

# **CÁLCULO DE PROPRIEDADES HIDRÁULICAS EM MEIO FISSURAL E CÁRSTICO PELO MÉTODO DA CAPACIDADE ESPECÍFICA FRACTAL**

João Manoel Filho<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Professor do Departamento de Engenharia de Minas, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco.  
Av. Acadêmico Hélio Ramos s/n - 4º andar - 50740-530 - Recife - PE  
Telefones: (081) 271-8245 e 271-8239.



## RESUMO

O método da capacidade específica fractal foi desenvolvido pelo autor para análise de testes de produção realizados com vazão variável. Isto porque, em geral, os dados de bombeamento de poços perfurados em meio fissural e/ou cárstico, que são tipicamente heterogêneos, costumam apresentar, entre outras coisas, variações na vazão bombeada. Essas variações afetam as curvas de rebaixamento e recuperação com o tempo, complicando a interpretação dos testes pelos métodos convencionais, todos eles, como se sabe, desenvolvidos para vazão constante. Admite-se que a evolução da capacidade específica do poço, observada nas condições de campo,  $y(Q_t, s_t) = Q_t / s_t$  (com o rebaixamento), pode ser aproximada por uma lei de potência do tipo  $y(Q_t, s_t) \cong y^* = Q^* / s_t^D$ , onde  $Q^*$  é a descarga fractal uniforme e  $D$  a dimensão do fluxo fractal para o poço. O cálculo das propriedades hidráulicas é feito aplicando o modelo de Boulton & Streltsova (1977), para o rebaixamento em uma fratura, substituindo no mesmo, o rebaixamento específico  $s/Q$ , pelo inverso da capacidade específica fractal, . Exemplos de aplicação, em poços perfurados na Bahia, fornecem as primeiras estimativas de propriedades hidráulicas obtidas pelo autor, em meio fraturado e cárstico. As ordens de grandeza são compatíveis com resultados de estudos recentes, desenvolvidos na Alemanha em uma zona de falhas de alta permeabilidade (Himmelsbach et al., 1994).

## ABSTRACT

The fractal specific capacity approach has been developed by the author for analysing single well production test data under variable discharge rate conditions. Pumping test data from wells drilled in a typical heterogeneous fractured and/or carstic medium usually present, among other things, discharge rate variations. Such variations affect time drawdown and time recovery curves thus complicating the well test analysis by conventional methods, which are only valid for constant discharge conditions. The observed well specific capacity, under field conditions,  $y(Q_t, s_t) = Q_t / s_t$ , (with drawdown), may be approximated by a power law of the type  $y(Q_t, s_t) \cong y^* = Q^* / s_t^D$ , where  $Q^*$  is a uniforme fractal discharge and  $D$  a fractal flow dimension. Calculation of hydraulic parameters is made through Boulton and Streltsova (1977) block-fracture model, by replacing the specific drawdown  $s/Q$ , for the inverse of the fractal specific capacity,  $1 / y^*$ . Examples are presented for wells drilled in Bahia, giving the first

hydraulic property estimates obtained by the author in a fractured and in a karstic medium. Such results are of the same order of magnitude of recent studies carried out in Germany in a highly permeable fault zone (Himmelsbach et al., 1994).

