



Lista de Exercícios Resolvidos 12

## Engenharia Geotécnica

### Parte 1: Geotecnia Básica

Lucas Monteiro Nogueira

#### ■ Problemas

##### Parte 1: Geotecnia Básica

1. Consistência e Plasticidade
2. Índices Físicos de Solos I
3. Índices Físicos de Solos II
4. Índices Físicos de Solos III
5. Índices Físicos de Solos IV
6. Índices Físicos de Solos V
7. Índices Físicos de Solos VI
8. Índices Físicos de Solos VII
9. Índices Físicos de Solos VIII
10. Índices Físicos de Solos IX
11. Índices Físicos de Solos X – Densidade Relativa I
12. Índices Físicos de Solos XI – Densidade Relativa II
13. Compactação I – Plotando Dados de Compactação
14. Compactação II – Ensaio Proctor
15. Compactação III – Seleção de Jazidas de Empréstimo
16. Compactação IV – Análise de uma Curva de Compactação
17. Compactação V – Compactação e Densidade Relativa
18. Transporte de Água I – Permeâmetro de Carga Constante I
19. Transporte de Água II – Permeâmetro de Carga Constante II
20. Transporte de Água III – Permeâmetro de Carga Variável
21. Transporte de Água IV – Problema do Dique
22. Transporte de Água V – Condutividade Equivalente
23. Transporte de Água VI – Variando o Índice de Vazios
24. Transporte de Água VII – Percolação I
25. Transporte de Água VIII – Percolação II



Não se esqueça que utilizo o padrão americano de notação decimal, no qual um ponto (“.”) aparece nos lugares em que, no sistema brasileiro, utilizaríamos uma vírgula (“,”) (e vice-versa).

- 26. Transporte de Água IX – Solo Inclinado
  - 27. Transporte de Água X – Cálculo de Subpressões
- 

## **Parte 2: Mecânica dos Solos**

- 28. Tensão Efetiva I
  - 29. Tensão Efetiva II
  - 30. Tensão Efetiva III
  - 31. Tensão Efetiva IV
  - 32. Tensão Efetiva V
  - 33. Ensaio de Adensamento I
  - 34. Ensaio de Adensamento II
  - 35. Ensaio de Adensamento III
  - 36. Ensaio de Adensamento IV
  - 37. Tempo de Adensamento I
  - 38. Tempo de Adensamento II
  - 39. Tempo de Adensamento III
  - 40. Tempo de Adensamento IV
  - 41. Tempo de Adensamento V
  - 42. Tempo de Adensamento VI
  - 43. Resistência de Solos I – Tensões de Corte
  - 44. Resistência de Solos II – Ensaio de Cisalhamento Direto I
  - 45. Resistência de Solos III – Ensaio de Cisalhamento Direto II
  - 46. Resistência de Solos IV – Ensaio de Compressão Não Drenada
  - 47. Resistência de Solos V – Teste Triaxial com uma Areia
  - 48. Resistência de Solos VI – Teste Triaxial com uma Argila
  - 49. Resistência de Solos VII – Ensaio CD com uma Areia
  - 50. Resistência de Solos VIII – Ensaio Consolidados Drenados I
  - 51. Resistência de Solos IX – Ensaio Consolidados Drenados II
  - 52. Resistência de Solos X – Análise Conjugada – Ensaio Triaxial e de Cis. Direto
- 

## **Parte 3: Sapatas e Estacas**

- 53. Sapatas – Capacidade de Carga I – Salgado
- 54. Sapatas – Capacidade de Carga II – Salgado
- 55. Sapatas – Capacidade de Carga III – Salgado
- 56. Sapatas – Capacidade de Carga IV – Salgado
- 57. Sapatas – Capacidade de Carga V – Salgado
- 58. Sapatas – Capacidade de Carga VI – Terzaghi
- 59. Sapatas – Capacidade de Carga VII – Equação Geral
- 60. Sapatas – Capacidade de Carga VIII – Compressibilidade
- 61. Sapatas – Capacidade de Carga IX – Meyerhof (Excêntrica)
- 62. Sapatas – Capacidade de Carga X – Meyerhof (Excêntrica)

63. Sapatas – Dimensões Adequadas I
  64. Sapatas – Dimensões Adequadas II
  65. Sapatas – Recalque I – Teoria da Elasticidade
  66. Sapatas – Recalque II – Christian-Carrier
  67. Sapatas – Recalque III – Mayne-Poulos
  68. Estacas – Capacidade de Carga I
  69. Estacas – Capacidade de Carga II
  70. Estacas – Capacidade de Carga III
  71. Estacas – Capacidade de Carga IV
  72. Estacas – Capacidade de Carga V
  73. Estacas – Recalque I – Método de Poulos-Davis
  74. Estacas – Recalque II – Método de Vesíć
  75. Estacas – Atrito Negativo
  76. Estacas – Carregamento Lateral I
  77. Estacas – Carregamento Lateral II
  78. Grupo de Estacas
- 

#### ■ Problema 1 (Consistência e Plasticidade)

Sabe-se que uma amostra de solo argiloso possui limite de liquidez igual a 38%, limite de plasticidade igual a 21%, teor de umidade igual a 27% e porcentagem de partículas de tamanho argiloso ( $<2 \mu\text{m}$ ) igual a 34%. Utilizando essas informações, julgue os itens a seguir.

1. ( ) O índice de plasticidade do solo é maior que 18%.
2. ( ) O índice de liquidez do solo é maior que 36%.
3. ( ) O índice de consistência do solo é maior que 60%.
4. ( ) A atividade do solo é maior que 0.48.

#### ■ Problema 2 (Índices Físicos dos Solos I)

Uma amostra de solo úmido foi seca em estufa. São conhecidos os seguintes dados:

- ▶ Volume total:  $0.0138 \text{ m}^3$
- ▶ Massa total: 28.31 kg
- ▶ Massa após secagem: 23.40 kg
- ▶ Gravidade específica dos sólidos: 2.71

Determine:

- (a) A densidade do solo.
- (b) O peso específico do solo.
- (c) O índice de vazios do solo.
- (d) A porosidade do solo.
- (e) O grau de saturação do solo.

### ■ Problema 3 (Índices Físicos dos Solos II)

Uma amostra de areia úmida tem massa 1090 g e volume 592 cm<sup>3</sup>. Ademais, sabe-se que a areia possui massa de 920 g quando seca e que a densidade dos sólidos que compõem a amostra é de 2680 kg/m<sup>3</sup>. Determine:

- (a) O índice de vazios.
- (b) A porosidade.
- (c) O teor de umidade.
- (d) O grau de saturação.
- (e) A densidade total (úmida) do solo.

### ■ Problema 4 (Índices Físicos dos Solos III)

Uma amostra cilíndrica de argila siltosa saturada possui 10 cm de diâmetro e 2.5 cm de espessura. O índice de vazios da amostra é inicialmente igual a 1.42 e a gravidade específica dos sólidos é 2.68. A amostra é comprimida até atingir uma espessura de 2 cm sem alterar o diâmetro inicial.

- (a) Encontre a densidade da amostra de argila (g/cm<sup>3</sup>) antes da compressão.
- (b) Encontre o índice de vazios após a compressão e a variação no teor de umidade entre os estados inicial e final.

### ■ Problema 5 (Índices Físicos dos Solos IV)

Um solo apresenta massa específica 1910 kg/m<sup>3</sup> e teor de umidade 9.5%. A gravidade específica do solo é igual a 2.70. Calcule o índice de vazios e o grau de saturação do solo. Quais seriam os valores de densidade e teor de umidade se o solo estivesse completamente saturado, mas com o mesmo índice de vazios?

### ■ Problema 6 (Índices Físicos dos Solos V)

Uma amostra de areia tem massa total 182 g, volume total 90 cm<sup>3</sup>, teor de umidade 14% e sólidos com gravidade específica igual a 2.71. Qual é a variação de volume necessária para que a amostra tenha grau de saturação igual a 90%, sabendo que a massa total deve permanecer fixa?

### ■ Problema 7 (Índices Físicos dos Solos VI)

Uma amostra de solo apresenta peso específico igual a 16.6 kN/m<sup>3</sup> quando o grau de saturação é de 50%. A mesma amostra apresenta peso específico igual a 17.8 kN/m<sup>3</sup> quando o grau de saturação é de 75%. Encontre o índice de vazios  $e$  e a gravidade específica  $G_s$  do solo em questão.

### ■ Problema 8 (Índices Físicos dos Solos VII – Unidades USCS)

Uma amostra de solo possui peso úmido igual a 62 lb e volume 0.56 ft<sup>3</sup>. Logo após ser seco em estufa, o solo apresentou peso igual a 50 lb. Sabendo que a gravidade específica dos sólidos é 2.64, determine o teor de umidade e o índice de vazios do solo em questão.

■ **Problema 9 (Índices Físicos dos Solos VIII – Unidades USCS)**

As porosidades mínima e máxima registradas em uma areia siltosa (gravidade específica  $G_s = 2.7$ ) são respectivamente iguais a 32% e 44%. Qual é o intervalo correspondente de pesos específicos saturados em  $\text{lb/ft}^3$ ?

■ **Problema 10 (Índices Físicos dos Solos IX)**

Um solo foi compactado em um perfil pedológico de massa específica igual a  $2.15 \text{ Mg/m}^3$  e teor de umidade de 12%. O valor da gravidade específica do solo é 2.65. Calcule a densidade seca, o índice de vazios, o grau de saturação e o conteúdo de ar do solo. Por fim, responda: seria possível compactar o solo em questão a um teor de umidade de 13.5% até obter-se uma densidade seca de  $2.0 \text{ Mg/m}^3$ ?

■ **Problema 11 (Índices Físicos dos Solos X – Densidade Relativa I)**

A densidade seca *in situ* de uma areia é de  $1.72 \text{ Mg/m}^3$ . As densidades secas máxima e mínima determinadas em ensaios laboratoriais são respectivamente iguais a 1.81 e  $1.54 \text{ Mg/m}^3$ . Determine a densidade relativa da areia em questão.

■ **Problema 12 (Índices Físicos dos Solos XI – Densidade Relativa II)**

Em um projeto construtivo, o peso específico úmido de uma areia examinada *in situ* é de  $115 \text{ lb/ft}^3$ ; o teor de umidade correspondente é 8%. Sabendo que os pesos específicos secos mínimo e máximo determinados em laboratório são respectivamente iguais  $108 \text{ lb/ft}^3$  e  $92 \text{ lb/ft}^3$ , encontre a densidade relativa da areia investigada em campo.

■ **Problema 13 (Compactação I – Plotando Dados de Compactação)**

Os resultados de um ensaio de compactação realizado com uma argila de interesse para aplicações geotécnicas estão tabelados a seguir. Além dos dados experimentais listados a seguir, sabe-se que o solo possui gravidade específica igual a 2.7.

