

INTERPRETAÇÃO DE ENSAIOS DE BOMBEAMENTO

João Manoel Filho¹

RESUMO

No Brasil, a interpretação de testes de bombeamento ainda constitui um problema muito sério, na medida em que é muitas vezes feita sem conhecimento de informações fundamentais sobre o aquífero por falta de poços de observação ou falta de planejamento do teste. Por exemplo, um perfil litológico e construtivo detalhado do poço nem sempre está disponível ou é devidamente analisado antes da interpretação dos dados do bombeamento. Por outro lado, mesmo quando se conhecem os perfis litológicos e construtivos dos poços em estudo, às vezes não são percebidos efeitos de armazenamento no próprio poço, de penetração parcial, de drenagem gravitacional retardada, etc. Se não houver uma perfeita caracterização das condições de campo para avaliar a existência de potenciais elementos capazes de interferir nos resultados do teste, a interpretação pode levar a resultados errôneos. São discutidos métodos de interpretação de testes de bombeamento em aquíferos confinados drenantes e não drenantes para poços totalmente penetrantes de diâmetro infinitesimal e de diâmetro finito. Poços parcialmente penetrantes não foram tratados. A abordagem é, sobretudo prática e contempla apenas as formações homogêneas do tipo granular.

INTRODUÇÃO

Os testes de bombeamento geralmente se destinam a avaliar as propriedades hidráulicas dos aquíferos. Neste caso, exigem pelo menos um poço de observação ou um piezômetro, situado a uma certa distância do poço bombeado e são chamados de *testes de aquífero*. Outras vezes o objetivo do bombeamento é apenas de avaliar a capacidade de produção e a eficiência do poço bombeado, recebendo neste caso a denominação de *teste de produção*. É raro que um teste de bombeamento seja realizado em um aquífero (camada aquífera), sem que existam influências externas ao domínio, ou seja, sem que ocorram fluxos induzidos de outras camadas. Assim, quase nunca, o “aquífero”, nos termos da definição, é o único responsável pelo fornecimento da água bombeada, e por isso, quando se fala de “sistema aquífero”, alerta-se, implicitamente, para essa realidade, que é muito importante na interpretação dos testes de aquífero.

CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CAMPO

Dentre as observações sugeridas por alguns autores (por ex. Stallman, 1971; Walton, 1987), para avaliar as condições de campo antes de um teste de bombeamento, destacam-se:

- O poço de bombeamento deve ser equipado com uma bomba confiável e com um dispositivo de controle de vazão, de preferência do tipo escoador de orifício circular.
- A água bombeada deve ser desviada das proximidades do poço para evitar a recirculação, sobretudo nos testes em aquíferos pouco profundos, como é o caso de depósitos aluviais.
- Acessos adequados, através de tubulações exclusivas, devem ser instalados no poço produtor de modo a permitir a introdução de medidores elétricos, para controle do nível d'água, antes, durante e depois do bombeamento.
- As cotas topográficas e os perfis litológicos e construtivos do poço de bombeamento e de todos os poços de observação devem ser conhecidos, para avaliação: i) da espessura do aquífero ii) da espessura do aquífero eventualmente presente; iii) das extensões e posições dos filtros, as quais correspondem à zona de admissão de fluxo horizontal de água para o poço e caracterizam a porcentagem de penetração do poço em relação à espessura total da camada aquífera que está sendo testada.
- Se existirem outros poços dentro da área de influência do teste, os seus níveis e descargas devem ser, necessariamente, controlados.
- Os piezômetros ou poços de observação construídos para o teste, devem ser bem desenvolvidos e a sua capacidade de reação ao bombeamento deve ser previamente testada mediante injeção de um volume conhecido de água, e medição subsequente do declínio do nível d'água. Se o poço de observação estiver em boas condições, a subida de nível d'água produzida pela injeção deve dissipar-se dentro de poucos minutos, o que significa que o poço deve reagir bem às mudanças de carga do sistema aquífero durante o teste.
- Todas as distâncias radiais do poço bombeado aos poços de observação associados, bem como aos poços produtores interferentes, devem ser levantadas.
- Quaisquer discontinuidades que possam constituir-se em fronteiras positivas ou negativas, devem ser mapeadas e as suas distâncias a cada um dos poços de observação, devem ser medidas.

