

## **AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS DE SIMULAÇÃO EM MEIO AQUIFERO FRATURADO.**

ADELBANI BRAZ DA SILVA \*; AGOSTINHO FERNANDES SOBREIRO NETO \*\* e ANTONIO CARLOS BERTACHINI \*\*\*

### **RESUMO**

Foram desenvolvidas, adaptadas, testadas e avaliadas técnicas de simulação matemática em meio aquífero fraturado. Este trabalho foi facilitado pela existência de uma área com uma série histórica de dados geológicos e hidrogeológicos que permitiu a realização de retro-análises de dados e aferição das simulações. Os balanços hídricos e as variações das superfícies potenciométricas obtidas nas simulações foram compatíveis com os dados reais disponíveis o que ratifica a adequabilidade do emprego destes programas em meios descontínuos.

### **INTRODUÇÃO**

Este trabalho é um produto de uma pesquisa realizada pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, com recursos financeiros do Programa de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - PADCT, da Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP, através do contrato no. 42.86.0508.02.

A pesquisa visou principalmente desenvolver, adaptar e testar metodologia para aplicar técnicas de simulação matemática em aquíferos fraturados. Procurou-se definir estratégias para utilização de modelos numéricos em meio fraturado e selecionar os algoritmos e programas de simulação que poderiam se aplicados neste tipo de aquífero.

A área onde foram testados os modelos e simulado o aquífero fraturado foi a mina de Conceição da Companhia Vale do Rio Doce - CVRD, no município de Itabira-MG. Nesta mina existe um trabalho contínuo, e monitorado, de desaguamento da cava para lavra do minério, com um grande número de dados e informações geológicas e hidrogeológicas que facilitaram sensivelmente o desenvolvimento dos trabalhos.

### **GEOLOGIA DA ÁREA**

As minas da CVRD no distrito ferrífero de Itabira encontram-se num sinclínrio formado pelas rochas dos Supergrupos Minas e Rio das Velhas. Estas minas (Cauê, Conceição e Dois Córregos) estão situadas em sinclinais com eixo apresentando caimento para leste.

O sinclinal da mina de Conceição tem na base as rochas meta-pelíticas do Grupo Caraça, constituídas essencialmente por filitos

\* Geólogo PhD do IGC/UFMG, Rua Panema 338, BHZ-MG, Cep 31.130-620.

\*\* Geólogo da CVRD, Centralizada Cauê, Itabira-MG, Cep 35.900-900.

\*\*\* Geólogo da MBR, Av Ligação 3000, Nova Lima-MG, Cep 34.000-000.

sericíticos, com intercalações arenosas. Estas rochas são bastante impermeáveis e constituem o limite local do aquífero. Sobre o Grupo Caraça ocorrem as rochas da Formação Cauê, constituídas por itabiritos e hematitas, que são os minérios explotados na mina. Recobrimo estes minérios aparecem as rochas do Grupo Piracicaba constituídas por quartzitos friáveis amarelo-esbranquiçadas, em parte argilosos.

Na área onde foi realizada esta pesquisa, isto é, no corpo "C" da mina de Conceição, ocorrem diferentes tipos de hematitas, que são classificadas pela CVRD segundo o tipo físico em: dura, mole, pulverulenta e "Blue Dust". As hematitas duras e moles mostram-se xistosas e fraturadas, enquanto a pulverulenta é apenas xistosa e o "Blue Dust" não mostra nenhuma estrutura. A distribuição espacial desses tipos na mina é irregular, não havendo indícios de condicionamento estrutural na conformação dos diversos tipos de hematita e os seus contatos ocorrem de modo transicional. Os itabiritos ocorrem em menor proporção formando corpos irregulares que são espacialmente associados à área de "Blue Dust". São rochas duras mas encontram-se bastante fraturadas na área estudada. Além destas rochas ocorrem também finos diques decompostos de rochas intrusivas dispostas, normalmente, de maneira concordante com as rochas encaixantes. Provavelmente devem ser rochas metabásicas.