Teor de umid. (%)	6.1	8.2	9.9	11.4	12.3	13.3
Peso específico aparente seco ( $\text{kN/m}^3$ )	17.0	18.8	19.4	20.1	19.9	19.3

- (a) Determine o peso específico seco máximo e o teor de umidade ótimo.
- (b) Estime o peso específico seco e o teor de umidade correspondentes a 95% de compactação (ramo seco).
- (c) Determine o grau de saturação do solo.
- (d) Plote a curva de saturação completa.

### ■ Problema 14 (Compactação II – Ensaio Proctor)

A tabela a seguir mostra os resultados do ensaio Proctor padrão em uma argila arenosa (35% areia, 55% argila, 10% silte) extraída de um depósito pedológico natural. A argila extraída do depósito apresenta porosidade e teor de umidade natural respectivamente iguais a 65% e 5.2%. A argila será utilizada na construção de um aterro para determinada obra rodoviária.

Teor de umid. (%)	4.2	5.1	7.8	9.2	12
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	16.9	18.1	19.6	19.5	18.5

- (a) Forneça as especificações de compactação (peso específico seco e teor de umidade) que devem ser empregadas no campo. Justifique seus resultados.
- (b) Quantos metros cúbicos de solo oriundo do depósito são necessários para a construção de um metro cúbico de aterro?
- (c) Qual é a massa de água por unidade de volume necessária para atender às especificações técnicas fornecidas por você?
- (d) Sabendo que cada caminhão utilizado no transporte de solo do depósito suporta um volume de 22.5 m<sup>3</sup>, quantas cargas (*truckloads*) são necessárias para a execução de um aterro de 100,000 m<sup>3</sup>? **Dica:** A resposta **não** é 100,000/22.5.
- (e) Utilizando as informações do item (d) e os dados listados a seguir, estime o custo associado à execução do aterro de 100,000 m<sup>3</sup>.

- ▶ Cada processo de carga + descarga implica custos de \$7;
- ▶ Cada rota de transporte (ida + volta) envolve um trajeto de 10 km. Os caminhões utilizados são movidos a diesel e operam com eficiência de 4 km/litro. O valor do óleo diesel é considerado fixo e igual a \$5/litro.
- ▶ O custo associado à compactação é de \$2 por m<sup>3</sup> de solo oriundo do depósito natural.

### ■ Problema 15 (Compactação III – Seleção de Jazidas de Empréstimo)

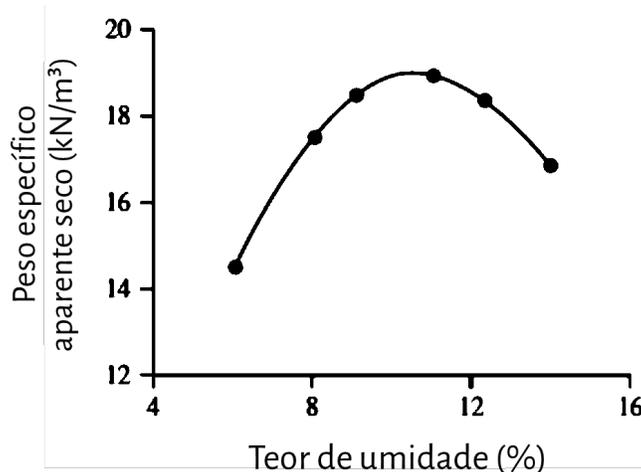
Um aterro hipotético requer 7500 m<sup>3</sup> de solo compactado. O índice de vazios do terrapleno compactado é igual a 0.7. O solo pode ser transportado de quatro jazidas de empréstimo, conforme listado na tabela a seguir. A tabela contém o índice de vazios, a gravidade específica dos sólidos e o custo por metro cúbico para transporte de material ao canteiro de obras.

Jazida	Índice de vazios	Gravidade esp.	Custo (\$/m <sup>3</sup> )
I	0.85	2.66	11
II	0.92	2.69	8
III	1.21	2.71	9
IV	0.89	2.73	10

- (a) Determine, para cada jazida de empréstimo, o volume de solo necessário para atender às especificações da obra em foco.
- (b) Realize os cálculos necessários para estabelecer qual das quatro jazidas fornece o melhor custo-benefício.

■ **Problema 16 (Compactação IV – Análise de uma Curva de Compactação)**

A curva de compactação obtida em um ensaio de compactação de Proctor é ilustrada a seguir. Sabe-se que o solo sob estudo apresenta gravidade específica igual a 2.69.



- (a) Encontre o peso específico seco máximo e o teor de umidade ótimo.
- (b) Qual é o peso específico úmido correspondente ao teor de umidade ótimo?
- (c) Qual é o grau de saturação correspondente ao teor de umidade ótimo?
- (d) Se o peso específico aparente seco desejado é de  $18.5 \text{ kN/m}^3$ , qual é a compactação relativa?
- (e) Qual deveria ser o intervalo de teores de umidade admissíveis para obter a compactação relativa do item (d)?
- (f) Ainda considerando que o peso específico seco desejado é o mesmo do item (d), responda: se os índices de vazios mínimo e máximo são respectivamente iguais a 0.31 e 0.82, qual é a densidade relativa de compactação no campo?

■ **Problema 17 (Compactação V – Compactação e Densidade Relativa)**

A compactação relativa de uma areia siltosa no campo é de 94%. Sabendo que os pesos específicos mínimo e máximo da areia seca no campo são respectivamente  $\gamma_{d(\text{min})} = 13.8 \text{ kN/m}^3$  e  $\gamma_{d(\text{max})} = 17 \text{ kN/m}^3$ , encontre o peso específico seco no campo e a densidade relativa.

■ **Problema 18 (Transporte de Água I – Permeâmetro de Carga Constante I)**

Em um teste com permeâmetro de carga constante envolvendo um solo arenoso, são conhecidos os seguintes dados:

- ▶ Altura do equipamento = 320 mm;
- ▶ Área de seção do equipamento = 200 cm<sup>2</sup>;
- ▶ Carga piezométrica = 510 mm;
- ▶ Volume de água recolhido em 2 min = 650 cm<sup>3</sup>;
- ▶ Índice de vazios da areia = 0.59.

Determine a condutividade hidráulica  $k$  do solo em cm/sec.

### ■ Problema 19 (Transporte de Água II – Permeâmetro de Carga Constante II)

Em um ensaio com permeâmetro de carga constante, o comprimento da amostra de solo é de 200 mm e a área de seção é 78.5 cm<sup>2</sup>. Se a condutividade hidráulica do solo é  $k = 2.1 \times 10^{-2}$  cm/sec e busca-se manter uma taxa de escoamento 130 cm<sup>3</sup>/min ao longo do experimento, qual deve ser a perda de carga registrada ao longo da amostra?

### ■ Problema 20 (Transporte de Água III – Permeâmetro de Carga Variável)

Em um teste com permeâmetro de carga variável, são conhecidos os seguintes dados:

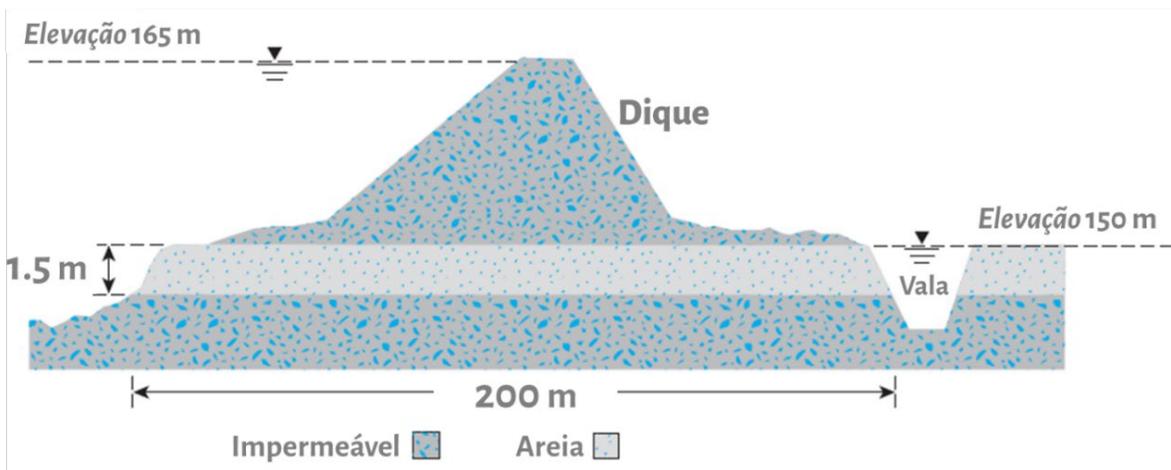
- ▶ Altura da amostra de solo = 20 in.;
- ▶ Área de seção da amostra de solo = 5 in.<sup>2</sup>;
- ▶ Área do piezômetro = 0.3 in.<sup>2</sup>;
- ▶ A diferença de carga em  $t = 0$  é 34 in.;
- ▶ A diferença de carga em  $t = 10$  min é 10 in.;

(a) Determine a condutividade hidráulica  $k$  do solo em in./min.

(b) Qual era a diferença de carga no tempo  $t = 5$  min?

### ■ Problema 21 (Transporte de Água IV – Problema do Dique)

O dique ilustrado a seguir é entremeado por uma camada de areia que se estende ao longo da estrutura. A largura do dique (dimensão entrando no plano do papel) é de 800 m. A condutividade hidráulica da camada de areia é de 3 m·dia<sup>-1</sup>. Determine, em m<sup>3</sup>/min, a vazão de água que esco para dentro da vala destacada na ilustração.

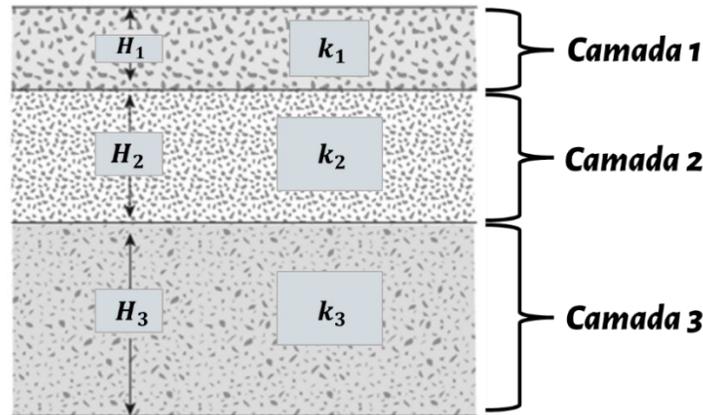


■ **Problema 22 (Transporte de Água V – Condutividade Equivalente)**

Considere o solo horizontalmente estratificado ilustrado a seguir. São conhecidos os seguintes dados para espessura  $H$  e condutividade hidráulica  $k$ :

- ▶ Camada 1:  $H_1 = 1$  m;  $k_1 = 2.5 \times 10^{-3}$  cm/sec;
- ▶ Camada 2:  $H_2 = 1.8$  m;  $k_2 = 1.5 \times 10^{-4}$  cm/sec;
- ▶ Camada 3:  $H_3 = 4$  m;  $k_3 = 0.035$  cm/sec.

