

Aterros sobre solos moles: recalques e estabilidade

Uma rodovia com plataforma de 30 m de largura, atravessando uma região de baixada litorânea caracterizada pela ocorrência de camadas de argila orgânica em uma grande extensão do traçado, será construída sobre um aterro de areia.

Para oferecer condições de trafegabilidade em épocas de inundação, a cota mínima imposta no projeto geométrico para o greide do aterro é de +3 m.

1. Verificar se um aterro construído com altura inicial de 4 m atende aos requisitos de projeto para a pista.

Considerando os parâmetros geotécnicos da camada de argila mole (reproduzidos abaixo), o carregamento de 72 kPa, a tensão inicial no meio da camada de 37,5 kPa e a tensão de pré-adensamento de 45 kPa, chega-se a uma deformação de 13,8% e, portanto, a um recalque final da ordem de 2,07 m, com greide final insuficiente na cota 1,93 m.

$$\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$$

$$OCR = 1,2$$

$$C_c / (1+e_0) = 0,35$$

$$C_r / C_c = 0,1$$

2. Calcular em primeira aproximação a altura inicial do aterro para que o greide da pista esteja sempre acima da cota de inundação, considerando apenas a ocorrência do recalque primário. Observe que ainda não está sendo discutido o tempo de ocorrência desse recalque.

Com os mesmos dados da questão anterior chega-se, iterativamente, a uma altura inicial de 5,6 m, com recalque final de 2,6 m (somente compressão primária, aquela causada pelo crescimento das tensões efetivas durante o processo de adensamento; não estão aí computados os efeitos de compressão secundária ou deformação lenta, que se processa sob tensão efetiva constante).

3. Verificar o tempo necessário para a ocorrência de 95% dos recalques. Caso se deseje reduzir esse tempo, citar as soluções possíveis, realizando um pré-dimensionamento e comentando suas vantagens e desvantagens.

Do gráfico de porcentagem de adensamento (U , teoria de Terzaghi, fluxo exclusivamente vertical) em função de fator tempo (T), apresentado na coleção 9, chega-se a $T = 1,128$ para $U = 0,95$. Considerando drenagem em ambas as faces da camada de argila (aterro de areia), tem-se $H_d = 750$ cm. Com o coeficiente de adensamento dado ($c_v = 3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$) e o fator tempo $T = 1,128$ chega-se a um tempo de cerca de 81,6 meses, ou seja, recalques da rodovia por quase 7 anos!

Aceleração possível: drenos verticais (praticamente só se utilizam drenos fibroquímicos na atualidade). Espaçamento típico (malha de triângulos equiláteros): 1 a 2 m. Drenos mais próximos seriam menos eficientes porque maiores volumes de argila sofreriam amolgamento na instalação; o amolgamento reduz a permeabilidade e aumenta a compressibilidade, o que resulta em redução de c_v ! Aliás, a redução do amolgamento foi a principal razão para a substituição dos drenos verticais de areia por drenos fibroquímicos, que oferecem altas vazões com seções transversais cuja área reduzida minimiza a perturbação de instalação. Fluxo passa a ser praticamente horizontal. Modelo requer, portanto, teorização diferente da teoria do adensamento de Terzaghi. Os principais resultados dessa formulação estão resumidos nas expressões abaixo.

$$(1-U) = (1-U_v) \cdot (1-U_r) \quad T_r = \frac{C_{vr} t}{d^2} \quad U_r = 1 - e^{-\frac{8T_r}{m}}$$

Aterros sobre solos moles: recalques e estabilidade

$$m = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln n - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \quad \text{sendo} \quad n = \frac{d}{d_e} \quad \text{e} \quad d_e = \frac{a+b}{2}$$

d = distância entre drenos

d_e = diâmetro equivalente do dreno,

a = largura do dreno,

b = espessura do dreno.

Adotando $d_e \cong 5$ cm (para o dreno examinado em classe) e utilizando, para o adensamento radial, $c_{vh} = 5 \times 10^{-3}$ cm²/s, chega-se aproximadamente aos números da planilha “Coleção 2 – Aceleração de recalques com a utilização de drenos verticais”, disponível no Moodle.

Observações: grande redução de tempo e fluxo essencialmente radial, podendo-se antecipar até porcentagens maiores do recalque resultante da compressão primária; no entanto, ainda necessário conviver com a **compressão secundária** (deformação lenta), a qual só pode ser reduzida com pré-carregamento para **aumentar a razão de sobre-adensamento** (OCR) da argila, o que permite reduzir significativamente o seu coeficiente de adensamento secundário (c_α).

Soluções alternativas para a questão dos recalques: a) troca de solo (somente econômica para espessuras pequenas de solo mole); b) aterro estaqueado (raramente vantajosa do ponto de vista econômico).

4. Verificar a condição de estabilidade para esta altura do aterro, admitindo um talude normal de terraplenagem (1V:1,5H). Foi sugerido que se aceitasse um coeficiente de segurança de 1,3, que é típico de obras provisórias. Discuta essa sugestão.

