Hoek

Lista de Exercícios Resolvidos 3

Hidrologia de Águas Subterrâneas

Lucas Monteiro Nogueira

Problemas

■ Problema 1 **(Rendimento Específico)**

Um aquífero confinado de área igual a 8 km^2 apresenta queda de 0.9 m após ser bombeado a uma taxa de 6.5 m^3/dia ininterruptamente ao longo de 7 anos. Qual é o rendimento específico do aquífero?

■ Problema 2 **(Retenção Específica)**

A elevação do nível d'água de um aquífero sofreu um rebaixamento de 2.1 m devido à remoção de 90 milhões de metros cúbicos de água. Sabendo que o aquífero estende-se por 180 km^2 e tem porosidade igual a 0.44, encontre a retenção específica.

■ Problema 3 **(Várias Características de Aquíferos)**

Uma amostra de solo possui volume igual a 180 cm^3. O volume de vazios na amostra é de 67 cm^3. Desse volume de vazios, apenas 45 cm^3 estão disponíveis para a percolação de água. Sabemos ainda que, no aquífero onde a amostra foi colhida, bombearam-se 6 m^3/dia durante 5 anos, ao fim dos quais o aquífero apresentou um rebaixamento de 1.0 m em seu nível d'água. Julgue os itens a seguir.

1.( ) A porosidade do solo em questão é **maior** que 40%.

2.( ) O rendimento específico do solo é **menor** que 30%.

3.( ) A retenção específica do solo é **maior** que 10%.

4.( ) A área do aquífero é **menor** que 40,000 m^2.

■ Problema 4 **(Compressibilidade e Coeficiente de Armazenamento)**

A porosidade de um aquífero não-confinado em solo não-saturado é 0.44. O aquífero tem 10 m de espessura e o módulo de elasticidade do solo argiloso que ocorre no local é 8.5×10^7 N/m^2. Lembrando que o módulo de elasticidade da água a temperatura ambiente é $\approx 2.1\times10^9$ N/m^2, use a fórmula de Jacob para estimar o coeficiente de armazenamento do aquífero.

■ Problema 5 **(Lei de Darcy I)**

Um aquífero tem condutividade hidráulica igual a 10 m/dia. O lençol freático tem declividade igual a 0.002 e o material que compõe o aquífero possui porosidade igual a 0.155. Que distância percorrerá a água do aquífero ao longo de um ano inteiro?

Problema 6 **(Lei de Darcy II)**

Um aquífero confinado tem 40 m de espessura e 8 km de extensão. Dois poços de observação, 1 e 2, são instalados à distância de 1.5 km um do outro. A carga d'água é de 100 m no poço 1 e 94 m no poço 2. A condutividade hidráulica é igual a 80 cm/dia.

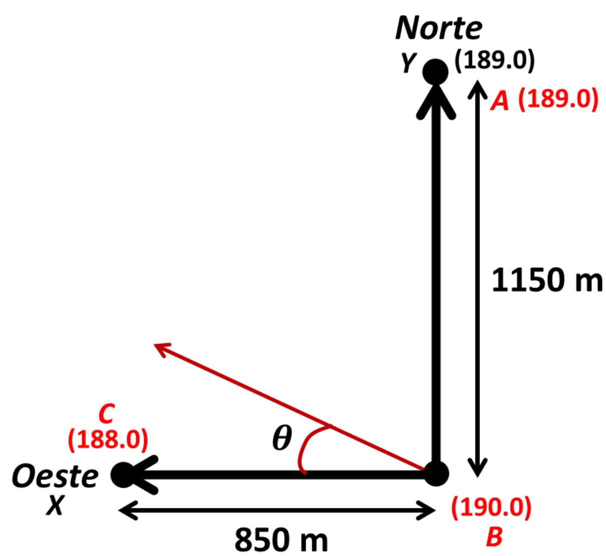
(a) Qual é o volume de água que escoa diariamente no aquífero?

(b) Qual é a elevação da superfície potenciométrica em um ponto localizado a 500 m do poço 1 e 1000 m do poço 2?

Problema 7 **(Lei de Darcy III)**

Três poços *A*, *B* e *C* drenam o mesmo aquífero horizontal. Sejam as distâncias *AB* = 1150 m e *BC* = 850 m. O poço *B* está exatamente ao sul do poço *A* e o poço *C* está a oeste do poço *B*. A tabela a seguir fornece a elevação de cada poço acima do *datum* e o nível do lençol freático nas regiões adjacentes a cada poço. Sabendo que a seta vermelha indica a direção do escoamento de águas subterrâneas, determine o ângulo θ.

