

OBRAS EM SOLOS MOLES

SUMÁRIO

SIMBOLOGIA	3
APRESENTAÇÃO	4
INTRODUÇÃO.....	5
1. ADENSAMENTO DOS SOLOS.....	6
2. MÉTODOS CONSTRUTIVOS – CONSTRUÇÃO FASEADA	13
3. MÉTODOS CONSTRUTIVOS – PRÉ-CARGA	20
4. MÉTODOS CONSTRUTIVOS – DRENOS VERTICAIS	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

SIMBOLOGIA

Símbolo	Significado
H_d	Altura de drenagem
H_{aterro}	Altura do aterro
H_f	Altura final da camada compressível
H_0	Altura inicial da cama compressível
C_h	Coeficiente de adensamento horizontal
C_v	Coeficiente de adensamento vertical
C_c	Coeficiente de compressão
m_v	Coeficiente de compressibilidade volumétrica
C_r	Coeficiente de recompressão
s	Espaçamento entre drenos
Z	Fator de profundidade
FS	Fator de segurança
T_h	Fator tempo do adensamento horizontal
T_v	Fator tempo do adensamento vertical
U	Grau de adensamento global
U_h	Grau de adensamento horizontal
U_v	Grau de adensamento vertical
e_p	Índice de vazios correspondente à tensão de pré-adensamento
e_f	Índice de vazios final
e_0	Índice de vazios inicial
γ_{areia}	Peso específico da areia
γ_{argila}	Peso específico da argila
γ_{aterro}	Peso específico do aterro
γ_{sub}	Peso específico do solo submerso
z	Profundidade da camada de solo compressível
R_{inf}	Raio de influência do dreno
r	Raio do dreno
OCR	Razão de sobreadensamento
n	Razão dos raios dos drenos
Δh	Recalque por adensamento em um instante de tempo
Δh_t	Recalque total
S_u	Resistência não drenada em argilas
t	Tempo
t_t	Tempo total para o fim da consolidação
σ'_{vm}	Tensão de pré-adensamento
σ'_v	Tensão efetiva vertical
σ'_{vf}	Tensão efetiva vertical final
σ'_{v0}	Tensão efetiva vertical inicial
$\Delta\sigma'_v$	Varição da tensão efetiva vertical

APRESENTAÇÃO

Esta publicação tem por objetivo atender estudantes de graduação em Engenharia Civil nos estudos da área de Geotecnia, em especial os referentes às obras em solos moles. Esta compilação constitui um material didático básico para discentes no início dos estudos em solos, não substituindo a vasta bibliografia existente sobre o assunto.

Além de expandir, é intenção dos autores e do Grupo de Estudos em Geotecnia da Universidade Federal do Paraná (UFPR) o aprimoramento deste material. Portanto, sugestões e críticas são bem-vindas.

Jordana Furman¹

Lucas Ghion Zorzan²

Vítor Pereira Faro³

¹ Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC) da UFPR – jor_furman@hotmail.com

² Graduando em Engenharia Civil da UFPR – lucasghionzorzan@gmail.com

³ Professor do Departamento de Construção Civil e do PPGECC da UFPR – vpfaro@ufpr.br

INTRODUÇÃO

Os solos moles possuem características geotécnicas intrínsecas a sua origem geológica e deposição, dentre as quais pode-se destacar:

- Baixa resistência à penetração;
- Alta compressibilidade;
- Composição predominantemente argilosa com características coesivas;
- Deposição recente, originária do Quaternário;
- Alto teor de matéria orgânica;
- Heterogeneidade espacial das características físicas;
- Completa ou quase completa saturação.

Os solos moles são objeto de pesquisa diversos estudiosos em virtude da vastidão de problemas associados a incorreta interpretação da fenomenologia envolvida. Dão importância à temática a estabilidade das fundações de obras de arte especiais (de modo especial as pontes e os viadutos) bem como dos aterros de acesso a tais construções, os recalques diferenciais em edificações gerais e a construção de aterros para execução de obras de infraestrutura rodovias e ferroviária.

A tônica do estudo dos solos moles é a experiência obtida em projetos práticos – as quais muitas vezes culminaram no colapso. As lições aprendidas e o conhecimento adquirido mostram que é indispensável, para o bom entendimento do comportamento dos solos moles, a consolidação do entendimento da Mecânica dos Solos Saturados, em especial no que se refere à Teoria do Adensamento e à Resistência ao Cisalhamento dos Solos. Nos capítulos seguintes, esses tópicos serão brevemente abordados, sendo seguidos pela apresentação dos princípios do dimensionamento de obras de terra sobre solos moles.

1. ADENSAMENTO DOS SOLOS

CONCEITOS GERAIS

Em solos moles, cujo teor de umidade e índice de vazios são elevados, a compressibilidade também o é. O adensamento trata da variação do volume de solo ao longo do tempo após a ocorrência dos recalques imediatos (elásticos). Essas variações de volume ocorrem devido às alterações no índice de vazios de uma massa de solo. Dessa forma, pode-se perceber uma relação direta do adensamento com o volume de água presente nos solos. De fato, quando o solo é submetido a um aumento de tensão, a poropressão (pressão de água que se desenvolve nos vazios de uma massa de solo) aumenta subitamente. A dissipação dessa poropressão concomitante à drenagem da água e a conseqüente redução do volume do solo resulta no aumento da tensão efetiva no esqueleto do solo e em recalques primários cuja determinação é importante para obras civis usuais.

Como o adensamento primário relaciona-se com o processo de drenagem, este fenômeno está fundamentalmente ligado à permeabilidade do material e, portanto, às suas características granulométricas. Por essa razão, o efeito do adensamento é observado em argilas¹, cujo coeficiente de permeabilidade baixo faz com que o recalque se desenvolva ao longo do tempo. A Teoria do Adensamento Unidimensional foi inicialmente apresentada por Terzaghi (1925) e aprimorada na publicação de Terzaghi e Frolich (1936). As principais hipóteses simplificadoras envolvem a consideração de uma massa de solo homogênea, saturada, com compressão unidimensional (estado geostático de tensões) onde é válida a Lei de Darcy. Além disso, supõe-se a existência de uma única relação linear e independente do tempo entre o índice de vazios e a tensão vertical efetiva durante o processo de adensamento.

A deformação dependente do tempo em solos argilosos pode ser facilmente compreendida por meio da analogia mecânica de Terzaghi, para a qual sugere-se a consulta a Fernandes (2016). A teoria de Terzaghi, entretanto, não é válida para problemas tridimensionais em que há camadas não confinadas de solo. Para esses casos, resultantes sobretudo do processo de deposição ou de problemas práticos onde a área de aplicação da carga é da ordem de grandeza da profundidade da camada de solo, o fenômeno do adensamento só é bem definido conhecendo-se o estado de tensões e deformações e a variação destes com o tempo. É fácil perceber que o problema se torna mais complexo visto que as deformações horizontais deixam de ser nulas e que as tensões e deformações passam a ser variáveis bi ou tridimensionais. Isso acontece devido à existência de gradientes hidráulicos nas direções horizontais – a anisotropia da permeabilidade. Uma das mais aceitas teorias para a resolução desse tipo de problema foi desenvolvida por Biot (1941).

¹ Em areias, devido à rápida drenagem da água nos poros, os recalques são imediatos e calculados pela Teoria da Elasticidade.

SOLOS NORMALMENTE ADENSADOS E SOBREADENSADOS

Como é sabido da Mecânica dos Solos, o fenômeno do adensamento é comumente representado por uma curva semilogarítmica que relaciona o índice de vazios com o logaritmo da tensão efetiva vertical. Esse diagrama, mostrado esquematicamente na Figura 1, traduz o comportamento reológico do solo. A parte inicial da curva (Trecho I) apresenta declividade reduzida, correspondendo ao conjunto de tensões já experimentadas pelo solo *in situ*. O trecho retilíneo (Trecho II) reúne a gama de tensões ainda não experimentadas pelo maciço de onde a amostra foi retirada, sendo por isso conhecido como **ramo virgem**. A tensão máxima ao qual o solo foi submetido e que divide os dois domínios da curva é comumente conhecida como tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}) e caracteriza dois comportamentos distintos, a depender da tensão efetiva de campo:

- Trecho I: domínio elasto-plástico não linear → **solos sobreadensados**;
- Trecho II: domínio elástico não linear histerético → **solos normalmente adensados**.

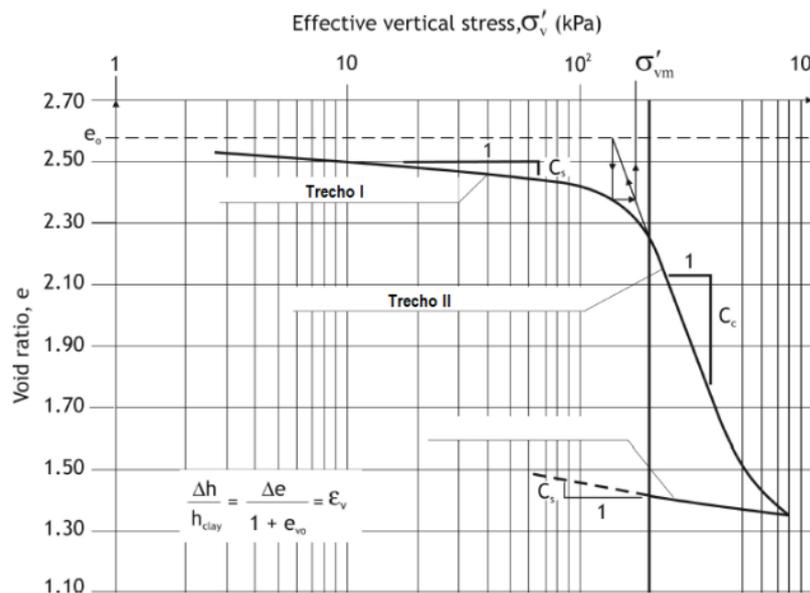


Figura 1 - Curva de Adensamento.

A razão entre a tensão de pré-adensamento e a máxima tensão experimentada pelo solo (σ'_v) é definida como OCR (do inglês *over consolidation ratio*). Os solos geralmente são classificados de acordo com o OCR (Tabela 1).

$$OCR = \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_v}$$

Tabela 1 - Classificação dos solos de acordo com o OCR (Fernandes, 2016).