As rochas apresentam dois "trends" principais de fraturamento, que ocorrem predominantemente na área. Assim, as principais direções de fraturas que condicionam a circulação da água no subsolo são: N40°E e N50°W.

### **CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS**

As características hidrodinâmicas do aquífero fraturado da mina de Conceição foram determinadas através de interpretação de vários testes de aquíferos realizados pela CVRD dentro do programa de desaguamento da área.

O primeiro estudo hidrogeológico na mina de Conceição foi realizado em 1983, através da perfuração e teste de um poço-piloto e vários piezômetros. Os piezômetros foram dispostos em duas linhas segundo as direções paralela e perpendicular à xistosidade. Foram determinados dois valores distintos de T e S, segundo as duas linhas de piezômetros, ratificando, desta maneira, o modelo anisotrópico do aquífero, com direções preferenciais do fluxo d'água subterrâneo. A linha de piezômetros disposta na direção perpendicular à xistosidade apresentou valores menores de T e S, enquanto a linha paralela à xistosidade estes valores foram maiores. Os valores médios obtidos foram T = 162 m<sup>3</sup>/dia e S = 9.10<sup>-4</sup>, para os piezômetros perpendiculares à xistosidade, e T = 343 m<sup>3</sup>/dia e S = 1,67.10<sup>-4</sup> para os paralelos à xistosidade. Assim, o conoide de depressão formado mostrou uma forma elíptica com o eixo maior sendo perpendicular à xistosidade.

A partir da interpretação destes dados hidrodinâmicos a CVRD dimensionou uma bateria de 6 poços espaçados de 30m para o

rebaixamento do lençol d'água da mina de Conceição, prevendo uma vazão total de 560 m<sup>3</sup>/h de forma que o bombeamento contínuo durante 30 dias rebaixasse 26m a uma distância de 120m. Após a perfuração dos poços desta bateria foi efetuada uma série de ensaios, visando a obtenção de novos dados. Esses novos dados permitiram a definição da capacidade real de produção da bateria bem como uma menor projeção do rebaixamento previsto.

Os valores médios obtidos nos testes da bateria de poços foram, então, de  $T = 172$  m<sup>3</sup>/dia e  $S = 0,0094$  com vazões de testes da ordem de 40 a 45 m<sup>3</sup>/h.

Durante a operação de desaguamento da mina de Conceição foram medidos os rebaixamentos em piezômetros situados a 60m e a 120m (TÁRCIA, R.F. et alii, 1986). Os valores reais foram menores que os projetados. Isto sugere que as projeções feitas, baseadas nos parâmetros hidrodinâmicos obtidos a partir do poço-piloto, ou mesmo dos poços da bateria, estavam super-estimadas ou que existe uma heterogeneidade muito grande no aquífero da mina. Segundo TÁRCIA, R.F. et alii (1986) a medida que aumentou o tempo de bombeamento, os resultados reais aproximaram-se cada vez mais da prospecção teórica. Este fato mostra que houve uma substancial melhoria operacional da bateria com o tempo, e que, logrou-se alcançar um rebaixamento médio aproximadamente igual ao teórico com 45 dias de bombeamento.

Outra observação que pode ser feita é que alguns piezômetros apresentam um rebaixamento além do projetado. De acordo com TÁRCIA, R.F. et alii (1986), tais piezômetros situam-se em área de predomínio de hematita dura/mole sobre a hematita pulverulenta e "Blue Dust", indicando a diferente resposta dos dois tipos de minério frente ao bombeamento. À medida que se aproxima da área de predomínio do "Blue Dust" o rebaixamento é progressivamente menor. O comportamento das hematitas pulverulentas e "Blue Dust" se aproxima à de um aquífero granular e homogêneo e o das hematitas mole e dura tem características de aquífero fraturado.

#### MODELOS DE SIMULAÇÃO UTILIZADOS

Os modelos escolhidos e utilizados para simulação do aquífero da mina de Conceição foram os de PRICKETT-LONNQUIST (1971) e o FEELTR de HOSANSKI, J.M. (1981), inédito; modificado e adaptado nesta pesquisa.

