

J. Delgado Rodrigues, C. Almeida e A. S. Lopes (1989)

**Interpretação automática de ensaios em patamares de
caudal. II – Aplicações**

Recursos Hídricos, revista da Associação Portuguesa dos
Recursos Hídricos, vol. 10, fasc. 1 a 3, p. 65-70.

INTERPRETAÇÃO AUTOMÁTICA DE ENSAIOS EM PATAMARES DE CAUDAL

II - APLICAÇÕES

AUTOMATED ANALYSIS OF STEP-DRAWDOWN TESTS

II - APPLICATIONS

J. Delgado Rodrigues

Geólogo, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, membro da APRH nº 333

Carlos Almeida

Geólogo, Departamento de Geologia da F. C. U. L., membro da APRH nº 506

Ana Rita S. Lopes

Geóloga, Direcção-Geral dos Recursos Naturais, membro da APRH nº 755

RESUMO - Na primeira parte deste trabalho (ALMEIDA et al., 1989) apresentam-se os fundamentos teóricos para alguns métodos utilizáveis na interpretação de ensaios em patamares de caudal.

Em seguida, descrevem-se sucintamente os programas de computador correspondentes a esses métodos e, ainda, alguns desenvolvidos por outros autores ou por nós, mas baseados em ideias propostas anteriormente por outros autores.

O objectivo é facilitar a interpretação dos ensaios e a sua optimização por forma a incentivar a realização sistemática de ensaios nos milhares de captações que são executadas anualmente em Portugal.

ABSTRACT- This paper describes several programs for step-drawdown tests analysis whose fundamentals are presented in the first part (ALMEIDA et al. 1989).

The availability and simplicity of automated methods here proposed aim to make easier the treatment of this kind of tests and to contribute to the improvement of their efficiency and to stimulate people in the execution and interpretation of tests in the thousands of wells drilled each year in Portugal.

1 - INTRODUÇÃO

Os ensaios de bombagem em patamares de caudal são largamente usados em Portugal, embora essa grande quantidade de ensaios nem sempre corresponda a situações suficientemente caracterizadas do ponto de vista hidrogeológico.

Os ensaios, nessas circunstâncias, são claramente subaproveitados, resultando, portanto, em investimento: quase inúteis.

Julgam os autores que tal situação radica, em parte, na insuficiente divulgação das metodologias de interpretação dos ensaios, em especial das de aplicação mais simples, e que funcionará como inibidor para a execução cuidada dos ensaios e para a sua interpretação completa.

Em trabalho apresentado neste número (ALMEIDA et al., 1989) os autores fazem considerações sobre os aspectos teóricos ligados à interpretação de ensaios de bombagem, indicam alguns métodos mais correntes para essa interpretação e apresentam novos métodos.

O presente trabalho é o complemento do anterior e tem como objectivo apresentar alguns casos práticos, fazer discussão dos resultados e fornecer indicações de diversos programas de cálculo automático para interpretação dos ensaios.

2 - REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS EM PATAMARES DE CAUDAL

Existem, basicamente, dois tipos de ensaios em patamares de caudal, conforme se processa, ou não, a recuperação de níveis entre cada dois patamares consecutivos.

Do ponto de vista teórico, a existência do período de recuperação de níveis é vantajoso porque:

- dispensa correcções para eliminar a sobreposição de efeitos provocados pelos patamares anteriores;
- reduz as probabilidades de interferência de efeitos devidos a fronteiras do aquífero.

Do ponto de vista prático, este esquema de ensaio é, também, aliciente porque:

- é mais versátil, uma vez que a ordem de execução dos patamares é arbitrária;
- os intervalos entre patamares podem ter duração variável e podem ser suficientemente longos para permitir interrupções de períodos de trabalho da equipa de ensaio;
- a duração da bombagem pode ser curta, uma vez que toda a interpretação é válida para regime transitório;
- os dados do ensaio são de preparação mais fácil.

A duração dos períodos de bombagem merece algumas considerações. Qualquer dos métodos, em teoria, pode ser aplicado com durações de bombagem curtas. No entanto, na prática, o ensaio com patamares sucessivos exige que o rebaixamento de cada um deles seja corrigido para os efeitos dos patamares anteriores. Nestas circunstâncias, se os períodos forem curtos, o regime é, ainda, fortemente transitório e os erros introduzidos no cálculo dos níveis teóricos de cada um dos patamares anteriores podem atingir valores muito significativos. Habitualmente, para reduzir este inconveniente, prolonga-se a bombagem até se atingir um regime quase-estacionário. Mas esta prática conduz, de facto, a períodos de bombagem mais longos e, teoricamente, desnecessários.