Classificação	OCR
Normalmente adensado	1
Ligeiramente sobreadensado	1 a 2
Medianamente sobreadensado	2 a 5
Fortemente sobreadensado	>5

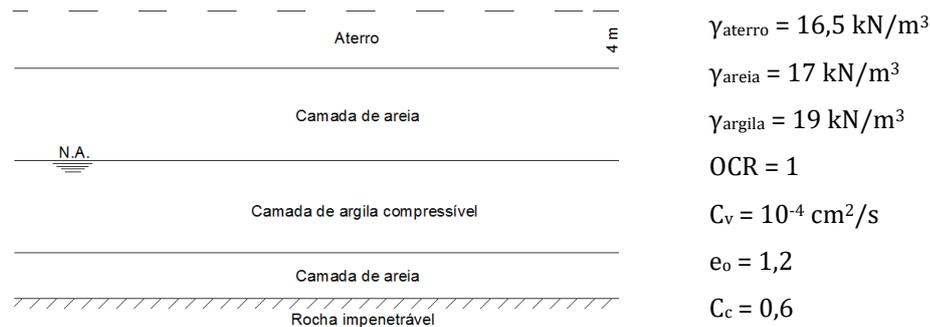
EQUAÇÕES ÚTEIS

Nesta seção, apresentam-se algumas das equações originárias da Teoria do Adensamento úteis para a avaliação de recalques e tempo de consolidação em solos moles.

Descrição	Equação	
Cálculo de recalque primário no ramo sobreadensado ($\sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v < \sigma'_{vm}$)	$\Delta h = \frac{H_0}{1 + e_0} \left(C_r \log \frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_{v0}} \right)$	
Cálculo de recalque primário no ramo normalmente adensado ($\sigma'_{v0} = \sigma'_{vm}$)	$\Delta h = \frac{H_0}{1 + e_p} \left(C_c \log \frac{\sigma'_{vm} + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_{vm}} \right)$	
Cálculo de recalque primário – caso geral	$\Delta h = \frac{H_0}{1 + e_0} C_r \log \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}} + \frac{H_0}{1 + e_p} C_c \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vm}}$	
Fator de Profundidade	$Z = \frac{z}{H_d}$	
Fator Tempo	$T_v = \frac{C_v t}{H_d^2}$	
	Para U até 60%	$T_v = \frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{100} \right)^2$
	Para U > 60%	$T_v = 1,781 - 0,933 \log(100 - U)$
Grau de Adensamento	$U = \frac{\Delta h_t}{\Delta h} \times 100$	

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R1.1: Sobre o perfil geotécnico ilustrado a seguir, será construído um aterro de 4 m de altura e grandes dimensões em planta. Determine o tempo necessário para que ocorra um recalque por adensamento de 33 cm.



Solução:

Tensão efetiva vertical no ponto médio da camada de argila mole, antes da construção do aterro:

$$\sigma'_{vo} = 5.17 + \frac{8}{2}(19 - 10) = 121 \text{ kPa}$$

Tensão efetiva vertical no ponto médio da camada de argila mole, após a construção do aterro:

$$\sigma'_{vf} = 5.17 + \frac{8}{2}(19 - 10) + 4.16,5 = 187 \text{ kPa}$$

O recalque total da camada de argila será:

$$\Delta h = \frac{H_o}{1 + e_o} C_c \log \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vo}}$$

$$\Delta h = \frac{8}{1 + 1,2} 0,6 \log \frac{187}{121}$$

$$\Delta h = 0,4125 \text{ m} = 41,25 \text{ m}$$

O grau de adensamento correspondente a um recalque de 33 cm será:

$$U = \frac{33}{41,25} = 0,8 = 80\% \text{ do recalque total}$$

O fator tempo correspondente a um recalque de 80% será:

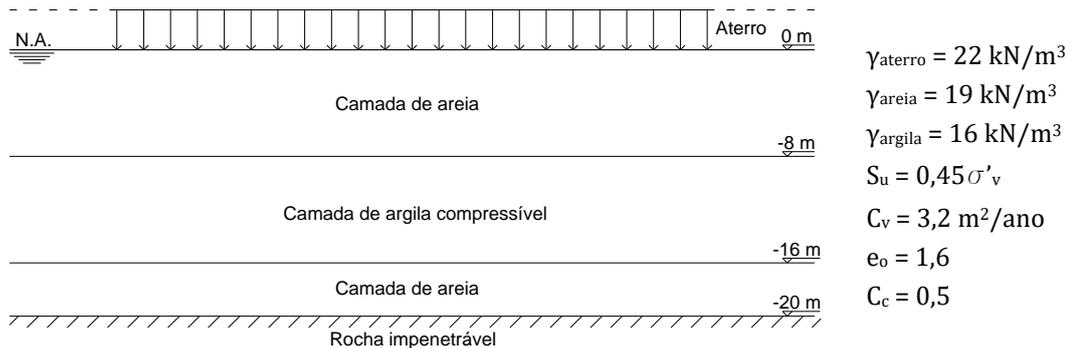
$$T_v = 1,781 - 0,933 \log(100 - U) = 1,781 - 0,933 \log(100 - 80) = 0,567$$

Logo, o tempo para ocorrer 80% do adensamento, ou seja, 33 cm, será:

$$t = \frac{T_v H_d^2}{C_v} = \frac{0,567 \cdot \left(\frac{800}{2}\right)^2}{10^{-4}} = 9,072 \cdot 10^8 \text{ s} = 28,8 \text{ anos}$$

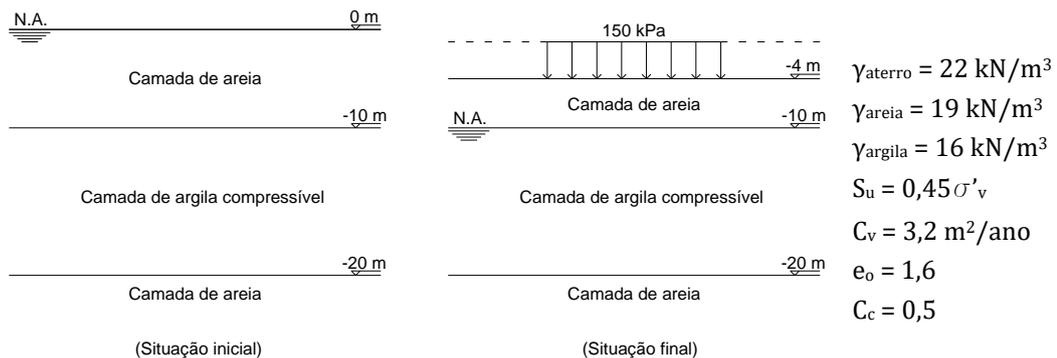
EXERCÍCIOS PROPOSTOS

1.1: Sobre o maciço representado na figura a seguir será construído um aterro de grandes dimensões que ocupará uma área total de 10 hectares e com espessura de 6 m. Todas as camadas representadas subjacentes ao impenetrável podem ser consideradas normalmente adensadas.



- Apresente um diagrama e - $\log \sigma'_v$ para os pontos representativos do estado de tensão em repouso e no fim do adensamento primário para o ponto médio da camada de argila mole.
- Determine o recalque total por adensamento primário.
- Estime o recalque por adensamento 1 ano após a construção do aterro.
- Quanto tempo se deverá esperar para que se tenha processado 90% do recalque por adensamento?

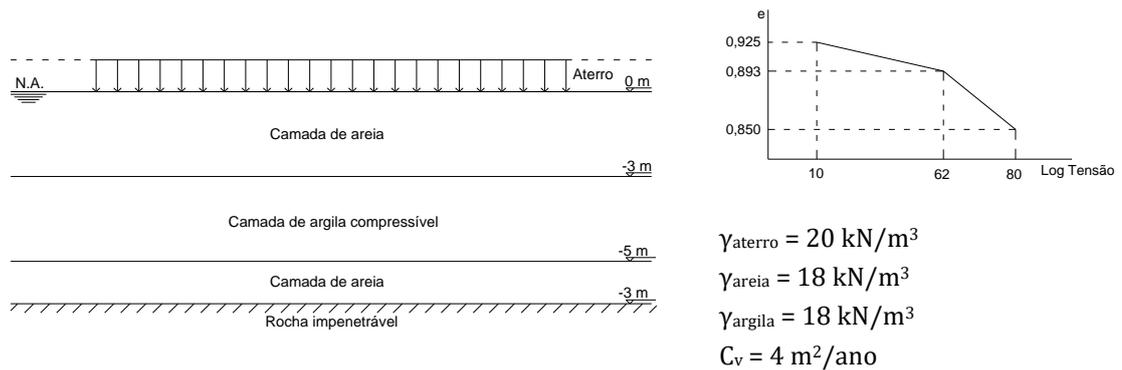
1.2: Considere o perfil geotécnico a seguir.



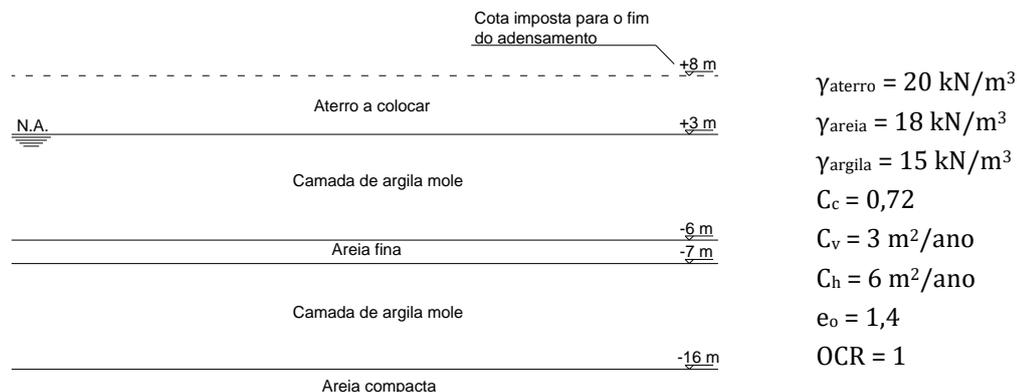
- Determine o adensamento primário da camada argilosa provocado por um rebaixamento permanente do nível freático até a cota -10 m.
- Para a construção de um estacionamento subterrâneo de um grande edifício comercial, será realizada uma escavação na área até a cota -4 m, conforme se indica no lado direito da figura. Admitindo que o recalque associado ao rebaixamento do nível freático está concluído, avalie o recalque que a fundação do edifício irá provocar na camada argilosa, sabendo que o acréscimo uniforme de tensão vertical na superfície do terreno será de 150 kPa.