Inicialmente, foi realizada a calibração do modelo de simulação de aquífero de PRICKETT-LONNQUIST (1971) através de uma retro-análise utilizando-se os parâmetros hidrodinâmicos obtidos nos ensaios de bombeamento da mina de Conceição. Nesta etapa foram efetuadas diversas discretizações do aquífero e impostas diferentes condições de contorno da área simulada, até que os resultados calculados fossem semelhantes aos reais medidos na operação de desaguamento. O programa PRICKETT-LONNQUIST foi escolhido porque o aquífero das hematitas pulverulentas e o "Blue Dust" tem comportamento granular e aparece em maior expressão areal na mina. Além disso, a escala de

trabalho permitia assumir que o conjunto do aquífero tivesse um comportamento isotrópico, onde os fluxos preferenciais nas fraturas fossem inibidos, na escala, pelo fluxo no meio granular.

Com esta calibração foi possível conhecer melhor o funcionamento hidráulico do aquífero da mina de Conceição. Por outro lado, também foi possível determinar quais os valores de  $T$  e  $S$  que mais representam as condições hidrodinâmicas do aquífero.

Após a calibração anteriormente citada e com um melhor conhecimento dos parâmetros hidrodinâmicos e do modelo de funcionamento hidráulico do aquífero, utilizou-se o programa FEELTR, desenvolvido para resolução de problema de escoamento permanente ou transitório em maciço rochoso cortado por dois sistemas de fraturas subverticais de orientação qualquer.

Com o modelo FEELTR, também, foram realizadas diversas discretizações do aquífero e impostas diferentes condições de contorno da área simulada.

#### DISCRETIZAÇÃO DO AQUIFERO E CONDIÇÕES DE CONTORNO - MODELO PRICKETT-LONNQUIST

Para a aferição do modelo PRICKETT-LONNQUIST a área foi subdividida em malhas (figura 1). A discretização espacial do aquífero foi efetuada segundo várias distintas condições com objetivo inicial de verificar-se sua influência nos resultados de simulação para posterior comparação com os resultados reais disponíveis. Por se tratar de um estudo local e de detalhe e um aquífero de pequena extensão, qualquer modificação nos dados iniciais provoca sensível influência nos resultados.

#### CONDIÇÕES HIDRODINÂMICAS

Em todas as simulações o filito Caraça foi considerado como limite impermeável. Nas primeiras simulações a porção norte da área foi considerada impermeável, mas os rebaixamentos foram muito grandes sugerindo que o aquífero era alimentado através daquela parte. Assim, posteriormente considerou-se o limite norte como sendo de nível constante. Não foi considerada infiltração por chuva uma vez que os volumes infiltrados localmente, na área simulada, são desprezíveis. Por outro lado, foram consideradas várias condições de bombeamento numa tentativa de ajustar aos dados disponíveis.

De todos os valores dos parâmetros hidrogeológicos testados, a simulação que calibrou o modelo foi a com  $T = 172$  m<sup>3</sup>/dia e  $S = 9,4.10^{-3}$ , para o aquífero (hematita e "blue dust"), e  $T = 100$  m<sup>3</sup>/dia e  $S = 9,4.10^{-3}$  para o quartzito Piracicaba. As condições de contorno, para estes parâmetros, foram a de nível impermeável no filito Caraça ( $T = 0$  m<sup>3</sup>/dia) e nível constante de recarga na porção norte da área ( $T = 640$  m<sup>3</sup>/dia). Os rebaixamentos, no tempo, observados nestas condições são congruentes aos valores reais medidos no desaguamento da mina. Os volumes extraídos e os volumes

