

CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DE AQUÍFEROS FRACTURADOS POR MODELOS DE POROSIDADE DUPLA NO CONCELHO DE ÉVORA

Alice **Fialho**⁽¹⁾; António **Chambel**⁽²⁾; Carlos **Almeida**⁽³⁾

RESUMO

Os aquíferos fracturados possuem características especiais que se revelam quando se analisam as curvas rebaixamento/tempo produzidas por ensaios de bombeamento. Esse comportamento particular deve-se à existência de dois meios com características hidráulicas próprias e interactuantes: blocos porosos e fracturas (porosidade dupla). Neste trabalho analisam-se ensaios de bombeamento efectuados em dois locais distintos do concelho de Évora, em captações implantadas em aquíferos de gnaisses e quartzodioritos. A circulação e armazenamento da água naqueles aquíferos faz-se, fundamentalmente, numa camada superficial alterada, com características aproximadas de um meio poroso, e numa zona mais profunda alterada e fracturada com características próprias de meio com porosidade dupla. Os ensaios foram interpretados recorrendo ao programa AQFIS que permite produzir curvas rebaixamento/tempo características de modelos propostos por vários autores para simular o comportamento de meios com porosidade dupla, fazendo variar parâmetros geométricos e hidráulicos característicos, que se procuram ajustar aos dados de campo. Nesta interpretação verificou-se que o modelo que mais se ajustava era o de aquífero livre com porosidade dupla. No entanto, anomalias verificadas nalguns ensaios mostram que existem factores que influenciam o comportamento hidráulico dos aquíferos e que ainda não foram considerados nos modelos actualmente disponíveis.

Palavras-chave: Aquífero, Ensaios de Bombeamento, Transmissividade, Meios de porosidade dupla.

⁽¹⁾ Engenheira dos Recursos Hídricos, Colaboradora da Direcção Regional do Ambiente- Alentejo

⁽²⁾ Hidrogeólogo, Assistente do Departamento de Geociências da Universidade de Évora, Direcção do Projecto Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo(ERHSA), pela Universidade de Évora

⁽³⁾ Prof. Associado da Fac. de Ciências da Univ. de Lisboa. Centro Geol. Universidade de Lisboa.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho, feito no âmbito do Projecto “Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo (ERHSA)”, coordenado e financiado pela Comissão de Coordenação da Região Alentejo (CCRA), pretende contribuir para o conhecimento das características hidráulicas dos sistemas aquíferos dos gnaisses e dos quartzodioritos da região de Évora.

No concelho de Évora, como em tantos outros do Alentejo, os recursos hídricos superficiais não são abundantes, pelo que se recorre, por vezes, às águas subterrâneas para a viabilização de regadios. É vulgar os agricultores recorrerem a sistemas hidráulicos, de que fazem parte um conjunto de furos e uma charca, tendo esta por funções o armazenamento e a distribuição da água para os sistemas de rega.

A partir dos relatórios técnicos de sondagem existentes na Direcção Regional do Ambiente – Alentejo, no âmbito dos processos de licenciamento de captações de águas subterrâneas, foi realizado um inventário de pontos de água, e, com base neste, seleccionaram-se duas áreas com litologias distintas e com o tipo de aproveitamento acima referido. Os locais escolhidos para realização dos trabalhos de campo foram duas propriedades que dispunham de conjuntos de captações que, pela proximidade entre elas, permitia observar o comportamento do sistema aquífero durante e após os ensaios de bombeamento. Além disso, a existência de reservatórios permitiram o aproveitamento da água extraída durante os ensaios.

2. LOCALIZAÇÃO, GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

As áreas seleccionadas, representadas na figura 1, situam-se, uma no Monte da Lagoa, 7 km a sudeste da cidade de Évora, e a outra no Monte da Torre, a norte do concelho de Évora, já no limite com o concelho de Arraiolos. O primeiro possui dois sistemas de captação independentes com 8 furos cada, tendo sido seleccionado o sistema localizado a leste da estrada nacional que faz a ligação Évora- Reguengos de Monsaraz. No Monte da Torre existem 10 furos.