OBRAS EM SOLOS MOLES

1.3: Considere o perfil geotécnico a seguir e o resultado de um ensaio edométrico realizado em uma amostra de solo coletada no ponto médio da camada de argila, que pode ser considerada representativa dessa camada. Supondo que sobre o maciço seja construído um aterro de grandes dimensões com 2,5 m de altura, qual o recalque total verificado na camada de argila?

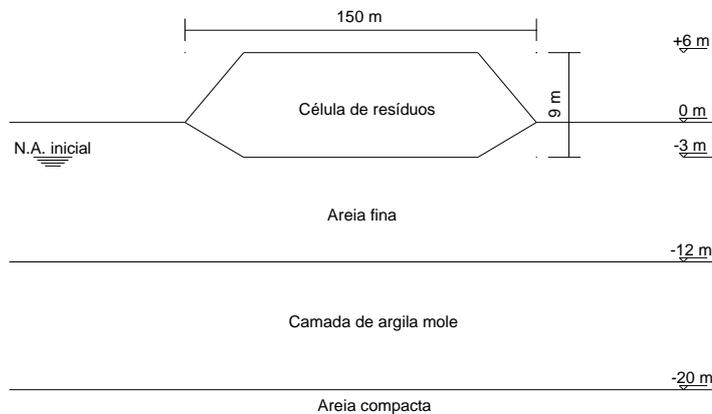


1.4: Pretende-se construir um aterro de grandes dimensões para um estacionamento de veículos de pequeno porte. A figura a seguir apresenta o perfil geotécnico do maciço. A cota da superfície do terreno antes da construção do aterro é +3 m. Pretende-se que a cota da superfície do terreno seja +8 m ao final do adensamento primário. Calcule a altura do aterro a colocar para se assegurar as especificações do projeto.



1.5: A figura a seguir apresenta um maciço sobre o qual será instalado um aterro sanitário. A célula de resíduos tem cerca de 150x150 m de área em planta e altura máxima de 9 m (6 m acima da superfície do terreno e 3 m em escavação). Por questões ambientais e de segurança, o nível freático deverá ser rebaixado até a cota -5 m e o recalque máximo da base da célula não deverá exceder 0,20 m.

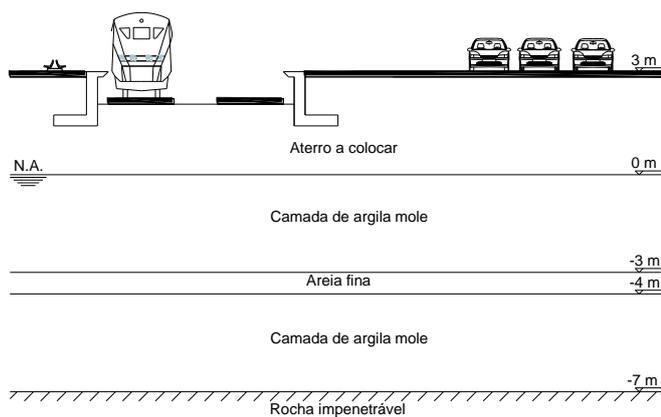
OBRAS EM SOLOS MOLES



$$\begin{aligned} \gamma_{\text{resíduo}} &= 15 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_{\text{areia}} &= 20 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_{\text{argila}} &= 17 \text{ kN/m}^3 \\ C_c &= 0,4 \\ C_r &= 0,07 \\ C_v &= 10 \text{ m}^2/\text{ano} \\ e_o &= 1,5 \end{aligned}$$

- Se o rebaixamento do nível freático até a cota -5 m e a deposição dos resíduos ocorrerem simultaneamente, o critério de recalque máximo será atendido? Justifique.
- De modo a atender as especificações de projeto, optou-se por rebaixar o nível freático até a cota -12 m durante certo período de tempo. Após esse período, elevou-se o nível freático até a cota -5 m e colocou-se a célula de resíduos. Determine o tempo necessário em que o nível freático deve permanecer na cota -12 m, de modo que o recalque após a colocação do aterro respeite o máximo admissível de 0,20 m.

1.6: A figura a seguir ilustra o perfil geotécnico de um local onde se pretende construir uma estação ferroviária. Para a obra será necessário sobrelevar a superfície do terreno através da construção de um aterro de 3 m de altura e de grandes dimensões em área. Determinado o tempo após a execução do aterro em que poderão ser executados os trabalhos de pavimentação e construção da plataforma ferroviária.



$$\begin{aligned} \gamma_{\text{aterro}} &= 20 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_{\text{areia}} &= 18 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_{\text{argila}} &= 17,5 \text{ kN/m}^3 \\ C_c &= 0,20 \\ C_v &= 3,5 \text{ m}^2/\text{ano} \\ C_h &= 5,7 \text{ m}^2/\text{ano} \\ e_o &= 1,1 \\ \text{OCR} &= 1 \end{aligned}$$

- Determine o recalque por adensamento primário associado à construção do aterro.
- Após a construção do pavimento e da plataforma ferroviária, os recalques não deverão exceder 2,5 cm. Determine o tempo que será necessário aguardar para iniciar a execução destes trabalhos.

2. MÉTODOS CONSTRUTIVOS – CONSTRUÇÃO FASEADA

CONCEITOS GERAIS

A construção de aterros sobre solos moles pode, em muitas situações, acarretar problemas de estabilidade global da obra. Uma das soluções consagradas para a solução deste problema é a construção faseada. O método da construção faseada consiste, basicamente, em se executar o aterro em várias camadas estáveis de menor altura. Após a colocação de cada camada do aterro, é necessário esperar pela dissipação da poropressão gerada. Essa dissipação, associada ao aumento da tensão efetiva do solo, promove o acréscimo de resistência ao corte necessário para o suporte da camada subsequente do aterro. Esse acréscimo de resistência foi estudado por Leroueil (1990).

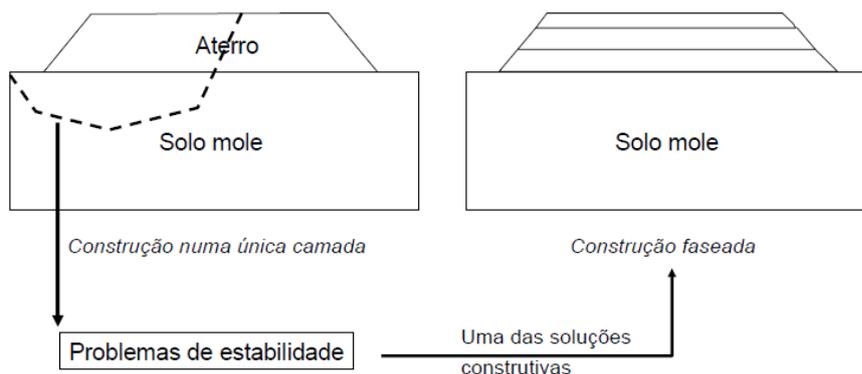


Figura 2 - Representação esquemática da solução de um aterro em construção faseada.

A título de exemplo, considere a construção de um aterro em duas camadas (Figura 3), onde o trecho AB representa a execução da 1ª camada e o trecho BC a consolidação da 1ª camada. Analogamente, o trecho CD identifica a instalação da segunda camada e DE sua consolidação. Pela análise da Figura 3, é possível observar como se processa a dissipação do excesso de poropressão e o aumento da tensão efetiva ao longo do tempo. Após a finalização da consolidação da 1ª camada, a execução da 2ª camada faz o processo de adensamento se repetir – entretanto garantindo a altura de aterro necessária tendo o solo de sustentação uma maior resistência ao cisalhamento. É esse princípio de garantia da estabilidade que norteia uma das mais econômicas e difundidas técnicas de construção de aterros sobre solos moles.

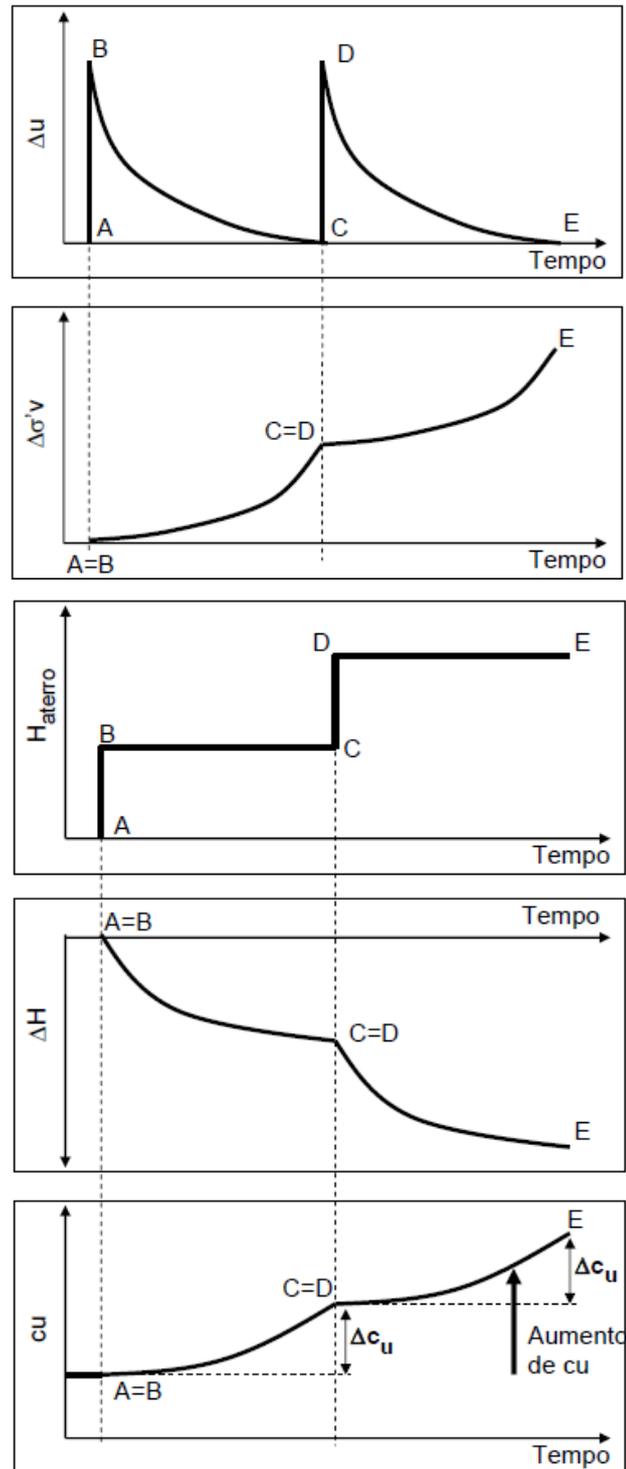
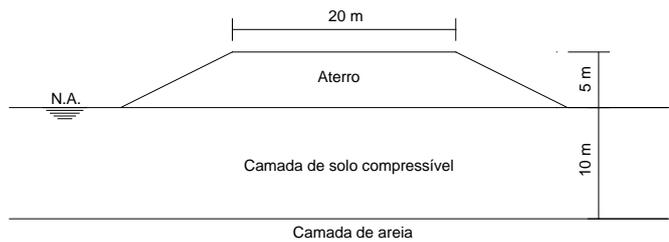