## INTRODUÇÃO

A despeito dos inúmeros trabalhos desenvolvidos no campo da hidráulica de poços em meios fraturados até hoje ainda não existe uma uniformidade de conceitos sobre o comportamento do fluxo radial para poços em aquíferos heterogêneos, cársticos e fissurados. Streltsova-Adams (1978) após ampla revisão bibliográfica sobre a hidráulica de poços em meios fraturados, assinala que os trabalhos publicados sobre testes de poços em reservatórios subterrâneos de rochas fendilhadas revelam a falta de uma metodologia uniforme, o que tem conduzido a resultados contraditórios sobre a evolução do rebaixamento. As divergências de pontos de vista dão lugar a duas linhas principais de idéias conceituais: i) a dos modelos que analisam o fluxo subterrâneo exclusivamente através das fraturas, simuladas como um sistema de tubos, de placas ou de canais; ii) a dos modelos que simulam a rede de fraturas como um *continuum* equivalente, ou em outras palavras, como um meio estatisticamente homogêneo, em cada ponto do qual se pode definir uma velocidade macroscópica média de fluxo. Em ambas as linhas de modelos, persiste a tendência de se encarar o meio fraturado como um sistema homogêneo equivalente, sem o que parece difícil justificar, na análise do fluxo radial para poços, a validade da lei de Darcy, para regime estacionário ou do modelo de Theis (1935) para o regime transiente. Todavia, a forte descontinuidade mecânica representada pelas fraturas, não justifica a hipótese de um meio fraturado homogêneo, razão pela qual alguns autores (Barenblatt et al. 1960, Warren & Root, 1963), seguindo idéias de Muskat (1937) admitem a existência de dois meios contínuos superpostos, distinguindo uma porosidade para as fraturas e uma porosidade para a matriz rochosa. São os chamados modelos de *dupla-porosidade*. Dentre esses, considera-se como um dos mais efetivos, para representar a evolução do rebaixamento com o tempo em uma zona fraturada, o de Boulton & Streltsova, (1977). Boehmer (1993), depois de descrever alguns dos métodos desenvolvidos nos últimos 20 anos, para análise de testes de bombeamento de poços em aquíferos de rochas fraturadas, conclui que tal análise, no caso de meios representados por redes de fraturas permeáveis em rochas cristalinas de baixa permeabilidade, e em ambientes cársticos de dissolução de calcáreos e dolomitos, não é

possível com os métodos existentes. De fato, esse problema ainda não foi devidamente solucionado e talvez um dos motivos seja porque os métodos convencionais se aplicam para condições de *fluxo uniforme*, enquanto que o fluxo *não uniforme* é a regra nos testes de bombeamento de poços nos meios heterogêneos. Neste artigo, como contribuição, e, quem sabe, talvez como candidato a uma solução aproximada do citado problema, apresenta-se o *método da capacidade específica fractal*, que permite avaliar uma condição de fluxo uniforme equivalente para o poço. Conhecido o fluxo uniforme, o cálculo das propriedades hidráulicas é aqui efetuado usando o modelo de Boulton & Streltsova (1977).

## O CONCEITO DE CONDUTOR HIDRÁULICO

Gustafson e Krásný (1994) consideram que muitos termos e conceitos normalmente empregados na hidrogeologia deveriam ser revisados ou modificados, no caso dos meios muito heterogêneos e descontínuos. O termo **aqüífero**, por exemplo, no caso das rochas cristalinas fraturadas, deveria ser substituído pela denominação **condutor hidráulico**. Já o conceito de Elemento de Volume Representativo (EVR), em termos gerais, talvez nem devesse ser formulado para as rochas cristalinas fraturadas, posto que seriam necessários volumes da ordem de milhares de m<sup>3</sup> para produzir um valor estável da condutividade hidráulica efetiva [Gustafson (1986) in Gustafson e Krásný (1994)].

A denominação **condutor hidráulico**, é aqui adotada para o sistema "poço-fendas associadas". Admite-se que essa denominação é mais apropriada do que o termo **aqüífero**, para descrever o reservatório subterrâneo conectado com o poço através da **superfície de controle** (parede do poço) criada pela perfuração no maciço rochoso fraturado ou cárstico. A **transmissividade** do referido sistema pode ser identificada através de testes de bombeamento, independente de ser este condutor constituído por uma única fratura ou por uma rede de fraturas ou de canais de dissolução.

A combinação **aqüífero fraturado**, ou **aqüífero fissural**, de Costa, (1986), se aplica globalmente, a nível regional, ao reservatório de água subterrânea existente em uma formação de rochas ígneas ou de metamórficas do embasamento, a exemplo do que acontece com a combinação **aqüífero cárstico**, que se aplica sem contestação aos reservatórios subterrâneos aqüíferos encontrados nas rochas carbonáticas.