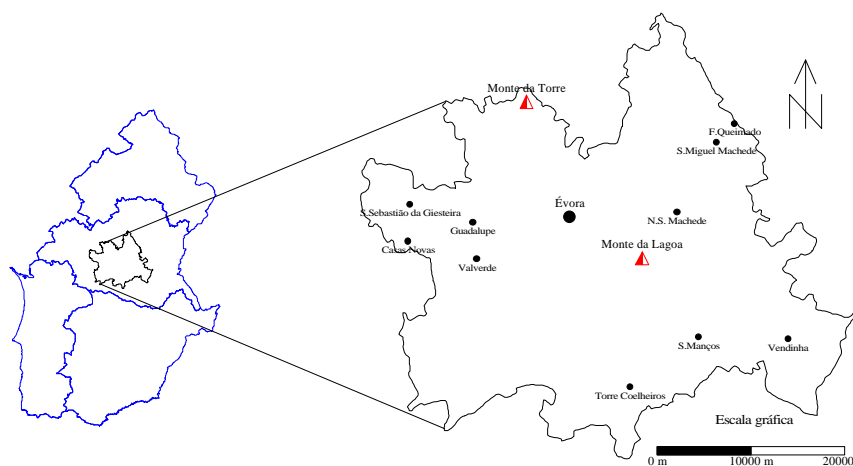


Figura 1 – Localização das áreas de estudo.

Estas áreas fazem parte de um afloramento, que se estende para além de Montemor-o-Novo, de rochas ígneas de composição monzogranito-granodiorítica que se encontram associadas ao maciço eruptivo de São Manços. Deste maciço fazem parte os gnaisses de composição tonalítica, de grão médio, constituídos essencialmente por quartzo, plagioclase, biotite e hornblenda verde.

A leste da cidade de Évora, aos gnaisses sucede-se a Formação dos “Xistos de Moura”, que é constituída por xistos quartzo-feldspáticos, micaxistos, com quartzo de exsudação abundante e anfibolitos com intercalações subordinadas de micaxistos (CARVALHOSA E CARVALHO, 1969).

Do ponto de vista geomorfológico, a região faz parte da peneplanície alentejana, com altitudes de 210 a 220 m. A drenagem natural é assegurada por dois conjuntos de linhas de água que correspondem às bacias dos rios Sado e Guadiana, com o rio Xarrama como principal colector da primeira e o rio Degebe da segunda.

3. ESCOAMENTO EM MEIOS COM POROSIDADE DUPLA

Para a interpretação dos ensaios foram utilizados modelos que descrevem o escoamento em meios com porosidade dupla, os quais se encontram associados a aquíferos fracturados. De acordo com BARENBLATT *et al.* (1960), entende-se como meio de porosidade dupla aquele em que existem dois sistemas entrosados, um de blocos porosos, com permeabilidade baixa, mas com elevada capacidade de armazenamento, e outro de fracturas, com permeabilidade mais elevada, mas com escassa capacidade de armazenamento. Considera-se então que a porosidade total resulta da existência de dois tipos distintos: a porosidade correspondente aos blocos e a correspondente às fracturas.

Na região estudada, os gnaisses e as rochas ígneas apresentam um perfil de alteração com as características típicas das regiões temperadas (GODARD, 1977). Neste tipo de perfil podemos considerar três meios com características hidráulicas distintas (fig.2). A parte superior apresenta comportamento típico de meio poroso, a parte intermédia corresponde a um meio com porosidade dupla e a parte inferior poderá representar um meio puramente fracturado (STRELTSOVA, 1976). Como se observa na figura, sobre a rocha fracturada ocorrem blocos de rocha arredondados, entre os quais existem zonas contendo material resultante da alteração da mesma

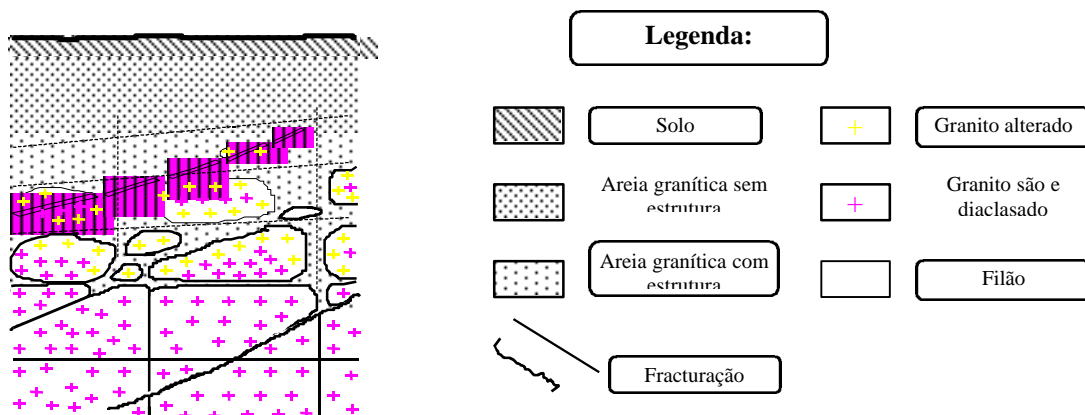


Figura 2- Perfil típico de rochas fracturadas em clima temperado (GODARD, 1977)

A relação entre o coeficiente de armazenamento, ou a permeabilidade, nos blocos e nas fracturas é variável, consoante o tipo de rocha e o tipo de alteração resultante. Por exemplo, a alteração resultante de um granito tenderá a ser mais “arenosa”, enquanto a alteração de uma rocha básica terá tendência mais argilosa, o que afectará a relação de permeabilidade entre blocos e fracturas: no primeiro caso a permeabilidade das fracturas deverá ser muitas vezes superior à dos blocos, enquanto no segundo poderá, no extremo, chegar a ser inferior (caso que acontece muito raramente).