Poço	Elevação acima do *datum* (m)	Profundidade do lençol freático
A	200.00	11.00
B	197.00	7.00
C	202.00	14.00



Problema 8 **(Equação de Dupuit I)**

Um aquífero não-confinado possui condutividade hidráulica de 8.7×10^{-2} cm/s. O aquífero é drenado por dois poços de observação que distam 180 m um do outro. A elevação da água em um dos poços é de 9.0 m relativamente ao lençol d'água, ao passo que a elevação d'água no outro poço é de 8.0 m.

(a) Qual é a vazão diária (m^3/dia) de uma faixa de 30 m de espessura extraída do aquífero em análise?

(b) Qual é a elevação do nível d'água em um ponto equidistante dos dois poços?

Problema 9 **(Equação de Dupuit II)**

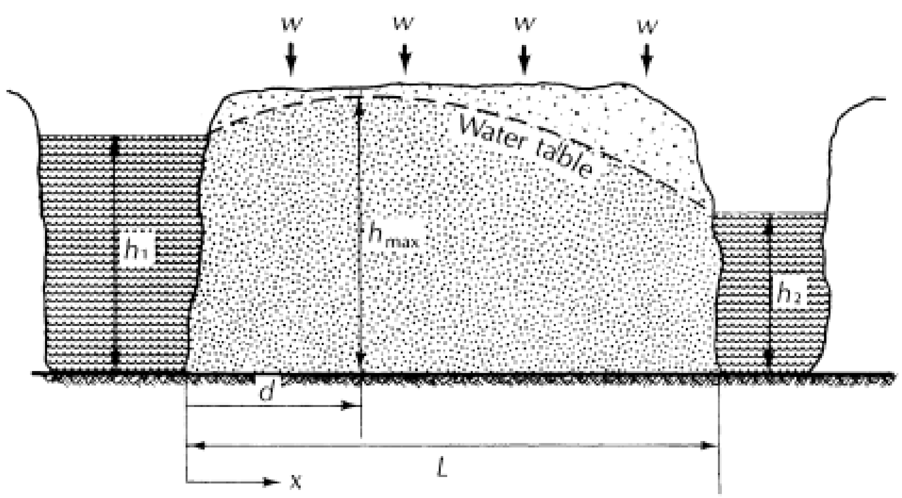
Considere a figura a seguir. A condutividade do aquífero é 14.5 m/dia, o valor da profundidade h_1 é 17.6 m e o valor de h_2 é 15.3 m. A distância L entre h_1 e h_2 é de 525 m. Há uma taxa média de recarga w de 0.007 m/dia.

(a) Qual é a vazão média por unidade de espessura em x = 0?

(b) Qual é a vazão média por unidade de espessure em x = 525 m?

(c) Verifique se há uma divisa de lençol freático. Em caso positivo, qual é a posição da divisa ao longo do eixo x?

(d) Qual é a altura máxima h_{max} do lençol freático?



Problema 10 **(Equação de Thiem I – Aquíferos Confinados)**

Um poço que bombeia água a uma taxa de 4500 m^3/dia acaba de atingir condições de equilíbrio; portanto, não haverá mais qualquer mudança no rebaixamento do sistema ao longo do tempo. O poço drena um aquífero confinado de 6 m de espessura. Um poço de observação localizado a 50 m do poço principal tem carga hidráulica de 78.5 m acima do nível do mar; outro poço localizado a 250 m do poço principal registra carga de 80.7 m. Use a equação de Thiem para estimar a transmissividade do aquífero.