MÉTODOS PARA AQUIFEROS CONFINADOS NÃO DRENANTES

1. Poço de diâmetro infinitesimal: modelo de Theis (1935)

Exemplo 1 – Dados medidos, sem influência de drenança, em um poço de observação situado a 430 m de distância de um poço bombeado com vazão constante de 58 m³/h, no sistema aquífero Barreiras-Beberibe em Dois Unidos (Região Metropolitana do Recife). Tanto o poço bombeado quando o observado, são totalmente penetrantes.

Função do poço de Theis

$$s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (1.1)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (1.2)$$

$$W(u) = -0,5772 - \ln u - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{u^n}{n \cdot n!} \quad (1.3)$$

MÉTODOS DE INTERPRETAÇÃO

a) Método da curva-padrão de Theis (1935)

- Abrir o arquivo da planilha que contém os dados da função do poço de Theis, e nele incluir os dados de campo do poço de observação em estudo. Salvar esse arquivo com um nome que identifique o teste e o poço observado.
- Construir a partir da referida planilha o gráfico log-log, com a curva-padrão da função do poço. Sobre esse primeiro gráfico construir um segundo, também log-log, com os dados de campo, e com o mesmo número de ciclos logarítmicos nos respectivos eixos de ambos os gráficos.
- Superpor as curvas arrastando um gráfico sobre o outro até obter o melhor ajuste (fig. 1).
- Selecionar um ponto comum e dele anotar os valores da função do poço $W(u)$ e do seu argumento u , do rebaixamento s e do tempo t . Substituir os valores de $W(u)$ e s na equação (1.1) para calcular a transmissividade (T). Substituir os valores de u e T na equação (1.2) para calcular o coeficiente de armazenamento (S), conforme se indica a seguir:

$$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u) = \frac{(58/3600) \times 1.1}{4\pi(0,5)} = 2,82 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S = \frac{4Ttu}{r^2} = \frac{4 \times 2,82 \times 10^{-3} \times 290 \times 60 \times 0,25}{430^2} = 2,65 \times 10^{-4}$$

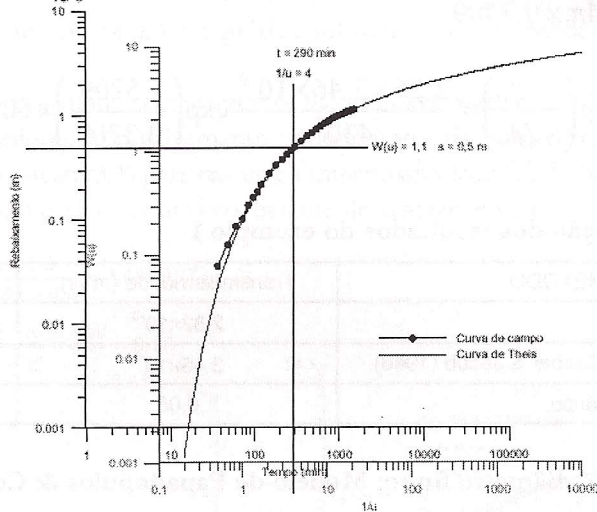


Fig. 1- Método de superposição da curva-padrão de Theis para o exemplo 1.

b) Método da reta logarítmica de Cooper & Jacob (1946)

$s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T} \ln t + \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,25T}{r^2 S} \quad (2.1)$	$s(r,t) = M \ln t + N \quad (2.2)$	$T = \frac{Q}{4\pi M} \quad (2.3)$	$S = \frac{2,25T \exp\left(-\frac{N}{M}\right)}{r^2} \quad (2.4)$
--	------------------------------------	------------------------------------	---

- Construir a partir da planilha que contém os dados do poço de observação em estudo, o gráfico mono-log, de rebaixamento versus tempo. (figura 2).
- Efetuar um ajuste logarítmico para avaliar os parâmetros M e N (equação 2.2)
- Substituir o valor de M na equação (2.3) para calcular a transmissividade (T) e substituir os valores de M e N na equação (2.4) para determinar o coeficiente de armazenamento (S).