Como o escoamento em meios com porosidade dupla depende de um elevado número de parâmetros, torna-se difícil a interpretação de ensaios de bombeamento recorrendo a curvas padrão, dado o grande número de combinações que seria possível obter. O programa AQFIS (OLIVEIRA, 1990) auxilia a interpretação de ensaios em meios daquele tipo, pois gera curvas para qualquer combinação de valores dos parâmetros, introduzida pelo utilizador. As curvas padrão geradas são projectadas no monitor e, por tentativas, procura-se ajustar as mesmas aos dados de campo, fazendo variar o valor dos parâmetros.

O programa permite seleccionar um de 34 modelos diferentes que consideram as seguintes condições gerais:

1. meios com porosidade dupla;
2. aquífero de extensão infinita;
3. poço totalmente penetrante;
4. matriz isótropa e homogénea;
5. fluido e rocha incompressíveis;
6. caudal de extracção constante ou variável;
7. fluxo para o poço de extracção apenas através do sistema de fracturas.

De acordo com o autor do programa, a condição apresentada no ponto 7 é admitida como válida porque a permeabilidade dos blocos é seguramente muito baixa quando comparada com a permeabilidade das fracturas. Desta forma, o volume de água que entra no poço conduzido pelas fracturas é muito maior que o conduzido pelos blocos e a condutividade hidráulica do aquífero será a das fracturas. Este facto torna desnecessária a condição, pouco realista, colocada por alguns autores, por exemplo BOULTON E STRELTSOVA (1977), do poço captar apenas nas fracturas.

Num meio com porosidade dupla existem dois regimes de escoamento, nos blocos e nas fracturas, e, trocas de fluido entre ambos, devido à diferença de potencial hidráulico criada entre os dois meios quando se produz um bombeamento. Os modelos que descrevem matematicamente o escoamento entre blocos e fracturas baseiam-se essencialmente em duas hipóteses: que aquele se dá em regime permanente ou em regime transitório. A primeira hipótese dá origem ao chamado regime de pseudo-equilíbrio: regime transitório para as fracturas e permanente para os blocos. A existência de um regime permanente nos blocos pode ser justificado pela presença do efeito de pele de fractura (MOENCH, 1984), consistindo esta numa película fina de material, de permeabilidade inferior à dos blocos, que reveste a superfície destes, e que resulta da alteração da rocha ou da precipitação de minerais (fig.3). Segundo o mesmo autor, esta pele impede o fluxo livre entre os blocos e as fracturas, retardando a contribuição dos blocos.

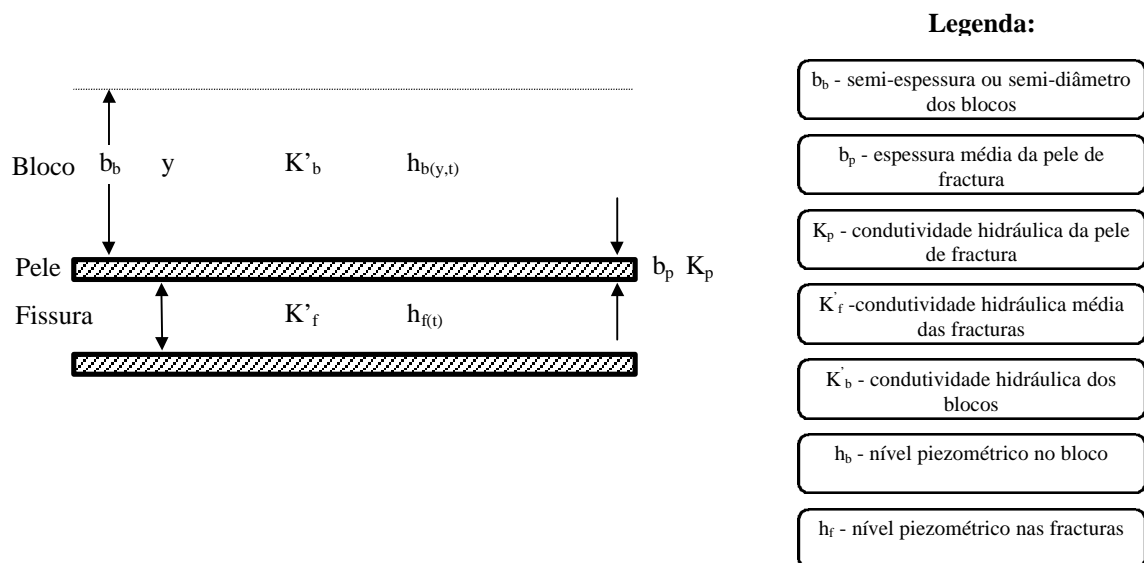


Figura 3 - Efeito de pele de fractura (MOENCH, 1984)