■ Problema 11 **(Equação de Thiem II – Aquíferos Não-Confinados)**

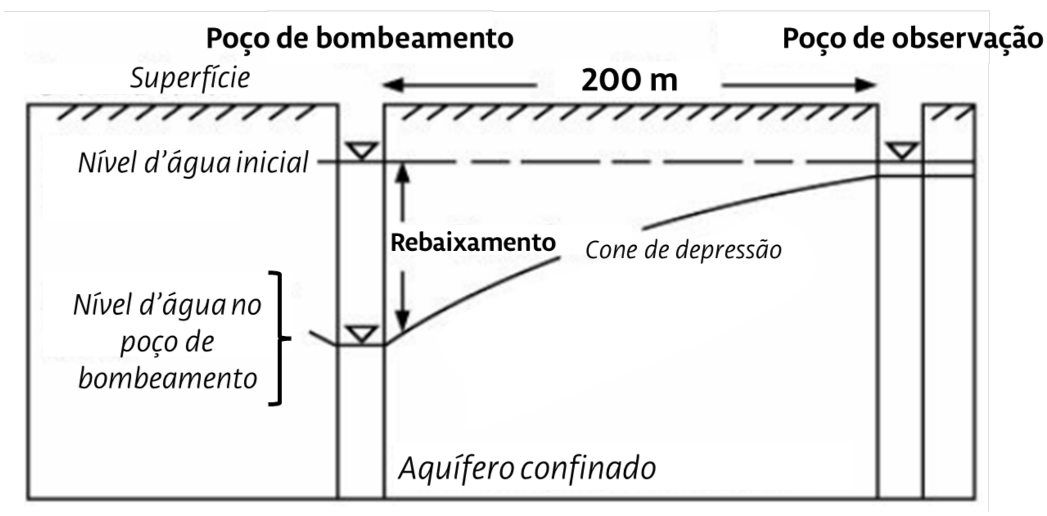
Um poço que bombeia água a vazão constante de 80 m^3/dia acaba de atingir condições de equilíbrio; portanto, não haverá mais qualquer mudança no rebaixamento com relação ao tempo. O poço drena um aquífero não-confinado que é constituído de areia grossa sobrejacente a uma base rochosa; a região encontra-se 101 m acima do nível do mar. Um poço de observação a 40 m de distância do poço principal tem carga d'água igual a 103 m acima do nível do mar. outro poço de observação a 100 m de distância registra uma carga de 103.5 m. Qual é a condutividade hidráulica do aquífero?

■ Problema 12 **(Equação de Thiem III)**

Três poços situados ao longo de uma linha reta têm espaçamento igual a 180 m. Os poços penetram o aquífero local inteiramente e a transmissividade do aquífero é 2500 m^2/dia. Os poços têm 32 cm de diâmetro e raio de influência igual a 1000 m. O aquífero tem espessura igual a 60 m. Qual deve ser a vazão permanente de bombeamento (a mesma para os três poços) a fim que o rebaixamento em cada poço não exceda 2.5 m?

■ Problema 13 **(Função Poço de Theis I)**

A transmissividade e o coeficiente de armazenamento de um aquífero confinado são iguais a 1850 m^2/dia e 3.2×10^{-4}, respectivamente. Um poço produtivo que bombeia 2000 m^3 diariamente opera nesse aquífero ao longo de um ano inteiro. Sabendo que a distância entre esse poço produtivo e um poço de observação vizinho é de 200 m, estime o rebaixamento obtido ao fim de 300 dias.



Problema 14 **(Função Poço de Theis II)**

Um poço produtivo bombeia água de um aquífero confinado com vazão constante e igual a 64 L/s. Se a transmissividade e o coeficiente de armazenamento do aquífero são 1240 m^2/dia e 4×10^{-4}, respectivamente, forneça uma estimativa dos rebaixamentos observados a 200 m do poço após 8 horas, 30 dias e 6 meses de bombeamento contínuo.

Problema 15 **(Funções de Theis e Hantush-Jacob)**

Uma comunidade está recebendo um novo poço em um aquífero regionalmente confinado com transmissividade 495 m^2/dia e coeficiente de armazenamento igual a 7×10^{-4}. A taxa de bombeamento planejada é de 200 m^3/hora. Há vários poços nas cercanias da região de interesse, e os gestores locais querem saber se o novo poço interferirá com as instalações já existentes.

(a) Determine o abaixamento teórico causado pelo novo poço após 30 dias de bombeamento contínuo para as distências 15, 45, 75, 150, 300, 900, 1800 e 3000 m.

(b) Suponha agora que o aquífero descrito acima não está completamente confinado, mas situado sob uma camada confinante permeável de 2.5 m de espessura com condutividade hidráulica vertical igual a 0.01 m/dia. A taxa de bombeamento continua sendo de 200 m^3/hora ao longo de 30 dias. Nesse caso, quais serão os valores de rebaixamento esperados nas distâncias radiais mencionadas em (a)?

Problema 16 **(Águas Subterrâneas e Abastecimento)**

Em um território de 6 km^2 de extensão, a precipitação anual, a flutuação do nível d'água e o rendimento específico são respectivamente iguais a 800 mm, 3.6 m/ano e 4%. A área foi colonizada no decurso do século XX e atualmente abriga cerca de 400 pessoas por km^2. A taxa de infiltração de água no solo é de 10% do volume precipitado e o consumo d'água *per capita* por dia é de 150 litros. Responda:

(a) Qual é o volume de água necessário para suprir a população local por um ano inteiro?

(b) Qual é o volume de água disponibilizado por flutuações anuais no nível do lençol freático?

(c) Qual é o volume anual de água que pode ser reabastecido por águas pluviais?

(d) Encontre a razão entre a oferta de água disponível (itens (b) e (c)) e o volume necessário para abastecimento da população local (item (a)).

