

INTERPRETAÇÃO DE TESTE DE VAZÃO DE POÇO JORRANTE COM CORREÇÃO DE PERDA DE CARGA NA EDUTORA

Edson Wendland¹, Luís H. Gomes² & Marli Torres³

Resumo: Aquíferos confinados artesianos não necessitam de energia adicional (bombeamento) e a água subterrânea jorra naturalmente na cabeça do poço. Este estudo propõe uma correção para o método de teste de poço jorrante apresentado por Lohman (1972) a partir do cálculo da perda de carga por atrito na coluna edutora. A aplicação do método proposto permitiu a determinação da transmissividade ($T = 430 \text{ m}^2/\text{d}$) e coeficiente de armazenamento ($S = 2 \cdot 10^{-5}$), representativos para o Aquífero Guarani confinado na área de estudo. Ignorando a correção devido ao atrito na coluna edutora, o erro na transmissividade é de 19%. Para o coeficiente de armazenamento, o erro é de 5 ordens de magnitude, resultando em valores inaceitáveis do ponto de vista físico.

Abstract: Artesian confined aquifers do not need pumping energy, and water from the aquifer flows naturally at the well head. This study proposes correcting the method for flowing well test presented by Lohman (1972) by considering the head losses due to friction in the well casing. The application of the proposed correction allowed the determination of a transmissivity ($T = 430 \text{ m}^2/\text{d}$) and storage coefficient ($S = 2 \cdot 10^{-5}$) which appear to be representative for the confined Guarani Aquifer in the study area. Ignoring the correction due to head losses in the well casing, the error in transmissivity evaluation is about 19%. For the storage coefficient, the error is of 5 orders of magnitude, resulting in an unacceptable value from the physical point of view.

Palavras-chave: teste de bombeamento, aquífero confinado, hidrometria.

1. INTRODUÇÃO

Testes de vazão são conduzidos para caracterizar sistemas hidrogeológicos. Observando a resposta do aquífero a determinados estímulos, pode-se determinar sua transmissividade (T) e coeficiente de armazenamento (S). Esses parâmetros são essenciais para a compreensão, o gerenciamento e a modelação de aquíferos.

^{1,2} Departamento de Hidráulica e Saneamento; SHS-EESC-USP, Caixa Postal 359; 13560-970; São Carlos; SP; Brasil; (16) 3373-9541; (16) 3373-9550; ¹ ew@sc.usp.br; ² gomeslh@yahoo.com.br

³

A interpretação de resultados de testes de bombeamento depende das condições físicas do aquífero (i.e. livre, confinado, drenante, homogêneo, isotrópico), do regime de rebaixamento (estacionário ou transiente), condições de bombeamento (descarga constante ou variável), das fronteiras hidráulicas e da construção do poço (total ou parcialmente penetrante). Tendo em vista essa variedade de condições, vários autores desenvolveram aproximações matemáticas para a análise dos dados, de acordo com as diferentes condições do teste.

Aquíferos confinados artesianos não necessitam de energia adicional (bombeamento) e água jorra naturalmente na cabeça do poço. A análise desse problema foi descrita originalmente por Jacob e Lohman (1952). Como esse tipo de aquífero é relativamente raro, os métodos matemáticos para a interpretação dos dados não foram suficientemente examinados.

Neste trabalho é apresentada uma correção para o método desenvolvido por Lohman (1972), introduzindo a consideração da perda de carga por atrito ao longo da coluna edutora. A correção proposta é avaliada para um teste de vazão realizado em um poço jorrante perfurado no Aquífero Guarani, para o qual a edutora tem mais de 1000 m de comprimento. O erro na determinação da transmissividade e do coeficiente de armazenamento é analisado e discutido.

2. FORMULAÇÃO CONCEITUAL DO PROBLEMA

O teste de vazão proposto consiste em um problema clássico conhecido na literatura como o Problema de Rebaixamento Constante de Jacob e Lohman (1952). O modelo conceitual para o teste de poço jorrante é apresentado esquematicamente na Figura 1.