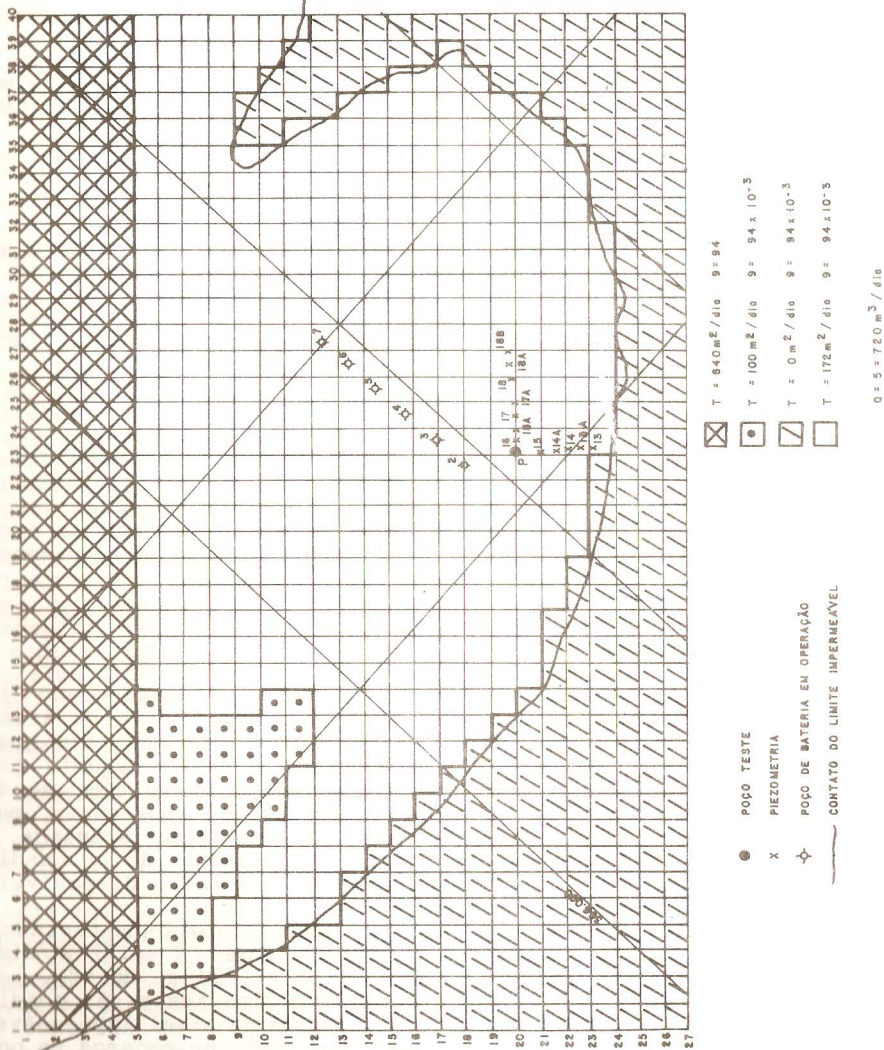


FIGURA 1 - CONDIÇÕES INICIAIS DO TESTE

simulados também são da mesma ordem de grandeza (figura 2).

#### DISCRETIZAÇÃO DO AQUIFERO E CONDIÇÕES DE CONTORNO - MODELO FELLTR

Após as simulações com o modelo PRICKETT-LONNQUIST, onde foram testadas várias grandezas dos parâmetros do aquífero e diversas condições de contorno, efetuaram-se algumas simulações com o programa FELLTR. As condições de contorno foram semelhantes, isto é, o filito Caraça foi considerado impermeável e a porção norte da área foi imposto um nível constante de recarga do aquífero. A área simulada foi delimitada em seis segmentos, sendo quatro destes segmentos com fluxos nulos e dois com potencial imposto constante (figura 3).

#### PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO FELLTR

Foi considerado o regime transitório em escoamento livre, supondo que as variações de carga são pequenas diante da espessura do aquífero. Foram realizadas diversas simulações com diferentes dados. A que foi congruente com os dados disponíveis teve os seguintes parâmetros iniciais:

- permeabilidade de matriz:  $6,0 \cdot 10^{-4}$ ;
- armazenamento da matriz:  $9,4 \cdot 10^{-3}$ ;
- densidade volumétrica da superfície da fratura: 0,10;
- número de nós reais do contorno: 130;
- ângulo entre as fraturas:  $90^\circ$ ;
- permeabilidades direcionais:  $5,6 \cdot 10^{-4}$  e  $1,2 \cdot 10^{-4}$  m/s;
- vazão total de bombeamento: 5.352 m<sup>3</sup>/dia;
- espessura do aquífero: 80 m.

Com estes parâmetros iniciais foram simulados 19 meses considerando-se como bombeamento mensal de entrada de dados, os valores médios dos volumes reais bombeados mensalmente. O período de simulação numérica corresponde aproximadamente aos dados reais de 24/08/85 a 18/12/87.

#### RESULTADOS OBTIDOS

Os trabalhos de calibração dos modelos foram muito facilitados em vista de disponibilidade de dados reais do aquífero. Assim, foi possível ajustar os dados simulados aos disponíveis e testar os diferentes parâmetros do aquífero e as condições de contorno.

Verificou-se que os modelos utilizados simularam perfeitamente as condições reais, não havendo necessidade do desenvolvimento de um novo algoritmo para a escala de trabalho adotada. Em escala pequena

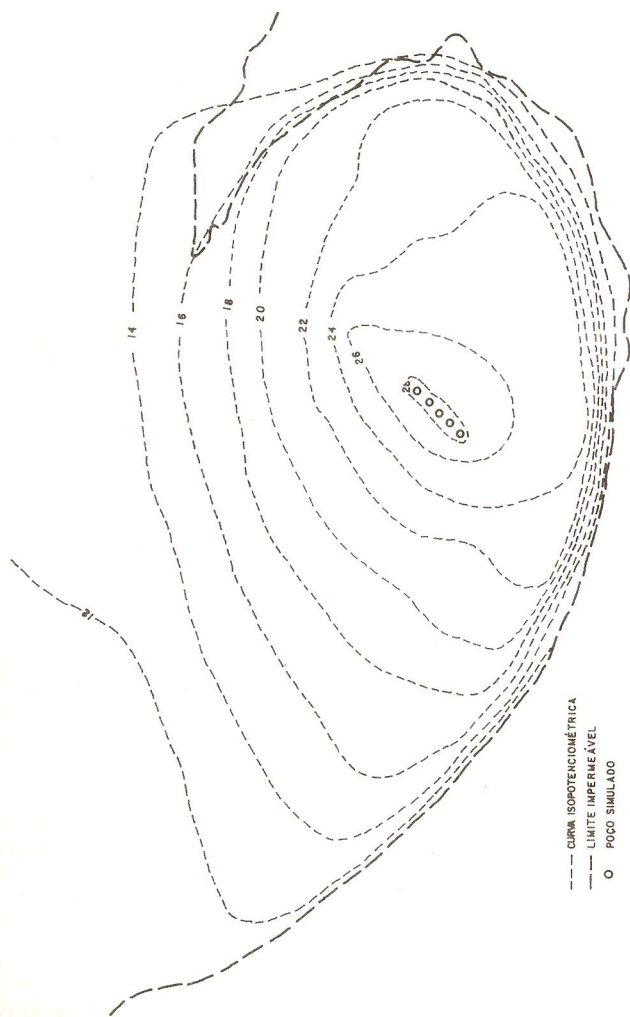
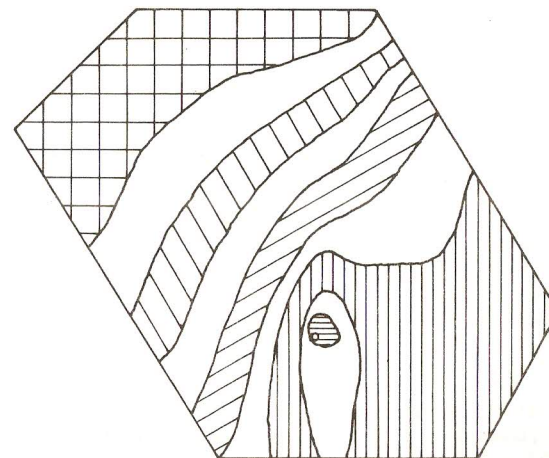