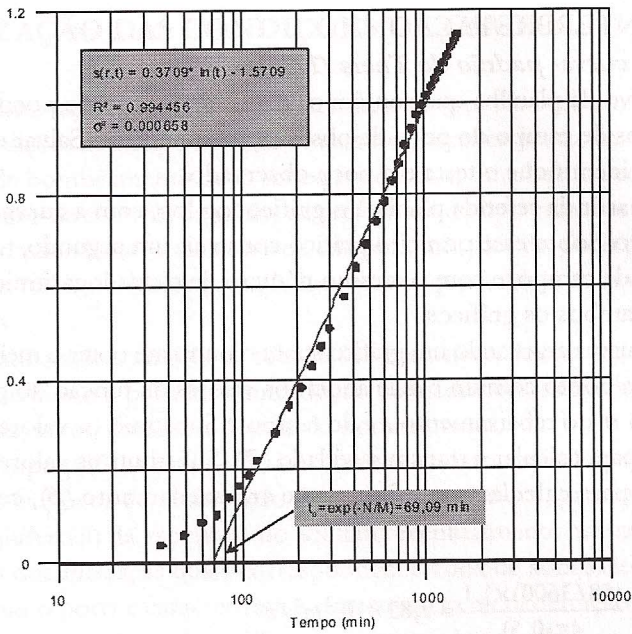


Fig. 2- Método de Cooper & Jacob (1946) com os dados do exemplo 1 ($r=430$ m).

$$T = \frac{Q}{4\pi M} = \frac{58/3600}{4\pi \times 0,3709} = 3,46 \times 10^{-3} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$S = \frac{2,25T}{r^2} \exp\left(-\frac{N}{M}\right) = \frac{2,25 \times 3,46 \times 10^{-3}}{430^2} \exp\left(\frac{1,5709}{0,3709}\right) \times 60 = 1,74 \times 10^{-4}$$

Comparação dos resultados do exemplo 1

MÉTODO	Transmissividade (m ² /s)	Armazenamento S
Theis (1935)	$2,82 \times 10^{-3}$	$2,65 \times 10^{-4}$
Aproximativo de Cooper & Jacob (1946)	$3,46 \times 10^{-3}$	$1,74 \times 10^{-4}$
Erro médio quadrático	0,05	0,12

2. Poço de diâmetro finito: Modelo de Papadopulos & Cooper (1967)

É idêntico ao modelo de Theis (1935) modificando-se apenas a condição de que o diâmetro do poço não é desprezível.

Exemplo 2 – Dados medidos em um poço amazonas construído no manto eluvial do granito Meruoca na cidade de Alcântaras – CE. O aquífero é livre, suposto confinado com correção de Jacob (1944). O poço, com diâmetro de 2,5 m e carga inicial de 2,52 m, foi bombeado durante 24 horas, com vazão constante de 3,03 m³/h.

Função do poço de Papadopulos & Cooper, 1967.

$s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T} F(u_w, \alpha) \quad (3.1)$	$u_w = \frac{r_w^2 S}{4Tt} \quad (3.2)$
--	---

Métodos de interpretação

No Nordeste do Brasil os poços tipo amazonas, com diâmetros da ordem de 3 m, são quase sempre pouco profundos e construídos em aquíferos livres. Os perfis litológicos e construtivos raramente estão disponíveis, o que torna difícil análises mais detalhadas incluindo as características do aquífero e do poço. A interpretação é geralmente conduzida pelo método de Papadopulos & Cooper (1967) fazendo-se previamente a correção de Jacob (1944) para a variação da espessura saturada inicial do aquífero h_0 , durante o teste. Essa correção consiste em substituir o rebaixamento medido no poço s_w , pelo rebaixamento equivalente em aquífero confinado s_c através da expressão:

$$s_c = s_w - \frac{s_w^2}{2h_0} \quad (4)$$

a) Método da curva-padrão de Papadopulos & Cooper (1967)

Abrir o arquivo da planilha que contém os dados da função do poço de Papadopulos & Cooper, e nele incluir os dados de campo do poço de observação em estudo. Salvar esse arquivo com um nome que identifique o teste e o poço observado.

· Construir a partir da referida planilha o gráfico log-log, com a curva padrão da função do poço, $[1/u_w$ versus $F(u_w, \alpha)]$. Sobre este, construir um segundo gráfico, (t, s) , também log-log, com os dados de campo, e com igual número de ciclos logarítmicos nos respectivos eixos de ambos os gráficos.

· Fazer a superposição arrastando um gráfico sobre o outro até obter o melhor ajuste (figura 3).