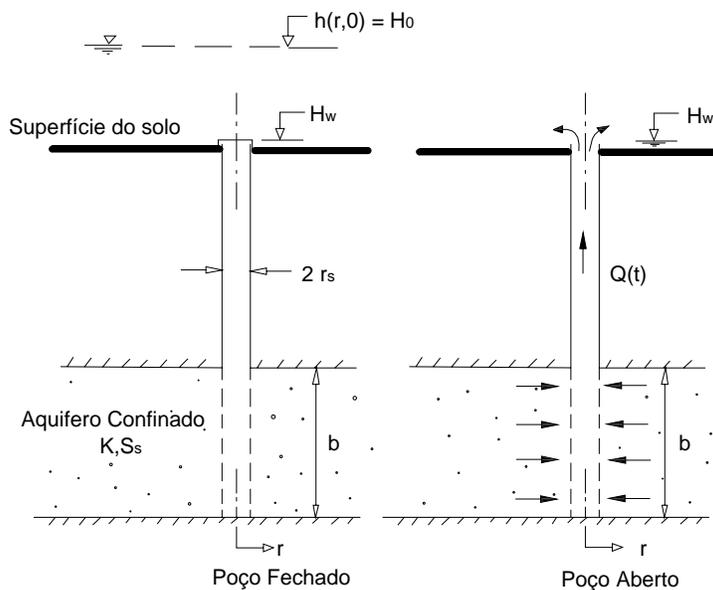


Figura 1: Representação esquemática do teste de vazão em poço jorrante

Um poço de raio finito r_w é perfurado através de toda a espessura de um aquífero confinado infinito de espessura b , condutividade horizontal K e coeficiente de armazenamento específico S_s . O aquífero é artesiano e foi mantido fechado por um longo tempo.

No instante $t=0$, a carga hidráulica em todo o aquífero é H_0 . No instante $t=0^+$, o poço é repentinamente aberto e a carga hidráulica cai imediatamente para H_w , que corresponde à cota de instalação da boca do poço. Como o aquífero é artesiano, o poço passa a jorrar naturalmente. Não havendo fonte externa (recarga) de água (isto é, toda a água jorrada é derivada do armazenamento), o poço continuará jorrando até que a carga hidráulica em todos os pontos do aquífero seja reduzida para H_w .

3. FUNDAMENTAÇÃO MATEMÁTICA

3.1. Modelo matemático para poço jorrante

A partir do Princípio da Conservação de Massa e da Lei de Darcy, a equação de fluxo radial para descrever a distribuição de carga hidráulica $h(r,t)$ em um aquífero confinado, homogêneo e isotrópico pode ser escrita como

$$S = \frac{\partial h}{\partial t} = T \left(\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} \right) \quad (1)$$

em que t representa o tempo a partir do início do teste, r representa a distância radial do centro do poço testado, S representa o coeficiente de armazenamento e T representa a transmissividade do aquífero.

Conforme apresentado na Figura 1, a carga hidráulica inicial (H_0) no aquífero é considerada uniforme

$$h(r,0) = H_0 \quad \text{para } t = 0, r > r_w \quad (2)$$

em que r_w é o raio efetivo do poço.

A condição de contorno do teste de rebaixamento (ou carga) constante no poço (portanto para $r = r_w$) em qualquer instante é

$$h(r_w, t) = H_w = H_0 - s_w \quad \text{para } t > 0, r = r_w \quad (3)$$

em que H_w é a carga remanescente no poço e s_w é o rebaixamento correspondente. Essa condição estabelece que a carga hidráulica na seção filtrante é aproximadamente igual à cota de descarga do poço jorrante. Essa aproximação é válida, quando a perda de carga na coluna edutora é desprezível.

A carga hidráulica é suposta inalterada (constante) em um ponto qualquer no infinito e pode ser expressa como

$$h(\infty, t) = H_0 \quad \text{para } t > 0, r \rightarrow \infty \quad (4)$$

A solução analítica para esse problema foi proposta por Jacob e Lohman (1952) a partir da solução de Smith (1937), derivada originalmente para um problema de fluxo de calor em corpo infinito limitado internamente por um cilindro.

