

C. Almeida (1987)

Determinação da transmissividade e coeficiente de armazenamento por ensaios de recuperação

Hidrogeologia y Recursos Hidráulicos, t. XII, p. 689-694.

IV SIMPOSIO DE HIDROGEOLOGIA

DETERMINAÇÃO DE TRANSMISSIVIDADE E COEFICIENTE DE ARMAZENAMENTO POR ENSAIOS DE RECUPERAÇÃO

ALMEIDA, Carlos

Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

RESUMEN

Los ensayos de recuperación son frecuentemente utilizados en el estudio de los acuíferos siendo, en algunos casos, la única manera de evaluar sus características. El método más empleado, el de Theis, solo permite calcular la transmisividad y muchas veces su aplicación no es posible por no cumplirse las condiciones necesarias a su utilización.

Otros métodos permiten la obtención de la transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S) pero son poco fiables, y se basan en la extrapolación, después del periodo de bombeo, de los descensos observados durante este.

El método propuesto en este trabajo permite la obtención de los dos parámetros T y S ofreciendo las ventajas de ser totalmente automático e de poder utilizar datos para los cuales la aproximación de Jacob no es válida. El referido método se basa en el análisis de la sensibilidad de la función de pozo a pequeñas variaciones en los parámetros T y S. Otras aplicaciones deste principio a la interpretación de diferentes tipos de ensayos de bombeo han sido propuestos por varios autores como por ejemplo McELWEE (1980).

INTRODUÇÃO

Os ensaios de recuperação são correntemente utilizados no estudo dos aquíferos pois podem, em certos casos, ser a única forma de avaliar a sua transmissividade. Tal sucede, por exemplo, quando não se dispõe de piezómetros e as medições são feitas no poço onde se faz a bombagem. Neste caso o nível dinâmico é perturbado por perdas de carga devidas a diversos factores de que se destacam a travessia dos ralos e a circulação através da bomba e das tubagens (CUSTODIO e LLAMAS, 1976).

Os ensaios de recuperação são também úteis quando o caudal varia no decorrer da bombagem, pois não são demasiado sensíveis a essas variações. Neste caso pode-se usar um caudal médio ponderado (VILLANUEVA e IGLESIAS, 1984)

O método mais utilizado para a interpretação deste tipo de ensaios é o método proposto por THEIS (1935). Este método é de aplicação fácil, no entanto, apenas permite calcular a transmissividade. Além disso, para que o método de recuperação de Theis seja aplicável é necessário que se verifiquem as condições que permitem o emprego da

verifiquem as condições que permitem o emprego da aproximação de Jacob, não sendo geralmente válidas as observações feitas imediatamente após a paragem da bomba ou as que se fazem em piezómetros distantes.

Os métodos que permitem calcular o coeficiente de armazenamento a partir de ensaios de recuperação baseiam-se na decomposição dos rebaixamentos residuais em duas parcelas, uma correspondente ao prolongamento, para além do tempo de paragem da bomba, dos rebaixamentos produzidos pela bombagem, e outra correspondente à subida de nível produzida pela introdução, a partir do momento da paragem da bomba, dum caudal igual ao da extracção. Para se obter essa decomposição, ou se considera que a extracção entrou em regime de equilíbrio e neste caso considera-se o rebaixamento, produzido pela bombagem, constante - método de Houpeurt-Pouchan - (MARSILY, 1986) ou se extrapolam os rebaixamentos a partir do gráfico rebaixamentos-tempo (CUSTODIO e LLAMAS, 1976).

O segundo método é mais rigoroso mas tem o inconveniente, atrás referido, de necessitar de dados dos rebaixamentos produzidos durante a bombagem o que nem sempre é possível de obter.

O método proposto neste trabalho permite superar algumas das restrições dos métodos anteriores, sendo caracterizado por:

- fornecer a transmissividade e o coeficiente de armazenamento;
- poder utilizar dados obtidos num piezómetro e em tempos próximos do momento de paragem da bomba;
- ser totalmente automático.