Quando um poço perfurado nesse aqüífero não intercepta qualquer fenda produtora, ou quando nenhuma entrada de água acontece no evento perfuração, pode-se dizer que os parâmetros do condutor hidráulico são nulos. Nem por isso o aqüífero deixa de existir e nem se pode dizer que sejam nulas as suas propriedades hidráulicas

no ponto, na medida em que o simples aprofundamento do poço pode produzir um condutor hidráulico com parâmetros diferentes de zero. Ou seja, ocorrendo uma ou mais fendas produtoras de água, o conjunto poço-fendas passa a constituir um condutor hidráulico. O poço, que por hipótese nunca poderá penetrar totalmente o aquífero, define uma **superfície elementar de controle**, considerada como representativa do domínio em relação ao qual as análises dos testes dos condutores hidráulicos (conjunto poço-fendas produtoras) podem ser feitas e os correspondentes parâmetros hidráulicos identificados.

Entende-se dessa forma que a capacidade de transmissão de água, deduzida de um teste de bombeamento em um poço, não pode ser considerada como uma característica do aquífero fissural, mas tão somente do sistema de fendas (ou condutor hidráulico) direta ou indiretamente conectadas com o poço testado. Isto porque, não se admite a hipótese de poço totalmente penetrante no aquífero fissural. Os parâmetros do condutor hidráulico, deduzidos do teste, como por exemplo a transmissividade, a condutividade hidráulica, a porosidade e a abertura média das fendas, têm portanto um significado que se restringe ao próprio poço. A base do condutor hidráulico é definida pela fenda produtora mais profunda conectada com o poço.

## O CONCEITO DE CONDUTOR HIDRÁULICO FRACTAL

Diremos que um condutor hidráulico é fractal (Mandelbrot, 1983), se a capacidade específica do poço por ele representado constituir um conjunto fractal, isto é, um conjunto de dimensão  $D$ , definido pela expressão:

$$D = \frac{\log\left(\frac{Q^*}{y^*}\right)}{\log s_w} \quad (1)$$

onde:

$Q^*$  = vazão fractal uniforme [ $L^{2+D} T^{-1}$ ]

$y^*$  = capacidade específica fractal do condutor hidráulico conectado com o poço [ $L^2 T^{-1}$ ]

$s_w$  = rebaixamento medido no poço [ $L$ ]

## INTERPRETAÇÃO DE TESTES DE PRODUÇÃO

A análise ou interpretação dos dados de bombeamento em meio fraturado, pelo método da **capacidade específica fractal**, envolve as seguintes etapas:

### Cálculo da descarga fractal uniforme e da dimensão do fluxo

- Construir, em um mesmo gráfico, as curvas de variação da vazão bombeada e do nível dinâmico em função do tempo, destacando a posição da(s) fenda(s) produtora(s) principal(ais) e definindo o rebaixamento máximo permissível no nível da fenda produtora mais profunda.
- Construir a curva de capacidade específica  $y$ , versus rebaixamento  $s$ , em coordenadas bi-logarítmicas, e ajustar à mesma uma lei de potência do tipo  $y^* = Q^* s^{-D}$  onde  $D$  é a *dimensão fractal do fluxo* e  $Q^*$  a *descarga fractal uniforme*. A extrapolação dessa lei deve ser feita até o nível da fenda produtora mais profunda, ou de rebaixamento máximo permissível.

### Cálculo dos parâmetros do condutor hidráulico fraturado

- Calcular as propriedades hidráulicas do meio pelo processo clássico, superpondo, no caso, a curva de rebaixamento específico fractal versus tempo, com a curva padrão da função do poço em meio fraturado (Boulton & Streltsova 1977), substituindo  $s/Q$  pelo inverso da capacidade específica fractal, ou seja, usando

$$\frac{1}{y^*} = \frac{1}{4\pi T_f} [W(\theta, \eta, r/B)]^D \quad (2)$$

**Observação:** admite-se a validade da equação (2) para níveis dinâmicos inferiores à profundidade da(s) fenda (s) produtora(s) principal (ou principais).