A solução da equação (1), que satisfaz as condições (2), (3) e (4) é expressa por

$$Q = 2\pi T s_w G(\alpha) \quad (5)$$

sendo Q a vazão jorrante no poço. A variável α é definida como

$$\alpha = \frac{Tt}{Sr_w^2} \quad (6)$$

e a função-tipo

$$G(\alpha) = \frac{4\alpha}{\pi} \int_0^\infty x e^{-\alpha x^2} \left[\frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{Y_0(x)}{J_0(x)} \right) \right] dx \quad (7)$$

em que $J_0(x)$ e $Y_0(x)$ são as funções de Bessel de ordem zero do primeiro e segundo tipo, respectivamente.

Deve ser observado que a presente solução apresenta semelhanças com a solução de Theis (1935), desenvolvida para o teste com vazão constante. No problema de Theis (1935), a solução depende da função $W(u)$. No presente caso de rebaixamento constante, a solução depende de $G(\alpha)$.

O mesmo problema foi abordado por Peng et al. (2002) a partir da solução de Carslaw e Jaeger (1959), baseada na aplicação da Transformada de Laplace e no Método de Integrais de Contorno, derivando uma solução equivalente.

A função (7) não é tratável analiticamente, mas pode ser substituída por uma série, integrada numericamente e apresentada em formato tabular, conforme descrito no trabalho original de Jacob e Lohman (1952). Com o auxílio dessas tabelas o problema de interpretação de dados de testes de vazão de poços jorrantes pode ser conduzido de forma similar ao método de superposição de curvas (*curve-matching method*) de Theis (1935). Propostas alternativas para integração numérica foram apresentadas por Peng et al. (2002) e Ojha (2004).

Uma alternativa interessante foi apresentada por Lohman (1972). Com exceção de valores muito pequenos de t , a função $G(\alpha)$ pode ser aproximada suficientemente bem por $2/W(u)$. Por outro lado, para valores pequenos de u , $W(u)$ pode ser aproximada por $2,30 \log_{10} \frac{2,25Tt}{r_w^2 S}$.

Fazendo essas substituições na equação (5), obtém-se a transmissividade

$$T = \frac{2,30Q}{4\pi s_w} \log_{10} \frac{2,25Tt}{r_w^2 S} \quad (8)$$

e, a partir da equação (6), o coeficiente de armazenamento do aquífero

$$S = \frac{Tt}{\alpha r_w^2} \quad (9)$$

Diferenciando a equação (8) e substituindo os diferenciais por valores finitos, obtém-se

$$T = \frac{2,30}{4\pi\Delta(s_w/Q)/\Delta \log_{10} t/r_w^2} \quad (10)$$

Os valores para essa equação podem ser obtidos, apresentando os dados do teste de vazão em gráfico de $(s_w/Q) \times \log(t/r_w^2)$. Geralmente, são usados gráficos semi-logarítmicos para esse fim. Extrapolando a reta de ajuste desses pontos até $s_w/Q=0$, o valor de S pode ser determinado de

$$S = 2,25T \left(\frac{t}{r_w^2} \right)_0 \quad (11)$$

ou, de forma análoga ao método de Cooper e Jacob (1946), S pode ser determinado do trecho reto da linha de ajuste no gráfico

$$S = \frac{2,25Tt/r_w^2}{\log_{10}^{-1} \left[\frac{(s_w/Q)}{\Delta(s_w/Q)} \right]} \quad (12)$$

Deve ser observado que o valor de S só pode ser determinado, quando r_w é conhecido. Caso haja dúvida sobre o valor de r_w , esse método não deve ser utilizado para a determinação do coeficiente de armazenamento.

3.2. Correção de pressão devido à perda de carga na edutora

O modelo matemático correspondente à Figura 1 foi desenvolvido para poços perfurados em aquíferos confinados de baixa profundidade, para os quais a perda de carga na coluna edutora pode ser desprezada.

No presente caso, o aquífero confinado encontra-se a uma profundidade de mais de 1000m. Para esse comprimento de tubulação e com as vazões esperadas, a perda de carga pode ser significativa, portanto, o equacionamento teórico deve ser revisado.