Determine a razão de condutividades equivalentes  $k_{H(eq)}/k_{V(eq)}$ .

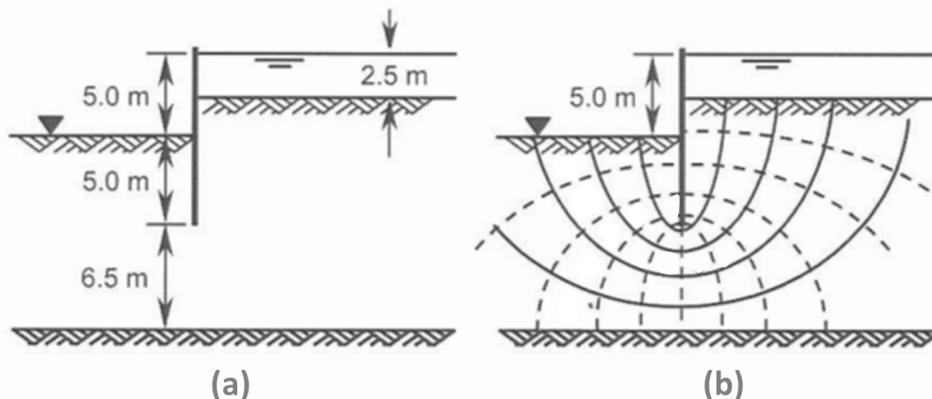


■ **Problema 23 (Transporte de Água VI – Variando o Índice de Vazios)**

A equação de Samarsinghe diz que a condutividade hidráulica de uma argila normalmente adensada pode ser estimada através da expressão  $k = C_4 e^n / (1 + e)$ , onde  $e$  é o índice de vazios e  $C_4$  e  $n$  são constantes. Sabe-se que um solo argiloso tem condutividade igual a  $0.3 \times 10^{-7}$  cm/s quando o índice de vazios é igual a 1.1 e  $0.12 \times 10^{-7}$  cm/s quando o índice de vazios é igual a 0.9. Utilize a referida equação para estimar a condutividade da argila correspondente a  $e = 0.75$ .

■ **Problema 24 (Transporte de Água VII – Percolação I)**

Considere o muro de estacas-pranchas ilustrado na figura (a). Utilizando a rede de fluxo da figura (b) e sabendo que o solo no local é hidráulicamente isotrópico com condutividade  $k = 5.0 \times 10^{-5}$  m/s, determine a taxa de percolação em  $m^3/\text{dia}$ .

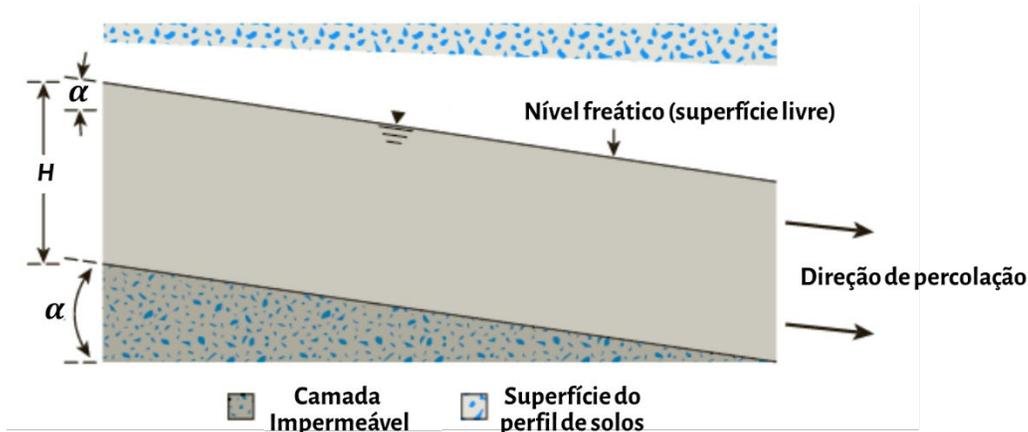


■ **Problema 25 (Transporte de Água VIII – Percolação II)**

Uma barragem de terra é erigida em uma fundação impermeável com um filtro horizontal próximo à base. As permeabilidades do solo nas direções horizontal e vertical são respectivamente iguais a  $0.05 \text{ mm/s}$  e  $0.01 \text{ mm/s}$ . A altura d'água do reservatório local está  $40 \text{ m}$  acima do filtro. Uma rede de fluxo delineada em uma seção da barragem consiste de 4 canais de fluxo e 16 faixas de perda de potencial. Estime a taxa de perda de água por percolação por metro de comprimento da barragem.

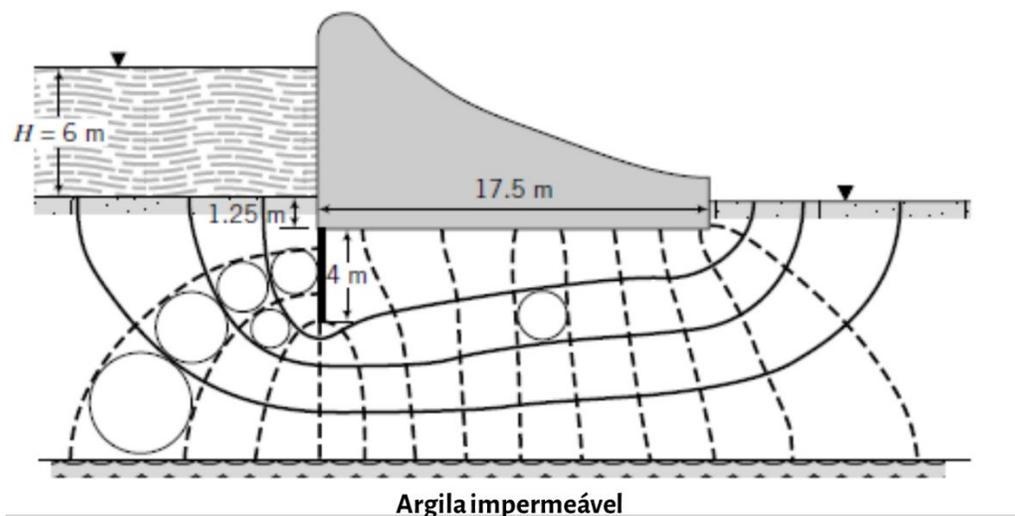
■ **Problema 26 (Transporte de Água IX – Solo Inclinado)**

Uma camada de solo permeável é inclinada e sobrejacente a uma camada impermeável, como ilustra a figura a seguir. Sendo  $k = 6 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$  a condutividade da camada permeável, determine a taxa de percolação ao longo da camada inclinada. Sabe-se que  $H = 5.5 \text{ m}$  e  $\alpha = 8^\circ$ .



■ **Problema 27 (Transporte de Água X – Cálculo de Subpressões)**

Considere a barragem ilustrada a seguir.



- (a) Determine a taxa de percolação sob a barragem sabendo que a condutividade hidráulica é  $k = 4 \times 10^{-4}$  cm/s.
- (b) Determine a distribuição de poropressões na base da barragem.
- (c) Determine a força resultante das subpressões e o ponto de aplicação da força relativamente à face a montante (isto é, a face voltada para a água represada).
- (d) Calcule o peso da barragem para obter um fator de segurança de 1.2 contra ruptura por subpressão.
- (e) Verifique se ocorrerá *piping* (erosão tubular) sabendo que o índice de vazios do solo subjacente à barragem possui índice de vazios  $e = 0.6$ .

## ■ Soluções

### ■ Prob. 1

**1. Falso.** O índice de plasticidade é dado pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, isto é,

$$IP = LL - LP = 38 - 21 = \boxed{17\%}$$

**2. Falso.** O índice de liquidez é dado por

$$IL = \frac{w - LP}{LL - LP} = \frac{27 - 21}{38 - 21} = \boxed{35.3\%}$$

**3. Verdadeiro.** O índice de consistência é dado por

$$IC = \frac{LL - w}{LL - LP} = \frac{38 - 27}{38 - 21} = \boxed{64.7\%}$$

(Lembre-se que a soma do índice de liquidez e o índice de consistência deve ser igual a 100%; os resultados obtidos na análises das assertivas 2 e 3 confirmam essa relação:  $IL + IC = 35.3 + 64.7 = 100\%$ .)

**4. Verdadeiro.** A *atividade* de uma argila é a razão entre o índice de plasticidade ( $IP$ ) e a proporção de partículas com tamanho argiloso ( $< 2 \mu\text{m}$ ),

$$A = \frac{IP}{[\% < 2 \mu\text{m}]} = \frac{17}{34} = \boxed{0.5}$$

### ■ Prob. 2

**Parte (a):** Basta dividir a massa total pelo volume total,

$$\rho_t = \frac{M_t}{V_t} = \frac{28.31}{0.0138} = \boxed{2051.5 \text{ kg/m}^3}$$

**Parte (b):** Para obter o peso específico, multiplica-se a densidade  $\rho_t$  obtida na parte (a) pela gravidade  $g$ ,

$$\gamma_t = \rho_t g = 2051.5 \times 9.81 = 20,125 \text{ N/m}^3 \approx \boxed{20.13 \text{ kN/m}^3}$$

**Parte (c):** O volume de sólidos é

$$V_s = \frac{M_s}{G_s \rho_w} = \frac{23.40}{2.71 \times 1000} = 0.00863 \text{ m}^3$$

Em seguida, calcula-se o volume de vazios  $V_v$ ,

$$V_v = V_t - V_s = 0.0138 - 0.00863 = 0.00517 \text{ m}^3$$

Por fim, tem-se o índice de vazios  $e$ ,

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{0.00517}{0.00863} = 0.599 \approx \boxed{0.60}$$

**Parte (d):** A porosidade  $n$  pode ser facilmente obtida a partir do índice de vazios calculado na parte anterior,

$$n = \frac{e}{1+e} \times 100\% = \frac{0.60}{1+0.60} \times 100\% = \boxed{37.5\%}$$

