

TRATAMENTO CONTÍNUO APLICADO AOS MEIOS FISSURADOS

Abelardo A.A. Montenegro*, Antonio M. Righetto* e Suzana M.G.L. Montenegro**

*Dept. de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo,
Av. Dr. Carlos Botelho, 1465, São Carlos, SP, Brasil CEP. 13.560**Dept. de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco,
Av. Prof. Moraes Rego, s/nº, Cidade Universitária, Recife, PE, Brasil, CEP. 50.000

ABSTRACT

A description of a highly fractured groundwater aquifer has been constructed in order to take better advantage about local geological information. This formulation allows the users to choose homogeneous subregions, with different scales, which can be seen as a continuum. A numerical code has been developed to generate bidimensional sample fractures systems using the geometric properties of the medium, such as fracture orientation, aperture, spacing and length. This model has been used to investigate the sample size effect and to study the influence of different realizations of a statistically described fracture system. The flow behavior is evaluated by a model based on finite elements technique that receives hydraulics information from the first one. The entire formulation is applied to Serra Geral aquifer in Ribeirão Preto City, São Paulo State, Brazil.

KEYWORDS

Escoamento em meios fissurados; Aquífero Serra Geral; Método dos Elementos Finitos; Modelação quase-tridimensional de águas subterrâneas; Meios porosos equivalentes.

INTRODUÇÃO

Quando se analisa regionalmente escoamentos em meios fissurados, uma questão da maior importância é verificar a possibilidade da rede de fissuras ser tratada como um meio poroso equivalente.

Sistemas com fraturas foram analisados por Snow (1969), que desenvolveu expressão matemática para o tensor de permeabilidade associado a uma fissura infinita (que efetivamente contribui para a permeabilidade do meio), com abertura arbitrária e orientação qualquer, relativa a um sistema de coordenadas fixo. Foi também demonstrado que o tensor de permeabilidade para uma malha de tais fissuras pode ser obtido somando-se os respectivos componentes dos tensores individuais, para cada fissura do sistema.

Este trabalho objetiva a aplicação da formulação supracitada ao tratamento contínuo de meios fissurados, considerando-se sub-regiões de homogeneidade e anisotropia.

Nestes subdomínios, determina-se a permeabilidade equivalente a partir de informações da geometria das fissuras, assumindo-se matriz rochosa impermeável e fissuras infinitas.

Em análises locais, a representação por fraturas discretas é usualmente mais apropriada, possi-

bilitando utilizar-se de modo mais eficiente as informações geológicas disponíveis. O escoamento resultante, neste caso, é determinado a partir das características de uma malha rígida de fissuras planares. Quando o estudo assume caráter regional, entretanto, tal metodologia não mais é exequível, devendo-se optar por métodos que empreguem as distribuições estatísticas dos principais parâmetros geométricos caracterizadores do meio. Este tratamento contínuo permitirá simulações do comportamento hidrodinâmico regional de aquíferos fissurados.

Em particular, o desenvolvimento desse estudo está relacionado com o interesse na avaliação do potencial hídrico do aquífero Serra Geral, caracterizado como um meio puramente fissurado, isto é, com blocos de rocha impermeáveis separados por uma rede de fissuras interconectadas e sem preenchimento.

O aquífero Serra Geral, apesar de pouco explorado como reserva hídrica, é unidade hidrogeológica componente do balanço hídrico do manancial subterrâneo de Ribeirão Preto (SP), disto decorrendo o interesse na avaliação de sua potencialidade.

O sistema aquífero considerado é multicamada compreendendo os aquíferos Serra Geral e Botucatu, hidráulicamente conectados através de um aquífero intermediário. Uma descrição minuciosa desse sistema de aquíferos é apresentada por Montenegro (1990).