Conforme apresentado, para análise do teste de vazão em poço jorrante, a carga hidráulica deve ser determinada na seção de filtros (H_w). O manômetro instalado na cabeça do poço indica uma pressão de referência (H_M), que deve ser corrigida para a seção filtrante através da perda de carga (ΔH) por atrito nas paredes da edutora

$$H_M = H_w - \Delta H \quad \text{ou} \quad H_w = H_M + \Delta H \quad (13)$$

Na interpretação do teste de vazão são usados os dados de rebaixamento de carga (s_w) na seção filtrante do poço

$$s_w = H_0 - H_w \quad \text{ou} \quad s_w = H_0 - (H_M + \Delta H) \quad (14)$$

A Figura 2 apresenta esquematicamente uma comparação entre a situação teórica analisada por Jacob e Lohman (1952) e a situação real do presente estudo de caso. Conforme se observa, a carga real na seção filtrante (H_w) é maior que a carga indicada pelo manômetro na cabeça do poço. Em outras palavras, o rebaixamento real no aquífero é menor que o indicado pelo manômetro ($H_M = p_M/\gamma$), sendo que essa diferença corresponde à perda de carga na coluna edutora (ΔH).

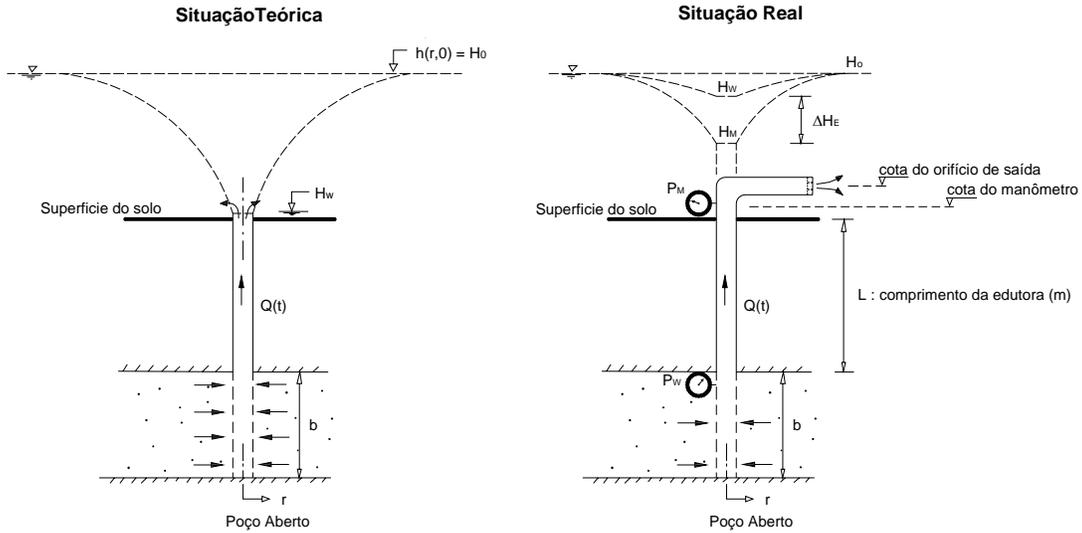


Figura 2: Representação esquemática da correção de pressão na seção filtrante a partir da pressão observada na cabeça do poço

3.3. Correção de pressão devido à perda de carga na edutora

A perda de carga na coluna edutora será calculada pela Equação Universal (Darcy-Weisbach)

$$\Delta H = \sum_{i=1}^3 f_i \frac{L_i}{D_i} \frac{v_i^2}{2g} \quad (15)$$

sendo o fator de atrito determinado pela equação de Swamee-Jain

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (16)$$

uma vez que o escoamento é considerado turbulento. Para o cálculo do número de Reynolds, é necessário corrigir a viscosidade da água em função da temperatura, de acordo com a equação

$$\nu = \frac{1,78 \cdot 10^{-6}}{(1 + 0,0337T + 0,000221T^2)} \quad (17)$$

4. Aplicação

O método proposto foi aplicado a um poço jorrante, cujo perfil é apresentado esquematicamente na Figura 3. A coluna edutora é composta por tubos de 3 dimensões diferentes, $D_1 = 508$ mm, $D_2 = 314$ mm e $D_3 = 219$ mm, com comprimentos de $L_1 = 55,10$ m, $L_2 = 64,70$ m e $L_3 = 1124,20$ m, respectivamente.