**Parte (e):** Para calcular o grau de saturação  $S$ , devemos antes estabelecer a massa de água pré-secagem,

$$M_w = 28.31 - 23.40 = 4.91 \text{ kg}$$

e o volume correspondente,

$$V_w = \frac{M_w}{\rho_w} = \frac{4.91}{1000} = 0.00491 \text{ m}^3$$

Por fim, o valor de  $S$  é tal que

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% = \frac{0.00491}{0.00517} \times 100\% = 94.97\% \approx \boxed{95\%}$$

### ■ Prob. 3

**Parte (a):** Primeiramente, podemos determinar o volume dos sólidos que compõem a amostra,

$$\rho_s = \frac{W_s}{V_s} \rightarrow V_s = \frac{W_s}{\rho_s}$$

$$\therefore V_s = \frac{920}{2.68} = 343.28 \text{ cm}^3$$

e, em seguida, o volume de vazios,

$$V_t = V_v + V_s \rightarrow V_v = V_t - V_s$$

$$\therefore V_v = 592 - 343.28 = 248.72 \text{ cm}^3$$

Podemos então determinar o índice de vazios,

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{248.72}{343.28} = \boxed{0.725}$$

**Parte (b):** Conhecendo o índice de vazios, é fácil computar a porosidade  $n$ ,

$$n = \frac{e}{1+e} \times 100\% = \frac{0.725}{1+0.725} \times 100\% = \boxed{42.0\%}$$

**Parte (c):** Antes de determinar o teor de umidade, precisamos da massa de água na amostra,

$$M_w = 1090 - 920 = 170 \text{ g}$$

Portanto,

$$w = \frac{M_w}{M_s} \times 100\% = \frac{170}{920} \times 100\% = \boxed{18.5\%}$$

**Parte (d):** O volume de água na amostra é  $V_w = M_w/\rho_w = 170/1.0 = 170 \text{ cm}^3$ . Segue que o grau de saturação resulta em

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% = \frac{170}{248.72} \times 100\% = \boxed{68.4\%}$$

**Parte (e):** A densidade do solo é

$$\rho_t = \frac{M_t}{V_t} = \frac{1090}{592} = 1.841 \text{ g/cm}^3 = \boxed{1841 \text{ kg/m}^3}$$

#### ■ Prob. 4

**Parte (a):** O volume total da amostra é

$$V_t = \frac{\pi \times 10^2}{4} \times 2.5 = 196.35 \text{ cm}^3$$

Uma vez que a amostra está inicialmente saturada, o volume de vazios é igual ao volume de água,  $V_w = V_v$ . Ademais, sabemos que o índice de vazios é igual a 1.42; recorrendo à definição do referido índice, temos

$$e = \frac{V_v}{V_s} \rightarrow V_v = eV_s = 1.42V_s$$

Sabendo que a soma de volumes deve ser igual a 196.35 cm<sup>3</sup> conforme calculado acima,

$$V_t = V_v + V_s = 1.42V_s + V_s = 2.42V_s$$

$$\therefore 2.42V_s = 196.35 \text{ cm}^3$$

$$\therefore V_s = \frac{196.35}{2.42} = 81.14 \text{ cm}^3$$

O volume de vazios correspondente é

$$V_v = 1.42V_s = 1.42 \times 81.14 = 115.22 \text{ cm}^3$$

Lembrando novamente que o solo está completamente saturado, podemos calcular a massa de água contida na amostra como

$$M_w = \rho_w V_w = 1.0 \times 115.22 = 115.22 \text{ g}$$

Em seguida, calculamos a massa de sólidos,

$$M_s = G_s \rho_w V_s = 2.68 \times 1.0 \times 81.14 = 217.46 \text{ g}$$

e a massa total,

$$M_t = M_s + M_w = 217.46 + 115.22 = 332.68 \text{ g}$$

A densidade correspondente é

$$\rho_t = \frac{M_t}{V_t} = \frac{332.68}{196.35} = 1.694 \text{ g/cm}^3 = \boxed{1694 \text{ kg/m}^3}$$

Antes de encerrar a parte (a), convém determinar o teor de umidade da amostra,

$$w = \frac{M_w}{M_s} \times 100\% = \frac{115.22}{217.46} \times 100\% \approx 53.0\%$$

**Parte (b):** Vamos designar condições pré-compressão com o subscrito “1” e condições pós-compressão com o subscrito “2”; sendo assim, temos  $V_{t1} = 196.35 \text{ cm}^3$  conforme calculado no início da parte (a). O volume total  $V_{t2}$  após a compressão é

$$V_{t2} = \frac{\pi \times 10^2}{4} \times 2.0 = 157.08 \text{ cm}^3$$

Supõe-se que o volume de sólidos não se altera com a compressão, então temos  $V_{s1} = V_{s2} = V_s = 81.14 \text{ cm}^3$ . O volume de vazios pós-compressão é

$$V_{v2} = V_{t2} - V_s = 157.08 - 81.14 = 75.94 \text{ cm}^3$$

O índice de vazios final é calculado em seguida,

$$e_2 = \frac{V_{v2}}{V_s} = \frac{75.94}{81.14} = \boxed{0.936}$$

Sabendo que a amostra segue saturada após a compressão, temos  $V_{w2} = V_{v2} = 75.94 \text{ cm}^3$ . Evidentemente, a densidade aproximada da água é  $1.0 \text{ g/cm}^3$  e a massa líquida correspondente é

$$M_{w2} = \rho_w V_w = 1.0 \times 75.94 = 75.94 \text{ g}$$

O teor de umidade final é, por sua vez,

$$w_2 = \frac{75.94}{217.46} \times 100\% = 34.9\%$$

Resta apenas calcular a variação do teor de umidade entre 1 e 2,

$$\Delta w = |w_2 - w_1| = |34.9 - 53.0| = \boxed{18.1\%}$$

### ■ Prob. 5

Podemos isolar o índice de vazios  $e$  na fórmula

$$\rho = \frac{G_s(1+w)}{1+e} \rho_w \rightarrow 1+e = G_s(1+w) \frac{\rho_w}{\rho}$$

$$\therefore 1+e = 2.70 \times (1+0.095) \times \frac{1.0}{1.91}$$

$$\therefore 1+e = 1.548$$

$$\therefore \boxed{e = 0.548}$$

Em seguida, calculamos o grau de saturação

$$S = \frac{wG_s}{e} = \frac{0.095 \times 2.70}{0.548} = 0.468 = \boxed{46.8\%}$$

A densidade do solo saturado, supondo que o índice de vazios permanece inalterado, é tal que

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{G_s + e}{1 + e} \rho_w = \frac{2.70 + 0.548}{1 + 0.548} \times 1.0 = \boxed{2.10 \text{ g/cm}^3}$$

Por fim, o teor de umidade do solo saturado é

$$w = \frac{e}{G_s} = \frac{0.548}{2.70} \approx 0.203 = \boxed{20.3\%}$$

### ■ Prob. 6

Antes de calcular a variação de volume necessária para atingir determinado grau de saturação, um passo inicial óbvio é determinar o grau de saturação inicial. Sabendo que o teor de umidade inicial é de 14%, a massa de água pode ser expressa em termos da massa de sólidos, isto é,

$$w = \frac{M_w}{M_s} \rightarrow M_w = wM_s = 0.14M_s \quad \text{(I)}$$

Substituindo na fórmula da massa total, vem

$$M_t = M_s + M_w = M_s + 0.14M_s$$

$$\therefore M_t = 1.14M_s$$

$$\therefore M_s = \frac{M_t}{1.14} = \frac{182}{1.14} = 159.65 \text{ g}$$

Substituindo de volta em (I),

$$M_w = 0.14M_s = 0.14 \times 159.65 = 22.35 \text{ g}$$

Supondo que a densidade da água é igual a 1.0 g/cm<sup>3</sup>, conclui-se que o volume de água correspondente é  $V_w = M_w/\rho_w = 22.35/1.0 = 22.35 \text{ cm}^3$ . Já o volume de sólidos é

$$V_s = \frac{M_s}{G_s \rho_w} = \frac{159.65}{2.71 \times 1.0} = 58.91 \text{ cm}^3$$

Subtraindo esse resultado do volume total  $V_t = 90 \text{ cm}^3$  nos fornece o volume de vazios  $V_v$ , qual seja,

$$V_v = V_t - V_s = 90 - 58.91 = 31.09 \text{ cm}^3$$

Finalmente, temos o grau de saturação  $S$ ,

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% = \frac{22.35}{31.09} \times 100\% = 71.9\%$$

Busca-se aumentar o valor de  $S$  para 90%; sabendo que o volume de água permanece o mesmo, o novo volume de vazios  $V_v$  será

$$S = \frac{V_w}{V_v} \rightarrow V_v = \frac{V_w}{S}$$

$$\therefore V_v = \frac{22.35}{0.90} = 24.83 \text{ cm}^3$$

Ademais, supõe-se que o volume de sólidos permanece inalterado e igual a 58.91  $\text{cm}^3$ . O novo volume final será então

$$V'_t = V_s + V_v = 58.91 + 24.83 = 83.74 \text{ cm}^3$$

Isso implica uma variação de volume total cujo valor é

$$\Delta V = V'_t - V_t = 83.74 - 90 = \boxed{-6.26 \text{ cm}^3}$$

### ■ Prob. 7

Recorremos à expressão geral

$$\gamma = \frac{\gamma_w (G_s + Se)}{1 + e}$$

Substituindo  $\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$ ,  $\gamma = 16.6 \text{ kN/m}^3$  e  $S = 50\%$ , obtemos uma primeira equação

$$16.6 = \frac{9.81 \times (G_s + 0.5e)}{1 + e} \quad \text{(I)}$$

Substituindo  $\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$ ,  $\gamma = 17.8 \text{ kN/m}^3$  e  $S = 75\%$ , obtemos uma segunda equação

$$17.8 = \frac{9.81 \times (G_s + 0.75e)}{1 + e} \quad \text{(II)}$$

Observe que **(I)** e **(II)** compõem um sistema de duas equações e duas variáveis, quais sejam, a gravidade específica  $G_s$  e o índice de vazios  $e$ . Qualquer método algébrico de resolução de sistemas lineares é cabível aqui. Por exemplo, podemos isolar a gravidade específica  $G_s$  em **(I)**,

$$16.6 = \frac{9.81 \times (G_s + 0.5e)}{1 + e} \rightarrow 9.81 \times (G_s + 0.5e) = 16.6 \times (1 + e)$$

$$\therefore 9.81G_s + 4.91e = 16.6 + 16.6e$$

$$\therefore G_s = \frac{16.6 + 16.6e - 4.91e}{9.81}$$

$$\therefore G_s = 1.692 + 1.192e \quad \text{(III)}$$

e substituí-la em (II),

$$17.8 = \frac{9.81 \times (G_s + 0.75e)}{1 + e} = \frac{9.81 \times (1.692 + 1.192e + 0.75e)}{1 + e}$$

$$\therefore 17.8 = \frac{9.81 \times (1.692 + 1.942e)}{1 + e}$$

$$\therefore 17.8 \times (1 + e) = 9.81 \times (1.692 + 1.942e)$$

$$\therefore 17.8 + 17.8e = 16.60 + 19.05e$$

$$\therefore e = \frac{17.8 - 16.60}{19.05 - 17.8} = \boxed{0.960}$$

Substituindo o índice de vazios acima em (III), vem

$$G_s = 1.692 + 1.192e = 1.692 + 1.192 \times 0.960 = \boxed{2.836}$$

### ■ Prob. 8

O peso da água contida pelo solo é dado pela diferença entre o peso  $W_u$  do solo ainda úmido e o peso  $W_s$  do solo obtido após secagem em estufa:

$$W_w = W_u - W_s = 62 - 50 = 12 \text{ lb}$$

Sabendo que o teor de umidade é dado pela razão entre o peso de água acima e o peso de sólidos  $W_s$ , temos