### Exemplos

Para ilustração do método, foram analisados testes de produção de poços em meio muito heterogêneo, no Craton do São Francisco, respectivamente no embasamento e na região de cobertura do Craton [calcários do Grupo Salitre (Bambui) e orto-quartzitos do Grupo Chapada Diamantina]. Os poços selecionados aparecem na tabela 1 e as propriedades hidráulicas das fraturas, associadas com os respectivos poços, são mostradas na tabela 2. Os gráficos correspondentes a 2 dos 6 poços selecionados são mostrados nas figuras 1a-1c e 2a-2c.

Tabela 1 - Poços selecionados para ilustração do método proposto

CÓDIGO	AQUÍFERO	FORMAÇÃO OU GRUPO	MUNICÍPIO	UF	EQPTO	NUMERO ENTIDADE
50000401	Quartzito	M.Chapéu	G.OURO	BA	bomba pistão	CERB2-0272
50000501	Quartzito	M.Chapéu	G.OURO	BA	bomba pistão	CERB2-0872
50000601	Calcário	Bambuí	IBIPEBA	BA	compressor	CERB1-0872
50000701	Calcário	Bambuí	IRECÊ	BA	compressor	CERB1-0972
50001301	Cristalino	Embasamento	IBIRAPOAN	BA	bomba pistão	CERB1-0472
50001501	Cristalino	Embasamento	IBIRAPOAN	BA	compressor	CERB1-0772

Tabela 2 - Parâmetros físicos de condutores hidráulicos testados nos poços selecionados na Província Hidrogeológica do São Francisco - BA

Código-teste	Tf m <sup>2</sup> /s	Kf m/s	kf m <sup>2</sup>	Difusiv m <sup>2</sup> /s	Sf	Abertura mm
500004-01	6.90E-05	1.63E-01	1.49E-08	4.17E-03	1.65E-02	0.423
recuperação	5.64E-05	1.42E-01	1.31E-08			0.396
500005-01	1.54E-05	6.00E-02	5.52E-09	4.17E-03	3.72E-03	0.257
recuperação	2.98E-05	9.32E-02	5.88E-09			0.320
500006-01	7.27E-04	7.73E-01	7.18E-08	4.17E-03	1.75E-01	0.929
recuperação	7.26E-04	7.73E-01	7.18E-08			0.928
500007-01	8.10E-01	1.81E-01	1.66E-08	4.17E-03	1.94E-02	0.447
recuperação	8.84E-05	1.92E-01	1.76E-08			0.460
500013-01	3.11E-05	9.58E-02	8.78E-09	4.17E-03	7.64E-03	0.325
recuperação	3.11E-05	9.58E-02	8.78E-09			0.325
500015-01	2.26E-04	3.60E-01	3.30E-08	4.17E-03	5.43E-02	0.629
recuperação	2.30E-04	3.64E-01	3.34E-08			0.633