· Selecionar um ponto comum e dele anotar os valores das coordenadas $1/u_w$ versus $F(u_w, \alpha)$, da curva padrão e os valores do rebaixamento s e do tempo t , da curva de campo. Substituir os valores de (u_w, α) na equação (3.1) para calcular a transmissividade (T). Substituir os valores de u_w, t e T na equação (3.2) para calcular o coeficiente de armazenamento (S).

$$T = \frac{Q}{4\pi s_c} F(u_w, \alpha) = \frac{3,02 \times 2,2}{3600 \times 4\pi \times 0,4} = 3,68 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$S = \frac{4Tt}{r_c^2 \times 1/u_w} = \frac{4 \times 3,68 \times 10^{-4} \times 50 \times 60}{1,25^2 \times 45} = 0,06$$

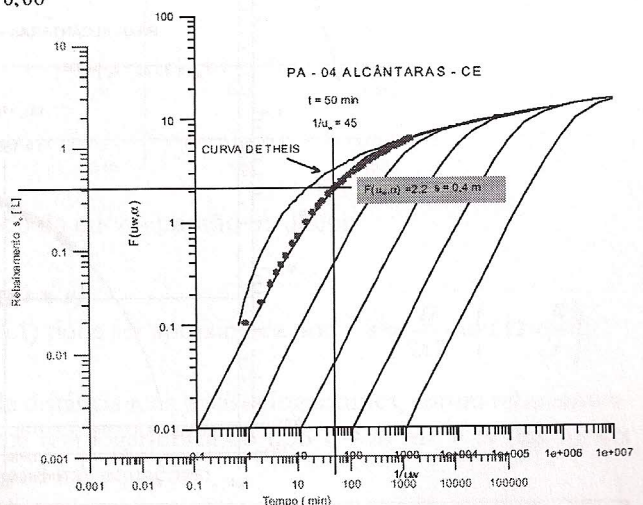


Fig. 3 – Método de Papadopulos & Cooper, 1967 para poço de diâmetro finito, com dados do exemplo 2.

b) Método da capacidade específica fractal –Manoel Filho (1996)

Esse método se aplica a todos os casos em que a vazão liberada do armazenamento do aquífero para o poço, durante um teste de bombeamento, não é constante, como é o caso dos testes em poços de grande diâmetro.

· Calcular a vazão Q_w , liberada do armazenamento no poço de raio r_w , na zona de rebaixamento, usando a equação

$$Q_w = \pi r_w^2 \frac{\Delta s_w}{\Delta t} \tag{5}$$

· Calcular a vazão liberada do aquífero Q_a , subtraindo Q_w da vazão bombeada, restando apenas os valores $Q_a \geq 0$, caso ocorram inconsistências.

· Construir o gráfico log-log da vazão específica $y_a = Q_a/S_c$ versus S_c , sendo S_c o rebaixamento obtido com a equação (4) e nele ajustar uma reta logarítmica do tipo $\log y_a^* = -D \log S_c + \log Q_a^*$. Com esse ajuste ficam determinados o fluxo fractal uniforme Q_a^* e a dimensão fractal D .

· Construir o gráfico padrão da função do poço $[1/u_w, W(u_w)]$ e sobre ele construir o gráfico de rebaixamento específico fractal versus tempo $(t, 1/y_a^*)$, com o mesmo número de ciclos logarítmicos nos respectivos eixos de ambos os gráficos.

· Fazer a superposição da curva de campo com a curva- padrão, arrastando um gráfico sobre o outro até obter o melhor ajuste (figura 4).

· Selecionar um ponto comum no plano dos dois gráficos e anotar os valores das coordenadas de ambos os gráficos, a saber: $1/u_w, W(u_w), 1/y_a^*$ e t . Calcular os parâmetros T e S usando as equações:

$$T = \frac{y_a^*}{4\pi} W(u) = \frac{15,15 \times 1}{3600(4\pi)} = 3,35 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$S = \frac{4Tt}{r_w^2 \times (1/u_w)} = \frac{4(3,35 \times 10^{-4})(160)(60)}{1,25^2(100)} = 0,08$$