Para se entenderem estas especificidades é conveniente distinguir o que é um ensaio de captação do que é um ensaio de aquífero. No primeiro caso, todas as interpretações são feitas em regime transitório, pelo que são desnecessários longos períodos de bombagem.

Por sua vez, nos ensaios de aquífero, pode justificar-se o prolongamento da duração de bombagem até atingir regimes estacionários ou quase-estacionários, ou para detectar comportamentos específicos devidos a fronteiras, a interferências com outras captações, etc. Contudo, não só não é necessário prolongar todos os patamares para obter estas informações, como é mais recomendável que elas sejam obtidas apenas durante um só escalão de bombagem executado a caudal constante rigorosamente controlado.

Em condições normais, o esquema de ensaio que inclui a recuperação de níveis entre patamares consecutivos pode ser realizado com durações entre 30 e 60 minutos por patamar, seguidas de igual período de repouso. Nesta modalidade, um dia de trabalho normal pode permitir realizar entre 6 e 8 patamares, número já bastante satisfatório para uma interpretação suficientemente rigorosa.

3 - INTERPRETAÇÃO AUTOMÁTICA DOS ENSAIOS

3.1 - Códigos utilizados

Na primeira parte deste trabalho (ALMEIDA et al., 1989), apresentam-se os fundamentos de diversos programas para interpretação automática de ensaios em patamares de caudal, nomeadamente:

WELOSS - Elaborado por RODRIGUES e LOPES (1988) com base em teoria desenvolvida por NAHM (1980). Pressupõe $n = 2$ e aplica-se a ensaios com recuperação de níveis entre patamares. Calcula o coeficiente C, o valor de T e estima a ordem de grandeza de S. Elimina valores anómalos e apresenta valores individuais e médias de um conjunto cujo número de elementos pode ser seleccionado pelo operador. Corresponde ao método I, referido por ALMEIDA et al. (1989).

STEPT1 - Calcula o valor de n, C, transmissividade e a variável composta Sr^2 . Necessita de, pelo menos, três observações de rebaixamento no primeiro escalão e de, pelo menos, uma em cada um dos escalões seguintes. Corresponde ao método II referido em ALMEIDA et al. (1989).

STEPT2 - Calcula o valor de n, de B e de C. Necessita de três, ou mais, observações feitas ao fim do mesmo tempo de bombagem, após cada mudança de caudal. Os rebaixamentos deverão ser corrigidos da influência dos patamares anteriores no caso de a bombagem se efectuar sem recuperação entre patamares. Corresponde ao método III referido em ALMEIDA et al. (1989).

STEPREG - Calcula os valores de transmissividade para cada patamar de caudal usando a metodologia descrita em ALMEIDA et al. (1989), método IV. Aplica-se a ensaios escalonados. Para este programa não é necessário corrigir os rebaixamentos dos efeitos dos escalões anteriores.

Além destes programas, baseados nos métodos descritos na primeira parte deste trabalho, indicamos, ainda, os programas seguintes e os trabalhos que lhes deram origem. Estes programas encontram-se à disposição dos eventuais interessados.

FASTEP - Elaborado por LABADIE & HELWEG (1975) para ensaios em escalões sucessivos. Calcula o valor de n, de B e de C para cada conjunto de rebaixamentos correspondentes a tempos iguais de bombagem dentro de cada escalão. A utilização sequencial de um programa de correlação permite seleccionar o valor de n que conduz aos menores desvios em relação aos dados reais registados (RODRIGUES & LOPES, 1988).

STEPRA - Baseado no método proposto por MILLER & WEBER, Jr. (1983), calcula os mesmos parâmetros do programa anterior, ainda que por método diferente.

STEPTTEST - Elaborado por ALMEIDA (1987), utiliza dados de ensaios escalonados. Calcula o valor de

n, de B e de C, tal como os anteriores, embora utilizando método e algoritmo diferentes.

Os programas referidos anteriormente utilizam as linguagens FORTRAN 77 e Quick-BASIC, correndo em microcomputadores tipo IBM ou compatíveis.