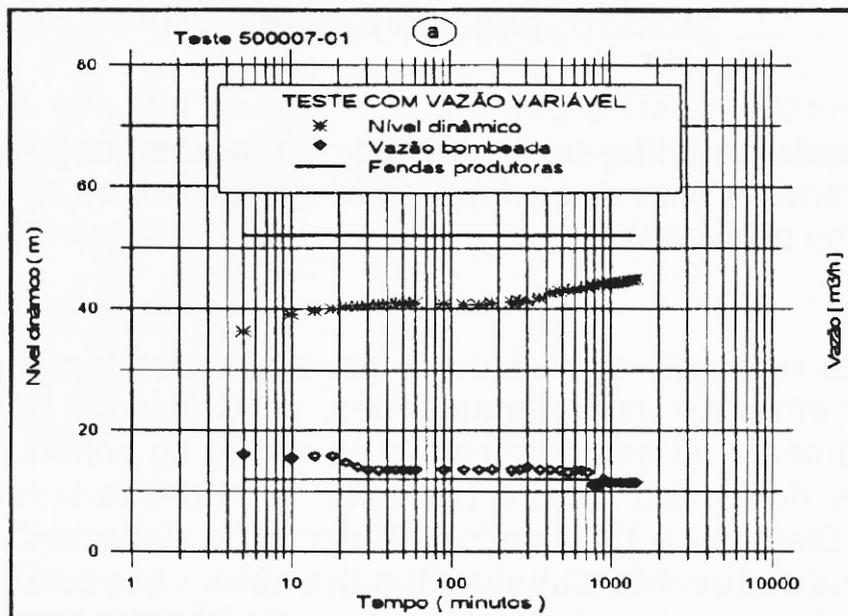


Figura. 1a - Poço em calcário do Grupo Salitre (Bambuí). a) vazão bombeada e nível dinâmico.;

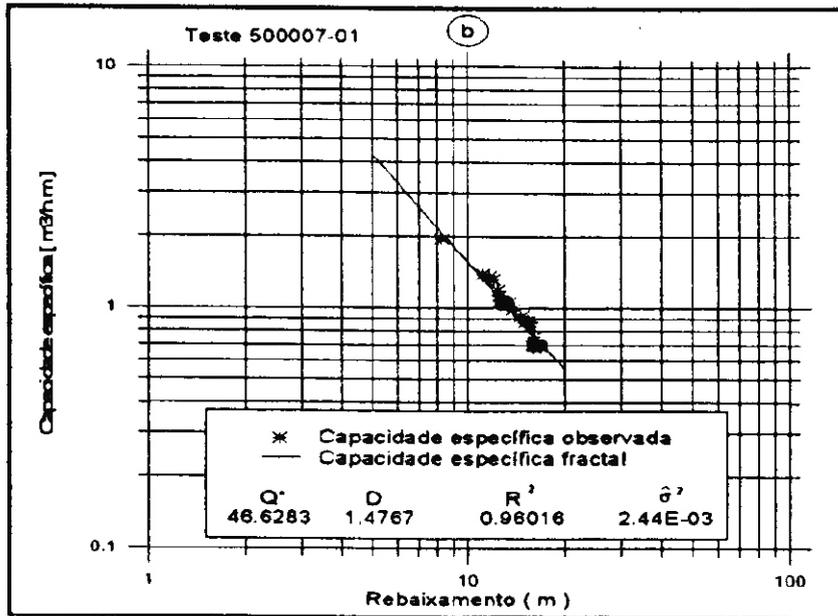


Figura. 1b - Poço em calcário do Grupo Salitre (Bambu). Gráfico de capacidade específica observada e capacidade específica fractal ajustada