Figura 3 - Processo de adensamento em um aterro construído em duas camadas. De baixo para cima: a) dissipação da poropressão ao longo do tempo; b) incremento de tensão efetiva no solo ao longo do tempo; c) evolução da altura do aterro ao longo da execução; d) evolução dos recalques no tempo; e) aumento da resistência ao cisalhamento do solo durante o processo executivo.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R2.1: Um aterro de 5 m de altura deverá ser executado pelo método de construção faseada. Para isto, a primeira camada de aterro deverá possuir 3 m de altura e será considerada finalizada quando atingido 98% do adensamento. Após isto, será executada a segunda camada de aterro e a obra será considerada finalizada quando esta atingir 95% do adensamento. Considerando os dados a seguir, determinar:



$$\gamma_{\text{aterro}} = 22 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{\text{argila}} = 19 \text{ kN/m}^3$$

$$S_u = 0,45 \sigma'_v$$

$$\text{OCR} = 2$$

$$C_v = 5 \text{ m}^2/\text{ano}$$

$$e_o = 1,3$$

$$C_r = 0,07 \text{ e } C_c = 0,4$$

- Qual a justificativa para utilização do método de construção faseada?
- Considerando o ponto médio da camada de argila mole como referência, apresentar os fatores de segurança desenvolvidos ao longo da obra.
- Apresentar o adensamento primário total ao final da obra.
- Quanto tempo será necessário para a entrega da obra, considerando C_v constante?

Solução:

- a) Tensão efetiva vertical no ponto médio da camada de argila mole, antes da construção do aterro:

$$\sigma'_{v,0} = \frac{H}{2} \gamma_{\text{sub}} = \frac{10}{2} (19 - 10) = 45 \text{ kPa}$$

Resistência não drenada da fundação:

$$S_u = 0,45 \sigma'_v = 0,45 \cdot 45 = 20,25 \text{ kPa}$$

Fator de segurança para um aterro de 5 m de altura:

$$FS = \frac{5,14 S_u}{\gamma_{\text{aterro}} H_{\text{aterro}}} = \frac{5,14 \cdot 20,25}{22 \cdot 5} = 0,95 < 1 \rightarrow \text{para esta condição, a obra romperia.}$$

- b) Resistência não drenada da fundação para a 1ª camada de aterro:

$$S_{u,1} = 0,45 \sigma'_v = 0,45 \cdot 45 = 20,25 \text{ kPa}$$

Fator de segurança para a 1ª camada de aterro:

$$FS_1 = \frac{5,14 S_u}{\gamma_{\text{aterro}} H_{\text{aterro}}} = \frac{5,14 \cdot 20,25}{22 \cdot 3} = 1,58 > 1,5 \rightarrow OK$$

Tensão efetiva vertical no ponto médio da camada de argila mole, após a construção da 1ª camada de aterro:

OBRAS EM SOLOS MOLES

$$\sigma'_{v,1} = \frac{10}{2}(19 - 10) + 22.3 = 111 \text{ kPa}$$

Resistência não drenada da fundação para a 2ª camada de aterro:

$$S_{u,2} = 0,45\sigma'_v = 0,45 \cdot 111 = 50 \text{ kPa}$$

Fator de segurança para a 2ª camada de aterro:

$$FS_2 = \frac{5,14S_u}{\gamma_{\text{aterro}}H_{\text{aterro}}} = \frac{5,14 \cdot 50}{22,3} = 3,89 > 1,5 \rightarrow OK$$

Tensão efetiva vertical no ponto médio da camada de argila mole, após a construção da 2ª camada de aterro:

$$\sigma'_{v,2} = \frac{10}{2}(19 - 10) + 22.3 + 22.2 = 155 \text{ kPa}$$

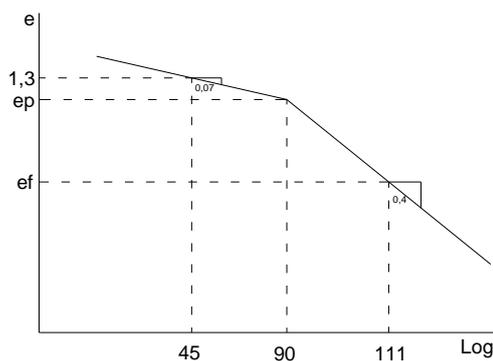
c) Tensão efetiva no ponto média da camada de solo antes da construção da 1ª camada de aterro é 45 kPa. Logo, a tensão de sobreadensamento é:

$$OCR = \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{vo}}$$

$$2 = \frac{\sigma'_{vm}}{45}$$

$$\sigma'_{vm} = 90 \text{ kPa}$$

O índice de vazios da camada mole varia conforme a aplicação do carregamento. No trecho pré-adensado, o índice de vazios varia entre e_o e e_p . No trecho normalmente adensado, o índice de vazios varia entre e_p e e_f . A determinação de e_p e e_f pode ser feita através da relação entre a variação do índice de vazios e a variação da tensão efetiva:



$$C_r = \frac{e_o - e_p}{\log \sigma'_{vm} - \log \sigma'_{vo}}$$

$$0,07 = \frac{1,3 - e_p}{\log 90 - \log 45}$$

$$e_p = 1,28$$

$$C_c = \frac{e_p - e_f}{\log \sigma'_{v1} - \log \sigma'_{vm}}$$

$$0,40 = \frac{1,28 - e_f}{\log 111 - \log 90}$$

$$e_f = 1,24$$

Tensão efetiva no ponto médio da camada de solo após a construção da 1ª camada de aterro é 111 kPa. Logo, o cálculo do recalque para a 1ª camada de aterro é:

$$\Delta h = \frac{H_o}{1 + e_o} C_r \log \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{vo}} + \frac{H_o}{1 + e_p} C_c \log \frac{\sigma'_{v1}}{\sigma'_{vm}}$$

$$\Delta h_1 = \frac{10}{1 + 1,3} 0,07 \log \frac{90}{45} + \frac{10}{1 + 1,28} 0,40 \log \frac{111}{90} = 0,092 + 0,160$$

OBRAS EM SOLOS MOLES

$$\Delta h_1 = 0,252 \text{ m} = 25,2 \text{ cm}$$

Tensão efetiva no ponto médio da camada de solo após a construção da 2ª camada de aterro é 155 kPa. Logo, o cálculo do recalque para a 2ª camada de aterro é:

$$\Delta h_1 = \frac{H_o - \Delta h_1}{1 + e_f} C_c \log \frac{\sigma'_{v2}}{\sigma'_{v1}} = \frac{10 - 0,252}{1 + 1,24} 0,4 \log \frac{155}{111}$$

$$\Delta h_2 = 0,252 \text{ m} = 25,2 \text{ cm}$$

O recalque total ao final da obra será:

$$\Delta h_t = \Delta h_1 + \Delta h_1 = 25,2 + 25,2$$

$$\Delta h_t = 50,4 \text{ cm}$$

d) Tempo necessário pra entrega da 1ª camada (U=98%):

$$T_v = 1,781 - 0,933 \log(100 - U) = 1,781 - 0,933 \log(100 - 98) = 1,5$$

$$t_1 = \frac{T_v H_d^2}{C_v} = \frac{1,5 \cdot 5^2}{5} = 7,5 \text{ anos}$$

Tempo necessário pra entrega da 2ª camada (U=95%):

$$T_v = 1,781 - 0,933 \log(100 - U) = 1,781 - 0,933 \log(100 - 95) = 1,129$$

$$t_2 = \frac{T_v H_d^2}{C_v} = \frac{1,129 \cdot 5^2}{5} = 5,6 \text{ anos}$$

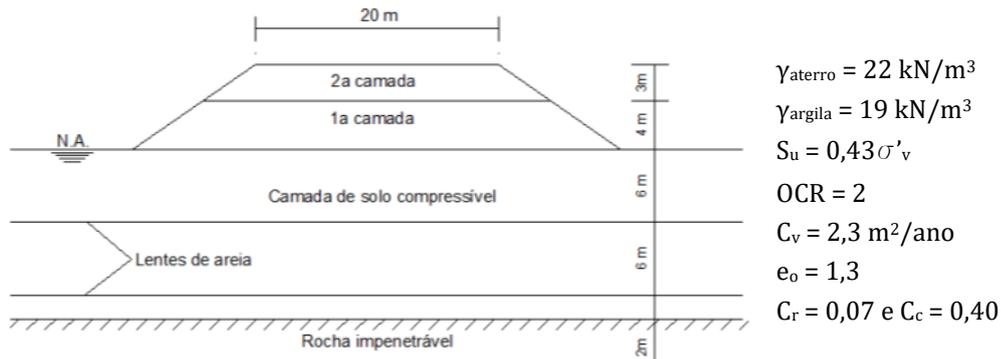
Tempo total para entrega da obra:

$$t_t = t_1 + t_2 = 7,5 + 5,6$$

$$t_t = 13,1 \text{ anos}$$

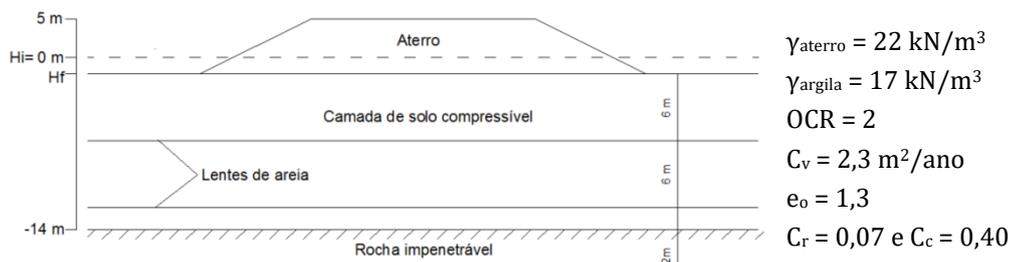
EXERCÍCIOS PROPOSTOS

2.1: O dono de certa obra exigiu a construção de um aterro faseado, conforme mostrado a seguir. A primeira camada de aterro será considerada finalizada com 98% do adensamento primário e a segunda camada com 95% do adensamento primário. Pede-se:



- Qual o índice de vazios da camada de solo compressível ao final do adensamento primário da 1ª camada de aterro?
- Mostre a evolução dos recalques ao longo da obra.
- Sabendo que a obra deverá ser entregue faltando 15 cm para o recalque total da segunda camada, quanto tempo durará a obra?