O método baseia-se na análise da sensibilidade da função de poço a pequenas variações nos parâmetros transmissividade e coeficiente de armazenamento.

Uma aplicação desse tipo de análise à interpretação de ensaios de bombagem foi proposta por McELWEE (1980). No presente trabalho segue-se de perto a formulação daquele autor generalizando-a ao caso dos ensaios de recuperação.

FUNDAMENTAÇÃO DO MÉTODO

A equação que descreve o comportamento do nível piezométrico num aquífero confinado, após a paragem da bomba, deriva do princípio da sobreposição.

O rebaixamento ao fim de um tempo qualquer t' após cessar a extracção é dado pela equação

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[W\left(\frac{Sr^2}{4Tt}\right) - W\left(\frac{Sr^2}{4Tt'}\right) \right] \quad (1)$$

onde $t = t_b + t'$ e t_b a duração da bombagem

Q o caudal de extracção

T transmissividade

S coeficiente de armazenamento

$$W(u) = \int_u^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx$$

Pode considerar-se o rebaixamento residual como a soma de duas componentes, uma positiva e outra negativa:

$$s = s_p(r; t, T, S, Q) - s_n(r; t', T, S, Q)$$

Se introduzirmos uma pequena variação no parâmetro T tem-se:

$$s_p^*(r; t, T + \Delta T, S, Q) \text{ e}$$

$$s_n^*(r; t', T + \Delta T, S, Q).$$

Estas funções podem ser expressas numa série de Taylor. Se admitirmos que a variação ΔT é pequena pode-se desprezar o segundo termo e os seguintes, tendo-se neste caso:

$$s_p^*(r; t, T + \Delta T, S, Q) = s_p(r; t, T, S, Q) + U_T \Delta T \text{ e}$$

$$s_n^*(r; t', T + \Delta T, S, Q) = s_n(r; t', T, S, Q) + V_T \Delta T \text{ onde}$$

$$U_T = \frac{\partial s_p}{\partial T} \text{ e} \quad V_T = \frac{\partial s_n}{\partial T}$$

Da mesma forma uma pequena variação no parâmetro S dá origem a:

$$s_p^*(r; t, T, S + \Delta S, Q) = s_p(r; t, T, S, Q) + U_S \Delta S$$

$$s_n^*(r; t', T, S + \Delta S, Q) = s_n(r; t', T, S, Q) + V_S \Delta S \text{ onde}$$

$$U_S = \frac{\partial s_p}{\partial S} \text{ e} \quad V_S = \frac{\partial s_n}{\partial S}$$

As equações que permitem calcular U_T , U_S , V_T , V_S obtêm-se usando a regra de Leibnitz:

$$U_T = -\frac{s_p}{T} + \frac{Q}{4\pi T^2} \exp\left(-\frac{Sr^2}{4Tt}\right); \quad V_T = -\frac{s_n}{T} + \frac{Q}{4\pi T^2} \exp\left(-\frac{Sr^2}{4Tt'}\right)$$

$$U_S = -\frac{Q}{4\pi TS} \exp\left(-\frac{Sr^2}{4Tt}\right); \quad V_S = -\frac{Q}{4\pi TS} \exp\left(-\frac{Sr^2}{4Tt'}\right)$$

Deste modo o rebaixamento residual calculado após a introdução das pequenas variações ΔS e ΔT é dado pela expressão

$$s^* = s_p^* - s_n^* = s_p + U_T \Delta T + U_S \Delta S - s_n - V_T \Delta T - V_S \Delta S \text{ ou seja}$$

$$s^* = (s_p - s_n) + (U_T - V_T) \Delta T + (U_S - V_S) \Delta S$$

CALCULO DA TRANSMISSIVIDADE E COEFICIENTE DE ARMAZENAMENTO

Para calcular os parâmetros T e S a partir dos rebaixamentos residuais observados s_e , começa-se por fazer uma primeira estimativa desses parâmetros e, em seguida, determinar pelo método dos mínimos quadrados os valores de ΔS e ΔT que minimizam o somatório

$$\sum [s_e(t_i) - s^*(t_i')]^2$$

A estimativa de T faz-se usando dois rebaixamentos observados

$$T = \frac{Q}{4\pi \alpha} \quad \text{onde} \quad \alpha = \frac{s_{e_n} - s_{e_m}}{\ln(t_n/t'_n) - \ln(t_m - t'_m)}$$

n = número de medições; m = INT(n/2)

A S atribui-se o valor fixo de 10^{-4} . Se o cálculo não convergir pode-se tentar outro valor.