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% = \frac{12}{50} \times 100\% = \boxed{24.0\%}$$

Proseguimos ao cálculo do índice de vazios. Para tanto, precisamos do volume de sólidos  $V_s$ ,

$$V_s = \frac{W_s}{G_s \gamma_w} = \frac{50}{2.64 \times 62.4} = 0.304 \text{ ft}^3$$

Segue que o volume de vazios é

$$V_v = V_t - V_s = 0.56 - 0.304 = 0.256 \text{ ft}^3$$

e o índice de vazios propriamente dito é

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{0.256}{0.304} = \boxed{0.842}$$

■ **Prob. 9**

Utilizando a relação entre porosidade e índice de vazios, verifica-se que o índice *mínimo* é

$$e_{\min} = \frac{n_{\min}}{1 - n_{\min}} = \frac{0.32}{1 - 0.32} = 0.471$$

e o índice *máximo* é

$$e_{\max} = \frac{n_{\max}}{1 - n_{\max}} = \frac{0.44}{1 - 0.44} = 0.786$$

A densidade dos sólidos que compõem a areia é obtida a partir da gravidade específica fornecida no enunciado,

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \rightarrow \rho_s = G_s \rho_w$$

$$\therefore \rho_s = 2.7 \times 62.4 = 168.48 \text{ lb/ft}^3$$

Sabendo que o peso específico saturado pode ser obtido através da fórmula usual

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{\gamma_s + \gamma_w e}{1 + e}$$

verifica-se que o peso específico mínimo é

$$\gamma_{\min} = \frac{168.48 + 62.4 \times 0.786}{1 + 0.786} = \boxed{121.80 \text{ pcf}}$$

ao passo que o peso específico máximo é

$$\gamma_{\max} = \frac{168.48 + 62.4 \times 0.471}{1 + 0.471} = \boxed{134.51 \text{ pcf}}$$

Em suma, o peso específico da areia encontra-se no intervalo aproximado  $121.8 < \gamma < 134.5$  pcf.

■ **Prob. 10**

A densidade do solo seco é

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w} = \frac{2.15}{1 + 0.12} = 1.92 \text{ Mg/m}^3$$

O índice de vazios pode ser obtido através da fórmula usual

$$\rho = \frac{G_s(1+w)}{1+e} \rho_w \rightarrow e = G_s(1+w) \frac{\rho_w}{\rho} - 1$$

$$\therefore e = 2.65 \times (1 + 0.12) \times \frac{1.0}{2.15} - 1 = \boxed{0.380}$$

ao passo que o grau de saturação é

$$S = \frac{wG_s}{e} = \frac{0.12 \times 2.65}{0.380} \approx 0.837 = \boxed{83.7\%}$$

Para obter o conteúdo de ar, escrevemos

$$A = \frac{e - wG_s}{1+e} = \frac{0.380 - 0.12 \times 2.65}{1 + 0.380} \approx 0.0449 \approx \boxed{4.5\%}$$

Finalmente, note que a densidade seca máxima que podemos obter com um teor de umidade  $w = 13.5\%$  é dada por

$$\rho_d = \frac{G_s}{1 + wG_s} \rho_w = \frac{2.65}{1 + 0.135 \times 2.65} \times 1.0 = 1.952 \text{ Mg/m}^3$$

Como esse valor é inferior a  $2.0 \text{ Mg/m}^3$ , conclui-se que, no que concerne ao solo em questão, *não* é possível obter uma amostra dotada de densidade  $2.0 \text{ Mg/m}^3$  com teor de umidade igual a  $13.5\%$ .

### ■ Prob. 11

Sabe-se que o índice de vazios pode ser escrito em função da gravidade específica ( $G_s$ ), da densidade da água ( $\rho_w$ ) e da densidade seca do solo ( $\rho_d$ ) conforme a expressão

$$e = \frac{G_s \rho_w}{\rho_d} - 1$$

O índice de vazios máximo  $e_{\max}$  corresponde à densidade seca mínima  $\rho_{d,\min}$ , ou seja,

$$e_{\max} = \frac{G_s \rho_w}{\rho_{d,\min}} - 1$$

Analogamente, sabe-se que o índice de vazios mínimo  $e_{\min}$  corresponde à densidade seca máxima  $\rho_{d,\max}$ ,

$$e_{\min} = \frac{G_s \rho_w}{\rho_{d,\max}} - 1$$

A densidade relativa  $D_r$  de um solo granular é dada pela razão

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

Substituindo  $e_{\max}$  e  $e_{\min}$  nessa definição, tem-se

$$D_r = \frac{\left( \frac{G_s \rho_w}{\rho_{d,\min}} - 1 \right) - \left( \frac{G_s \rho_w}{\rho_d} - 1 \right)}{\left( \frac{G_s \rho_w}{\rho_{d,\min}} - 1 \right) - \left( \frac{G_s \rho_w}{\rho_{d,\max}} - 1 \right)}$$

$$\therefore D_r = \frac{\frac{G_s \rho_w}{\rho_{d,\min}} - 1 - \frac{G_s \rho_w}{\rho_d} + 1}{\frac{G_s \rho_w}{\rho_{d,\min}} - 1 - \frac{G_s \rho_w}{\rho_{d,\max}} + 1}$$

$$\therefore D_r = \frac{\frac{G_s \rho_w}{\rho_{d,\min}} - \frac{G_s \rho_w}{\rho_d}}{\frac{G_s \rho_w}{\rho_{d,\min}} - \frac{G_s \rho_w}{\rho_{d,\max}}}$$

$$\therefore D_r = \frac{\cancel{G_s \rho_w} \left( \frac{1}{\rho_{d,\min}} - \frac{1}{\rho_d} \right)}{\cancel{G_s \rho_w} \left( \frac{1}{\rho_{d,\min}} - \frac{1}{\rho_{d,\max}} \right)}$$

$$\therefore D_r = \frac{\left( \frac{\rho_d - \rho_{d,\min}}{\cancel{\rho_{d,\min}} \rho_d} \right)}{\left( \frac{\rho_{d,\max} - \rho_{d,\min}}{\cancel{\rho_{d,\min}} \rho_{d,\max}} \right)}$$

$$\therefore D_r = \left( \frac{\rho_d - \rho_{d,\min}}{\rho_{d,\max} - \rho_{d,\min}} \right) \left( \frac{\rho_{d,\max}}{\rho_d} \right)$$

No presente caso, tem-se  $\rho_d = 1.72 \text{ Mg/m}^3$ ,  $\rho_{\max} = 1.81 \text{ Mg/m}^3$  e  $\rho_{\min} = 1.54 \text{ Mg/m}^3$ , portanto,

$$D_r = \left( \frac{1.72 - 1.54}{1.81 - 1.54} \right) \times \left( \frac{1.81}{1.72} \right) \approx 0.702 = \boxed{70.2\%}$$

### ■ Prob. 12

A densidade relativa é dada pela expressão geral

$$D_r = \left( \frac{\gamma_d - \gamma_{d,\min}}{\gamma_{d,\max} - \gamma_{d,\min}} \right) \left( \frac{\gamma_{d,\max}}{\gamma_d} \right) \quad \text{(I)}$$

Temos  $\gamma_{d,\min} = 92 \text{ lb/ft}^3$  e  $\gamma_{d,\max} = 108 \text{ lb/ft}^3$ . O peso específico seco do solo examinado em campo é

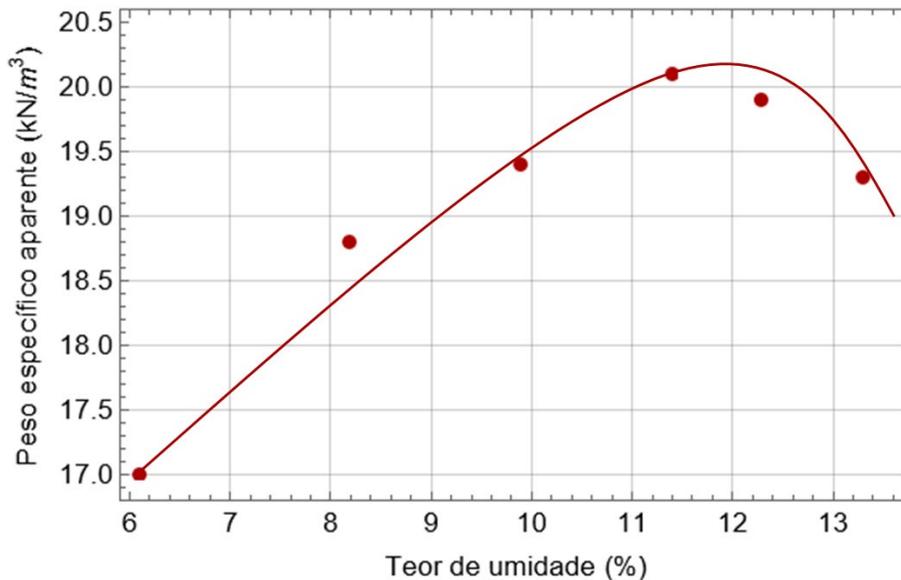
$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} = \frac{115}{1+0.08} = 106.48 \text{ lb/ft}^3$$

Substituindo em (I), vem

$$D_r = \frac{106.48 - 92}{108 - 92} \times \left( \frac{108}{106.48} \right) \approx 0.918 = \boxed{91.8\%}$$

### ■ Prob. 13

**Parte (a):** Para obter os parâmetros solicitados, deve-se primeiramente plotar os pesos específicos aparentes secos *versus* os teores de umidade fornecidos. Em seguida, traçamos uma curva ao longo dos pontos plotados; os valores ótimos de teor de umidade e peso específico aparente seco correspondem à abscissa e ordenada do ponto mais alto da curva, respectivamente. No presente caso, estes são  $w_{opt} \approx 11.7\%$  e  $(\gamma_d)_{max} \approx 20.1 \text{ kN/m}^3$ .