Para além do efeito de pele de fractura, há também a considerar, nos meios de porosidade dupla, o efeito de pele de poço, que resulta da existência de uma zona envolvente (pele) caracterizada por permeabilidade e coeficiente de armazenamento diferentes dos da formação. Esta zona pode resultar do próprio processo de perfuração: pode ser devido à infiltração de lamas na formação, com conseqüente diminuição da permeabilidade, obtendo-se um efeito de pele positivo, ou devido à maior fracturação da rocha, que poderá ocasionar um aumento da permeabilidade, obtendo-se um efeito de pele negativo. A manifestação de um ou outro efeito resultará num acréscimo ou decréscimo do rebaixamento na vizinhança do poço.

A escolha do modelo a aplicar é feita em função das características da captação, da geologia do local e da geometria dos blocos.

Relativamente às características da captação, há que considerar o raio da zona revestida e de perfuração do poço e a existência, ou não, de efeito de pele de poço. Como frequentemente os meios de porosidade dupla têm uma produtividade baixa, o volume de água armazenado no furo pode ser significativo, contribuindo com uma fracção importante da água extraída nos primeiros momentos do bombeamento. Este aspecto é considerado nalguns modelos: poço com diâmetro finito. Quando aquela contribuição é desprezável, considera-se poço com armazenamento nulo: poço linear.

Quanto à geologia do local, dever-se-à identificar o tipo de aquífero (livre ou confinado) e considerar, ou não, o efeito de pele de fractura. Na geometria dos blocos pode-se considerar, tendo em conta a geologia, um de três modelos aproximativos: cilindros, esferas ou prismas.

No quadro 1 apresentam-se os símbolos relativos a cada parâmetro, utilizados na interpretação dos ensaios de bombeamento.

Quadro 1

Parâmetros e variáveis utilizados na interpretação dos ensaios.

Parâmetro	Símbolo
Caudal de extração	Q
Transmissividade do aquífero	T
Transmissividade dos blocos	Tb
Efeito de pele de poço	Sw
Efeito de pele de fractura	SF
Coefficiente de armazenamento total do aquífero	S
Coefficiente de armazenamento dos blocos	Sb
Coefficiente de armazenamento das fracturas	Sf
Raio de perfuração do poço	rw
Distância do ponto de observação ao centro do poço	r
Raio do poço na zona revestida	rc
Cedência específica	Sy

A cedência específica é considerada pelo único modelo disponível para aquíferos livres fissurados. Neste considera-se uma geometria tabular, poço linear e ausência de pele de fractura.

3.1. Interpretação dos ensaios de bombeamento

A realização dos ensaios de bombeamento foi condicionada pela evolução das culturas em cada uma das propriedades.

- **Monte da Lagoa**

O ensaio realizado na captação F4, cuja localização se apresenta na figura 4, decorreu a caudal constante de 345,6 m³/dia, durante 9h30 min e com uma recuperação de 1h e 30 min após final do bombeamento.

Durante a realização deste ensaio registaram-se os níveis das outras captações, tendo-se verificado rebaixamento apenas na captação F5, localizada a 54 m de distância da captação ensaiada.

O aquífero ensaiado situa-se numa área de gnaisses cobertos com uma camada superficial muito argilosa, à qual se segue uma camada alterada, com circulação fundamentalmente em meio do tipo poroso intergranular, que poderá atingir 15 a 20 m.