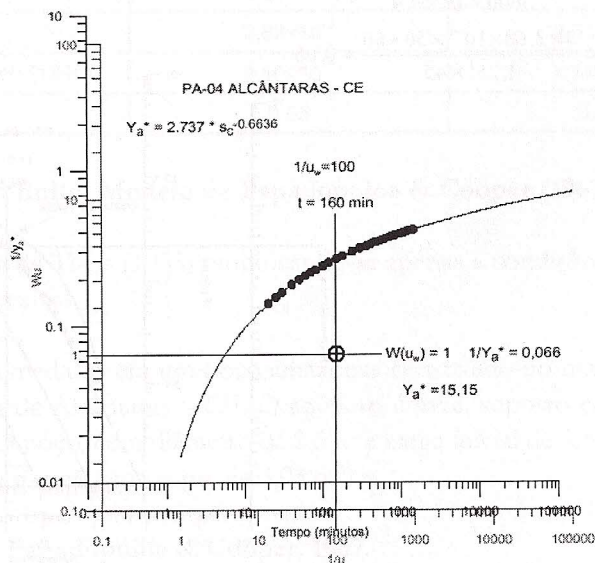


Fig. 4 – Método da capacidade específica fractal para poço de grande diâmetro, com dados do exemplo 2.

MÉTODOS PARA AQUÍFEROS CONFINADOS DRENANTES

Exemplo 3: Dados obtidos em um teste de bombeamento realizado no sistema aquífero Barreiras-Marituba em Bebedouro – Maceió (margem da Lagoa do Mundaú). A vazão bombeada foi de 33,8 l/s e os rebaixamentos foram medidos em 4 (quatro) poços de observação situados a distâncias de 80, 292, 347 e 640 m respectivamente.

Para esse exemplo, com dados coletados em três ou mais poços de observação, nos quais os níveis d'água praticamente atingiram a estabilização, podem ser usados os seguintes métodos (Hantush 1964):

1) REGIME ESTACIONÁRIO

a) Método da Curva-padrão de Jacob

O procedimento é análogo ao do método de Theis (exemplo 1a) porém a curva padrão utilizada é um gráfico log-log de x versus $K_0(x)$ e a curva de campo é a de rebaixamento s versus distância r . Como $x = r/B$, as coordenadas do ponto de superposição [$x, K_0(x), r$ e s (fig. 5)] permitem calcular T e K'/b' usando as equações:

$T = \frac{Q}{2\pi s} K_0(x) \quad (6.1)$	$\frac{K'}{b'} = T \left(\frac{x}{r} \right)^2 \quad (6.2)$
---	--

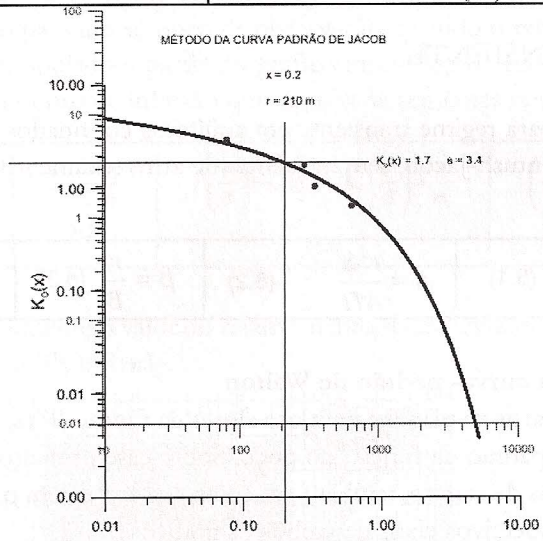


Fig. 5 – Método da curva-padrão de Jacob

b) Método da reta logarítmica ($r \times s$)

Quando $r/B < 0,05$ a equação (6.1) pode ser aproximada por $s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \left(1,12 \times \frac{B}{r} \right)$.

Controi-se o gráfico mono-log de distância r , na abscissa logarítmica, contra rebaixamento s na ordenada linear, e ajusta-se uma reta logarítmica do tipo $s = M \ln r + N$ (fig. 6). Os parâmetros T e K'/b' são avaliados usando as equações:

$T = \frac{Q}{2\pi M} \quad (7.1)$	$r_0 = \exp \left(-\frac{N}{M} \right) \quad (7.2)$	$\frac{K'}{b'} = T \left(\frac{1,12}{r_0} \right)^2 \quad (7.3)$
------------------------------------	--	---