**Parte (b):** Para 95% de compactação, temos o peso específico aparente seco  $\gamma_d = 0.95 \times 20.1 = 19.1 \text{ kN/m}^3$ ; entrando com esse valor no ramo seco da curva de compactação da parte (a), lê-se o teor de umidade ótimo  $w = 9.4\%$ .

**Parte (c):** O grau de saturação correspondente ao peso unitário aparente seco máximo pode ser obtido com a relação

$$S = \frac{wG_s(\gamma_d)_{\max}/\gamma_w}{G_s - (\gamma_d)_{\max}/\gamma_w} = \frac{0.094 \times 2.70 \times 20.1/9.81}{2.70 - 20.1/9.81} \times 100\% \approx \boxed{80\%}$$

**Parte (d):** A curva de saturação é descrita pela expressão

$$\gamma_d = \left( \frac{G_s}{1 + wG_s/S} \right) \gamma_w$$

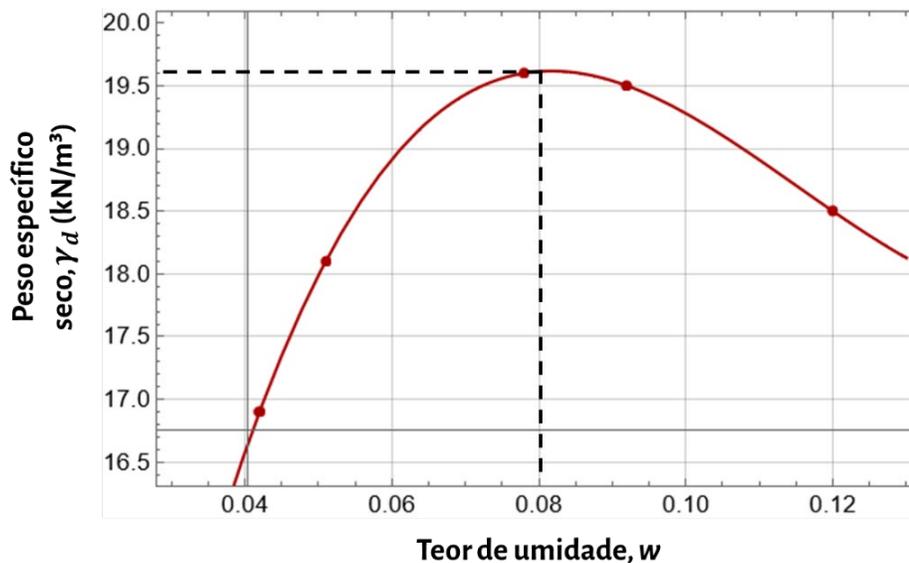
Sabendo que  $S = 100\%$  (saturação completa),  $\gamma_w \approx 9.81 \text{ kN/m}^3$  e  $G_s = 2.7$ ,

$$\gamma_d = \left( \frac{2.7}{1 + w \times 2.7/1} \right) \times 9.81 = \boxed{\frac{26.49}{1 + 2.7w}}$$

A expressão destacada pode então ser plotada para vários valores do teor de umidade  $w$ ; deixo essa última etapa como exercício para o leitor.

#### ■ Prob. 14

**Parte (a):** Como em qualquer problema de compactação, plotamos os pesos específicos secos *versus* os valores de teor de umidade. Utilizando a ferramenta *Get Coordinates* do Wolfram Mathematica, verifica-se que os valores ótimos são  $\gamma_d \approx 19.65 \text{ kN/m}^3$  e  $w \approx 8.2\%$ .



**Parte (b):** O peso de sólidos contido em  $1 \text{ m}^3$  de solo compactado é dado por

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \rightarrow W_s = \gamma_d V$$

$$\therefore W_s = 19.65 \times 1 = 19.65 \text{ kN}$$

O índice de vazios associado ao solo natural oriundo do depósito pode ser obtido a partir da porosidade  $n$ ,

$$e = \frac{n}{1-n} = \frac{0.65}{1-0.65} = 1.86$$

O peso específico seco do solo natural, por sua vez, é

$$\gamma_d = \frac{G_s}{1+e} \gamma_w = \frac{2.7}{1+1.86} \times 9.81 = 9.26 \text{ kN/m}^3$$

Segue que o volume de solo natural necessário para obter 19.65 kN de sólidos é tal que

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \rightarrow V = \frac{W_s}{\gamma_d}$$

$$\therefore V = \frac{19.65}{9.26} = \boxed{2.12 \text{ m}^3}$$

**Parte (c):** O solo processado no aterro possui teor de umidade  $w = 8.2\%$ . A massa de água contida em  $1 \text{ m}^3$  do referido solo é

$$w = \frac{W_w}{W_s} \rightarrow W_w = w \times W_s$$

$$\therefore W_w = 0.082 \times 19.65 = 1.611 \text{ kN}$$

Já o solo natural do depósito, por seu lado, possui teor de umidade  $w = 5.2\%$ . Conforme estabelecido na parte (b), precisamos de  $2.12 \text{ m}^3$  de solo natural para obter o peso de sólidos contido em  $1 \text{ m}^3$  de solo processado. O peso em questão é 19.65 kN. Assim sendo, a massa de água contida em  $2.12 \text{ m}^3$  do solo natural é

$$W_w = 0.052 \times 19.65 = 1.022 \text{ kN}$$

Portanto, para obter  $1 \text{ m}^3$  de solo compactado, precisamos de  $1.611 - 1.022 = 0.589$  kN de água, ou, em termos de massa, cerca de  $589/9.81 = 60.0$  kg.

**Parte (d):** A resposta não é  $100,000/22.5$  porque os solos natural e compactado não possuem o mesmo teor de umidade; como concluímos na parte (b), são necessários  $2.12 \text{ m}^3$  de solo natural para obter a mesma quantidade de sólidos do que em  $1 \text{ m}^3$  de

solo preparado para uso na construção do aterro. Por conseguinte, são necessários 212,000 m<sup>3</sup> de solo natural para edificar os 100,000 m<sup>3</sup> de aterro. O número de *truckloads* correspondente é 212,000/22.5 ≈ 9422.

**Parte (e):** O custo das 9422 cargas e descargas é \$7 × 9422 = \$65,950. Sabendo que cada trajeto envolve 10 km, os caminhões deverão percorrer uma distância total de 9422 × 10 = 94,220 km no decurso da obra. Ademais, verifica-se que os caminhões percorrem 4 km para cada litro de diesel consumido; isso significa que o volume de combustível consumido ao longo da obra é 94,220/4 = 23,560 L. Os gastos correspondentes são de 23,560 × \$5 = \$117,800. O custo de compactação dos 212,000 m<sup>3</sup> de solo natural extraídos do depósito geológico é 212,000 × \$2 = \$424,000. Por fim, o custo de execução do aterro na aplicação hipotética em foco é (utilizando o padrão de pontuação americano, como temos feito ao longo de todos os problemas)

$$\text{Custo} = \$65,950 + \$117,800 + \$424,000 = \boxed{\$607,800}$$

### ■ Prob. 15

**Partes (a) e (b):** Precisa-se de um peso de sólidos  $W_s$  dado por  $7500 \text{ m}^3 \times \gamma_d$ , onde  $\gamma_d$  é o peso específico seco do solo utilizado. Utilizando  $\gamma_d = G_s \gamma_w / (1 + e)$ , tem-se

$$W_s = 7500 \gamma_d = 7500 \times \frac{G_s \times 9.81}{1 + 0.7} = 43,279 G_s \text{ [kN]}$$

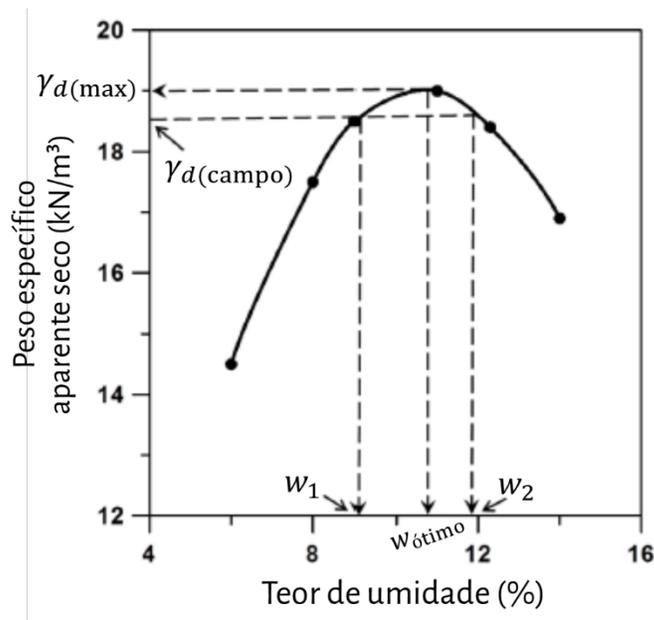
Como esperado, o peso de sólidos necessário é diretamente proporcional à gravidade específica  $G_s$ . Os cálculos pertinentes para as quatro jazidas de empréstimo estão listados a seguir. A coluna (1) identifica as jazidas. As colunas (2), (3) e (7) reproduzem os dados oriundos da tabela fornecida no enunciado. A coluna (4) contém os pesos de sólidos calculados com a fórmula acima. A coluna (5) contém os pesos unitários secos  $\gamma_d = G_s \gamma_w / (1 + e)$ . A coluna (6) contém o volume a ser escavado em cada caso, o qual é dado pela razão entre  $W_s$  (coluna (4)) e  $\gamma_d$  (coluna (5)). Finalmente, a coluna (8) contém o custo total, que é dado pelo produto entre (6) e (7). Examinando a tabela, conclui-se que o menor custo total é obtido com a jazida II.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Jazida	$e$	$G_s$	$W_s$ (kN)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Volume a ser excavado (m <sup>3</sup> ) (= $W_s/\gamma_d$ )	Custo/m <sup>3</sup> (\$)	Custo total (\$)
I	0.85	2.66	115,122	$\gamma_d = \frac{2.66 \times 9.81}{1 + 0.85} = 14.11 \text{ kN/m}^3$	8159	11	89,749
II	0.92	2.69	116,421	$\gamma_d = \frac{2.69 \times 9.81}{1 + 0.92} = 13.74 \text{ kN/m}^3$	8473	8	67,784

III	1.21	2.71	117,286	$\gamma_d = \frac{2.71 \times 9.81}{1 + 1.21} = 12.03 \text{ kN/m}^3$	9749	9	87,741
IV	0.89	2.73	118,152	$\gamma_d = \frac{2.73 \times 9.81}{1 + 0.89} = 14.17 \text{ kN/m}^3$	8338	10	83,380

■ Prob. 16

**Parte (a):** Para obter o peso específico seco máximo, buscamos a interseção entre o ponto mais alto da curva de compactação e o eixo vertical; o valor obtido é  $\gamma_{d(\max)} \approx 19.0 \text{ kN/m}^3$ . Analogamente, obtém-se o teor de umidade ótimo na interseção entre o ponto mais alto da curva e o eixo horizontal; o valor obtido é  $w_{\text{ótimo}} \approx 10.8\%$ .