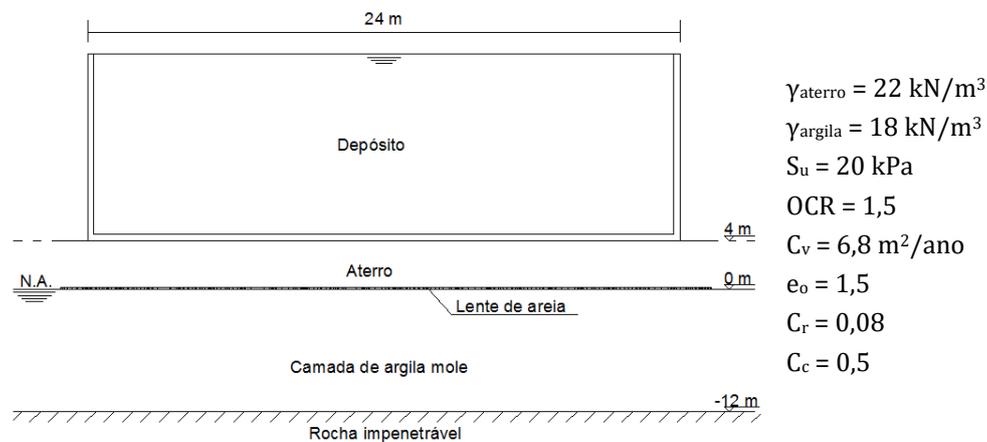
2.2: O dono de certa obra exigiu a construção de um aterro faseado, conforme figura a seguir. A primeira camada de aterro será construída com 3 m de altura sobre a cota zero de uma camada de solo compressível. A 2ª camada de aterro deverá possuir altura suficiente para que, após finalizado todos os recalques, a plataforma do aterro permaneça na cota 5 m. Pede-se:



- Qual o índice de vazios da camada de solo compressível ao final do adensamento primário da 1ª camada de aterro?
- Mostre a evolução do recalque primário para a 1ª camada de aterro.
- Qual deverá ser a altura de aterro da 2ª camada para atender as exigências de projeto?
- Considerando C_v constante ao longo da obra, quanto tempo é necessário para a entrega da obra?

- e) Apresente a situação dos recalques a cada 6 meses até o final do primeiro ano após a construção do aterro.

2.3: Um depósito cilíndrico de 24 m de diâmetro será construído sobre uma camada de argila compressível saturada. O peso próprio do depósito e do material de enchimento equivalem a pressões uniformemente distribuídas de, respectivamente, 10 kPa e 90 kPa. Para a construção do depósito, será necessário construir um aterro de 4 m de altura em duas fases. Cada camada de aterro deverá possuir metade da altura total do aterro. A primeira camada de aterro será considerada finalizada com 98% do adensamento primário e a segunda camada com 95% do adensamento primário. Antes da construção do aterro será colocada na superfície do terreno uma camada de areia de altura desprezível. Para esta situação:



- Tendo como referência o ponto médio da camada de argila, mostre a evolução do fator de segurança.
- Qual o recalque total ocasionado pelo aterro?
- Sabendo que a fundação do depósito tolera 5% do recalque total ocasionado pelo aterro, quanto tempo levará para iniciar a construção do depósito?
- Considerando que o depósito permanecerá constantemente cheio, qual será o recalque total da camada de argila ao final da vida útil do depósito?

3. MÉTODOS CONSTRUTIVOS – PRÉ-CARGA

CONCEITOS GERAIS

A técnica mais antiga para aceleração de recalques consiste na pré-carga. O método, como o próprio nome traduz, consiste na execução de um aterro que transmita ao maciço de solo mole uma carga superior à carga de operação. Devido ao excesso de carga, o fenômeno do adensamento se verifica em um intervalo de tempo menor. Essa sobrecarga é retirada apenas quando observados recalques da ordem de grandeza aos previstos para a obra que se deseja construir. É de fácil entendimento uma das principais limitações desta técnica: o maciço de solo deve apresentar uma capacidade de suporte compatível com a carga aplicada para execução de aterro – fato que nem sempre se verifica. Torna-se essencial, portanto, a verificação da ruptura da fundação em problemas práticos.

A ideia básica do método da pré-carga, segundo Fernandes (2016) é o fato de que a imposição de um dado recalque (no caso, o recalque para entrega da obra do aterro) implica na instalação uma determinada tensão efetiva no solo. Esse processo, como é sabido, acontece ao longo do tempo. A fim de atender a dois dentre os diversos requisitos para um projeto – explicitamente o tempo para entrega da obra e o atendimento do grau de adensamento de projeto – o esqueleto sólido é sobrecarregado para acelerar a consolidação.

As equações de dimensionamento são as da Teoria do Adensamento de Terzaghi já apresentadas. A Figura 4 ilustra do esquema de cálculo desse tipo de obra. Nesse esquema, $\delta (obra)$ e $\delta (temp)$ indicam os recalques por adensamento provocados, respectivamente, pela sobrecarga associada à obra que se pretende construir e pela mesma obra associada a uma sobrecarga adicional temporária. Essas sobrecargas correspondem, respectivamente, a $\Delta\sigma_v (obra)$ e $\Delta\sigma_v (temp)$.

A ideia da validade dessa teoria para o método da pré-carga não é rigorosa, visto que a relação biunívoca entre a deformação volumétrica e a tensão efetiva só é válida para um ponto confinado do solo em profundidade. Assim, o adensamento processa-se em velocidades distintos nos diversos níveis a depender a distância de drenagem. Mesmo assim, com a adoção de um certo grau de adensamento para o centro da camada de solo mole, se tem obtido sucesso em inúmeras obras.

OBRAS EM SOLOS MOLES

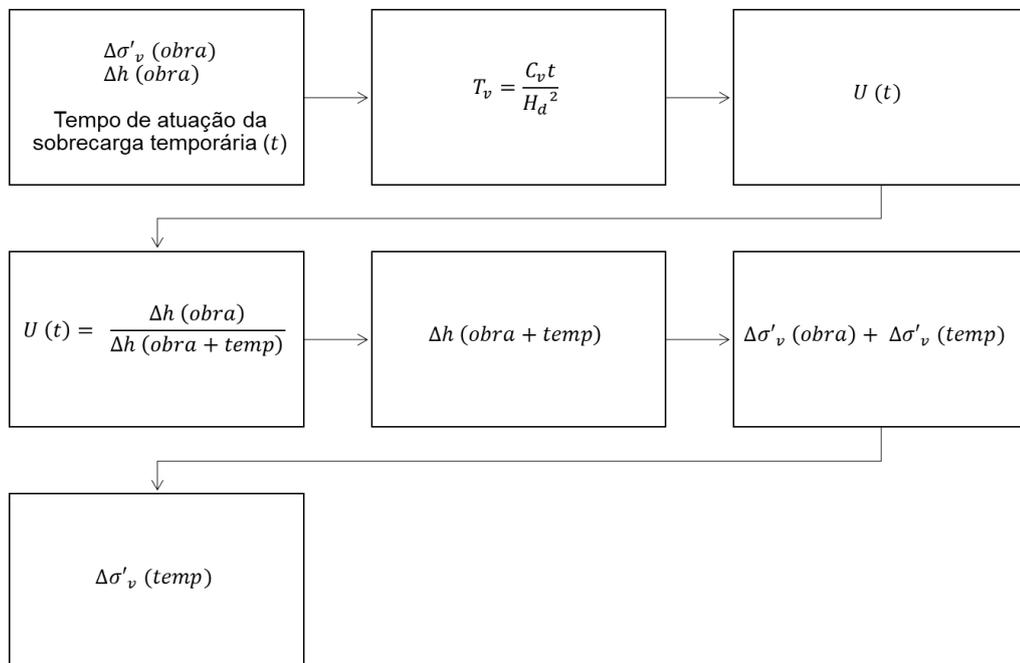
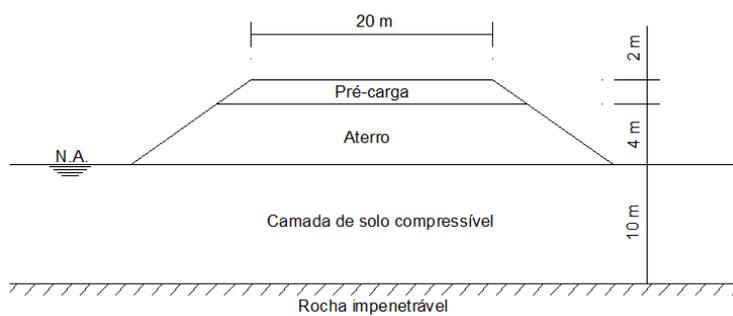


Figura 4 - Esquema de cálculo da sobrecarga que num período t acarreta o recalque desejado (Fernandes, 2016).

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R3.1: Determinado dono de obra exigiu a construção de um aterro com a técnica de pré-carga, conforme figura abaixo. Para esta situação:



$$\begin{aligned} \gamma_{\text{aterro}} &= 22 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_{\text{argila}} &= 18 \text{ kN/m}^3 \\ S_u &= 35 \text{ kPa} \\ OCR &= 2 \\ C_v &= 3,5 \text{ m}^2/\text{ano} \\ e_0 &= 1,3 \\ C_r &= 0,05 \text{ e } C_c = 0,4 \end{aligned}$$

- Calcule as tensões efetivas desenvolvidas no ponto médio da camada de solo mole ao longo da obra.
- Durante a execução do aterro, qual o fator de segurança mínimo a que estará sujeita a fundação?
- Mostre a evolução do índice de vazios ao longo da obra.
- Qual o recalque no dia da entrega da obra?
- Quanto tempo será necessário para a entrega da obra?