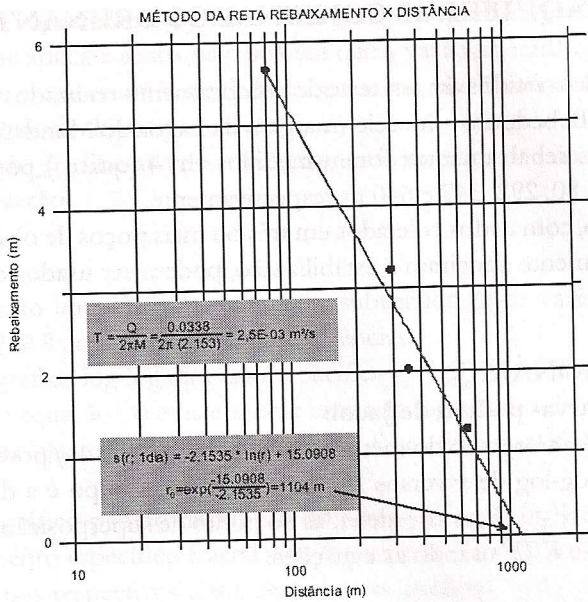


Fig. 6 – Método da reta logarítmica rebaixamento x distância (dados do exemplo 3).

2) REGIME TRANSIENTE

Os métodos para regime transiente em aquíferos confinados drenantes, baseiam-se na equação (8.1) de Hantush-Jacob, sem influência de armazenamento no aquífero.

$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, \beta) \quad (8.1)$	$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (8.2)$	$\beta = \frac{r}{B} \quad (8.3)$	$\frac{K'}{b'} = \frac{T}{B^2} \quad (8.4)$
--	-------------------------------------	-----------------------------------	---

a) Método da curva-padrão de Walton

· Construir a partir da planilha com os valores da função $W(u, \beta)$, o gráfico log-log, com a família de curvas padrão da função do poço. Sobre esse primeiro gráfico construir um segundo, com os dados de campo, também em escala log-log e com o mesmo número de ciclos logarítmicos nos respectivos eixos de ambos os gráficos.

· Fazer a superposição arrastando o gráfico de campo sobre a família de curvas padrão até encontrar a curva teórica que melhor se ajuste à curva de campo (figura 7).

· Selecionar um ponto comum e dele anotar os valores da função do poço $W(u, \beta)$ e dos seus argumentos u , e β , e ainda o rebaixamento s e o tempo t . Substituir os valores de $W(u, \beta)$ e s na equação (8.1) para calcular a transmissividade (T). Substituir os valores de u e T na equação (8.2) para calcular o coeficiente de armazenamento (S). O fator de drenança é obtido da relação $B = r/\beta$. Substituir T e B na equação 8.4 para calcular (K'/b') .

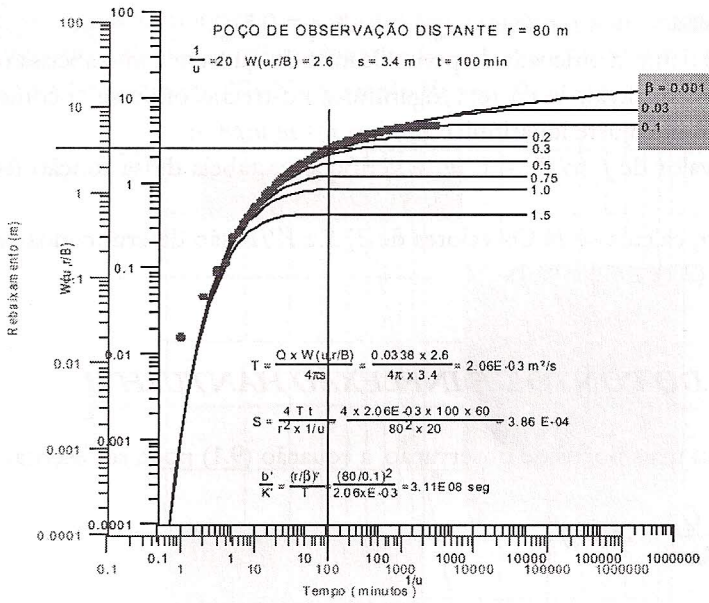


Fig. 7 – Método da curva-padrão de Walton, com dados do exemplo 3.

b) Método do ponto de inflexão Hantush I

Esse método é usado para um só poço de observação, quando o rebaixamento máximo (estacionário) pode ser extrapolado a partir do gráfico mono-log de rebaixamento ´ tempo. Esse gráfico apresenta um ponto de inflexão que satisfaz às seguintes relações:

$T = \frac{Q}{4\pi m_i} \exp\left(-\frac{r}{B}\right)$ <p>(9.1)</p>	$S = \frac{4T t_i}{2Br}$ <p>(9.2)</p>	$f\left(\frac{r}{B}\right) = \exp\left(\frac{r}{B}\right) K_0\left(\frac{r}{B}\right) = \frac{s_i}{m_i}$ <p>(9.3)</p>	$\left(\frac{K'}{b'}\right) = \frac{T}{B^2}$ <p>(9.4)</p>
---	---------------------------------------	---	---

s_i, m_i, t_i são respectivamente o valor do rebaixamento, a declividade da reta logarítmica e o valor do tempo t no ponto de inflexão.