Informações Adicionais

Tabela 1. *Tabela de valores da função poço W(u) para diferentes valores do argumento u.*

u	W(u)	u	W(u)	u	W(u)	u	W(u)	u	W(u)
1.E-14	31.66	1.E-11	24.75	1.E-08	17.84	1.E-05	10.94	1.E-02	4.04
2.E-14	30.97	2.E-11	24.06	2.E-08	17.15	2.E-05	10.24	2.E-02	3.35
3.E-14	30.56	3.E-11	23.65	3.E-08	16.74	3.E-05	9.84	3.E-02	2.96
4.E-14	30.27	4.E-11	23.36	4.E-08	16.46	4.E-05	9.55	4.E-02	2.68
5.E-14	30.05	5.E-11	23.14	5.E-08	16.23	5.E-05	9.33	5.E-02	2.47
6.E-14	29.87	6.E-11	22.96	6.E-08	16.05	6.E-05	9.14	6.E-02	2.30
7.E-14	29.71	7.E-11	22.81	7.E-08	15.90	7.E-05	8.99	7.E-02	2.15
8.E-14	29.58	8.E-11	22.67	8.E-08	15.76	8.E-05	8.86	8.E-02	2.03
9.E-14	29.46	9.E-11	22.55	9.E-08	15.65	9.E-05	8.74	9.E-02	1.92
1.E-13	29.36	1.E-10	22.45	1.E-07	15.54	1.E-04	8.63	1.E-01	1.82
2.E-13	28.66	2.E-10	21.76	2.E-07	14.85	2.E-04	7.94	2.E-01	1.22
3.E-13	28.26	3.E-10	21.35	3.E-07	14.44	3.E-04	7.53	3.E-01	0.91
4.E-13	27.97	4.E-10	21.06	4.E-07	14.15	4.E-04	7.25	4.E-01	0.70
5.E-13	27.75	5.E-10	20.84	5.E-07	13.93	5.E-04	7.02	5.E-01	0.56
6.E-13	27.56	6.E-10	20.66	6.E-07	13.75	6.E-04	6.84	6.E-01	0.45
7.E-13	27.41	7.E-10	20.50	7.E-07	13.59	7.E-04	6.69	7.E-01	0.37
8.E-13	27.28	8.E-10	20.37	8.E-07	13.46	8.E-04	6.55	8.E-01	0.31
9.E-13	27.16	9.E-10	20.25	9.E-07	13.34	9.E-04	6.44	9.E-01	0.26
1.E-12	27.05	1.E-09	20.15	1.E-06	13.24	1.E-03	6.33	1.E+00	2.2E-01
2.E-12	26.36	2.E-09	19.45	2.E-06	12.55	2.E-03	5.64	2.E+00	4.9E-02
3.E-12	25.96	3.E-09	19.05	3.E-06	12.14	3.E-03	5.23	3.E+00	1.3E-02
4.E-12	25.67	4.E-09	18.76	4.E-06	11.85	4.E-03	4.95	4.E+00	3.8E-03
5.E-12	25.44	5.E-09	18.54	5.E-06	11.63	5.E-03	4.73	5.E+00	1.1E-03
6.E-12	25.26	6.E-09	18.35	6.E-06	11.45	6.E-03	4.54	6.E+00	3.6E-04
7.E-12	25.11	7.E-09	18.20	7.E-06	11.29	7.E-03	4.39	7.E+00	1.2E-04
8.E-12	24.97	8.E-09	18.07	8.E-06	11.16	8.E-03	4.26	8.E+00	3.8E-05
9.E-12	24.86	9.E-09	17.95	9.E-06	11.04	9.E-03	4.14	9.E+00	1.2E-05

Soluções

Prob. 1

O rendimento específico S_y é dado por $S_y = V_w/A\Delta h$, onde o volume drenado V_w, evidentemente, é dado pelo produto entre a vazão de bombeamento Q e o tempo Δt. Portanto,

$$S_y = \frac{V_w}{A\Delta h} = \frac{Q\Delta t}{A\Delta h}$$

$$\therefore S_y = \frac{6.5\times(7\times 365)}{(8\times 10^6)\times 0.9} = 0.00231 = \boxed{2.31\times 10^{-3}}$$

■ Prob. 2

Sabe-se que a soma de rendimento específico e retenção específica é igual à porosidade do material que constitui o aquífero, isto é,

$$S_y + S_r = n \quad \textbf{(I)}$$

Já temos n = 0.44. Resta obter o rendimento específico S_y e a retenção específica S_r; esta última é a principal variável em questão. Para calcular S_y, escrevemos

$$S_y = \frac{V_w}{A\Delta h} = \frac{90\times 10^6}{\left(180\times 10^6\right)\times 1.6} = 0.238$$