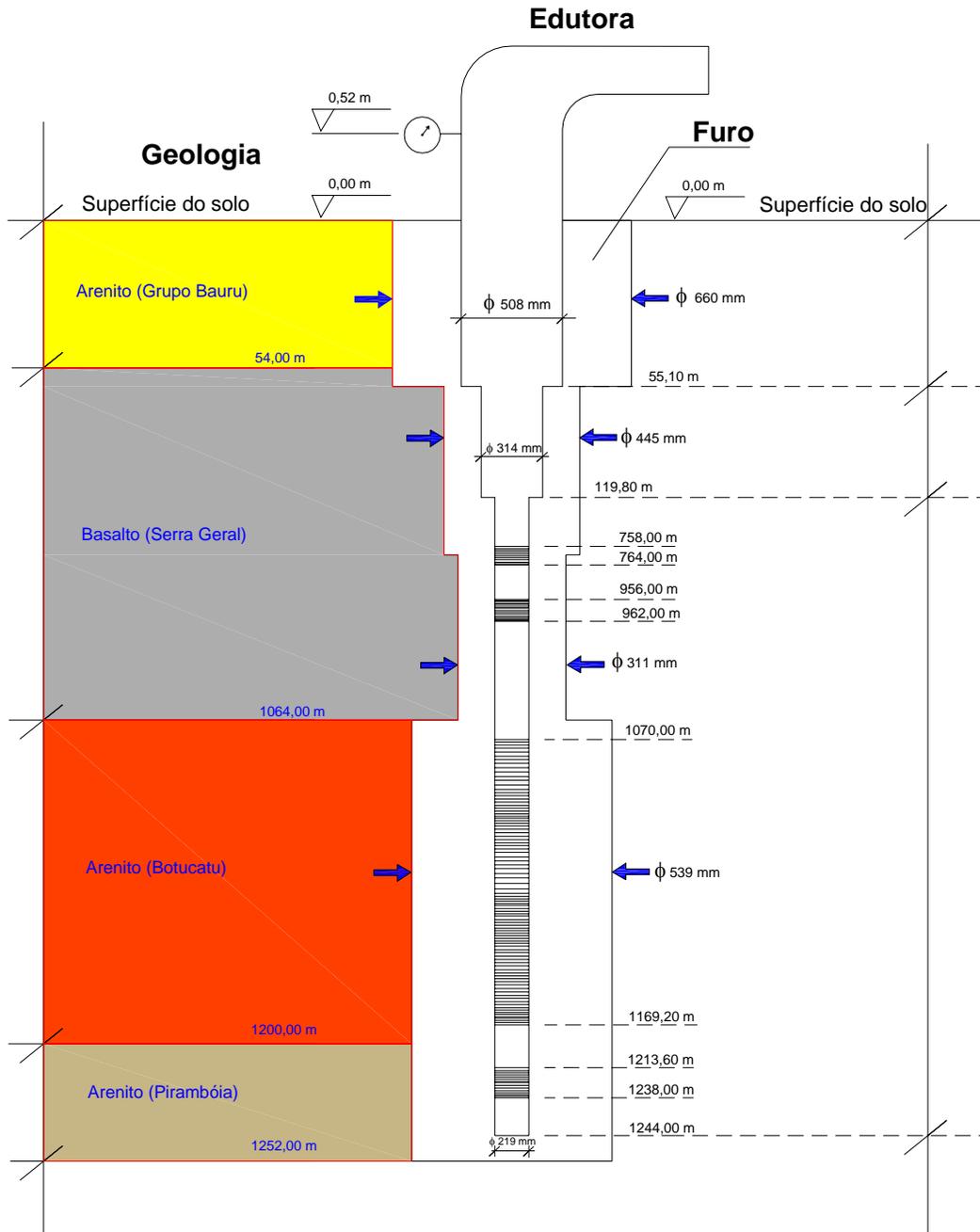


Figura 3: Perfil esquemático do poço jorrante (teste de vazão)

Para a temperatura da água de 49 °C, a viscosidade cinemática (ν) é da ordem de $0,56 \times 10^{-6}$ m²/s. A rugosidade absoluta de tubo de aço soldado é da ordem de 0,05 mm.

A vazão observada no início do teste foi de $Q = 175,19$ m³/h. Para essa descarga, a perda de carga na edutora é de $\Delta H = 5,75$ m. No final do teste (após 34 horas ou 2040 minutos), a vazão remanescente foi de 155,95 m³/h. Nesse caso, a perda de carga ainda é de $\Delta H = 4,59$ m.