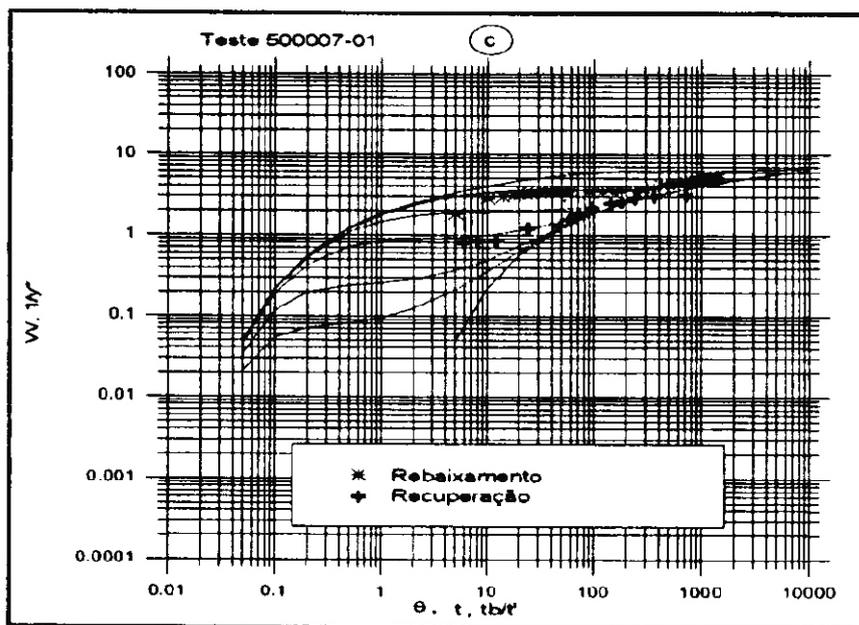


Figura. 1c - Poço em calcário do Grupo Salitre (Bambu). Curvas de rebaixamento e recuperação específicas, superpostas às curvas padrão do modelo blocos-fraturas, de Boulton & Streltsova, (1977).

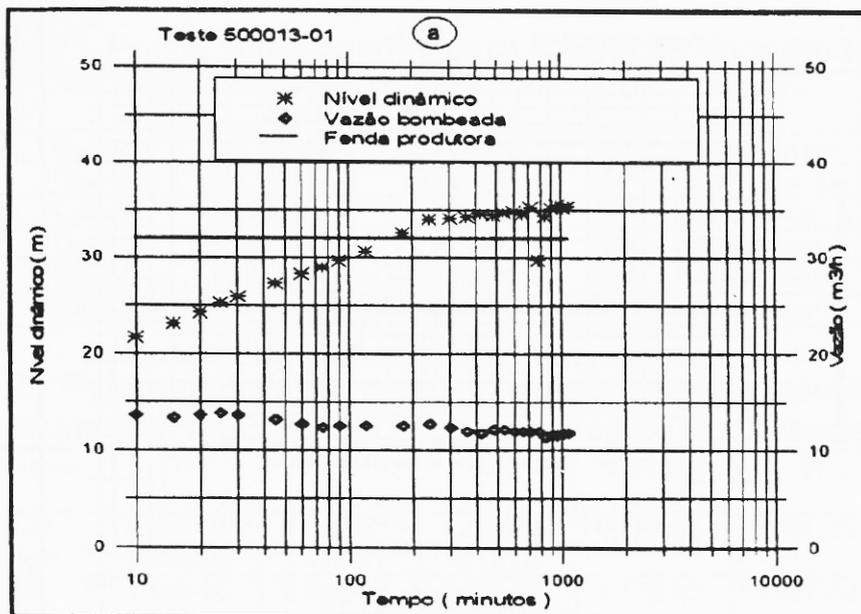


Figura. 2a - Poço no embasamento do Craton do São Francisco. Curvas de vazão bombeada e nível dinâmico.

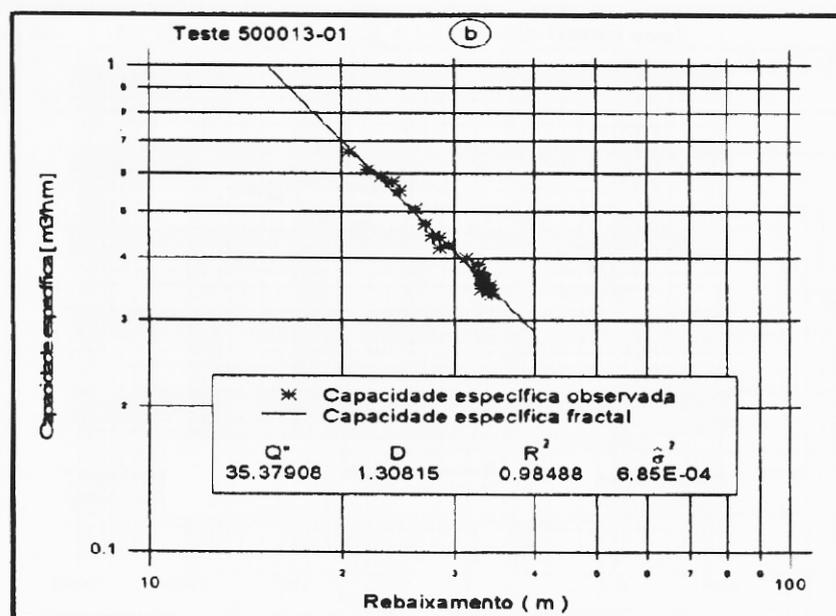


Figura. 2b - Poço no embasamento do Craton do São Francisco. capacidade específica e capacidade específica fractal ajustada.