Solução:

- a) Tensão efetiva vertical no ponto médio da camada de argila mole, antes da construção do aterro:

$$\sigma'_{vo} = \frac{H_0}{2} \gamma_{sub} = \frac{10}{2} (18 - 10) = 40 \text{ kPa}$$

A tensão de pré-adensamento é:

$$OCR = \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{vo}} \rightarrow 2 = \frac{\sigma'_{vm}}{40} \rightarrow \sigma'_{vm} = 80 \text{ kPa}$$

Tensão efetiva vertical no ponto médio da camada de argila mole, considerando apenas a construção do aterro sem a pré-carga:

$$\sigma'_{v1} = \frac{10}{2} (18 - 10) + 22.4 = 128 \text{ kPa}$$

Tensão efetiva vertical no ponto médio da camada de argila mole, considerando apenas a construção do aterro com a pré-carga:

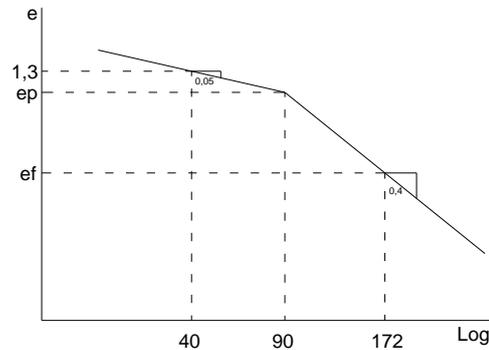
$$\sigma'_{v2} = \frac{10}{2} (18 - 10) + 22.6 = 172 \text{ kPa}$$

- b) Fator de segurança para um aterro de 6 m de altura:

$$FS = \frac{5,14 S_u}{\gamma_{\text{aterro}} H_{\text{aterro}}} = \frac{5,14 \cdot 35}{22.6} = 1,36$$

O fator de segurança para o aterro com pré-carga é menor que o mínimo recomendado de 1,5.

c)



$$C_r = \frac{e_o - e_p}{\log \sigma'_{vm} - \log \sigma'_{vo}}$$

$$0,05 = \frac{1,3 - e_p}{\log 80 - \log 40}$$

$$e_p = 1,28$$

$$C_c = \frac{e_p - e_f}{\log \sigma'_{v1} - \log \sigma'_{vm}}$$

$$0,40 = \frac{1,28 - e_f}{\log 172 - \log 80}$$

$$e_f = 1,15$$

d) O recalque esperado para o dia de entrega da obra corresponde ao recalque que seria provocado apenas pelo aterro de 4 m. Logo:

$$\Delta h = \frac{H_o}{1 + e_o} C_r \log \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{vo}} + \frac{H_o}{1 + e_p} C_c \log \frac{\sigma'_{v1}}{\sigma'_{vm}}$$

$$\Delta h = \frac{10}{1 + 1,3} 0,05 \log \frac{80}{40} + \frac{10}{1 + 1,28} 0,4 \log \frac{128}{80}$$

$$\Delta h = 0,423 \text{ m}$$

e) Deve-se calcular o grau de adensamento para o qual será retirada pré-carga. Logo, o recalque total considerando a pré-carga:

$$\Delta h = \frac{H_o}{1 + e_o} C_r \log \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{vo}} + \frac{H_o}{1 + e_p} C_c \log \frac{\sigma'_{v2}}{\sigma'_{vm}}$$

$$\Delta h = \frac{10}{1 + 1,3} 0,05 \log \frac{80}{40} + \frac{10}{1 + 1,28} 0,4 \log \frac{172}{80}$$

$$\Delta h = 0,648 \text{ m}$$

Ao chegar aos 0,423 m, a pré-carga será retirada. Logo, ao atingir-se o grau de adensamento de:

$$U = \frac{0,423}{0,648} = 0,653 = 65,3\%$$

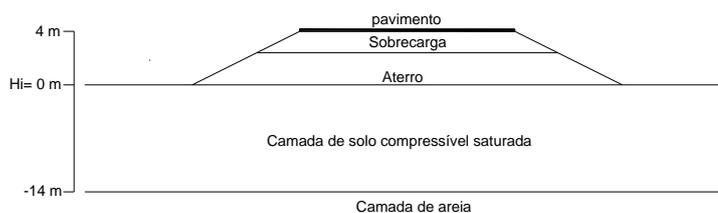
O tempo necessário para a entrega da obra será quando atingido 65,3% do recalque. Logo:

$$T_v = 1,781 - 0,933 \log(100 - U) = 1,781 - 0,933 \log(100 - 65,3) = 0,344$$

$$t = \frac{T_v H_d^2}{C_v} = \frac{0,344 \cdot 10^2}{3,5} = 9,82 \text{ anos}$$

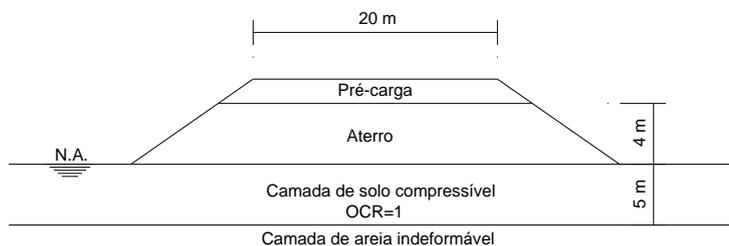
EXERCÍCIOS PROPOSTOS

3.1: Um cais de porto será construído sobre uma camada de solo compressível. O pavimento do cais deverá ser construído sobre um aterro para atingir a cota 2 m. Com o intuito de acelerar os recalques, será construído um aterro com altura superior àquela necessária, com 4 m de altura. Qual deverá ser a altura de aterro de sobrecarga removida após a finalização do adensamento primário?



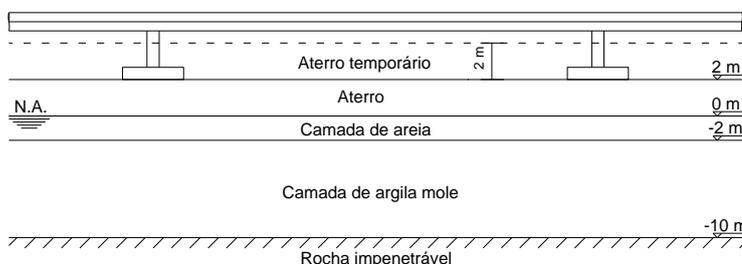
$$\begin{aligned} \gamma_{\text{aterro}} &= 20 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_{\text{argila}} &= 17 \text{ kN/m}^3 \\ S_u &= 20 \text{ kPa} \\ \text{OCR} &= 5 \\ C_v &= 5 \text{ m}^2/\text{ano} \\ e_o &= 1,2 \\ C_r &= 0,08 \text{ e } C_c = 0,35 \end{aligned}$$

3.2: O dono de uma obra necessita construir um aterro de 4 m de altura sobre uma camada de argila mole. Para acelerar o processo de recalque, ele decidiu implantar a técnica de pré-carga de tal modo que o tempo de recalque seja reduzido pela metade. Qual deverá ser a altura do aterro de pré-carga? É possível atender esta exigência?



$$\begin{aligned} \gamma_{\text{aterro}} &= 22 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_{\text{argila}} &= 16 \text{ kN/m}^3 \\ S_u &= 40 \text{ kPa} \\ \text{OCR} &= 1 \\ C_v &= 4 \text{ m}^2/\text{ano} \\ e_o &= 1,4 \\ C_c &= 0,5 \end{aligned}$$

3.3: Com o objetivo de sobrelevar a cota da superfície do terreno para a colocação de um oleoduto, será construído um aterro de 2 m de altura. Para minimizar os recalques das sapatas de apoio, será construído um aterro temporário de 2 m de altura no terreno de fundação, no período que antecede a instalação da fundação. Para esta situação:

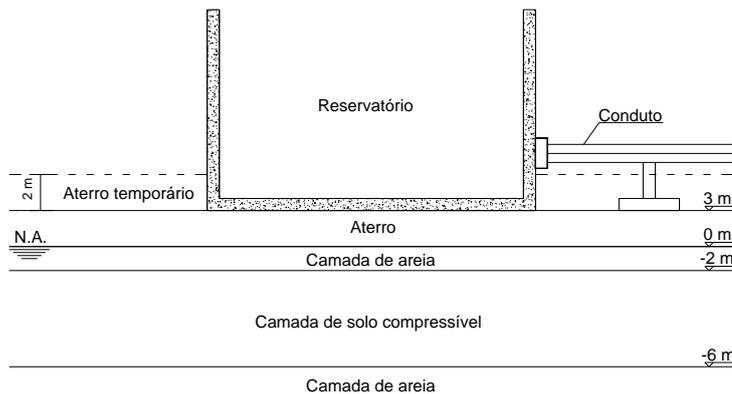


$$\begin{aligned} \gamma_{\text{aterro}} &= 21 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_{\text{areia}} &= 20 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_{\text{argila}} &= 17 \text{ kN/m}^3 \\ \text{OCR} &= 1 \\ C_v &= 6 \text{ m}^2/\text{ano} \\ e_o &= 1,3 \\ C_r &= 0,02 \text{ e } C_c = 0,2 \end{aligned}$$

- Determine o recalque por adensamento causado pelo aterro temporário.
- Qual o valor do recalque um ano após a colocação do aterro?
- Durante quanto tempo será necessário deixar atuar a sobrecarga temporária, sabendo que o oleoduto tolera um recalque admissível máximo de 2 cm?

