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_v = 2\ \mathrm{m^2/ano}, \gamma_{sat} = 18$**
Fundação	**Retângulo flexível de 4 × 6 m, $q = 150\ \mathrm{kPa}$, na superfície do terreno; nível do lençol freático na superfície; profundidade de cálculo de 10 m (base do perfil)**
Exemplos anteriores	**S_e = 30.7 mm (Exemplo 1); S_c = 150.2 mm (Exemplo 2); sem escavação**
Drenagem	**argila drena no topo (areia) e na base (base rígida): drenagem dupla, H = 6 m**
Tempos	**t = 0.25; 0.5; 1; 2; 4; 8 anos**

PEDE-SE

H_{dr}, t_{50}, t_{90} e S(t); recalque em t = 0^+.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Caminho de drenagem e tempos (C_v = 2 m²/ano)

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

2 Recalque inicial e final

$$S(0^+) = S_e = 30.7\ \text{mm} \qquad S(\infty) = S_e + S_c = 30.7 + 150.2 = \mathbf{181.0\ mm}$$

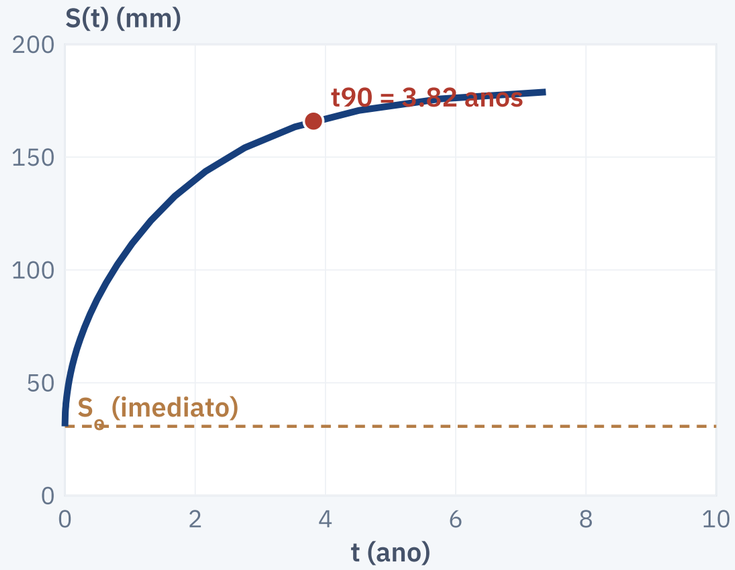
Logo após a aplicação da carga, o recalque é de 30.7 mm (17% do total); 90% do adensamento da argila se completa em **3.82 anos**.

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

t (ano)	U	$S_c(t)$ (mm)	$S(t) = S_e + S_c(t)$ (mm)
0.25	0.266	40.0	**71**
0.50	0.376	56.5	**87**
1.00	0.531	79.8	**110**
2.00	0.729	109.6	**140**
4.00	0.910	136.7	**167**
8.00	0.990	148.7	**179**

Em 1 ano, o recalque total é de 110 mm (61% do valor final); em 4 anos, 167 mm (92%). A curva começa pelo recalque imediato e cresce com o adensamento da argila.



Verificar a solução no GeoTerva ↗

Enunciado

EXEMPLO

Dados

Perfil	**apenas argila, 0–6 m (NC):** $E_u = 10\ \mathrm{MPa}$**,** $e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ \gamma_{sat} = 18$**; nível do lençol freático na superfície**
Fundação	**4 × 6 m,** $q = 150\ \mathrm{kPa}$**, sem escavação; profundidade de cálculo 6 m (base do perfil)**
Comparação	**Módulos de recalque elástico (coesivo) + adensamento**

PEDE-SE

Comparar S_e, S_c e o total do módulo Recalque total com os resultados dos dois módulos de tipo único.

Solução

SOLUÇÃO

Módulo	S_e (mm)	S_c (mm)	total (mm)
Recalque elástico: solo coesivo	35.3	—	—
Adensamento	—	591.6	—
soma dos dois módulos	35.3	591.6	**626.9**
Recalque total (2D)	35.3	591.6	**626.9**

O módulo Recalque Total é **exatamente igual** à soma dos dois módulos para um perfil de um único tipo (626.9 mm). A soma no canto é 601.5 mm ($S_{e,corner}$ = 9.9 + S_c), e a da sapata rígida, 624.4 mm.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Enunciado

EXEMPLO

Dados

Perfil	**Aterro arenoso 0–2 m (E = 12 MPa) · Argila-1 2–7 m (E_u = 8 MPa; C_c = 0.25; OCR = 1.6) · Areia 7–11 m (E = 35 MPa) · Argila-2 11–20 m (E_u = 15 MPa; C_c = 0.30; OCR = 1.3) · Areia pedregulhosa 20–30 m (E = 70 MPa)**
Sapata, escavação	**10 × 15 m, q_{gross} = 120 kPa; profundidade de escavação 2 m (planta da escavação = fundação); nível do lençol freático a 2 m**
Profundidade de cálculo	**profundidade de influência, p = 10%**
Resultado	**Projeto de exemplo do módulo Recalque total**

PEDE-SE

S_e e S_c camada a camada, levantamento; centro, canto, total rígido; t_{50} e t_{90}.

Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Escavação e profundidade de cálculo

$$q_{lift} = \sigma'_{v0}(2) = 18(2) = 36.0\ \text{kPa} \qquad q_{net} = 120 - 36.0 = \mathbf{84.0}\ \text{kPa}$$

$$z_{lim} = D_f + z' = 2 + 25.47 = \mathbf{27.47}\ \text{m}$$

O aterro (0–2 m) é removido pela escavação; o cálculo abrange quatro camadas, de 2 m até z_{lim} = 27.5 m. A última camada (areia pedregulhosa) é truncada por z_{lim}; a contribuição das camadas profundas é pequena.

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

Camada	z (m)	S_e (mm)	S_c (mm)	levantamento (mm)	total = S_e + S_c + empolamento (mm)
Argila-1 (CL, mole)	2.0 – 7.0	20.8	198.4	-62.6	156.6
Areia (SM, medianamente compacta)	7.0 – 11.0	5.6	—	—	5.6
Argila-2 (CH, dura)	11.0 – 20.0	14.1	27.0	-6.5	34.6
Areia pedregulhosa (compacta)	20.0 – 27.5	1.2	—	—	1.2
Total (centro)		**41.7**	**225.4**	**-69.1**	**198.0**

Centro **198.0 mm** = S_e 41.7 + S_c 225.4 – expansão 69.1 (mantida); canto 168.7 mm, rígido 195.1 mm. Tempo: t_{50} = 0.72 ano, t_{90} = 3.71 anos. O módulo fornece os mesmos valores.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Pontos de atenção ao ler os resultados

TEORIA

Nível da fundação = base da escavação; tensão uniforme sob sapata totalmente flexível; sapata rígida ≈ 0.93 × centro flexível na parcela imediata.

Recalque imediato: tensões do semiespaço homogêneo em cada camada (com o seu próprio ν); camada coesiva não drenada (ν = 0.5), camada granular drenada; sem correção de embutimento ($I_f = 1$).

Adensamento: Terzaghi unidimensional; poropressão hidrostática, o nível do lençol freático não é afetado pela escavação; σ'_p é a maior tensão do passado e não diminui com a escavação; o acréscimo de tensão é tomado na vertical sob o centro.

Recalque positivo, levantamento negativo; o seletor no cabeçalho inverte o sinal (o motor de cálculo permanece clássico).

Fora do escopo: compressão secundária, adensamento de camadas granulares, Schmertmann e ábacos de SPT/CPT, módulo crescente com a profundidade dentro de uma camada (subdividir a camada), rigidez da fundação e interação solo–estrutura, adensamento 2D/3D, elementos finitos, capacidade de carga, liquefação.

Resumo

Pontos-chave

$S = S_e + S_c$: camada coesiva = recalque imediato não drenado + adensamento; camada granular = apenas recalque elástico drenado

Recalque imediato (Steinbrenner): $\Delta S_e = q_{net}\, \alpha\, B'\, (1 - \nu^2)/E \cdot [I_s(z_{bottom}) - I_s(z_{top})]$; $q_{net} = q_{gross} - \sigma'_{v0}(D_{exc})$

Adensamento: trajetória de tensões $\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_p \rightarrow \sigma'_{final}$ (C_s, C_r, C_c); em argila NC, $S_c = C_c\, f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{v0})$

Centro $S_e + S_c$; **canto** $S_{e,corner} + S_c$; **rígida** $0.93\, S_e + S_c$; recalque diferencial = diferença entre as componentes imediatas

Escavação: a parcela imediata com q_{net}, a argila por expansão + recompressão; "mantida" $S = S_e + S_c + S_{swelling}$, "zerada" $S_e + S_c$

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

Em perfil de um único tipo de solo, o resultado é **exatamente igual** ao do módulo de Recalque Elástico ou de Adensamento

Referências bibliográficas

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

Das, B.M. (2018). Principles of Geotechnical Engineering, 9ª ed. Cengage — Cap. 10–11 (acréscimo de tensão, recalque por adensamento, taxa temporal).

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

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

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

GeoTerva

Cálculos geotécnicos on-line

Da teoria à prática

Montar, no GeoTerva, um perfil próprio de camadas de argila e areia; o módulo fornece o recalque e a curva no tempo em conjunto.

Abrir o módulo →

Página de teoria →

Abrir no celular
Os módulos de teste não exigem cadastro.