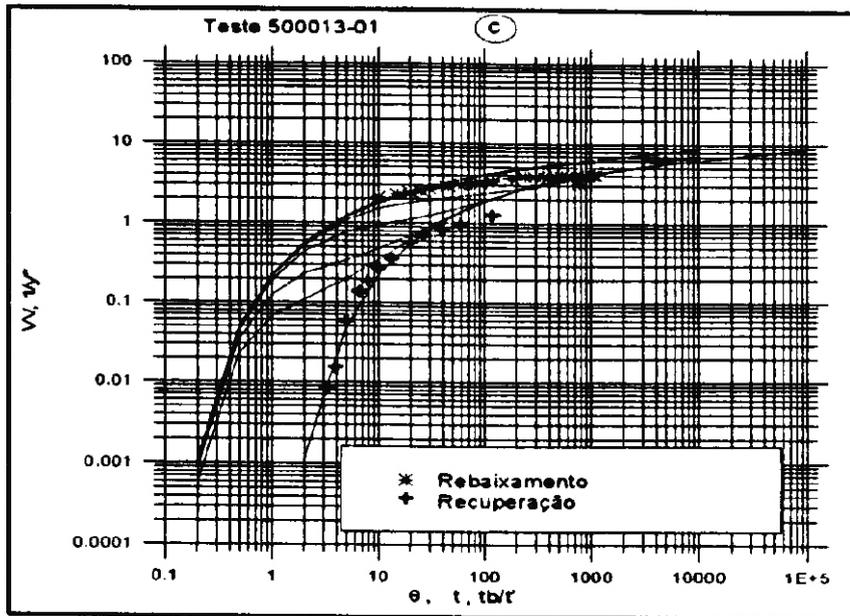


Figura. 2c - Poço no embasamento do Craton do São Francisco. Curvas de rebaixamento e recuperação específicas, superpostas às curvas padrão do modelo blocos-fraturas, de Boulton & Streltsova, (1977)

## CONCLUSÕES

O método da capacidade específica fractal permite avaliar uma condição de fluxo uniforme equivalente para um poço bombeado com vazão variável. Por isso, representa uma alternativa interessante para análise de testes de produção realizados em poços perfurados em meios heterogêneos, sejam eles fissurados ou cársticos, nos quais geralmente ocorrem variações na vazão bombeada. Conhecido o fluxo uniforme, podem-se determinar os parâmetros físicos do condutor hidráulico (conjunto poço-fendas associadas). Seis exemplos de cálculo foram apresentados, usando o modelo bloco-fratura de Boulton & Streltsova (1977), em testes de poços perfurados no cristalino do Craton do São Francisco. Os resultados obtidos (tabela 2) revelaram globalmente, aberturas médias de fissuras na faixa de 0.2 a 0.9 mm; coeficientes de armazenamento de fissuras variando entre 0,3 e 17,5% e condutividades hidráulicas compreendidas entre 0,06 e 0,77 m/s. Os valores mais elevados desses parâmetros foram encontrados nas zonas cársticas.