4.1. Dados registrados no poço jorrante

Durante o teste de vazão, a pressão na cabeça do poço foi monitorada com o auxílio de um manômetro. O equipamento de medição instalado apresentava uma faixa de medição de 0,0 a 4,0 bar, com resolução de 0,05 bar. Essa resolução corresponde à precisão da ordem de 0,50 metros de coluna d'água.

Os dados de rebaixamento (s_M) e vazão (Q) registrados no poço jorrante, durante a realização do teste de vazão, são apresentados na Tabela 1. A tabela também apresenta a perda de carga calculada (Δh) e o rebaixamento corrigido (s_w^*), os quais são necessários para a construção dos gráficos e interpretação do teste. O raio efetivo do poço é de 0,267m, que corresponde ao raio do furo à profundidade do aquífero (arenito).

Tabela 1: Dados de vazão (jorrante) e rebaixamento observados no poço.

t (min)	Q (m ³ /h)	s_M (m)	ΔH (m)	s_w^* (m)
1	179,44	18,00	6,02	11,98
2	175,19	18,50	5,75	12,75
3	174,41	18,40	5,70	12,70
4	174,01	18,40	5,68	12,72
5	174,01	18,30	5,68	12,62
6	174,21	18,40	5,69	12,71
7	174,21	18,30	5,69	12,61
8	174,80	18,30	5,73	12,57
9	174,99	18,30	5,74	12,56
10	175,39	18,30	5,77	12,53
12	175,58	18,25	5,78	12,47
14	175,58	18,30	5,78	12,52
16	175,58	18,25	5,78	12,47
18	175,19	18,40	5,75	12,65
20	174,80	18,25	5,73	12,52
25	174,01	18,30	5,68	12,62
30	173,22	18,25	5,63	12,62
35	172,43	18,30	5,58	12,72
40	172,03	18,20	5,56	12,64
50	171,04	18,20	5,49	12,71

60	170,03	18,30	5,43	12,87
70	169,63	18,20	5,41	12,79
80	169,02	18,50	5,37	13,13
90	168,41	18,40	5,33	13,07
100	168,00	18,50	5,31	13,19
120	166,78	18,50	5,24	13,26
150	166,16	18,50	5,20	13,30
180	165,33	18,50	5,15	13,35
210	164,71	18,55	5,11	13,44
240	164,08	18,55	5,07	13,48
270	163,46	18,55	5,04	13,51
300	163,25	18,55	5,02	13,53
330	162,83	18,55	5,00	13,55
360	162,62	18,55	4,99	13,56
390	162,19	18,55	4,96	13,59
420	161,98	18,55	4,95	13,60
480	161,56	18,55	4,93	13,62
540	161,14	18,60	4,90	13,70
600	160,92	18,60	4,89	13,71
660	160,71	18,70	4,88	13,82
720	160,50	18,80	4,86	13,94
780	160,28	18,80	4,85	13,95
840	160,28	18,80	4,85	13,95
900	160,07	18,80	4,84	13,96
960	159,64	18,80	4,81	13,99
1020	159,21	18,80	4,79	14,01
1080	158,78	18,80	4,76	14,04
1140	158,35	18,80	4,74	14,06
1200	157,91	18,90	4,71	14,19
1260	157,48	18,90	4,69	14,21
1320	157,26	18,90	4,68	14,22
1380	156,83	18,90	4,65	14,25
1440	156,39	18,90	4,63	14,27
1500	155,95	18,90	4,60	14,30
1560	155,95	18,90	4,60	14,30
1620	155,95	18,90	4,60	14,30
1680	155,95	18,90	4,60	14,30
1740	155,95	18,90	4,60	14,30
1800	155,95	18,90	4,60	14,30
1860	155,95	18,90	4,60	14,30
1920	155,95	18,90	4,60	14,30
1980	155,95	18,90	4,60	14,30
2040	155,95	18,90	4,60	14,30

A comparação entre as colunas 3 (s_M) e 4 (Δh) indica que a perda de carga na edutora não pode ser desprezada, uma vez que representa entre 24% e 33% do rebaixamento medido no manômetro na cabeça do poço.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os dados da Tabela 1 foi construído o gráfico da Figura 4, a partir do qual podem ser determinados a transmissividade e coeficiente de armazenamento do aquífero testado.