Substituindo em **(I)**,

$$0.238 + S_r = 0.44$$

$$\therefore S_r = 0.44 - 0.238 = \boxed{0.202}$$

■ Prob. 3

1. Falso. A porosidade do solo é

$$n = \frac{V_w}{V_t} = \frac{67}{180} = 0.372 = \boxed{37.2\%}$$

2. Verdadeiro. O rendimento específico do solo é

$$S_y = \frac{V_{w,m}}{V_t} = \frac{45}{180} = 0.25 = \boxed{25.0\%}$$

3. Verdadeiro. Lembrando que a porosidade é igual à soma de rendimento específico e retenção específica,

$$n = S_y + S_r$$

segue que

$$n = S_y + S_r \quad \rightarrow \quad S_r = n - S_y$$

$$\therefore S_r = 0.372 - 0.25 = 0.12 = \boxed{12\%}$$

4. Falso. A área de extensão do aquífero pode ser determinada a partir da definição de rendimento específico,

$$S_y = \frac{V_w}{A\Delta h} \quad \rightarrow \quad A = \frac{Q\Delta t}{S_y \Delta h}$$

$$\therefore A = \frac{6.0\times\left(5\times 365\right)}{0.25\times 1.0} = \boxed{43{,}800 \text{ m}^2}$$

■ Prob. 4

Em um aquífero não-confinado, o coeficiente de armazenamento corresponde ao rendimento específico. Pela fórmula de Jacob, o CDA é dado por

$$S = \gamma_w b\left(\alpha + n\beta\right)$$

onde γ_w é o peso específico da água, b é a espessura do aquífero, α é a compressibilidade das partículas de solo, n é a porosidade e β é a compressibilidade da água. Lembrando que compressibilidade é o recíproco do módulo de Young, podemos escrever

$$\alpha = \frac{1}{E_s} = \frac{1}{8.5\times10^7} = 1.18\times10^{-8}\ \text{m}^2/\text{N}$$

$$\beta = \frac{1}{E_w} = \frac{1}{2.1\times10^9} = 4.76\times10^{-10}\ \text{m}^2/\text{N}$$

Substituindo na fórmula supracitada, vem

$$S = 9810\times10\times\left[\left(1.18\times10^{-8}\right) + 0.44\times\left(4.76\times10^{-10}\right)\right] = \boxed{1.18\times10^{-3}}$$

Note que a contribuição oriunda da compressibilidade da água é muito pequena; de fato, se tomássemos $\beta \approx 0$, o coeficiente de armazenamento seria pouco alterado:

$$S = 9810\times10\times\left[\left(1.18\times10^{-8}\right) + 0.44\times0\right] = 1.158\times10^{-3}$$

■ Prob. 5

A velocidade de Darcy v_d é dada pela lei de Darcy (não me diga):

$$v_p = K\frac{dh}{dl} = 10\times0.002 = 0.02\ \text{m/dia}$$

Dividindo pela porosidade n, obtemos a velocidade de poro V_p,

$$V_p = \frac{v_p}{n} = \frac{0.02}{0.155} \approx 0.13\ \text{m}^3/\text{dia}$$

A distância Δx coberta pelas águas subterrâneas no decurso de 1 ano é

$$x = v_p\Delta t = 0.13\times365 = \boxed{47.5\ \text{m}}$$

■ Prob. 6

Parte (a): A vazão *Q* que percorre o aquífero no decurso de um dia é dada pela lei de Darcy,

$$Q = -Kb\frac{dh}{dl} \times \text{Extensão}$$

$$Q = -\left(0.8\ \frac{\text{m}}{\text{dia}}\right) \times (40\ \text{m}) \times \left(\frac{100\ \text{m} - 94\ \text{m}}{1500\ \text{m}}\right) \times 8000\ \text{m}$$

$$\therefore \boxed{|Q| = 1024\ \text{m}^3/\text{dia}}$$

Parte (b): Sabemos que a vazão unitária (isto é, a vazão dividida pela extensão do aquífero) é q' = (1024 m^3/dia)/(8000 m) = 0.128 m^2/dia. A elevação *h* a uma distância *x* = 500 m do poço 1 pode ser determinada como

$$h = h_1 - \frac{q'}{Kb}x = 100 - \frac{0.128}{0.8 \times 40} \times 500 = \boxed{98.0\ \text{m}}$$

■ Prob. 7

Seja *H* a elevação do lençol freático. Podemos escrever

$$H_A = 200 - 11 = 189.00\ \text{m}$$
$$H_B = 197 - 7 = 190.00\ \text{m}$$
$$H_C = 202 - 14 = 188.00\ \text{m}$$