**Parte (b):** O peso específico úmido pode ser facilmente obtido a partir das informações colhidas no item (a),

$$\gamma = \gamma_d (1 + w) = 19 \times (1 + 0.108) = \boxed{21.05 \text{ kN/m}^3}$$

**Parte (c):** O índice de vazios pode ser isolado na expressão usualmente empregada para calcular o peso específico seco,

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} \rightarrow e = \frac{\gamma_w G_s}{\gamma_d} - 1$$

$$\therefore e = \frac{9.81 \times 2.69}{19.0} - 1 = \boxed{0.389}$$

O grau de saturação, por sua vez, é dado por

$$S = \frac{wG_s}{e} = \frac{0.108 \times 2.69}{0.389} \approx 0.747 = \boxed{74.7\%}$$

**Parte (d):** A compactação relativa é dada pela razão

$$\overline{CR} = \frac{\gamma_{d(\text{campo})}}{\gamma_{d(\text{max})}} \times 100\% = \frac{18.5}{19.0} \times 100\% \approx \boxed{97.4\%}$$

**Parte (e):** Retornando à curva da parte (a), verifica-se que a compactação relativa do item (d) será garantida se o teor de umidade do solo estiver entre  $w_1 \approx 9\%$  e  $w_2 \approx 11\%$ .

**Parte (f):** O índice de vazios correspondente a um peso específico seco  $\gamma_{d(\text{campo})} = 18.5 \text{ kN/m}^3$  é

$$e_{(\text{campo})} = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_{d(\text{campo})}} - 1 = \frac{2.69 \times 9.81}{18.5} - 1 = 0.426$$

Substituindo na fórmula da densidade relativa, vem

$$D_r = \frac{e_{\text{max}} - e_{(\text{campo})}}{e_{\text{max}} - e_{\text{min}}} \times 100\% = \frac{0.82 - 0.426}{0.82 - 0.31} \times 100\% = \boxed{77.3\%}$$

### ■ Prob. 17

Podemos determinar o peso específico seco *in situ* a partir da definição de grau de compactação,

$$R = 0.94 = \frac{\gamma_{d(\text{campo})}}{\gamma_{d(\text{max})}} \rightarrow \gamma_{d(\text{campo})} = 0.94 \times \gamma_{d(\text{max})}$$

$$\therefore \gamma_{d(\text{campo})} = 0.94 \times 17 = \boxed{15.98 \text{ kN/m}^3}$$

Em seguida, determinamos a compactação relativa  $D_r$ ,

$$D_r = \left( \frac{\gamma_{d(\text{campo})} - \gamma_{d(\text{min})}}{\gamma_{d(\text{max})} - \gamma_{d(\text{min})}} \right) \left( \frac{\gamma_{d(\text{max})}}{\gamma_{d(\text{campo})}} \right) \times 100\%$$

$$\therefore D_r = \left( \frac{15.98 - 13.8}{17 - 13.8} \right) \times \left( \frac{17}{15.98} \right) \times 100\% = \boxed{72.5\%}$$

■ **Prob. 18**

Basta inserir os dados pertinentes na equação do permeâmetro de carga constante,

$$k = \frac{QL}{Aht} = \frac{(650 \text{ cm}^3) \times (320 \text{ mm})}{(200 \text{ cm}^2) \times (510 \text{ mm}) \times (120 \text{ sec})} = \boxed{0.017 \text{ cm/sec}}$$

■ **Prob. 19**

Substituindo os valores pertinentes na equação do permeâmetro de carga constante e resolvendo para a carga piezométrica  $h$ , vem

$$k = \frac{QL}{Aht} \rightarrow h = \frac{QL}{kAt}$$
$$\therefore h = \frac{130 \times 20}{0.021 \times 78.5 \times 60} = \boxed{26.3 \text{ cm}}$$

■ **Prob. 20**

**Parte (a):** Basta inserir os dados pertinentes na equação do permeâmetro de carga variável; note que estamos atribuindo os subscritos “1” e “2” aos tempos  $t = 0$  e  $t = 10$  min, respectivamente:

$$k = 2.303 \left( \frac{aL}{At} \right) \log_{10} \left( \frac{h_1}{h_2} \right) = 2.303 \times \left[ \frac{(0.3 \text{ in.}^2) \times (20 \text{ in.})}{(5 \text{ in.}^2) \times (10 \text{ min})} \right] \times \log_{10} \left[ \frac{(34 \text{ in.})}{(10 \text{ in.})} \right]$$
$$\therefore k = \boxed{0.147 \text{ in./min}}$$

**Parte (b):** Utilizando o subscrito “3” para denotar parâmetros no tempo  $t = 5$  min., isolamos a carga  $h_3$  na equação do permeâmetro de carga variável e substituímos os valores disponíveis:

$$k = 2.303 \left( \frac{aL}{At} \right) \log_{10} \left( \frac{h_1}{h_3} \right)$$
$$\therefore \log_{10} \left( \frac{h_1}{h_3} \right) = \frac{k}{2.303(aL/At)}$$
$$\therefore \log_{10} \left( \frac{h_3}{h_1} \right) = \frac{-k}{2.303(aL/At)}$$

$$\begin{aligned} \therefore \frac{h_3}{h_1} &= 10^{\frac{-k}{2.303(aL/At)}} \\ \therefore h_3 &= 10^{\frac{-k}{2.303(aL/At)}} \times h_1 \\ \therefore h_3 &= -10^{\frac{0.147}{2.303 \times (0.3 \times 20 / 5 \times 5)}} \times 34 = \boxed{18.43 \text{ in.}} \end{aligned}$$

### ■ Prob. 21

Primeiramente, calculamos o gradiente hidráulico  $i$  entre a superfície livre do dique e a superfície livre da vala,

$$i = \frac{165 - 150}{200} = 0.075 \text{ m/m}$$

Em seguida, convertamos a condutividade hidráulica da areia para unidades mais convenientes,

$$k = 3 \frac{\text{m}}{\text{dia}} \times \frac{1 \text{ dia}}{24 \text{ h}} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 2.08 \times 10^{-3} \text{ m/min}$$

Prosseguindo, calculamos a área de seção da camada de areia atravessada pela água,

$$A = 1.5 \times 800 = 1200 \text{ m}^2$$

Resta apenas determinar a vazão depositada na vala,

$$q = kiA = (2.08 \times 10^{-3}) \times 0.075 \times 1200 = \boxed{0.187 \text{ m}^3/\text{min}}$$

### ■ Prob. 22

A condutividade horizontal equivalente é dada pela expressão

$$k_{H(\text{eq})} = \frac{1}{H} \times (k_1 H_1 + k_2 H_2 + (\dots) + k_n H_n)$$

No presente caso, temos 3 camadas e o valor de  $k_{H(\text{eq})}$  torna-se

$$\begin{aligned} k_{H(\text{eq})} &= \frac{1}{H} \times (k_1 H_1 + k_2 H_2 + k_3 H_3) \\ \therefore k_{H(\text{eq})} &= \frac{1}{6.8} \times \left[ (2.5 \times 10^{-3}) \times 1 + (1.5 \times 10^{-4}) \times 1.8 + 0.035 \times 4 \right] = 0.021 \text{ cm/sec} \end{aligned}$$

A condutividade vertical equivalente é dada pela expressão

$$k_{V(\text{eq})} = \frac{H}{\frac{H_1}{k_1} + \frac{H_2}{k_2} + (\dots) + \frac{H_n}{k_n}}$$

Na situação em análise,  $k_{V(\text{eq})}$  é tal que

$$k_{V(\text{eq})} = \frac{H}{\frac{H_1}{k_1} + \frac{H_2}{k_2} + \frac{H_3}{k_3}}$$

$$\therefore k_{V(\text{eq})} = \frac{6.8}{\frac{1}{2.5 \times 10^{-3}} + \frac{1.8}{1.5 \times 10^{-4}} + \frac{4}{0.035}} = 5.43 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$$

Por fim, calculamos a razão de condutividades

$$\frac{k_{H(\text{eq})}}{k_{V(\text{eq})}} = \frac{0.021}{5.43 \times 10^{-4}} = \boxed{38.7}$$

No caso do solo estratificado em foco, a condutividade hidráulica equivalente horizontal é cerca de 39 vezes maior que a condutividade hidráulica equivalente vertical.

### ■ Prob. 23

A equação em foco é

$$k = C_4 \left( \frac{e^n}{1+e} \right)$$

Não temos a constante  $C_4$  e o expoente  $n$ , mas podemos estimá-los com os dois pontos fornecidos no enunciado. Sabendo que  $k_1 = 0.3 \times 10^{-7}$  cm/s,  $e_1 = 1.1$ ,  $k_2 = 0.12 \times 10^{-7}$  cm/s e  $e_2 = 0.9$ , escrevemos a razão

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{\cancel{C_4} \left( \frac{e_1^n}{1+e_1} \right)}{\cancel{C_4} \left( \frac{e_2^n}{1+e_2} \right)} = \frac{\left( \frac{e_1^n}{1+e_1} \right)}{\left( \frac{e_2^n}{1+e_2} \right)}$$

$$\therefore \frac{k_1}{k_2} = \frac{\left( \frac{e_1^n}{1+e_1} \right)}{\left( \frac{e_2^n}{1+e_2} \right)}$$

$$\begin{aligned} \therefore \frac{0.3}{0.12} &= \frac{\left(\frac{1.1^n}{1+1.1}\right)}{\left(\frac{0.9^n}{1+0.9}\right)} \\ \therefore \frac{0.3}{0.12} &= \left(\frac{1.1^n}{2.1}\right) \times \left(\frac{1.9}{0.9^n}\right) \\ \therefore 2.5 &= 0.905 \times 1.22^n \\ \therefore 2.76 &= 1.22^n \\ \therefore \ln(2.76) &= n \times \ln(1.22) \\ \therefore n &= \frac{\ln(2.76)}{\ln(1.22)} = 5.105 \end{aligned}$$