3.2 - Aplicações a casos reais

Para teste dos diversos programas utilizam-se dados de diversos ensaios de bombagem, inéditos ou retirados da bibliografia. A fim de permitir aos potenciais utilizadores destes programas verificar a correcção dos resultados com eles obtidos, apresentam-se os dados brutos dos ensaios e os resultados da interpretação de cada um dos programas utilizados. Uma vez que o tratamento dos dados de ensaios feitos com recuperação entre patamares é diferente do de ensaios escalonados, dão-se em seguida exemplos de aplicação aos dois tipos de ensaios. Na apresentação dos cálculos indicam-se, nalguns casos, valores dos parâmetros dos aquíferos com um número de casas decimais que não correspondem à precisão dos próprios cálculos, nem têm sentido em termos hidrogeológicos. A sua indicação destina-se, exclusivamente, a servir como elemento de controlo das saídas dos programas.

3.2.1 - Ensaios com recuperação entre patamares

Podem ser utilizados para interpretação deste tipo de ensaios os programas WELOSS, STEPTEST, STEPT2 e STEPREG, já referidos, sendo os três últimos igualmente aplicáveis a ensaios escalonados.

O programa WELOSS foi testado inicialmente usando os dados publicados no artigo que serviu de base (NAHM, 1980).

Quadro I
Ensaio JKc9 – efectuado com recuperação
Entre patamares

Caudais t (min)	3,9 l/s s (m)	5,8 l/s s (m)	7,1 l/s s (m)	2,2 l/s s (m)
1	1.80	5.96	7.73	1.63
2	2.19	8.11	10.11	2.02
3	3.50	9.06	11.82	2.25
4	4.49	9.91	13.04	2.34
5	5.72	10.38	13.73	2.40
6	6.10	10.75	14.25	2.49
7	6.62	10.97	14.71	2.54
8	6.79	11.28	15.08	2.64
9	7.02	11.61	15.36	3.05
10	7.19	12.03	15.58	3.22
12	7.43	12.52	15.93	3.35
14	7.63	12.96	16.19	3.20
16	7.77	13.23	16.42	3.19
18	7.88	13.46	16.59	3.18
20	7.98	13.73	16.77	3.18
25	8.14	14.07	17.10	3.20
30	8.23	14.19	17.33	3.32
40	8.45	14.47	17.91	3.78
50	8.52	14.64	18.19	3.83
60	8.62	14.79	18.29	3.84

O valor de transmissividade obtido usando o programa foi de 1264 m²/dia o que concorda bastante bem com o valor obtido no referido trabalho: 1310 m²/dia.

O método foi posteriormente utilizado para interpretar dois ensaios, feitos com recuperação entre patamares de caudal, conduzidos por um dos signatários (J.D.R.) em captações do Gabinete da Área de Sines. Os dados referentes a esses ensaios constam dos quadros I e II.

Quadro II
Ensaio JKc10 – efectuado com recuperação
entre patamares

Caudais t (min)	7,0 l/s s (m)	9,9 l/s s (m)	12,8 l/s s (m)	17,5 l/s s (m)	18,68 l/s s (m)
1	5.00	6.77	8.47	11.48	13.79
2	6.00	8.36	10.63	15.91	13.37
3	6.27	8.87	11.43	17.22	18.78
4	6.33	9.14	11.85	17.84	19.45
5	6.40	9.31	12.35	18.24	19.9
6	6.45	9.43	12.80	18.54	20.21
7	6.50	9.52	13.04	13.76	20.42
8	6.55	9.60	13.18	18.89	20.51
9	6.59	9.66	13.29	18.97	20.53
10	6.64	9.70	13.39	19.13	20.74
12	6.74	9.79	13.55	19.29	20.93
14	6.78	9.87	13.63	19.47	20.96
16	6.87	9.94	13.72	19.53	21.4
18	6.93	10.00	13.87	19.58	21.97
20	6.99	10.05	13.92	19.66	22.41
25	7.08	10.16	14.05	19.79	23.54
30	7.13	10.21	14.15	19.89	24.1
40	7.22	10.37	14.30	20.06	24.48
50	7.29	10.49	14.43	20.21	24.71
60	7.34	10.54	14.45	20.14	24.76

O programa WELOSS forneceu os seguintes resultados:

JKc9: $C = 2,32 \times 10^{-5}$; $T = 21 \text{ m}^2/\text{dia}$;

$S = 0,344$ ($n = 2$)

JKc10: $C = 1,86 \times 10^{-6}$; $T = 113 \text{ m}^2/\text{dia}$;

$S = 3,73 \times 10^{-5}$ ($n = 2$)

Para o conjunto de valores referente ao primeiro ensaio o programa STEPT2 não convergiu pelo que se utilizou a opção de ajuste interactivo. Neste caso obtiveram-se os valores:

ensaio no JKc9: $B = 0,0141$; $C = 2,99 \times 10^{-5}$; $n=2$.

ensaio no JKc10: $B = 9,74 \times 10^{-3}$; $C = 3,0 \times 10^{-6}$; $n=2$.