Designamos a direção norte como o eixo *y* e a direção oeste como o eixo *x*. Ao longo de *BA*, a mudança de elevação é

$$\Delta H_y = H_B - H_A = 190 - 189 = 1.00\ \text{m}$$

O gradiente hidráulico correspondente é

$$i_y = \frac{\Delta H_y}{L_{AB}} = \frac{1.00}{1150} = 8.6957 \times 10^{-4}$$

e a velocidade de percolação é obtida com a lei de Darcy,

$$V_y = K \times i_y = 8.6957 \times 10^{-4} K$$

onde *K* é a condutividade hidráulica. Prosseguindo de modo análogo, temos a seguinte queda de elevação entre os poços *B* e *C*,

$$\Delta H_x = H_B - H_C = 190 - 188 = 2.00\ \text{m}$$

O gradiente hidráulico correspondente é

$$i_x = \frac{\Delta H_x}{L_{BC}} = \frac{2.00}{850} = 2.3529 \times 10^{-3}$$

e, como antes, a velocidade de percolação é obtida com a lei de Darcy,

$$V_x = K \times i_x = 2.3529 \times 10^{-4} K$$

Resta calcular o ângulo θ,

$$\tan\theta = \frac{V_y}{V_x} = \frac{8.6957 \times 10^{-4} \cancel{K}}{2.3529 \times 10^{-3} \cancel{K}} = 0.36957$$

$$\therefore \theta = \arctan(3.6957) = \boxed{20.28^{\circ}}$$

A velocidade resultante de percolação perfaz um ângulo de aproximadamente 20.3 graus com a direção *BC*.

■ Prob. 8

Parte (a): Um passo inicial óbvio é converter a condutividade hidráulica do poço de cm/sec para m/dia,

$$K = 0.087 \frac{\text{cm}}{\text{sec}} \times \frac{1}{100} \frac{\text{m}}{\text{cm}} \times \frac{86,400}{1} \frac{\text{sec}}{\text{dia}} = 75.17 \text{ m/dia}$$

Em seguida, podemos determinar a vazão solicitada com a equação de Dupuit,

$$q = \frac{1}{2} K \left(\frac{h_1^2 - h_2^2}{L} \right) w = \frac{1}{2} \times 75.17 \times \left(\frac{9.0^2 - 8.0^2}{180} \right) \times 30 = \boxed{106.5 \text{ m}^3/\text{dia}}$$

Parte (b): Com $x = L/2 = 180/2 = 90$ m, a elevação no nível d'água a meio caminho entre os dois poços é

$$h = \sqrt{h_1^2 - \frac{\left(h_1^2 - h_2^2\right)x}{L}} = \sqrt{9.0^2 - \frac{\left(9.0^2 - 8.0^2\right) \times 90}{180}} = \boxed{8.514 \text{ m}}$$

Observe que a elevação do ponto em questão tem valor próximo (embora não exatamente igual) à média aritmética das elevações do NA nos dois poços.

■ Prob. 9

Parte (a): A vazão unitária pode ser determinada através da equação de Dupuit, lembrando, evidentemente, que temos de contabilizar a recarga w = 0.007 m/dia:

$$q' = \frac{K\left(h_1^2 - h_2^2\right)}{2L} - w\left(\frac{L}{2} - x\right)$$

$$\therefore q' = \frac{14.5\times\left(17.6^2 - 15.3^2\right)}{2\times 525} - 0.007\times\left(\frac{525}{2} - 0\right) = \boxed{-0.793\ \text{m}^2/\text{dia}}$$

Parte (b): Usando a mesma equação empregada na parte (a), temos, para x = 525 m,

$$q' = \frac{K\left(h_1^2 - h_2^2\right)}{2L} - w\left(\frac{L}{2} - x\right)$$

$$\therefore q' = \frac{14.5\times\left(17.6^2 - 15.3^2\right)}{2\times 525} - 0.007\times\left(\frac{525}{2} - 525\right) = \boxed{2.88\ \text{m}^2/\text{dia}}$$

Parte (c): Deve haver uma divisa porque a vazão q muda de sinal entre os extremos x = 0 (parte (a)) e x = 525 m (parte (b)). A distância d da origem até a posição da divisa do lençol é dada por

$$d = \frac{L}{2} - \frac{K}{w}\frac{\left(h_1^2 - h_2^2\right)}{2L} = \frac{525}{2} - \frac{14.5}{0.007}\times\frac{\left(17.6^2 - 15.3^2\right)}{2\times 525} = 113.2 \approx \boxed{113\ \text{m}}$$