O procedimento de cálculo apresentado na 3 resulta em valores de $T=430 \text{ m}^2/\text{d}$ (para a transmissividade) e $S=2.10^{-5}$ (para o coeficiente de armazenamento). Esse valor foi obtido utilizando a metodologia proposta por Lohman (1972), recomendada pelo USGS (*United States Geological Survey*) e pela metodologia de Ojha (2004).

O rebaixamento corrigido (s_w^*) da tabela 1 foi usado para construir a Figura 4, a partir da qual a transmissividade e coeficiente de armazenamento do aquífero podem ser determinados. Aplicando o procedimento proposto, os valores de $T = 430 \text{ m}^2/\text{d}$ (transmissividade) e $S = 2 \cdot 10^{-5}$ (coeficiente de armazenamento) foram obtidos. Esses valores também foram obtidos utilizando a metodologia proposta por Lohman (1972) e Ojha (2004). Nessa interpretação, os dados registrados nos 12 minutos iniciais do teste (indicados por diamantes no gráfico) foram ignorados, uma vez que não estão alinhados com a reta da equação $s_w^*/Q = 15,982 \ln(t/r_w^2) + 100,75$. Para os pontos remanescentes, o coeficiente de correlação é 0,9893, indicando excelente concordância com a linha de tendência. Incluindo os dados ignorados, a transmissividade estimada cresce para $T = 550 \text{ m}^2/\text{d}$. Considerando somente os dados das 4 primeiras horas do teste, a transmissividade calculada é de aproximadamente $T = 870 \text{ m}^2/\text{d}$. Essa análise demonstra que o teste de vazão deve ser suficientemente longo para permitir a determinação dos parâmetros do aquífero com maior confiabilidade.

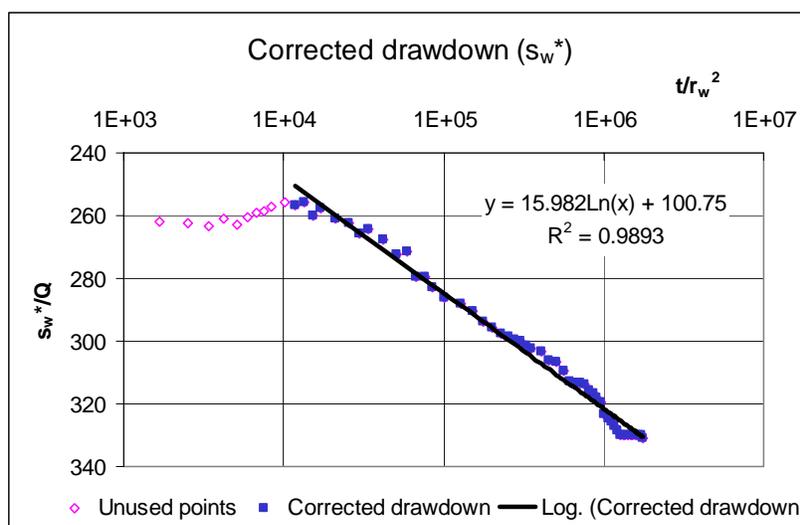


Figura 4: Diagrama de s_w^*/Q x t/r_w^2 para o poço jorrante, com rebaixamento corrigido

Executando a mesma análise com o rebaixamento medido (sem correção da perda de carga na edutora), a Figura 5 é obtida. Os dados observados são ajustados por uma reta dada pela equação $s_M/Q = 13,413 \ln(t/r_w^2) + 243,67$, com um fator de correlação de $R^2 = 0,9867$. A transmissividade e o coeficiente de armazenamento calculados são de $T = 510 \text{ m}^2/\text{d}$ e $S = 2 \times 10^{-10}$, respectivamente.