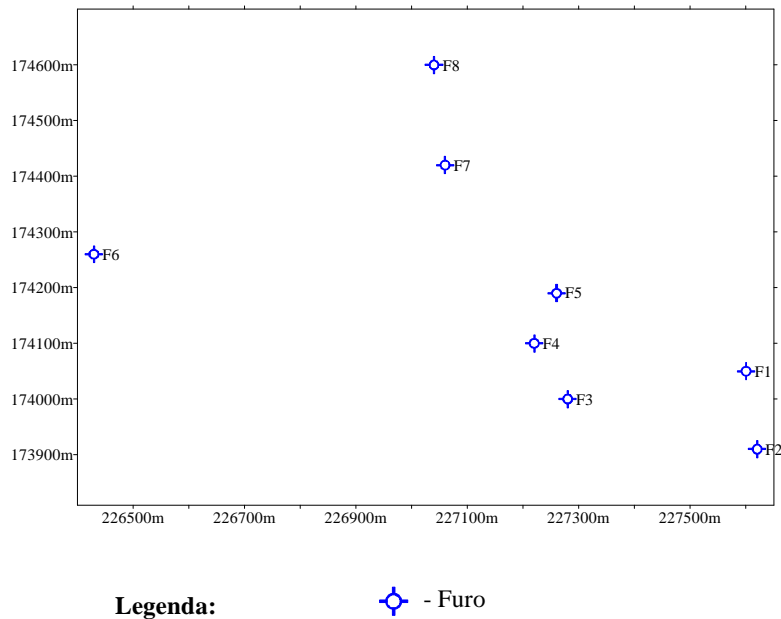


Figura 4 – Localização das captações do Monte da Lagoa

Na interpretação do ensaio optou-se pela utilização do modelo teórico de Theis e pelos modelos de porosidade dupla para aquífero confinado e livre. A utilização dos três modelos assentou no facto de não se terem obtido perfis fiáveis, e, pelas indicações de campo, se ter suscitado a presença de um aquífero superficial com características de aquífero livre ou semi-confinado. Os dados correspondentes ao período de extracção ajustam-se perfeitamente ao modelo de Theis. No entanto, não se consegue obter um ajuste razoável para os dados correspondentes ao período de recuperação.

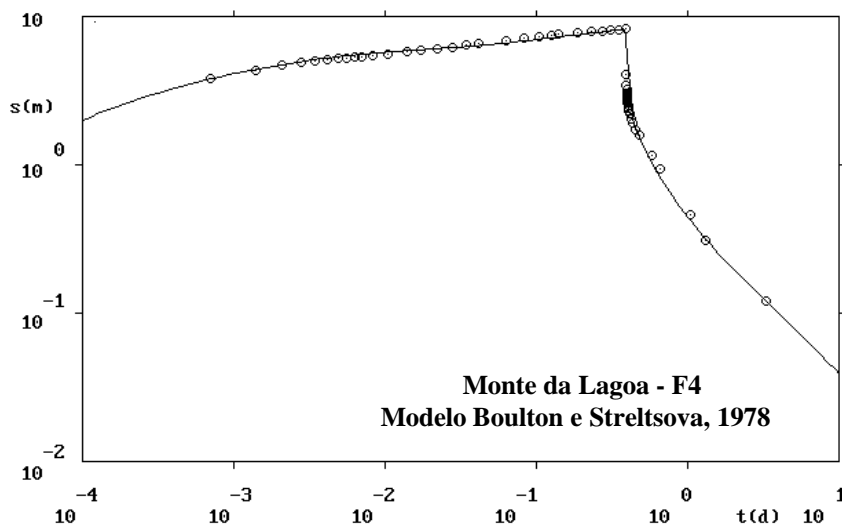


Figura 5 - Curva de Rebaixamento / Tempo

O melhor ajuste, tanto para o período de extracção como para o de recuperação, foi obtido para o modelo de aquífero livre (BOULTON E STRELTSOVA, 1978) como se

observa na figura 5. No entanto, todos os modelos usados fornecem valores de transmissividade bastante semelhantes (Quadro 2).

Os valores de coeficiente de armazenamento são praticamente impossíveis de estimar quando os níveis hidrodinâmicos são medidos na própria captação onde se efectua o ensaio de caudal, pelo que não serão considerados os valores obtidos.

Quadro 2

Transmissividade da captação F4 do Monte da Lagoa

Modelo	Transmissividade (m ² /dia)
Theis	38
Dupla porosidade - Aquífero livre	28
Dupla porosidade - Aquífero confinado	29

Considera-se o valor de 30 m² /dia como razoável para este ensaio.

A outra captação ensaiada nesta propriedade foi a F1, cuja localização também se apresenta na figura 4. O ensaio decorreu a caudal constante de 864 m³/dia com um período de duração de 8 h e 40 min e recuperação de 1h e 45 min.

Tal como no caso da captação F4, também aqui o perfil de alteração inclui uma camada superficial muito argilosa, à qual se segue uma camada alterada com porosidade intergranular que poderá atingir 15 ou 20 m.

O comportamento do aquífero neste caso foi idêntico ao do anterior. Assim, obteve-se um bom ajuste ao modelo de Theis e confinado com porosidade dupla, apenas para o período de extracção, e um bom ajuste para o total do ensaio quando interpretado pelo modelo de aquífero livre com porosidade dupla (fig. 6).