Assim sendo, o expoente  $n$  é aproximadamente igual a 5.105. Em seguida, utilizamos qualquer um dos dois pontos para estimar  $C_4$ ,

$$\begin{aligned} k = C_4 \left( \frac{e^n}{1+e} \right) &\rightarrow 0.3 \times 10^{-7} = C_4 \times \left( \frac{1.1^{5.105}}{1+1.1} \right) \\ \therefore 0.3 \times 10^{-7} &= C_4 \times 0.775 \\ \therefore C_4 &= 3.87 \times 10^{-8} \end{aligned}$$

Por fim, a condutividade hidráulica correspondente a  $e = 0.75$  é

$$k = C_4 \left( \frac{e^n}{1+e} \right) = (3.87 \times 10^{-8}) \times \left( \frac{0.75^{5.105}}{1+0.75} \right) = \boxed{5.09 \times 10^{-9} \text{ cm/s}}$$

#### ■ Prob. 24

A diferença de elevação entre os níveis d'água é  $h = 5.0$  m. Temos a condutividade hidráulica  $k = 5.0 \times 10^{-5}$  m/s. Recorrendo à figura (b), contamos 5 canais de fluxo e 11 faixas de perda. Unindo essas informações, calcula-se a taxa de percolação como

$$\begin{aligned} q = kH \frac{N_f}{N_d} &= (5.0 \times 10^{-5}) \times 5.0 \times \frac{5}{11} = 1.14 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \\ \therefore q &= 1.14 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 86,400 \frac{\text{s}}{\text{dia}} = \boxed{9.85 \text{ m}^3/\text{dia}} \end{aligned}$$

■ **Prob. 25**

Primeiramente, computamos a condutividade hidráulica equivalente do solo,

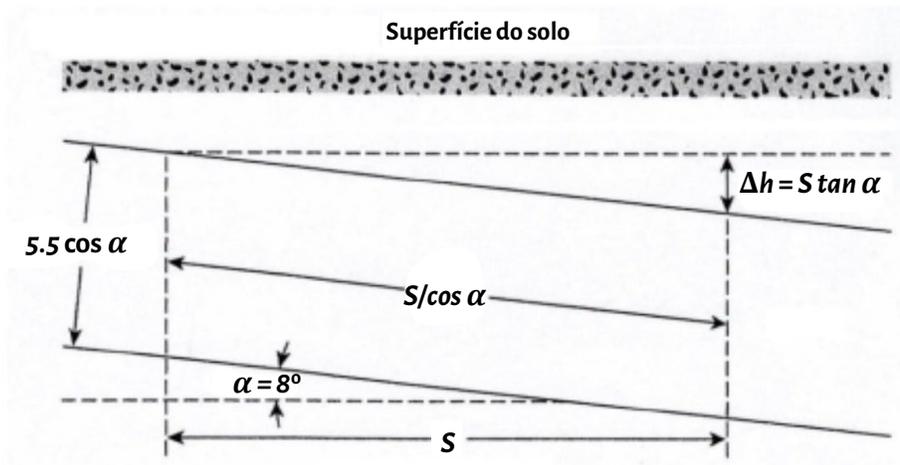
$$k_{eq} = \sqrt{k_H k_V} = \sqrt{0.05 \times 0.01} = 0.0224 \text{ mm/sec}$$

Em seguida, conhecendo a altura  $H = 30 \text{ m}$  do nível d'água acima do filtro, o número de canais de fluxo  $N_f = 4$  e o número de faixas de perda  $N_d = 16$ , a vazão por percolação torna-se

$$q = k_{eq} H \frac{N_f}{N_d} = (0.0224 \times 10^{-3}) \times 40 \times \frac{4}{16} = 2.24 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = \boxed{224 \text{ mL/s}}$$

■ **Prob. 26**

O solo inclinado em questão é ilustrado a seguir.



Recorrendo à ilustração, vê-se que o gradiente hidráulico  $i$  pode ser estimado como

$$i = \frac{\text{Perda de carga}}{\text{Distância}} = \frac{\cancel{S} \tan \alpha}{\cancel{S} / \cos \alpha} = \sin \alpha$$

Ademais, temos  $k = 6 \times 10^{-3} \text{ cm/sec} = 6 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$ . A taxa de percolação é então

$$q = kiA = (6 \times 10^{-5}) \times \sin 8^\circ \times (5.5 \cos 8^\circ \times 1) = 4.55 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec/m}$$

$$\therefore q = (4.55 \times 10^{-5}) \times 3600 = \boxed{0.164 \text{ m}^3/\text{hr/m}}$$

■ **Prob. 27**

**Parte (a):** A rede de fluxo delineada abaixo da barragem inclui 4 linhas de fluxo e 14 faixas de perda. Ademais, temos  $\Delta H = 6 \text{ m} = 600 \text{ cm}$ . Portanto, a taxa de percolação é

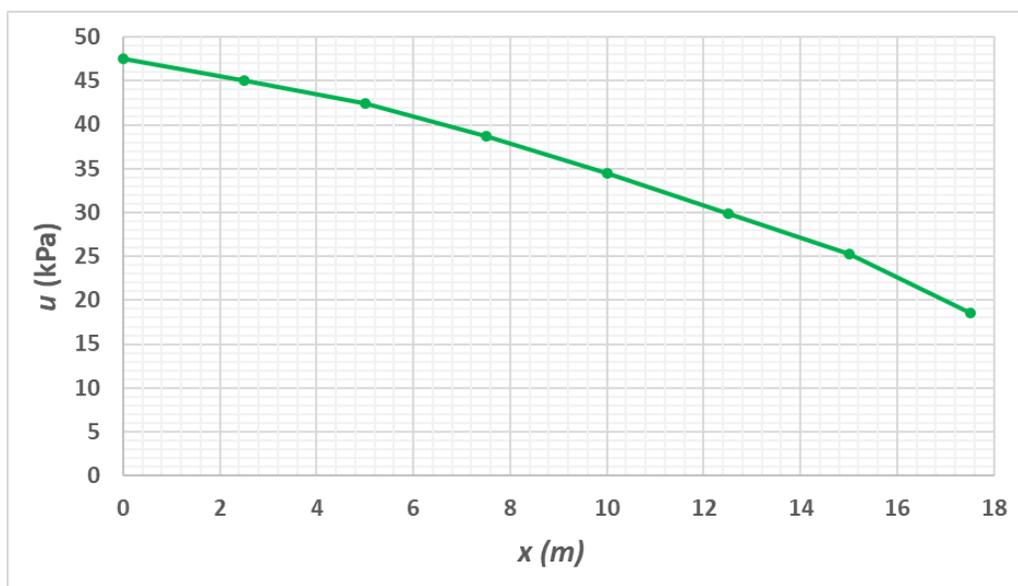
$$q = k\Delta H \frac{N_f}{N_d} = (4 \times 10^{-4}) \times 600 \times \frac{4}{14} = \boxed{0.069 \text{ cm}^2/\text{s}}$$

**Parte (b):** Para determinar a distribuição de subpressões, dividimos a base da barragem em 7 partes de mesmo comprimento e computamos a poropressão em cada segmento individualmente. Os cálculos estão sumarizados a seguir.

$N_d$	14
$N_f$	4
$\Delta H \text{ (m)}$	6
$\Delta h \text{ (m)}$	0.429

$x \text{ (m)}$	Abaixo da base da barragem (m)							
	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5
$N_d$	5.6	6.2	6.8	7.7	8.7	9.8	10.9	12.5
$N_d \Delta h \text{ (m)}$	2.402	2.660	2.917	3.303	3.732	4.204	4.676	5.363
$h_z \text{ (m)}$	-1.25	-1.25	-1.25	-1.25	-1.25	-1.25	-1.25	-1.25
$h_p \text{ (m)} = \Delta H - N_d \Delta h - h_z$	4.848	4.590	4.333	3.947	3.518	3.046	2.574	1.888
$u \text{ (kPa)} = h_p \gamma_w$	47.555	45.030	42.505	38.717	34.509	29.879	25.250	18.516

Em seguida, plotamos a poropressão (linha destacada em vermelho) *versus* a posição  $x$  (linha destacada em vermelho).



**Parte (c):** O gráfico construído na parte anterior indica que a distribuição de pressões é aproximadamente linear; portanto, a resultante das subpressões deve estar à distância de  $17.5/3 \approx 5.83$  m das estacas-pranchas. Recorrendo às poropressões listadas em vermelho na tabela da parte (b), podemos integrar numericamente e obter a carga de soerguimento  $P_w$ ,

$$P_w = \frac{2.5}{3} \times [47.56 + 18.52 + 2 \times (42.51 + 34.51 + 25.3) + 4 \times (45.03 + 38.72 + 29.88)]$$

$$\therefore \boxed{P_w = 604.4 \text{ kN}}$$

**Parte (d):** Para assegurar um fator de segurança igual a 1.2 contra subpressões, a barragem deve ter peso igual a  $1.2 \times 604.4 \approx 725$  kN.

**Parte (e):** O gradiente hidráulico máximo  $i_{\max}$  registrado no solo subjacente à barragem é

$$i_{\max} = \frac{\Delta h}{L_{\min}} = \frac{0.429}{0.5} = 0.858$$

Utilizando  $G_s = 2.7$  como um valor típico de gravidade específica, o gradiente hidráulico crítico  $i_{\text{cr}}$  resulta em

$$i_{\text{cr}} = \frac{G_s - 1}{1 + e} = \frac{2.7 - 1}{1 + 0.6} = 1.063$$

Verifica-se, pois, que  $i_{\max} < i_{\text{cr}}$ ; logo, a barragem **não** é suscetível a erosão tubular.

### ■ Referências (★ → Livro altamente recomendado)

1. Aysen, A. (2003). *Problem Solving in Soil Mechanics*. A.A. Balkema Publishers.
2. Budhu, M. (2008). *Soil Mechanics and Foundations*. 3ª edição. John Wiley and Sons. ★
3. Das, B.M. e Sobhan, K. (2018). *Principles of Geotechnical Engineering*. 9ª edição. Cengage Learning. ★
4. Holtz, R.D., Kovacs, W.D. e Sheahan, T.C. (2023). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. 3ª edição. Pearson.
5. Murthy, V.N.S. (2002). *Geotechnical Engineering*. CRC Press.
6. Venkatramaiah, C. (2006). *Geotechnical Engineering*. 3ª edição. New Age International Publishers.

## ■ Sobre mim



Sou aluno de graduação em Engenharia Civil na Universidade de Brasília (UnB). Meus principais interesses são hidrologia, engenharia hidráulica, fluidodinâmica, engenharia ambiental, geotecnia e métodos geofísicos. Tenho proficiência certificada em sete idiomas e busco me posicionar na comunidade brasileira de engenheiros e especialistas em infraestrutura.

**WhatsApp:** (61) 981247059

**Email:** [lucas\\_0150@hotmail.com](mailto:lucas_0150@hotmail.com)