FIGURA 2 - SIMULAÇÃO DE CALIBRAÇÃO









- |   |                                |
|---|--------------------------------|
|    | : CARGA ENTRE: 923.71 E 925.63 |
|    | : CARGA ENTRE: 927.55 E 929.48 |
|    | : CARGA ENTRE: 931.40 E 933.32 |
|   | : CARGA ENTRE: 935.24 E 937.16 |
|  | : CARGA ENTRE: 939.08 E 941.00 |
|  | : BOMBEAMENTO                  |

FIGURA 3 - MAPA POTENCIOMÉTRICO SIMULADO PARA O FISSURADO

o aquífero fraturado pode ser considerado como homogêneo e isotrópico. A medida que se aumenta a escala, os efeitos de anisotropia e heterogeneidade começam a influenciar nos resultados. A superfície potenciométrica em um meio aquífero fraturado é a resultante de todos os efeitos locais de heterogeneidade do aquífero. Assim, quando se faz um rebaixamento da superfície potenciométrica, os efeitos locais serão desprezíveis em escala pequena. Como os problemas hidrogeológicos raramente são tratados em escala grande pode-se concluir que é perfeitamente adequado a utilização dos modelos testados neste trabalho, tomando-se o cuidado com o valor significativo dos parâmetros empregados para a escala de trabalho.

Pela simplicidade de aplicação e pelo grande número de informações que a modelagem matemática oferece pode-se afirmar que esta ferramenta é indispensável aos estudos espaciais em hidrogeologia. No presente estudo, por exemplo, foi possível configurar uma área de recarga do aquífero na sua porção norte, que não era considerada anteriormente, como também, ratificar o limite impermeável do filito Caraça. Pelo volume extraído e pelos níveis de rebaixamento atingidos verifica-se também que está ocorrendo uma exaustão local do aquífero e que pela área superficial do aquífero a infiltração direta nas épocas de chuvas é desprezível.

#### CONCLUSÕES

A metodologia utilizada neste trabalho pode tornar possível a previsão e controle dos efeitos de bombeamento, drenagem e fluxos subterrâneos nos aquíferos em rochas fraturadas, inclusive com a quantificação dos volumes de água envolvidos no balanço hídrico.

Os modelos testados neste projeto, apesar de terem sido concebidos para meios porosos, podem perfeitamente serem aplicados em meios fraturados em função da escala de trabalho adotada. Os balanços hídricos e as variações das superfícies potenciométricas obtidas nas simulações foram compatíveis com os dados reais disponíveis o que ratifica a adequabilidade do emprego destes programas em meios descontínuos.

Os dois programas utilizados neste projeto dispõem também de subrotinas para a quantificação da variação das reservas de água subterrânea em aquíferos. Esta quantificação permite prever os volumes explotados e assim racionalizar o aproveitamento ou o desaguamento de um aquífero fraturado.

Sugere-se aplicar outros modelos matemáticos disponíveis na literatura nesta mesma área para testar a validade de sua utilização em meios fraturados.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- HOSANSKI, J.M. (1981). Nota de apresentação do programa de simulação - FEELTR - USP - Instituto de Geociências. São Paulo. Inédito.
- PRICKETT, T.A. & LONNQUIST, C.G. (1971). Selected digital computer techniques for groundwater resource evaluation. Illinois State Water Survey, Urbana, Bulletin 55, USA.
- TARCIA, R.F.; SOBREIRO NETO, A.F. & SANTANA, F.C. (1986). Rebaixamento do lençol freático da mina de Conceição-corpo "C". In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Brasília. Anais da ABAS, p 550-562. Brasília, DF.