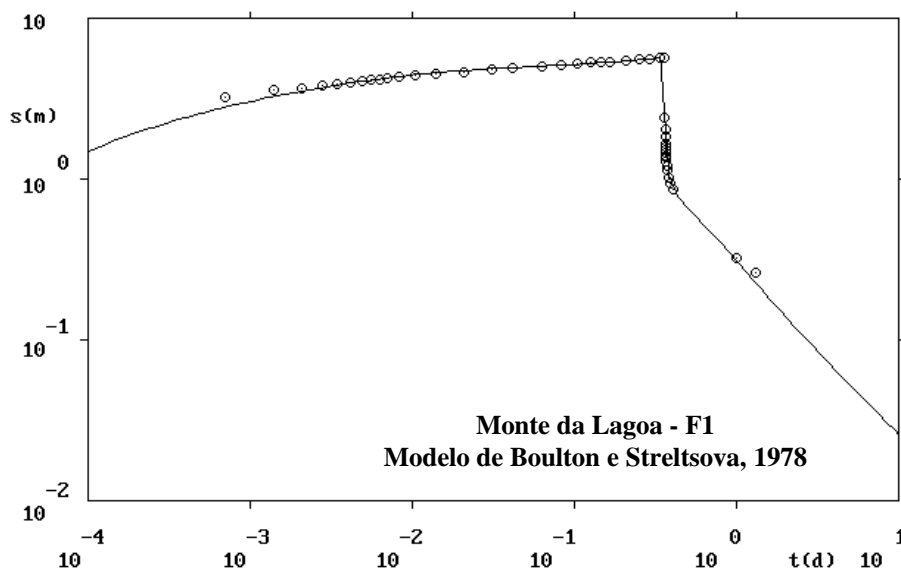


Figura 6 - Curva de Rebaixamento / Tempo

As transmissividades obtidas através da utilização dos três métodos descritos foram (Quadro 3):

Quadro 3

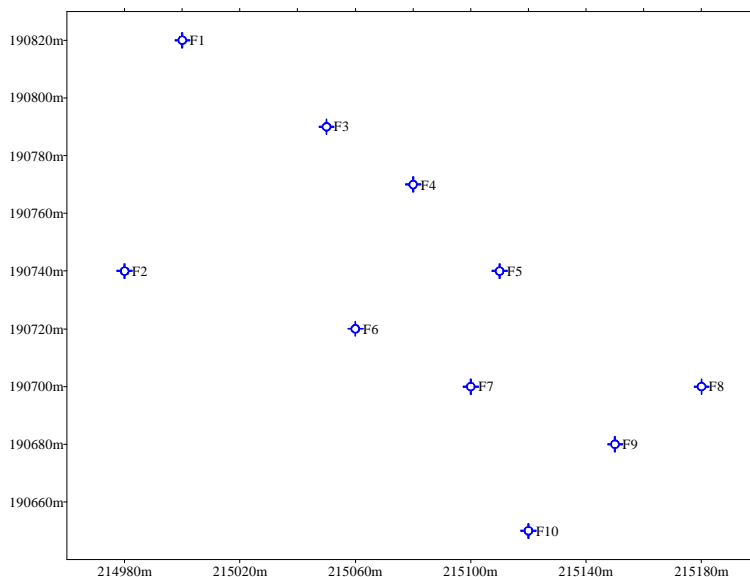
Transmissividade da captação F1 do Monte da Lagoa

Modelo	Transmissividade (m² /dia)
Theis	210
Dupla porosidade - Aquífero livre	98
Dupla porosidade - Aquífero confinado	167

Dado que se obtém um melhor ajuste, tanto no período de extracção como no de recuperação, para o modelo de aquífero livre a transmissividade deverá aproximar-se dos 100 m² /dia.

- **Monte da Torre**

O ensaio realizado na captação F4 do monte da Torre, cuja localização se apresenta na figura 7, decorreu a caudal constante de 61,3 m³/dia.



Legenda:  - Furo

Figura 7 – Localização das captações do Monte da Torre

Neste local a circulação faz-se fundamentalmente em meio fracturado, com alguma contribuição da zona superficial alterada, a qual não deverá ultrapassar os 5 a 8 m de profundidade.

O ensaio decorreu durante 9h e 5 min, após o que se iniciou o período de recuperação. No entanto, os dados de recuperação não foram utilizados devido à inexistência de válvula que impedisse o refluxo da água após paragem da bomba.