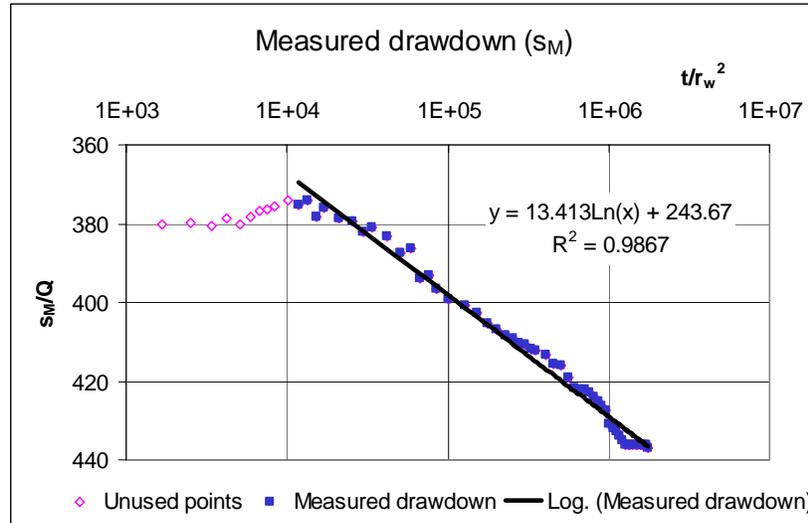


Figura 5: Diagrama de $s_M/Q \times t/r_w^2$ para o poço jorrante, com rebaixamento medido

Todos parâmetros calculados são resumidos na tabela 2. Uma comparação com valores apresentados na literatura indica que os valores obtidos com o rebaixamento corrigido ($T = 430 \text{ m}^2/\text{d}$ e $S = 2 \times 10^{-5}$) estão mais próximos dos valores esperados para o arenito. A transmissividade $T = 510 \text{ m}^2/\text{d}$, determinada sem correção do rebaixamento, superestima o valor correto em 19%, sendo um erro excessivo. O coeficiente de armazenamento correspondente $S = 2 \times 10^{-10}$ consiste em uma sub-estimativa de 5 ordens de magnitude.

Tabela 2: Parâmetros (T, S) estimados a partir dos dados do teste de vazão em poço jorrante.

	Rebaixamento medido		Rebaixamento corrigido	
	12 a 2100 min	12 a 2100 min	1 a 2100 min	1 a 240 min
Transmissividade (m^2/d)	510	430	550	870
Coef. de armazenamento (-)	2×10^{-10}	2×10^{-5}	1×10^{-7}	8×10^{-13}

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARSLAW H.S, JAEGER J.C., Some two-dimensional problems in conduction of heat with circular symmetry. *Heat Conduction*;46:361-88, 1939.

CETESB. Água Subterrânea e poços tubulares (tradução) UOP Johnson Division Saint Paul, Minnesota. 2ed. rev. São Paulo, 1974.

COOPER, H.H., JR , JACOB, C. E., A Generalized Graphical Method for Evaluating Formation Constants and Summarizing Well Field History. *Trans. Am. Geophysical Union*, Vol. 27, pgs 524-526, Washington, 1946.

DRISCOLL, F.C., *Groundwater and Well*. 2. ed., Minnesota: Johnson Division, 1986.

JACOB C.E., LOHMAN S.W., Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer. *Trans, Am Geophys Union*;33(4):559-69, 1952.

LOHMAN S.W., *Ground-Water hydraulics*. Geological Survey Professional Paper; 708, Washington: United States Government Printing Office; 1972

OJHA, C. S. P. (2004), Aquifer parameters estimation using artesian well test data, *Journal of Hydrologic Engineering*, 9(1), p. 64-67.

PENG H.-Y, YEH H. D., YANG S.-Y., Improved numerical evaluation of the radial groundwater flow equation. *Advances in Water Resources*, Volume 25, Issue 6, Pages 663-675, 2002.

SMITH L. P., Heat Flow in an infinite solid bounded internally by a cylinder. *J. Appl. Phys.*;8(6):45-9, 1937.

SWAMEE P.K, JAIN A.K., Explicit Equaton for Pipe-flow Problems. *J. Hydraulics Division*. ASCE, 102(5), 627-664, 1976.

THEIS, C.V., The Relation Between the Lowering of the Piezometric Surface and The Rate and Duration of Discharge of a Well Using Ground Water Storage. *Trans. Am. Geophysical Union*, pgs 519-524, 1935.