3.2.2 - Ensaios escalonados

A aplicação do programa STEPREG é sobretudo interessante em ensaios escalonados. Nos ensaios com recuperação entre patamares o programa só se pode aplicar a cada conjunto isolado de observações correspondentes a cada patamar de caudal. Neste caso o método não é mais do que a automatização do método gráfico de Jacob. No caso presente, o programa STEPREG forneceu, para o ensaio

no JKc9, valores de transmissividade situados entre 14 e 27,4m²/dia e para o ensaio no JKc10, valores situados entre 125 e 170 m²/dia, que concordam bastante bem com os obtidos pelo programa WELOSS.

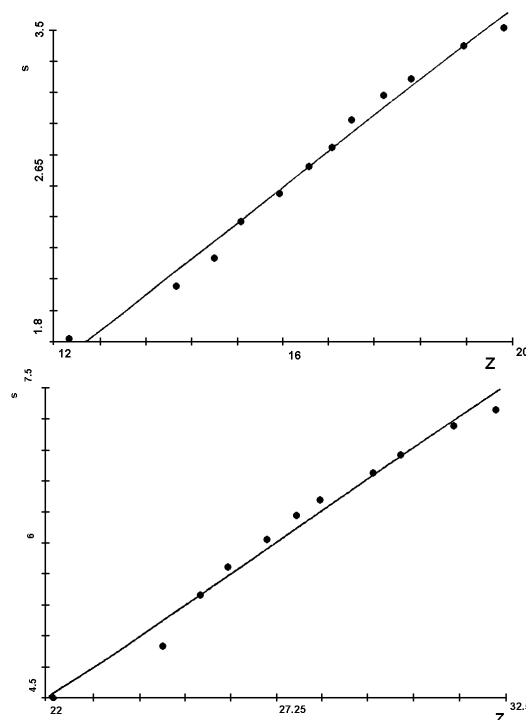
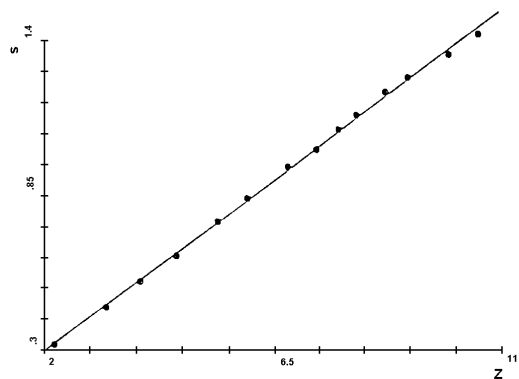
A aplicação do método aos dados do ex. 1 de CUSTÓDIO & LLAMAS (1976), p. 830 e seguintes, forneceu os valores de $T = 1070$, $T = 1164$ e $T = 1155$ m²/dia para o primeiro, segundo e terceiro escalões, respectivamente. O valor referido por aqueles autores, obtido por um ensaio clássico, é de 1000 m²/dia, muito próximo, portanto, do valor obtido pelo nosso método.

Para o exemplo referido por VILLANUEVA & IGLESIAS (1984), p. 240, o método forneceu os valores de 608, 300 e 300 m²/dia para o primeiro, segundo e terceiro escalões, respectivamente. Como se pode verificar nas figuras, obteve-se uma aderência notável dos dados à recta de regressão. No caso presente verifica-se uma variação do valor da transmissividade quando se passa do primeiro para os outros escalões.

A aplicação do método a outros exemplos colhidos na bibliografia e a dados disponíveis, mostra, por vezes, o mesmo fenómeno, isto é, variações no valor da transmissividade no decorrer do ensaio. Pensamos que tal pode dever-se ao facto de que, à medida que o cone de rebaixamento se alarga, se vão obtendo valores médios representativos de volumes cada vez maiores do aquífero pelo que, em geral, se nota uma tendência para os valores correspondentes aos últimos escalões serem mais estáveis.

A fim de melhorar as estimativas eliminando os pontos mais afastados da tendência geral, introduziu-se no programa a projecção dos dados no visor, bem como a recta de regressão e a possibilidade de eliminação de alguns deles pelo operador. Verifica-se que, em geral, são as primeiras observações que se afastam mais. Isto pode ser devido ao facto de não se conseguir uma rápida estabilização do caudal quando se faz a mudança, o que afecta mais as observações mais próximas do instante em que esta mudança se produz.