Para obter os melhores valores para ΔS e ΔT , no sentido dos mínimos quadrados, deriva-se o somatório $E(\Delta S, \Delta T) = \sum [s_e(t'_i) - s^*(t'_i)]^2$ em ordem a ΔS e ΔT obtendo-se:

$$\frac{\partial E}{\partial \Delta T} = -\sum \{[U_T(t'_i) - V_T(t'_i)][s_e(t'_i) - s_p(t'_i) + s_n(t'_i)]\} + \Delta T \sum [U_T(t'_i) - V_T(t'_i)]^2 + \Delta S \sum \{[U_S(t'_i) - V_S(t'_i)][U_T(t'_i) - V_T(t'_i)]\} = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial \Delta S} = -\sum \{[U_S(t'_i) - V_S(t'_i)][s_e(t'_i) - s_p(t'_i) + s_n(t'_i)]\} + \Delta T \sum \{[U_T(t'_i) - V_T(t'_i)][U_S(t'_i) - V_S(t'_i)]\} + \Delta S \sum [U_S(t'_i) - V_S(t'_i)]^2 = 0$$

Usando as seguintes convenções:

$$SQ1 = \sum [U_S(t'_i) - V_S(t'_i)]^2$$

$$SQ2 = \sum [U_T(t'_i) - V_T(t'_i)]^2$$

$$SP1 = [U_S(t'_i) - V_S(t'_i)][U_T(t'_i) - V_T(t'_i)]$$

$$SP2 = \sum \{[U_S(t'_i) - V_S(t'_i)][s_e(t'_i) - s_p(t'_i) + s_n(t'_i)]\}$$

$$SP3 = \sum \{[U_T(t'_i) - V_T(t'_i)][s_e(t'_i) - s_p(t'_i) + s_n(t'_i)]\}$$

Podemos finalmente obter

$$\Delta S = \frac{SQ2 \cdot SP2 - SP1 \cdot SP3}{SQ1 \cdot SQ2 - SP1^2} \quad \text{e} \quad \Delta T = \frac{SP3 - SP1 \cdot \Delta S}{SQ2}$$

Os valores de ΔS e ΔT assim obtidos são usados para corrigir as estimativas de T e S. Assim, por um processo iterativo, obtêm-se sucessivos valores de T e S cada vez mais próximos dos valores procurados.

No caso presente, considerou-se como critério de convergência um erro inferior a 10% entre duas estimativas consecutivas de T e S.

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Aplicou-se o método ao cálculo de T e S de vários ensaios efectuados ou com dados colhidos na literatura. Para ilustrar essas aplicações seleccionaram-se os dois exemplos seguintes:

Exemplo 1 – Bombagem durante 180' a um caudal de 1200 m³/dia, num aquífero com T = 150 m²/dia e S = 10⁻³. Observações num piezômetro situado a 25 m.

Os rebaixamentos observados foram os seguintes:

Tempo t' (min)	Rebaixamentos (m)
1	2.63
2	2.48
3	2.34
4	2.22
5	2.13
10	1.79
15	1.58
20	1.42
30	1.21
60	0.87
120	0.58
150	0.50

Os valores calculados pelo método foram: $T = 150 \text{ m}^2/\text{dia}$, $S = 9.9 \times 10^{-4}$.