MALHA DE FISSURAS

O fissuramento em um maciço rochoso está associado a esforços a que se submete o sistema durante sua história geológica, podendo ser provocado por tectonismo, resfriamento da crosta, carregamentos, etc.. Tais tensões tendem a produzir fissuras de orientações definidas, com a formação de "famílias" de fissuras paralelas.

Desse modo, a gênese do maciço constitui-se em ponto relevante na definição do modelo de fissuramento adotado ou, mais especificamente, no número de famílias passíveis de serem observadas no campo.

A caracterização de um sistema fraturado é considerada completa quando cada fissura é descrita em termos de sua abertura, orientação e comprimento (esta última característica de grande importância na circulação hidráulica através do maciço).

Robertson (1970), Priest e Hudson (1976), (1979), e Baecher e Lanney (1978) investigaram as distribuições estatísticas do comprimento e espaçamento em sistemas fissurados. De uma forma geral, o espaçamento entre fissuras apresenta distribuição exponencial, enquanto que o comprimento se distribui segundo uma log-normal.

Long et alii (1982) sugerem distribuição normal para a orientação e abertura. As distribuições anteriores devem ser consideradas quando se utiliza descrição contínua do meio fissurado.

Estas distribuições teóricas permitem adoção de análise estocástica no estudo das características hidráulicas de maciços rochosos, através da geração de diferentes cenários de fissuramentos.

A utilização de modelos contínuos para meios fraturados é prática comum em simulações regionais, onde a área de interesse é suficientemente extensa para que se tenha conhecimento preciso da geometria de suas fissuras. A escolha de tratamento contínuo depende, assim, da escala relativa do problema estudado e do módulo de fissuramento do maciço, caracterizado pelo espaçamento médio entre fissuras elementares de uma dada família.

O comportamento hidráulico de um sistema fraturado aproxima-se, então, de um meio contínuo quando apresenta elevada densidade de fissuras interconectadas, grande número de famílias (grupos de fissuras paralelas) e abertura de fissuras aproximadamente uniformes.

Portanto, é de importância fundamental a definição de sub-regiões de homogeneidade representativas, nas quais as fissuras se comportem como infinitas, promovendo a continuidade entre os blo-

cos homogêneos em que se divide o domínio de escoamento. Considera-se uma fratura como infinita quando esta ultrapassa o subdomínio definido pelo bloco homogêneo que a contém. Assim, o efeito do comprimento das fissuras na permeabilidade de um meio fraturado depende da escala de medida utilizada na definição das sub-regiões.

Considerando a independência hidráulica entre famílias de fissuras em uma mesma célula homogênea, o tensor de condutividade global será determinado a partir da composição dos tensores individuais, associado a cada família de fissuras.

A partir deste ponto, o meio fissurado será tratado como uma justaposição de meios porosos anisotrópicos e homogêneos, podendo-se aplicar as técnicas disponíveis para aquíferos contínuos na quantificação do escoamento em seu interior.

TENSOR DE PERMEABILIDADE EM UM BLOCO HOMOGÊNEO

Seja uma unidade geológica constituída pela superposição de duas famílias de fissuras infinitas paralelas e considere-se um bloco homogêneo quadrado de dimensão W (Fig. 1). Em cada família as fissuras apresentam-se igualmente espaçadas e com abertura uniforme.

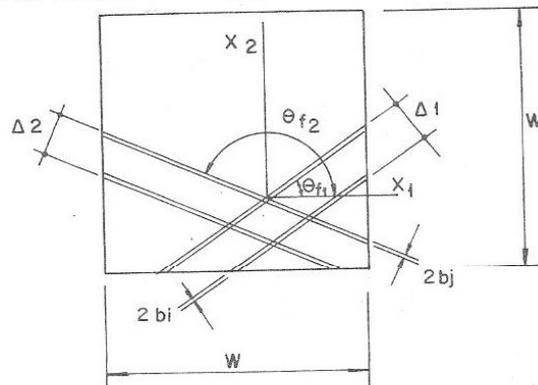


Fig. 1. Superposição de duas famílias de fissuras paralelas em um bloco homogêneo de dimensões W