Parte (d): A elevação máxima h_{max} do nível freático é dada por

$$h_{\max} = \sqrt{h_1^2 - \frac{\left(h_1^2 - h_2^2\right)d}{L} + \frac{w}{K}\left(L-d\right)d}$$

$$\therefore h_{\max} = \sqrt{17.6^2 - \frac{\left(17.6^2 - 15.3^2\right)\times 113}{525} + \frac{0.007}{14.5}\times\left(525-113\right)\times 113}$$

$$\therefore h_{\max} = 17.77 \approx \boxed{17.8\ \text{m}}$$

■ Prob. 10

Este problema é uma aplicação simples da equação de Thiem para aquíferos confinados, qual seja,

$$T = \frac{Q}{2\pi\left(h_2 - h_1\right)}\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) = \frac{4500}{2\pi\times\left(80.7-78.5\right)}\ln\left(\frac{250}{50}\right) = \boxed{524\ \text{m}^2/\text{sec}}$$

■ Prob. 11

O presente problema é uma aplicação simples da equação de Thiem para aquíferos não-confinados,

$$K = \frac{Q}{\pi\left(b_2^2 - b_1^2\right)}\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

$$\therefore K = \frac{80}{\pi\left[(103.5-100)^2 - (103-100)^2\right]}\times\ln\left(\frac{100}{40}\right)$$

$$\therefore K = \boxed{0.718 \text{ m/dia}} = 8.31\times 10^{-5} \text{ m/sec}$$

■ Prob. 12

Sabendo que a vazão de bombeamento é permanente, podemos estimar o rebaixamento com a equação de Thiem. Como referência, vamos utilizar o poço 'do meio', isto é, o poço situado a uma distância de 180 m dos dois demais poços. Lembrando que as contribuições de cada poço para o rebaixamento podem ser somadas linearmente, escrevemos

$$s = \sum_{i=1}^{3}\frac{Q_i}{2\pi T}\ln\left(\frac{r_{ei}}{r_i}\right)$$

$$\therefore 2.5 = \frac{Q}{2\pi\times 2500}\times\ln\left(\frac{1000}{0.16}\right) + \frac{Q}{2\pi\times 2500}\times\ln\left(\frac{1000}{180}\right) + \frac{Q}{2\pi\times 2500}\times\ln\left(\frac{1000}{180}\right)$$

$$\therefore 2.5 = 0.00167Q$$

$$\therefore Q = \frac{2.5}{0.00167} \approx \boxed{1500 \text{ m}^3\text{/dia}}$$

■ Prob. 13

O rebaixamento *s* atinente a um poço de bombeamento que penetra inteiramente um aquífero confinado é dado pela equação de Theis, qual seja,

$$s = \frac{Q}{4\pi T}W(u) \quad \textbf{(I)}$$

onde *Q* é a vazão de bombeamento, *T* é a transmissividade e *W(u)* é a função poço de Theis. O argumento *u* é dado por

$$u = \frac{r^2 S}{2Tt}$$

onde r é a distância radial entre o poço de bombeamento e o poço de observação, T é a transmissividade, S é o coeficiente de armazenamento e t é o tempo. No presente caso, temos r = 200 m, S = 3.2×10^{-4}, T = 1850 m^2/dia e t = 300 dias, logo

$$u=\frac{200^2\times\left(3.2\times10^{-4}\right)}{2\times1850\times300}=1.15\times10^{-5}$$

Recorrendo à tabela de valores da função poço de Theis (Tabela 1), obtemos $W(u) \approx$ 10.94. Substituindo em **(I)**, temos

$$s=\frac{2000}{4\pi\times1850}\times10.94=0.941\text{ m}=\boxed{94.1\text{ cm}}$$

■ Prob. 14

A abordagem seguida aqui é idêntica àquela do problema anterior. Ao invés de recorrer repetidas vezes à Tabela 1, no entanto, uma resolução mais rápida e moderna seria fazer uso do fato de que a função poço $W(u)$ equivale a –1 × a integral exponencial $Ei()$, que é uma função transcendental prontamente disponível em softwares como MATLAB ou Mathematica. No caso do Mathematica, por exemplo, a função que precisamos é *ExpIntegralEi*.

```
In[21]:= u1 = N[(200^2 * (4 * 10^-4))/(2 * 1240 * (8 / 24))];

In[22]:= u2 = N[(200^2 * (4 * 10^-4))/(2 * 1240 * (30 / 24))];

In[23]:= u3 = N[(200^2 * (4 * 10^-4))/(2 * 1240 * (180 / 24))];

In[24]:= Wu1 = -N[ExpIntegralEi[u1]]

Out[24]= 3.34815

In[25]:= Wu2 = -N[ExpIntegralEi[u2]]

Out[25]= 4.68419

In[26]:= Wu3 = -N[ExpIntegralEi[u3]]

Out[26]= 6.48025
```