Para este ensaio apenas foi possível obter um ajuste razoável ao modelo de aquífero livre com porosidade dupla (fig.8). Dado que os rebaixamentos eram muito importantes em relação à espessura inicial saturada efectuou-se a correcção de Jacob: $s_c = s - s^2/2H_0$

onde: s_c = rebaixamento corrigido; s = rebaixamento; H_0 = espessura inicial saturada

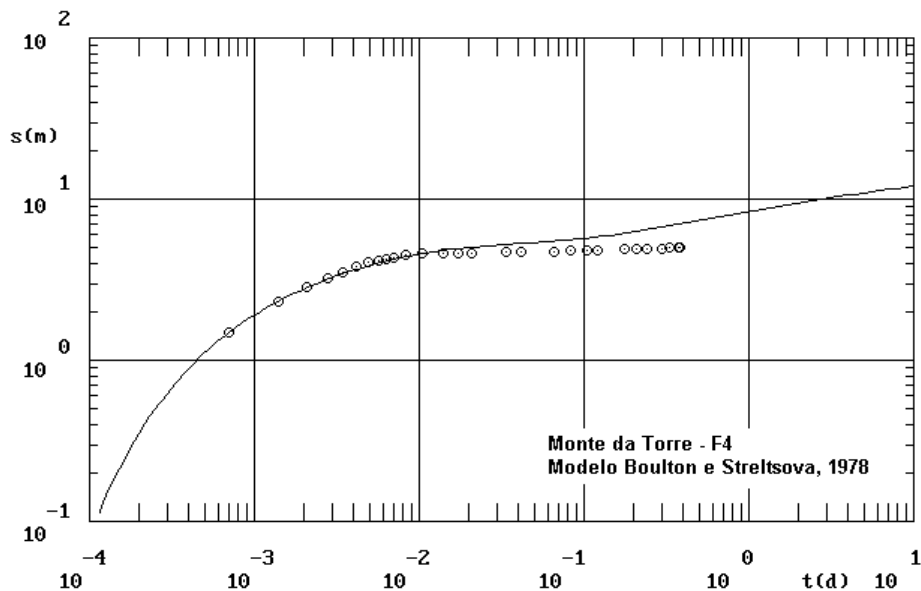


Figura 8 - Curva de rebaixamento / Tempo

tendo-se obtido um valor de $6 \text{ m}^2/\text{dia}$ para a transmissividade. A partir dos 15 min verifica-se uma tendência para a estabilização dos níveis que poderá ser explicada quer por variações no caudal de extracção, frequente em situações de rebaixamento importante, quer devido à inadequação do modelo a situações em que aquele constitui fracção importante da espessura saturada inicial.

Na captação F7 foi realizado um ensaio escalonado (a caudal variável), por se verificar, após 1 h e 30 min de ensaio, que a captação se encontrava a ser avaliada muito abaixo do seu potencial, decidindo-se pelo aumento do caudal.

Para interpretação deste ensaio optou-se pelo modelo de aquífero livre com porosidade dupla (fig. 9) por ser aquele que nos parecia mais consistente com a realidade, tendo-se efectuado a correcção de Jacob. Foi possível obter um bom ajuste para os rebaixamentos correspondentes ao primeiro escalão e aos rebaixamentos residuais para uma transmissividade de $7 \text{ m}^2/\text{dia}$. Os rebaixamentos correspondentes ao segundo escalão situam-se muito acima dos previstos pelo modelo. Nenhum outro modelo fornece um ajuste aceitável para aqueles valores, o que poderá ser devido a:

- perdas de carga na captação proporcionais ao quadrado do caudal;
- heterogeneidade vertical do aquífero, com uma zona superior mais transmissiva que a inferior;

- eventuais imprecisões na medição do caudal.

Como já se referiu anteriormente, estes modelos resultam muito bem na avaliação da transmissividade, mas muito mal no coeficiente de armazenamento, devido à observação dos níveis hidrodinâmicos, durante o ensaio, decorrer na captação onde se está a efectuar a extracção.