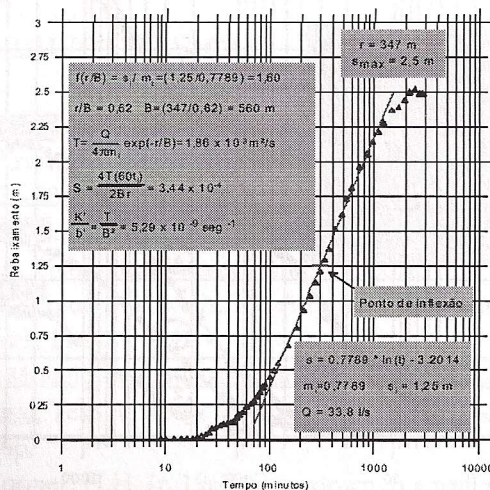


Fig. 10 – Método do ponto de inflexão Hantush I para um só poço de observação (dados do exemplo 3).

- Estime o rebaixamento máximo s_m e calcule $s_i = 0,5s_m$.
- Esse valor s_i define a ordenada do ponto de inflexão que tem como abcissa o valor de t_i .
- Determine a declividade da reta logarítmica no trecho onde se encontra o ponto de inflexão através de um ajuste logarítmico do tipo $s = m_i \ln t + n$.
- Calcule o valor de $f(r/B) = s_i/m_i$ e verifique na tabela dessa função (equação 9.3) o valor de r/B .

Conhecido r , calcula-se B . Os valores de T , S e K'/b' são determinados sucessivamente com as equações (9.1), (9.2) e (9.4).

C) MÉTODO DO PONTO DE INFLEXÃO HANTUSH II

Com dois ou mais poços de observação, a equação (9.1) pode ser escrita:

$$r = B \left[\ln \frac{Q}{4\pi T} - \ln(m_i) \right] \quad (10)$$

O gráfico mono-log de abcissa logarítmica m_i e ordenada linear r , da equação (14), é uma reta logarítmica com declividade B que intercepta o eixo $r = 0$ no ponto $(m_i)_0 = Q/4\pi T$. O procedimento adotado para o cálculo das propriedades hidráulicas do aquífero é o seguinte:

- Calcular, através de ajustes logarítmicos aos trechos retilíneos das curvas tempo-rebaixamento (t, s) de cada poço de observação (figura 9), as declividades m_i . Esses ajustes são do tipo $s = m \ln t + n$. Nos pontos de inflexão o rebaixamento $s_i = 0,5s_m$ e os tempos $t_i = \exp[(s_i - n)/m]$.