OBRAS EM SOLOS MOLES

3.4: Para a construção de um reservatório de uma estação de tratamento de água (ETA) de uma cidade, e com o objetivo de sobrelevar a cota da superfície do terreno, será construído um aterro de 3 m de altura sobre um depósito de solo compressível saturado. Após a dissipação dos excessos de poropressão gerados pela execução do aterro, proceder-se-á à execução do reservatório, conforme representado na figura a seguir. Para esta situação:



$$\gamma_{\text{aterro}} = 22 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{\text{areia}} = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{\text{argila}} = 17 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{OCR} = 1$$

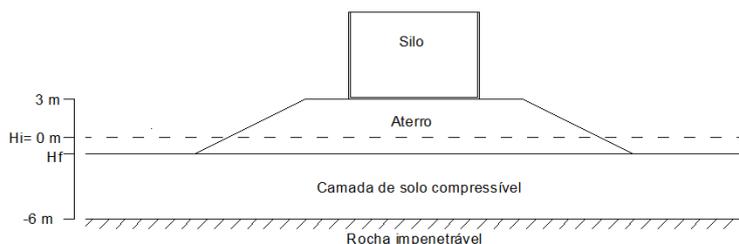
$$C_v = 5 \text{ m}^2/\text{ano}$$

$$e_o = 1,2$$

$$C_c = 0,2$$

- Mostre a evolução dos recalques causados pelo aterro.
- Com o objetivo de acelerar os processos de recalque, foi determinada a construção de um aterro temporário de 2 m de altura. Quanto tempo será necessário para a entrega da obra?
- Qual a redução de tempo no cronograma da obra?
- Considerando a construção e enchimento do reservatório praticamente simultâneo e implicando uma pressão uniformemente distribuída de 60 kPa, calcule o recalque por adensamento no centro da fundação.
- Após a construção do reservatório, um conduto deverá ser ligado ao reservatório. Sabendo que o conduto não suporta recalques diferenciais superiores a 2,5 cm, determine o tempo mínimo para instalação do conduto após a construção e enchimento do reservatório.

3.5: Um silo será construído sobre uma camada de solo compressível saturado. A base da fundação deverá ser construída sobre um aterro para atingir a cota 3 m. Sabendo que o silo deverá ser construído 1 ano após a finalização da construção do aterro e que o mesmo suporta apenas 5 cm de recalque, qual deverá ser a altura de aterro de sobrecarga necessária para iniciar a construção do silo no prazo estabelecido?



$$\gamma_{\text{aterro}} = 22 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{\text{argila}} = 17 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{OCR} = 1$$

$$C_v = 6 \text{ m}^2/\text{ano}$$

$$e_o = 1,5$$

$$C_c = 0,5$$

4. MÉTODOS CONSTRUTIVOS – DRENOS VERTICAIS

CONCEITOS GERAIS

Os drenos verticais são executados em camadas de solo compressível com o objetivo de acelerar o processo de adensamento, uma vez que, além do fluxo vertical, permitem o fluxo horizontal radial em um determinado diâmetro de influência. Os drenos criam caminhos de drenagem mais curtos, o que permite a maior rapidez na remoção da água intersticial e na dissipação da poropressão, permitindo a aceleração do recalque por adensamento.

Drenos verticais de areia geralmente são executados em furos de sondagem a percussão ou trado, com diâmetros entre 200 e 600 mm, que atravessam a camada de solo e são preenchidos com material permeável de granulometria adequada.

Também se podem utilizar drenos fibroquímicos, que consistem em um núcleo plástico plano e contínuo, com largura entre 60 e 100 mm e espessura de 2 a 5 mm, envolto por geotêxtil filtrante. O raio equivalente de um dreno fibroquímico é determinado considerando que ele possua o mesmo perímetro de um círculo.

O adensamento da camada mole através de drenos verticais envolve um processo de adensamento tridimensional e a drenagem total se dá pela soma das parcelas de drenagem vertical e horizontal. Nessa situação, o tempo para atingir o grau de adensamento será mais curto se comparado à situação sem drenos verticais. Isso se verifica principalmente pelo fato de que o coeficiente de permeabilidade horizontal é, em geral, maior que o coeficiente de permeabilidade vertical.

Os drenos circulares de raio (r) possuem uma área circular de influência de raio (R_{inf}). As distribuições mais econômicas de drenos, em planta, são em formato de malhas quadradas e triangulares, geralmente com espaçamento entre drenos de 1 m a 3 m (Figura 5).

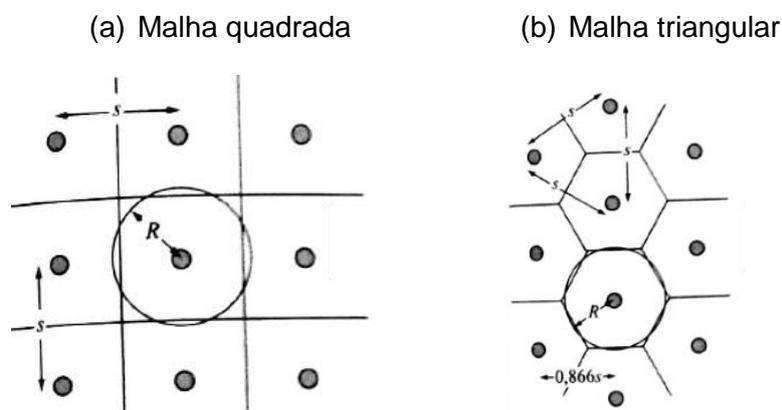


Figura 5 – Malha de drenos verticais.

Ao acelerar o processo de adensamento, os drenos verticais promovem uma rápida mobilização da resistência ao cisalhamento do solo, melhorando as condições de estabilidade do aterro.

Durante a instalação dos drenos, pode ocorrer o amolgamento da zona em torno do dreno, o que pode reduzir a permeabilidade do solo circundante e, conseqüentemente, reduzir a eficiência do dreno. Para levar este fator em consideração, pode-se usar um valor reduzido de C_h ($C_h = C_v$) ou um dreno de raio menor ($r/2$).

No caso de drenos de areia, ainda pode ocorrer o estrangulamento do dreno causado por argilas moles que penetram no furo de sondagem da remoção do revestimento, reduzindo o diâmetro e impedindo a adequada drenagem.

EQUAÇÕES ÚTEIS

Apresentam-se a seguir algumas das equações utilizadas para o dimensionamento de drenos verticais.

Descrição	Equação	
Grau de Adensamento Global	$U = \frac{\Delta h_t}{\Delta h} \times 100$	
Fator Tempo Vertical	$T_v = \frac{C_v t}{H_d^2}$	
Grau de Adensamento Vertical	Para U_v até 60%	$T_v = \frac{\pi}{4} \left(\frac{U_v}{100} \right)^2$
	Para $U_v > 60\%$	$T_v = 1,781 - 0,933 \log(100 - U_v)$
Grau de Adensamento (fórmula de Carrillo)	$(1 - U) = (1 - U_v) \cdot (1 - U_h)$	
Fator Tempo Horizontal	$T_h = \frac{C_h \cdot t}{4 \cdot R_{inf}^2}$	
Razão dos raios	$n = \frac{R_{inf}}{r}$	
Espaçamento entre drenos	Malha quadrada	$R_{inf} = 0,564 \cdot s$
	Malha triangular	$R_{inf} = 0,525 \cdot s$

O valor de T_h , correlacionado a U_h e n , pode ser obtido através da Tabela 2 ou do ábaco da Figura 6.

Tabela 2 - Valores de T_h para adensamento horizontal (Barnes, 2016).

U_h (%)	Fator Tempo (T_h)										
	n=5	10	15	20	25	30	40	50	60	80	100
10	0,012	0,021	0,026	0,030	0,032	0,035	0,039	0,042	0,044	0,048	0,051
20	0,026	0,044	0,055	0,063	0,069	0,074	0,082	0,088	0,092	0,101	0,107
30	0,042	0,070	0,088	0,101	0,110	0,118	0,131	0,141	0,149	0,162	0,172
40	0,060	0,101	0,125	0,144	0,158	0,170	0,188	0,202	0,214	0,232	0,246
50	0,081	0,137	0,170	0,195	0,214	0,230	0,255	0,274	0,290	0,315	0,334
55	0,094	0,157	0,197	0,225	0,247	0,265	0,294	0,316	0,334	0,363	0,385
60	0,107	0,180	0,226	0,258	0,283	0,304	0,337	0,362	0,383	0,416	0,441
65	0,123	0,207	0,259	0,296	0,325	0,348	0,386	0,415	0,439	0,477	0,506
70	0,137	0,231	0,289	0,330	0,362	0,389	0,431	0,463	0,490	0,532	0,564
75	0,162	0,273	0,342	0,391	0,429	0,460	0,510	0,548	0,579	0,629	0,668
80	0,188	0,317	0,397	0,453	0,498	0,534	0,592	0,636	0,673	0,730	0,775
85	0,222	0,373	0,467	0,534	0,587	0,629	0,697	0,750	0,793	0,861	0,914
90	0,270	0,455	0,567	0,649	0,712	0,764	0,847	0,911	0,963	1,046	1,110
95	0,351	0,590	0,738	0,844	0,926	0,994	1,102	1,185	1,253	1,360	1,444
99	0,539	0,907	1,135	1,298	1,423	1,528	1,693	1,821	1,925	2,091	2,219

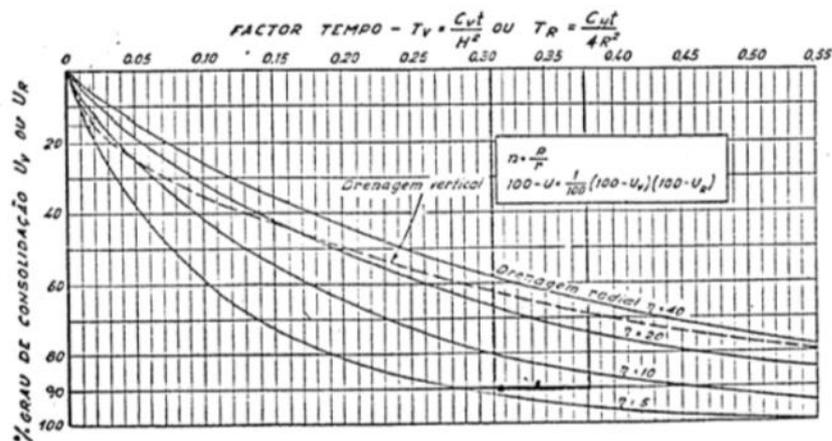


Figura 6 - Relação entre fator tempo (T_v , T_h) e grau de adensamento (U_v , U_h).