Após determinar $W(u)$, resta apenas substituir os valores obtidos e outras variáveis pertinentes na equação de Theis (note que Q = 64 L/s = 64×10^{-3} m^3/s e 1 dia = 86,400 sec):

```
In[27]:= s1 = ((64*10^-3)*86400)/(4*Pi*1240) * Wu1
Out[27]= 1.18814

In[28]:= s2 = ((64*10^-3)*86400)/(4*Pi*1240) * Wu2
Out[28]= 1.66225

In[29]:= s3 = ((64*10^-3)*86400)/(4*Pi*1240) * Wu3
Out[29]= 2.29961
```

Como mostram os resultados, os rebaixamentos observados no poço de interesse são de 1.19 m após 8 horas; 1.66 m após 30 dias; e 2.30 m após 6 meses.

■ Prob. 15

A solução desse problema e uma discussão detalhada dos modelos de Theis e Hantush-Jacob podem ser encontrados neste post do blog Hoek.

■ Prob. 16

Parte (a): A demanda de água é dada pelo produto entre população, consumo de água e tempo (= 365 d). Destarte, temos

$$W_r = \text{População} \times \text{Consumo de água} \times \text{Tempo}$$

$$\therefore W_r = (6 \times 400) \times 0.15 \times 365 = \boxed{131{,}400 \text{ m}^3/\text{ano}}$$

Parte (b): O volume em questão é dado pelo produto entre a área do território, a flutuação anual no nível to lençol freático e rendimento específico. Portanto, temos

$$A_g = \text{Area} \times \text{Flutuação do LF} \times \text{Rendimento esp.}$$

$$\therefore A_g = \left(6 \times 10^6\right) \times 3.6 \times 0.04 = \boxed{864{,}000 \text{ m}^3 / \text{ano}}$$

Parte (c): O volume reabastecido por águas pluviais é dado pelo produto entre a área do território, a precipitação anual e a taxa de infiltração no solo. Segue que

$$R_g = \text{Area} \times \text{Precipitação anual} \times \text{Taxa de infiltração}$$

$$\therefore R_g = \left(6 \times 10^6\right) \times 0.8 \times 0.1 = \boxed{480{,}000 \text{ m}^3/\text{ano}}$$

Parte (d): A disponibilidade de água $\bar{A}$ pode ser obtida como a média aritmética do volume fornecido por flutuações no nível freático (parte (b)) e do volume oriundo de reabastecimento pluvial (parte (c)),

$$\overline{A} = \frac{A_g + R_g}{2} = \frac{864,000 + 480,000}{2} = 672,000 \text{ m}^3/\text{ano}$$

Dividindo $\bar{A}$ pelo consumo W_r obtido na parte (a), obtemos a *disponibilidade de águas subterrâneas comparada com a demanda* (*AGR*, do inglês *availability of groundwater compared to the requirement*):

$$\overline{AGR} = \frac{\overline{A}}{W_r} = \frac{672,000}{131,400} = \boxed{5.11}$$

Isto é, ignorando o crescimento demográfico (o que é uma hipótese simplificadora bastante improvável), o aquífero em foco seria capaz de suprir a população local por cerca de 5 anos.

■ Referências (★ → Livro altamente recomendado)

1. FETTER, C.W. **Applied Hydrogeology**. 4ª edição. Pearson, 2014. ★
2. KARAMOUZ, M.; AHMADI, A.; AKHBARI, M. **Groundwater Hydrology**. 2ª edição. CRC Press, 2020. ★
3. RAO, N.S. **Hydrogeology: Problems with Solutions**. PHI Learning, 2016.
4. SUBRAMANYA, K. **Engineering Hydrology.** 3ª edição. Tata-McGraw-Hill, 2008.
5. TODD, D.K.; MAYS, L.W. **Groundwater Hydrology**. 3ª edição. John Wiley and Sons, 2005. ★

➔ **Referências de cada problema**

Problema	Ref.	Problema	Ref.
1	[2]	9	[1]
2	[2]	10	[4]
3	[2]	11	[4]
4	[2]	12	[4]
5	[6]	13	[1]
6	[6]	14	[5]
7	[4]	15	*
8	[1]	16	[3]

***** O Prob. 15 foi originalmente postado em um artigo no blog Hoek.

Sobre mim

Sou aluno de graduação em Engenharia Civil na Universidade de Brasília (UnB). Meus principais interesses são hidrologia, engenharia hidráulica, 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