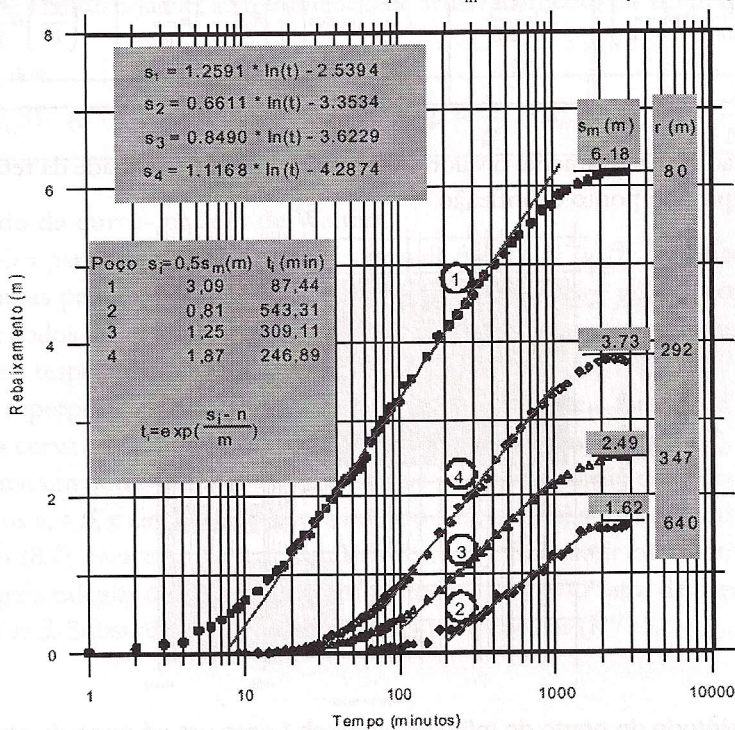


Fig. 9 – Cálculo de m e t no método do ponto de inflexão Hantush II (Dados do exemplo 3).

· Construir o gráfico mono-log dos pontos (m_i, r) com m_i na abcissa logarítmica e r na ordenada linear e nele efetuar um ajuste logarítmico do tipo $r = -B \ln(m_i) + C$, para obtenção dos valores de B e $(m_i)_0 = \exp(C/B)$. No exemplo (figura 10) tem-se $B = 764,251$ e $(m_i)_0 = 1,47$.

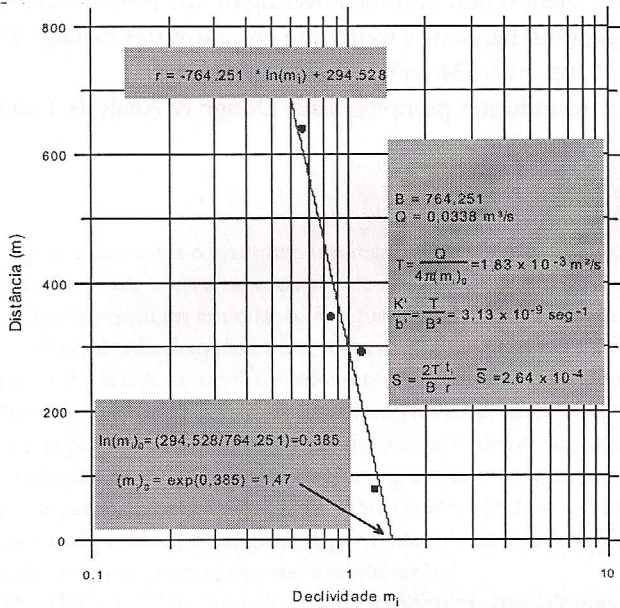


Fig. 10 – Cálculo de e no método do ponto de inflexão Hantush II (Dados do exemplo 3).

· Calcular T usando a equação $T = \frac{Q}{4\pi(m_i)_0}$

· Calcular o valor de K'/b' usando a relação $K'/b' = T/B^2$

· Calcular o valor de S para cada poço de observação usando a equação $S = (2T/B) \times (t/r)$.

O valor médio dessas determinações representa uma aproximação do valor médio de S na área do teste. No exemplo a média encontrada foi $S = 2,64 \times 10^{-4}$.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cooper, H. H. Jr. & Jacob, C. E. 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Trans. Am. Geophysical Union*, vol. 27, No. IV, pp. 526-534.
- Jacob, C. E. 1944. Notes on determining permeability by pumping tests under water-table conditions. U.S. Geological Survey Mimeo Report.
- Hantush, M. S. 1964. Hydraulics of wells. IN: *Advances in Hydrosience*. Ven Te Chow Ed. Vol. 1. Academic Press.
- Mizuel Filho, J. 1996. Modelo de dimensão fractal para avaliação de parâmetros hidráulicos em meio fissural. Tese de doutoramento. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. 196p.
- Papadopoulos, S.S. & Cooper, H.H. Jr. 1967. Drawdown in a well of large diameter. *Water Resources Research*. Vol. 3, No. 1, pp. 241-244.

- Stallman, R. W. 1971. Aquifer Test Design. Observations and Data Analysis. U.S. Geological Survey. Techniques of Water-Resources Investigations. Book 3, Chapter B1. *Apud Walton 1987, Groundwater Pumping Tests. Design & Analysis. Lewis Publishers. 201p.*
- Theis, C.V. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration or discharge of a well using ground-water storage. *Trans. Am. Geophysical Union*, vol. 16, pp. 519-524.
- Walton, W. C. 1987. Groundwater pumping tests. Design & Analysis. Lewis Publishers. 201 p.