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R4.1: Deseja-se construir um aterro de 3 m de altura sobre um depósito de solo compressível com 10 m de espessura, sobrejacente a um leito impermeável. O peso específico aparente para o aterro é de 20 kN/m^3 . A obra deve ser entregue 12 meses após a finalização da construção do aterro. Para acelerar o processo de recalque, serão construídos drenos verticais de areia. Dimensione uma malha quadrada de drenos de areia com 30 cm de diâmetro, de modo que a obra possa ser entregue dentro do prazo estipulado. Considere que o processo de adensamento se inicia após a finalização da construção do aterro. (Dados da argila: $C_v = 2,5 \text{ m}^2/\text{ano}$; $C_h = 5,5 \text{ m}^2/\text{ano}$; $m_v = 0,25 \text{ m}^2/\text{MN}$).

Solução:

Considerando que para a entrega da obra devem ocorrer quando atingido 95% do recalque total, então o grau de adensamento global deve ser:

$$U\% = 95\%$$

O fator tempo para o adensamento vertical é dado por:

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{H_d^2}$$

$$T_v = \frac{2,5 \cdot 1}{10^2}$$

$$T_v = 0,025$$

Sendo o grau de adensamento vertical:

$$T_v = \frac{\pi}{4} \left(\frac{U_v}{100} \right)^2$$

$$0,025 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{U_v}{100} \right)^2$$

$$U_v = 17,8\% (< 60\% \rightarrow \text{ok})$$

O grau de adensamento horizontal é dado por:

$$(1 - U) = (1 - U_v) \cdot (1 - U_h)$$

$$(1 - 0,95) = (1 - 0,178) \cdot (1 - U_h)$$

$$(0,05) = (0,822) \cdot (1 - U_h)$$

$$U_h = 0,939$$

$$U_h = 93,9\%$$

O fator tempo para o adensamento horizontal é dado por:

$$T_h = \frac{C_r \cdot t}{4 \cdot R_{inf}^2}$$

$$T_h = \frac{5,5 \cdot 1}{4 \cdot R_{inf}^2}$$

OBRAS EM SOLOS MOLES

Sendo n a razão entre o raio de influência (R_{inf}) e o raio do dreno (r), tem-se:

$$n = \frac{R_{inf}}{r}$$

$$n = \frac{R_{inf}}{0,15}$$

$$R_{inf} = 0,15 \cdot n$$

Para uma malha quadrada de drenos, o espaçamento entre drenos (s) é dado por:

$$R_{inf} = 0,564 \cdot s$$

$$0,15 \cdot n = 0,564 \cdot s$$

$$s = 0,266 \cdot n$$

Também é possível descrever o espaçamento entre drenos (s) em função de T_h , fazendo:

$$T_h = \frac{5,51}{4 \cdot R_{inf}^2}$$

$$T_h = \frac{5,51}{4 \cdot (0,564 \cdot s)^2}$$

$$T_h = \frac{4,32}{s^2}$$

$$s = \sqrt{\frac{4,32}{T_h}}$$

Como U_h é função de T_h e n , é necessário calcular um valor de s que atenda a seguinte igualdade:

$$s = 0,266 \cdot n = \sqrt{\frac{4,32}{T_h}}$$

Arbitrando-se valores de n obtém-se, através do gráfico ou fazendo a interpolação entre os valores da tabela a seguir, o valor de T_h para $U_h = 0,939$. Com os respectivos valores de n e T_h , determina-se os valores de s para o par de equações supracitado. O espaçamento a ser adotado é aquele que converge para ambas as equações.

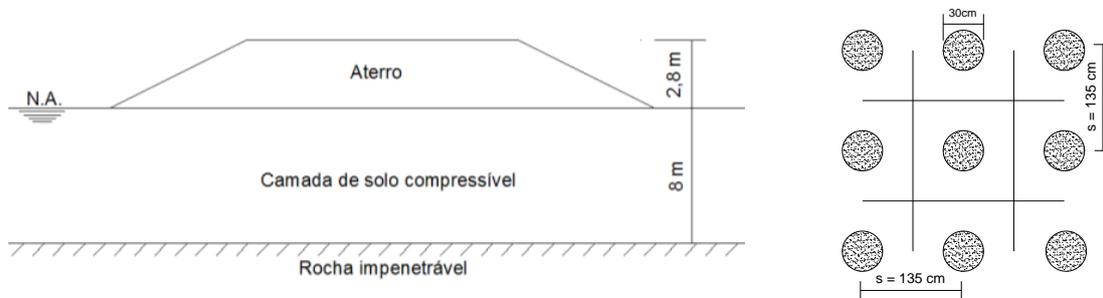
n	T_h	$s = 0,266 \cdot n$	$s = \sqrt{\frac{4,32}{T_h}}$
5	0,333	1,300	3,600
10	0,560	2,700	2,800
15	0,700	4,000	2,500
20	0,801	5,300	2,300

O espaçamento necessário entre drenos é de aproximadamente 2,7 m.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

4.1: Considere uma camada de argila mole com 10 m de espessura sobreposta a uma camada de areia. A argila possui como características $C_v = 3,0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ e $C_h = 5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Dimensionar uma rede triangular de drenos com 30 cm de diâmetro para que se obtenha 80% do adensamento em 6 meses.

4.2: Um aterro de 2,8 m de altura foi construído sobre uma camada de solo compressível de 8 m de espessura, conforme disposto na figura a seguir. Para acelerar o processo de adensamento, o aterro foi construído sobre uma malha de drenos de areia. Dado a malha quadrada de drenos verticais, calcular o recalque total esperado causado pelo aterro e o grau de adensamento alcançado 8 meses após o término da construção. Considerar carregamento instantâneo.



Dados necessários:

$$\gamma_{\text{aterro}} = 21 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{\text{argila}} = 18 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{OCR} = 2$$

$$e_o = 1,2$$

$$S_u = 0,43 \sigma'_v$$

$$C_v = 0,25 \text{ m}^2/\text{ano}$$

$$C_h = 1 \text{ m}^2/\text{ano}$$

$$C_r = 0,07$$

$$C_c = 0,4$$

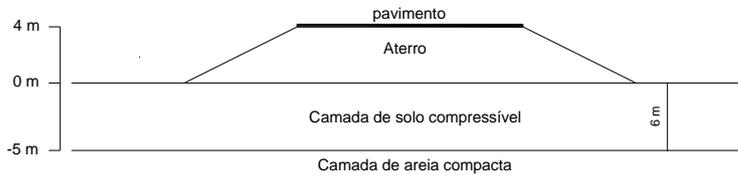
4.3: Considere o exercício 1.4. Pretende-se que 95% do adensamento primário esteja concluído ao final de 1 ano para a execução do pavimento. Apresente o dimensionamento de uma malha triangular de drenos sintéticos com $r = 3 \text{ cm}$ de modo a atender a esta exigência.

4.4: Considerando o exercício 1.6, apresente uma solução de dimensionamento de uma malha quadrada de drenos sintéticos ($r = 10 \text{ cm}$), de modo que os trabalhos referidos em b) possam ser executados ao fim de 3 meses.

4.5: Um aterro de 4 m de altura, que servirá de base para o pavimento de uma estrada, deve ser construído sobre uma camada de argila compressível. O pavimento deve ser executado 5 meses após a construção do aterro e o recalque máximo que o mesmo pode suportar é de 25 mm. Calcular o espaçamento mínimo entre drenos de modo que o

OBRAS EM SOLOS MOLES

recalque máximo não seja ultrapassado. Considerar drenos fibroquímicos com seção transversal de 112 mm x 6 mm.



$$\gamma_{\text{aterro}} = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{\text{argila}} = 17 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{OCR} = 1$$

$$C_v = 5 \text{ m}^2/\text{ano}$$

$$C_h = 2 C_v$$

$$e_o = 1,2$$

$$C_c = 0,2$$

4.6: Considere o exercício 3.2. Sabendo que o tempo máximo para entrega da obra é de 1 ano e 6 meses, dimensione uma malha de drenos fibroquímicos, com dimensões de 112x6mm, que irá acelerar os recalques em conjunto com a técnica de sobrecarga, de modo a atender as exigências de projeto. (Considere $C_v = C_h$).

4.7: Considerando o exercício 3.3, dimensione uma rede triangular de drenos verticais fibroquímicos ($r = 10 \text{ cm}$) que, em conjunto com a sobrecarga temporária, permita proceder a instalação do oleoduto ao fim de 3 meses. (Considere $C_v = C_h$).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M. de S. S.; MARQUES, M. E. S. **Aterros sobre solos moles: projeto e desempenho**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2010, 1: 254.

BARNES, G. **Mecânica dos solos: princípios e práticas**. 3ª edição. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

BIOT, M. A. (1941). **General theory of three-dimensional consolidation**. Journal of applied physics, 12(2), 155-164.

BORGES, J. M. L., et al. **Aterros sobre solos moles reforçados com geossintéticos: análise e dimensionamento**. 1995.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: mecânica das rochas, fundações e obras de terra**. Volume 2. 6ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 1983.

CRUZ, P. T.; SAES, J. L. **Mecânica dos solos: exercícios resolvidos**. 5ª edição. São Paulo: Grêmio Politécnico, 1980.

FERNANDES, M. de M. **Mecânica dos solos: conceitos e princípios fundamentais**. Oficina de Textos. São Paulo, 2016.

DELL'AVANZI, E. **Introdução à Previsão em Engenharia Geotécnica**. Curitiba - PR, 2014.

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DE PORTO. **Mecânica dos solos I: folha de exercícios no 5**. Disponível em: <http://civil.fe.up.pt/>. Acesso em: 22/03/2018.

FUTAI, M. M. **Considerações sobre a influência do adensamento secundário e do uso de reforços em aterros sobre solos moles**. 2010. PhD Thesis. Universidade de São Paulo.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics, series in soil engineering**. Jhon Wiley & Sons, 1969.

LEROUEIL, S., BOUCLIN, G., TAVENAS, F., BERGERON, L., & ROCHELLE, P. L. (1990). **Permeability anisotropy of natural clays as a function of strain**. Canadian Geotechnical Journal, 27(5), 568-579.

LEROUEIL, S.; MAGNAN, J.; TAVENAS, F. **Embankments on soft clays**. 1990.

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. Oficina de textos, 2010.

TERZAGHI, K. (1925). **Principles of soil mechanics, IV—Settlement and consolidation of clay**. Engineering News-Record, 95(3), 874-878.

TERZAGHI, K., & FROLICH, O. K. (1936). **Theory of settlement of clay layers**. Franz Deuticke, Leipzig Google Scholar.