**NOTAÇÃO**

<i>a</i>	$a = \left[ T_f \frac{12\nu}{g} \right]^{1/3}$	abertura das fraturas	[L]
<i>B<sub>f</sub></i>	$\sqrt{T_f / \alpha_f S_m}$	parâmetro de drenagem retardada das fissuras	[L]
<i>D</i>		dimensão fractal do fluxo	
<i>g</i>		aceleração da gravidade	[L/T <sup>2</sup> ]
<i>H</i>		espessura saturada do condutor hidráulico ou espessura do bloco . no modelo Boulton-Streltsova, 1977 (equivalente a espessura de aquitard)	[L]
<i>K<sub>f</sub></i>	$K_f = T_f / a$	condutividade hidráulica das fraturas	[L / T]
<i>k<sub>f</sub></i>	$k_f = K_f \frac{\nu}{g}$	permeabilidade das fraturas	[L <sup>2</sup> ]
<i>Q</i>		vazão constante de bombeamento ou injeção	[L <sup>3</sup> / T]
<i>Q*</i>		vazão fractal constante	[L <sup>2+D</sup> /T]
<i>Q(t)</i>		vazão variável com o tempo	[L <sup>3</sup> / T]
<i>r<sub>w</sub></i>		raio do poço bombeado	[L]
<i>S<sub>f</sub></i>	$S_f = \frac{4T_f t}{r^2 \theta}$	coeficiente de armazenamento das fraturas	
<i>S<sub>m</sub></i>	$S_m = S_f (\eta - 1)$	coeficiente de armazenamento da matriz rochosa (blocos)	
<i>st</i>		rebaixamento no poço bombeado no tempo <i>t</i>	[L]
<i>T<sub>f</sub></i>	$T_f = \frac{y^*}{4\pi} W(\theta, r / B_f, \eta)$	transmissividade do condutor hidráulico ( fraturas )	[L <sup>2</sup> / T]
<i>T'<sub>m</sub></i>		transmissividade da matriz (blocos) na direção vertical	[1 / T]
<i>y</i>		capacidade específica do poço	[L <sup>3</sup> / T L]
<i>y*</i>		capacidade específica fractal do poço	[L <sup>3</sup> / T L]
<i>α<sub>f</sub></i>	$\frac{\pi^2 T'_m}{4H^2 S_m}$	parâmetro de fluxo vertical bloco-fissura	[1 / T]
<i>μ</i>		viscosidade dinâmica do fluido	M / LT
<i>ρ</i>		densidade do fluido	[M / L <sup>3</sup> ]
<i>ν</i>	$\nu = \mu / \rho$	viscosidade cinemática do fluido	[L <sup>2</sup> / T]

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARENBLATT, G. E., ZHELTOV, I.P. and KOCHINA, I.N. 1960. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks. *J. Applied Math. Mech.* 24(5), 1286-1303.
- BOEHMER, W.K. 1993. Secondary type aquifers and the value of pumping tests for the evaluation of groundwater potential, *Memoires of the XXIV Cong. of IAH*, Oslo.
- BOULTON, N.S. and STRELTSOVA, T.D. 1977. Unsteady flow to a pumped well in a fissured water-bearing formation. *J. Hydrol.* 35, 257-269.
- COSTA, W. D. 1986. Análise dos fatores que atuam no aquífero fissural - área piloto dos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte, (Tese- Doutorado), Universidade de São Paulo.
- GUSTAFSON, G. , KRÁSNÝ, J. 1994, Crystalline rock aquifers: their occurrence, use and importance. *Applied Hydrogeology* 2(2):64-75.
- HIMMELSBACH, T., HOTZL, H. and MALOSZEWSKI, P. 1994. Forced gradient tracer tests in a highly permeable fault zone. *Applied Hydrogeology*, 2(3): 40-47.
- MANDELBROT, B.B. 1983. *The fractal geometry of nature*. New York. Freeman. 468p.
- MUSKAT, M. 1937. *The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media*, McGraw-Hill, New York.
- STRELTSOVA-ADAMS, T.D. 1978. Well Hydraulics in Heterogeneous Aquifer Formations, in *Advances in Hydroscience*, Academic Press (11), 357-423.
- THEIS, C.V. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, *Trans. Am. Geophys. Union* 16, 239-240.
- WARREN, J.E., & ROOT, P.J. 1963. The behavior of naturally fractured reservoirs. *Soc. Pet. Eng. J.*, 9: 245-255.