Segundo Snow (1969) o tensor de permeabilidade total no bloco será a soma algébrica dos tensores para cada família e é dado por

$$K = \frac{2}{3} \frac{g}{\nu} W \sum_{i=1}^{NF_1} \frac{b_i^3}{\Delta_1} \begin{bmatrix} 1 - \text{sen}^2 \theta_{f1} & \cos \theta_{f1} \text{sen} \theta_{f1} \\ \text{sen} \theta_{f1} \cos \theta_{f1} & 1 - \text{cos}^2 \theta_{f1} \end{bmatrix} + \sum_{j=1}^{NF_2} \frac{b_j^3}{\Delta_2} \begin{bmatrix} 1 - \text{sen}^2 \theta_{f2} & \cos \theta_{f2} \text{sen} \theta_{f2} \\ \text{sen} \theta_{f2} \cos \theta_{f2} & 1 - \text{cos}^2 \theta_{f2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde: NF_1 e NF_2 são os números de fissuras das famílias 1 e 2 no bloco, respectivamente; Δ_1 e Δ_2 são os espaçamentos médios entre fissuras das famílias 1 e 2; $2b_j$ é a abertura das fissuras da família j ; θ_{f1} e θ_{f2} são as orientações das famílias 1 e 2 em relação ao eixo x_1 do sistema de coordenadas local (x_1, x_2) (Fig. 1); e g , ν e W são a aceleração da gravidade, a viscosidade cinemática da água e a dimensão do bloco, respectivamente.

O número de fissuras em uma dada família pode ser calculado através de

$$NF = PAR_1 + PAR_2 - 1 \quad (2a)$$

se $\text{INT}(\text{PAR}_1) = \text{PAR}_1$ e $\text{INT}(\text{PAR}_2) = \text{PAR}_2$, onde $\text{INT}(M)$ é a função "Inteiro de M", ou por

$$\text{NF} = \text{INT}(\text{PAR}_1) + \text{INT}(\text{PAR}_2) \quad (2b)$$

nos demais casos, sendo

$$\text{PAR}_1 = \frac{\text{sen } \theta_f}{\Delta} \cdot W \quad (3a)$$

$$\text{PAR}_2 = \frac{\text{ABS}(\text{cos } \theta_f)}{\Delta} \cdot W \quad (3b)$$

onde $\text{ABS}(M)$ é a função "valor absoluto de M".

O modelo desenvolvido assume independência hidráulica entre as diversas famílias de fissuras.

Para geração da orientação de cada família em um dado bloco homogêneo, deve-se inicialmente estimar os parâmetros da distribuição da orientação de fissuras (assumida Normal), com base em dados de campo da região em análise.

De posse da média e variância das orientações, pode-se gerar orientações aleatórias normalmente distribuídas e representativas do domínio em questão.

Determinadas as orientações, tomam-se valores médios de abertura e espaçamento, estimando-se a permeabilidade do bloco a partir de (1).

Em domínios pouco heterogêneos, deve-se levar em consideração uma dependência estatística entre orientações em blocos homogêneos vizinhos.

APLICAÇÃO DO MODELO CONTÍNUO AO AQUIFERO SERRA GERAL

Segundo Sinelli (1972), a formação Serra Geral em Ribeirão Preto apresenta-se puramente fraturada, com elevado grau de fissuramento, favorecendo o tratamento contínuo do meio.

Devido a sua gênese recente, a unidade geológica representada pelos diabásios do Serra Geral não deve apresentar mais que dois sistemas (famílias) superpostos de fissuras paralelas.

Os blocos homogêneos, adotados para esta formação apresentam 1 km de dimensão, apresentando pelo menos 75% de suas fissuras como infinitas (no Serra Geral, 25% das fissuras apresentam comprimento inferior a 1 km).