Por que um coeficiente de segurança típico de obra provisória ($F = 1,3$)? Porque a situação não drenada de **fim de construção** do aterro é, de fato, provisória. Com o adensamento, dissipação de sobrepressões neutras, redução de índice de vazios, a resistência tende a aumentar e a segurança de longo prazo fica bem maior (como visto no exercício 4 da Coleção 1).

Ábacos de estabilidade (Pinto, 1974 e Pinto, 1994) permitem estimar carga de ruptura (e , portanto, F), desde que conhecida a variação da resistência não drenada com a profundidade. Esta pode ser caracterizada a partir dos resultados do ensaio de palheta (vide resultados dos *vane tests* na Fig. 1), com a correção de Bjerrum (Fig. 2). Desprezado o efeito de ressecamento superficial, chega-se aproximadamente a $C_0 \cong 7,2$ kPa e $C_1 \cong 1,44$ kPa / m (já com a correção de Bjerrum correspondente a $IP=35$ da argila em questão).

Com $m = 1,5$ e $d = 8,4$ m, de um dos ábacos (Fig. 3) obtém-se $N_{c0} \cong 9,6$ e $q_R \cong 69$ kPa, portanto $F \cong 0,68$ (com $q \cong 101$ kPa) e aterro instável com essa configuração!

5. Caso a condição de estabilidade não esteja atendida, propor soluções de estabilização com pré-dimensionamento. Utilize os ábacos fornecidos para discutir a viabilidade das soluções sugeridas.

Inverte-se o cálculo da questão anterior para chegar a um talude de terraplenagem menos íngreme: $m \cong 7,1$ (em vez do 1,5 inicialmente proposto) e $d \cong 40$ m. Viável?

É também possível utilizar bermas de equilíbrio (no lugar do talude de terraplenagem muito pouco inclinado, construtivamente inviável). Para tanto, utilizam-se os ábacos correspondentes, também fornecidos na Coleção.

Ainda com o cálculo invertido, necessita-se de $F = 1,3$, portanto $q_R \cong 131$ kPa e $N_{c0} = 18,2$. De um dos ábacos da Fig. 5 obtém-se $C_1 f / C_0 \cong 4,5$ e $f \cong 22,5$ m (largura das bermas).

O dimensionamento não está completo sem a verificação da estabilidade da própria berma, que tem 2,8 m de altura (vide características da solução da Fig. 6). Esta pode ser verificada exatamente como no exercício anterior. Se mantido, para a extremidade da berma, o talude 1V:1,5H, obtém-se $N_{c0} \cong 8$, $q_R \cong 58$ kPa e $F = 1,14$, insuficiente.

Aterros sobre solos moles: recalques e estabilidade

Verifique que, para garantir a estabilidade com $F = 1,3$, o talude da extremidade das bermas deverá ter inclinação 1V:2,5H, estendendo-se por 7 m adicionais.

Fica claro, portanto, que a dimensão transversal das bermas / taludes será, para cada lado do aterro central, da mesma ordem de grandeza da plataforma da rodovia!

Para reduzir custos há a alternativa de reforço da base do aterro com malha de geossintético. A expressão e o gráfico fornecidos (Figura 7) permitem uma estimativa preliminar da carga a ser resistida por metro de geossintético para que seja atingido o fator de segurança especificado ($F_R = 1,3$). Com $I_R \cong 0,23$, $P_{ref} \cong 1161$ kN/m.

Atenção: a carga de ruptura do geossintético a ser escolhido deverá ser bem maior do que esse valor, devido a efeitos de fluência, degradação e danos de instalação (vide informações abaixo). No caso analisado, o reforço com geogrelha(s) deveria ser especificado com resistência à tração da ordem de 4000 kN/m, para uma situação de utilização com $P_{ref} \cong 1161$ kN/m.

Consulte sempre o Manual Brasileiro de Geossintéticos para especificar adequadamente o geossintético capaz de oferecer comportamento adequado para a carga de trabalho.

$$T_{adm} = \frac{T_r}{FR_F \cdot FR_I \cdot FR_{DQ} \cdot FR_{DB}} \quad (5.21)$$

onde:

FR_F – fator de redução parcial devido à fluência para o tempo de vida útil da obra ou de atuação do reforço, que pode ser durante as fases construtivas e de adensamento e/ou posteriormente;

FR_I – fator de redução parcial devido a danos mecânicos de instalação;

FR_{DQ} – fator de redução parcial devido à degradação química;

FR_{DB} – fator de redução parcial devido à degradação biológica.

TAB. 5.2 FAIXA DE VALORES DE FATORES DE REDUÇÃO A SEREM USADOS NA EQ. (5.21)

Fatores de redução	Geotêxtil	Geogrelha
FR_I	1,1 – 2,0	1,1 – 2,0
FR_{DQ}	1,0 – 1,5	1,1 – 1,4
FR_{DB}	1,0 – 1,3	1,0 – 1,2
FR_F	2,0 – 3,5	2,0 – 3,0

$$J = \frac{T}{\varepsilon_a} \quad (5.22)$$