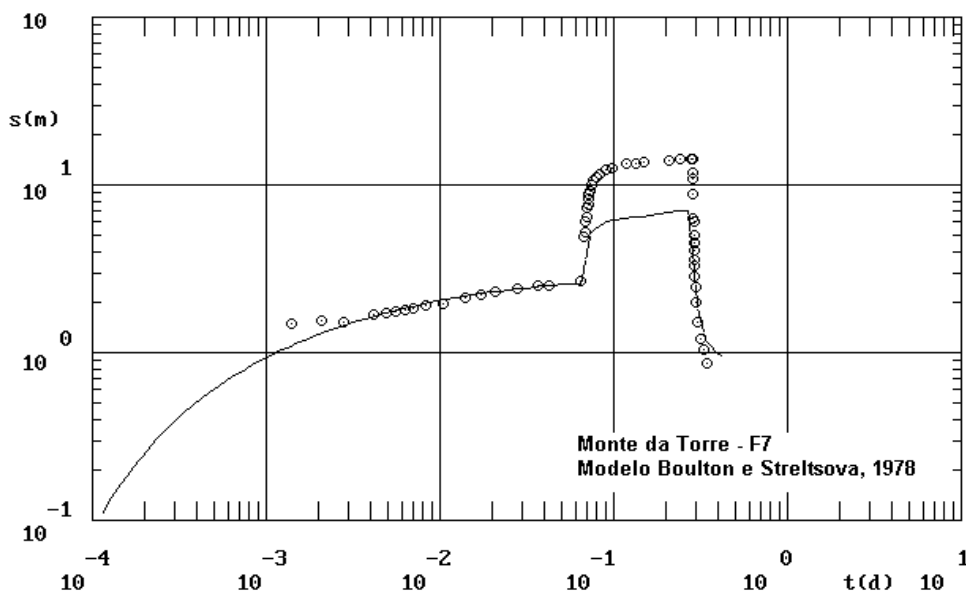


Figura 9 - Curva de Rebaixamento / Tempo

4 - CONCLUSÕES

Os dados de campo obtidos através de ensaios de bombeamento em rochas ígneas do Alentejo mostram que os modelos desenvolvidos para meios com porosidade dupla permitem, em geral, obter melhores ajustamentos que os modelos clássicos. No entanto, verificou-se, por vezes, a ocorrência de anomalias que poderão ser devidas a efeitos não previstos por aqueles modelos, facto já referido por outros autores (PEREIRA E ALMEIDA, 1997). Tais discrepâncias poderão ser devidas, entre outros factores, à geometria do meio, que pode não corresponder totalmente ao conceito de meio com porosidade dupla, a heterogeneidades, verticais e laterais, perdas de carga quadráticas na captação ensaiada, rebaixamentos excessivos, em relação à espessura saturada, etc.

Por outro lado é facto bem conhecido que as funções de poço para meios com porosidade dupla são pouco sensíveis a variações em alguns dos parâmetros pelo que pode ser muito questionável a sua estimação. No entanto, parece inegável que os valores obtidos para a transmissividade são representativos.

BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, C. E OLIVEIRA, M. M. – “Caracterização hidráulica de aquíferos fracturados”, in Livro de Homenagem a Carlos Romariz, editado pela Secção de Geologia Económica e Aplicada da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, 1990, p. 30-64.

- BARENBLATT, G.I., ZHELTOV, P. E KOCHINA, N. – “Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks”. J. Appl. Math. Mech. Engl. Transl., **24**, 1960, p 1286-1303.
- BOULTON, N.S., E STRELTSOVA, T.D. – “Unsteady flow to a pumped well in a two-layered water bearing formation”. J. Hydrology, **35**, 1977, p 245-256.
- BOULTON, N.S., E STRELTSOVA, T.D. – “Unsteady flow to a pumped well in a fissured water bearing formation”. J. Hydrology, **35**, 1977, p 257-270.
- BOULTON, N.S., E STRELTSOVA, T.D. – “Unsteady flow to a pumped well in a unconfined fissured aquifer”. J. Hydrology, **37**, 1978, p 349-363.
- CARVALHOSA, A. B. & CARVALHO, A. M. G. – “Carta Geológica de Portugal à escala 1:50 000, Notícia explicativa da folha 40 A – Évora”. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 1969, 26 p.
- CHAMBEL, A. – “Prospecção e exploração de águas subterrâneas em rochas fissuradas”. Dissertação apresentada nas provas de aptidão científica na Universidade de Évora, Évora, 1989, 173 p.
- CHAMBEL, A. – “Hidrogeologia da região de Évora”. Dissertação para obtenção do grau de Mestre, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, 1990, 126 p.
- FIALHO, A. – “Metodologia aplicada para atribuição de licenças de captação de água subterrânea em rochas cristalinas e cristalofílicas”. Trabalho de Fim de Curso da licenciatura em Engenharia de Recursos Hídricos pela Universidade de Évora, Évora, 1997, 111 p.
- GODARD, A. – “Pays et Paysages du Granite” Col. le géographe, P.U.F., Paris 232 p.
- MOENCH, A. F. – “Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin”. Water Resource Res., **7**, 1984, p 831-846.
- PEREIRA, M. R. E ALMEIDA, C. (1997) – “Interpretação de Ensaios de Caudal de Aquíferos Fracturados em Trás-os-Montes Oriental (Portugal) por Modelos de Porosidade Dupla e por Métodos Clássicos”. Hydrogeology of Hard Rocks, Some experiences from Iberian Peninsula and Bohemian Massif, Ed. by J. G. Yélamos y F. Villaroya, Madrid, p. 15-29.
- STRELTSOVA, T. D. – “Hydrodynamics of groundwater flow in a fractured formation”. Water Resource Res., **3**, 1976, p405-414.