O programa STEPT1 foi testado usando um conjunto de valores correspondentes a um ensaio fictício feito



num aquífero com $T = 150$ m²/dia, $S = 0,0001$, $r_e = 0,5$ m, $C = 10^{-7}$, $n = 2,2$ e $Sr_e^2 = 2,5 \times 10^{-5}$.

No quadro III referem-se os tempos e caudais e no quadro IV os rebaixamentos calculados (m).

Os valores obtidos, para as estimativas iniciais: $Sr_e^2 =$

$1,9 \times 10^{-6}$, $T = 250$ m²/dia, $C = 10^{-6}$ e $n = 2$, foram:

$T = 150,11$ m²/dia

$Sr_e^2 = 2,47 \times 10^{-5}$

$C = 9,9 \times 10^{-8}$

$n = 2,202$

Quadro III

t (min)	Q (m ³ /dia)
0	432
30	864
60	1296
90	1728

Quadro IV

tempos (min)	Rebaixamentos (m)
10	2,687
20	2,845
30	2,938
50	6,064
70	9,339
120	13,557

Fig. 1 - a) 1º escalão; b) 2º escalão; c) 3º escalão.

Como se pode apreciar, mesmo com estimativas iniciais bastante afastadas dos valores reais, obtêm-se valores finais praticamente iguais aos verdadeiros.

A aplicação do método ao mesmo conjunto de valores, mas após arredondamento dos valores de rebaixamento, mostra a sensibilidade do cálculo dos parâmetros à precisão das medidas.

Usaram-se dois conjuntos de valores (quadro V).

Quadro V

tempos (min)	Conjunto a)	Conjunto b)
10	2,69	2,70
20	2,85	2,80
30	2,94	2,90
50	6,06	6,00
70	9,34	9,30
120	13,56	13,60

Usando as mesmas estimativas iniciais o método forneceu os resultados seguintes:

$$Sr_e^2 = 2,5 \times 10^{-5}$$

	Conjunto a)	Conjunto b)
T:	152,3 m ² /dia	175,98 m ² /dia
C:	$5,6 \times 10^{-8}$	$4,22 \times 10^{-9}$
n:	2,276	2,644
$Sr_e^2 = 2,02 \times 10^{-5}$		$3,584 \times 10^{-6}$

Verifica-se, pois, que no caso b) os valores obtidos se afastam consideravelmente dos verdadeiros, sobretudo no que se refere às estimativas de C e n. No entanto, na prática é possível obter medidas de rebaixamento com erros inferiores aos do caso b).

A aplicação do método a alguns ensaios referidos na bibliografia nomeadamente em CUSTÓDIO & LLAMAS (1976) e VILLANUEVA & IGLESIAS (1984) não forneceu resultados concludentes. Este facto reflecte quer dificuldades experimentais quer insuficiência da equação dos rebaixamentos para descrever adequadamente o fenómeno.

Este facto já tinha sido mencionado por COOLEY & CUNNINGHAM (1979) que referem a quase impossibilidade de se obterem estimativas do coeficiente de armazenamento a partir de medições feitas na própria captação. Entre os factos que podem concorrer para essas dificuldades têm sido referidos: variações na transmissividade e variações no valor de n em consequência de modificações no tipo de escoamento, etc.

O programa STEPT2 foi testado usando dados referidos em diversos trabalhos e em dados obtidos por nós, fornecendo, em geral, resultados bastante próximos dos que se obtêm recorrendo a outros métodos,

A título ilustrativo, aplicou-se o método aos exemplos 12, 13 e 14 em VILLANUEVA & IGLESIAS (1983), 240 e seguintes, tendo-se obtido os seguintes resultados:

parâmetro	programa STEP2	valor referido
exemplo 12		
B	$4,118 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-4}$
C	$1,035 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-7}$
n	2,044	2
exemplo 13		
B	$1,264 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-4}$
C	$4,605 \times 10^{-7}$	$2,7 \times 10^{-7}$
n	1,94	2
exemplo 14		
B	$1,502 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$
C	$9,093 \times 10^{-9}$	$4,0 \times 10^{-9}$
n	2,756	2,80

Tal como acontece com o programa STEPREGR, também no programa STEPT2 se inclui a possibilidade de se visualizar o gráfico com os pontos experimentais e o ajuste obtido e, ainda, a possibilidade de se proceder ao ajuste semiautomático, fazendo o operador variar o valor de n, no caso de não se ter obtido convergência.