Exemplo 2 - A aplicação do método aos dados citados por CUSTODIO e LLAMAS (1976), pag. 692/3 forneceu os valores $T = 250 \text{ m}^2/\text{dia}$ e $S = 1.96 \times 10^{-3}$ contra os valores $T = 273 \text{ m}^2/\text{dia}$ e $S = 2.27 \times 10^{-3}$ referidos na citada obra e obtidos por um processo gráfico.

Nas figuras 1 e 2 pode apreciar-se o ajuste entre as curvas teóricas resultantes da introdução dos parâmetros T e S , calculados pelo método, na equação (1) e os pontos observados.

Noutras aplicações do método verificou-se, por vezes, que os valores obtidos usando apenas uma parte da série de observações eram mais fidedignos que os resultantes da utilização da série completa. Neste caso é preferível usar a parte da série correspondente às primeiras observações pois nestas o erro de medida tem um peso menor já que os rebaixamentos são maiores.

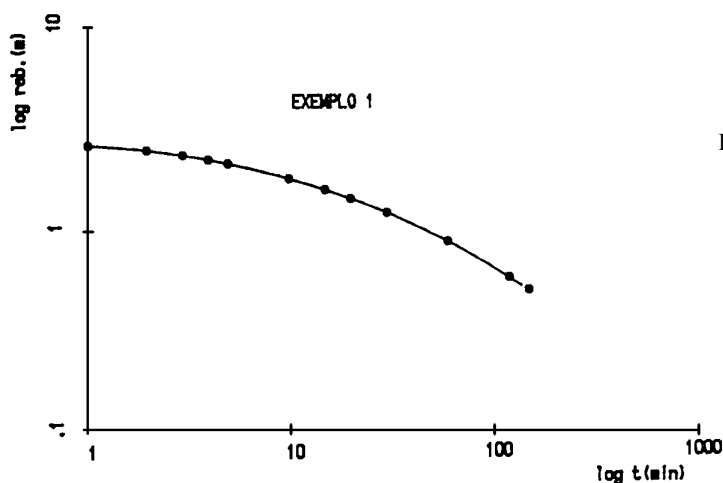


Fig. 1

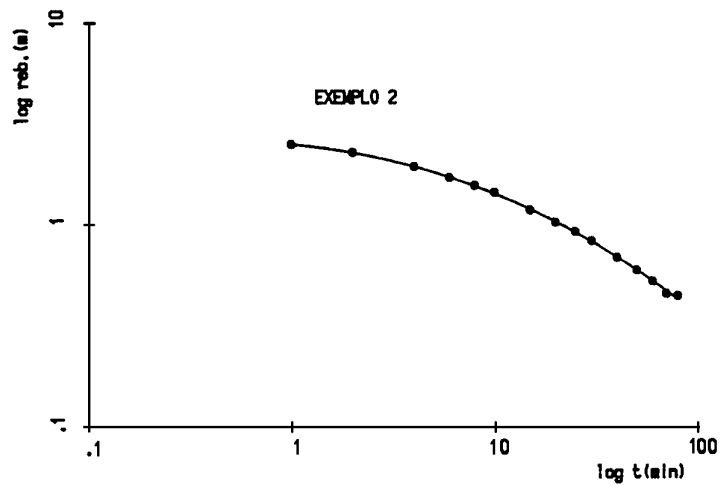


Fig. 2

REFERENCIAS

- Custodio, E. e M.R. Llamas (1976). "Hidrología Subterránea". Editorial Omega. Barcelona.
- Villanueva, M.M. e A.I. Lopez (1984). "Pozos e Acuíferos. Técnicas de Evaluación Mediante Ensayos de Bombeo". Inst. Geol. y Minero de España. Madrid.
- Theis, C.V. (1935). "The relation between lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage". Trans. Am. Geophys. Union, vol. 16, part 2, p. 519-524.
- Marsily, G. de (1986). "Quantitative Hydrogeology". Acad. Presa, Inc., 440 p.
- McElwee, C.D. (1980). "Theis Parameter Evaluation from Pumping Tests by Sensitivity Analysis". Ground Water, vol. 18(1), p. 56-60.