3.3 - Resumo das características principais dos programas e conclusões

Um dos objectivos deste trabalho é apresentar um conjunto de programas que podem ser utilizados na interpretação automática de ensaios em patamares de caudal.

A escolha do programa a usar depende do tipo de ensaio e da qualidade dos dados. Assim, no caso de ensaios com recuperação de nível entre patamares, o programa WELOSS permite obter boas estimativas da transmissividade e do coeficiente C, característico da captação, e, ainda, uma estimativa da ordem de grandeza do coeficiente de armazenamento.

Ainda em ensaios do mesmo tipo mas quando apenas se faz uma observação de rebaixamento em cada patamar de caudal, o programa STEPT2 permite obter o valor dos parâmetros n, B e C.

Para o caso de ensaios escalonados, isto é, sem recuperação entre cada mudança de caudal, o programa STEPT1 permite obter os parâmetros n, C, transmissividade e o factor Sr_e^2 . Para o usar são necessárias, pelo menos, três observações no primeiro escalão e, pelo menos, uma em cada um dos escalões seguintes.

No caso de dados de má qualidade ou comportamento da captação que se afaste significativamente do comportamento teórico, este programa pode apresentar problemas de convergência ou fornecer resultados absurdos. Nesse caso pode-se usar o programa STEPT2, já referido, sendo necessário efectuar correcções aos rebaixamentos verificados a partir do primeiro escalão.

O programa STEPREGR aplicável ao mesmo tipo de ensaios fornece boas estimativas da transmissividade embora não forneça valores relativos à captação.

A aplicação dos vários métodos aos dados de que dispúnhamos parece indicar que os modelos utilizados até agora para interpretação de ensaios escalonados se revelam muitas vezes inadequados. Tal facto poderá ser devido a variações dos parâmetros que figuram na equação dos rebaixamentos, no decurso do ensaio, nomeadamente quando se muda de caudal, e que poderão ser devidas a modificações no regime de escoamento e/ou a mudanças reais nos parâmetros do aquífero devido

ao alargamento progressivo do volume influenciado pela bombagem.

Admitimos que, em muitos casos, a não adesão dos dados aos modelos disponíveis se deve à imprecisão das observações. Esta imprecisão afecta de forma diferente o cálculo dos vários parâmetros, sendo os parâmetros B e C da equação dos rebaixamentos os mais sensíveis.

Pensamos que se justificaria uma investigação mais aprofundada deste tema, usando grande quantidade de dados, obtidos com a maior precisão possível, e referentes a ensaios efectuados em condições hidrogeológicas bem caracterizadas.

BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, C., 1987 - *Novo método para resolução da equação dos rebaixamentos em ensaios a caudal variável*. «Geolis», 1, pp. 101-103.
- ALMEIDA, C., J. D. RODRIGUES & A. R. S. LOPES, 1989 - *Interpretação automática de ensaios em patamares de caudal. I – Aspectos teóricos*. (Nesta publicação.)
- COOLEY, R. L. and A. B. CUNNINGHAM, 1979 - *Consideration of total energy loss in theory of flow to wells*. «Jour. of Hydrology», 43, pp. 161-184.
- CUSTÓDIO, E. & M. R. LLAMAS, 1976 - *Hidrologia Subterránea*. Tomo I, Ed. Omega, Barcelona.
- LABADIE, J. W. & O. J. HELWEG, 1975 - *Step-drawdown test analysis by computer*. «Ground-Water», 13(5), pp. 438-449.
- MILLER, C. T. & W. J. WEBER, Jr., 1983 - *Rapid solution of the non linear step-drawdown equation*. «Ground Water», 21(5), pp. 584-588.
- NANAM, G. Y., 1980 - *Estimating transmissivity and well loss constant using multirate test data from a pumped well*. «Ground Water», 18(3), pp. 281-285.
- RODRIGUES, J. D. & ANA RITA S. LOPES, 1989 - *Método de cálculo automático para determinação das perdas de carga em captações e estimação de parâmetros hidráulicos de aquíferos a partir de ensaios escalonados*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, relatório interno 109/88NP, 65 pp.
- VILLANUEVA, M. M. & A. L. IGLESIAS, 1984 - *Pozos y acuíferos, técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*. Inst. Geol. y Minero de Espana, Madrid, 429 pp.