Como os blocos são retangulares, o percentual de fissuras infinitas tende a aumentar, a medida que se analisam fissuras cujos centros estão próximos dos vértices do bloco (Fig. 2). Nas simulações efetuadas, o caráter finito das fissuras não foi considerado.

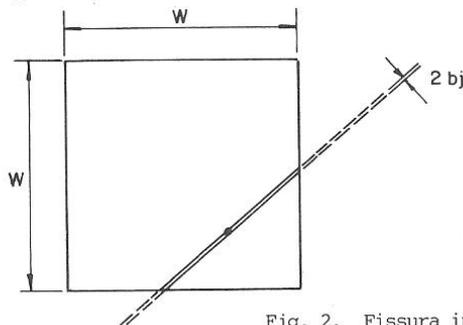


Fig. 2. Fissura infinita em bloco homogêneo

Montenegro (1990) apresenta para as fissuras do Serra Geral uma orientação média de 8 graus NE, com desvio-padrão de 40,64 graus ; o espaçamento médio entre fissuras cuja orientação é de Nordeste vale 112 m, enquanto que nas fissuras de Noroeste, este espaçamento é de 84 m. No tocante à abertura das fissuras, essa varia de milímetros a centímetros no domínio de Ribeirão.

A partir dos dados anteriores, pode-se proceder a análises estocásticas sobre os 150 blocos homogêneos pertencentes ao domínio em estudo (Montenegro (1990)).

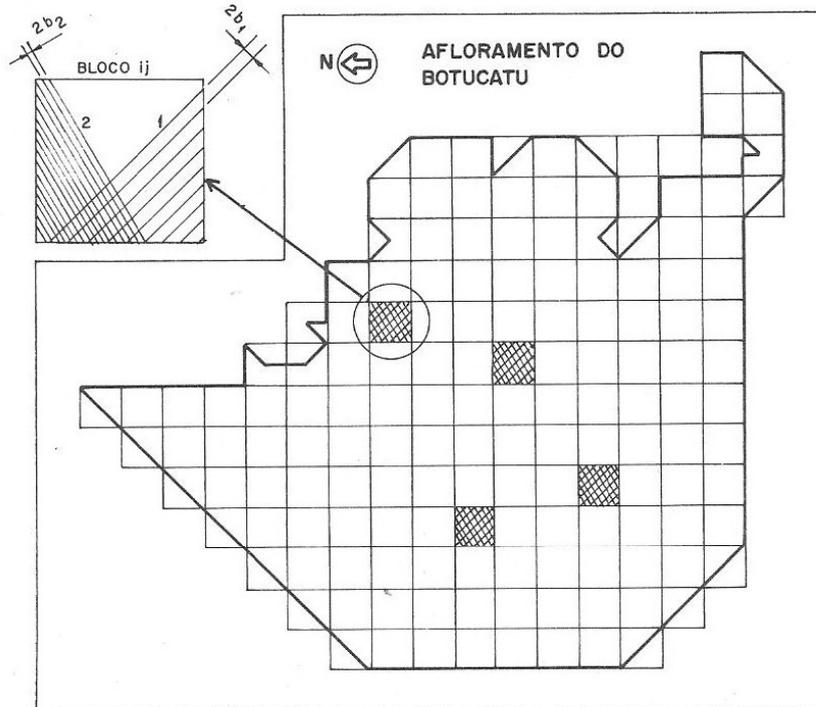


Fig. 3. Blocos homogêneos justapostos no domínio em questão destacando-se as famílias de fissuras presentes em um dado bloco

SIMULAÇÕES

Foram realizadas quatro simulações do manancial Serra Geral - Botucatu, variando-se as características do sistema fissurado, a saber:

Nº SIM	ABERTURA	HOMOGENEIDADE	DEPENDÊNCIA DE ORIENTAÇÃO
1	5 mm	1 km ²	independentes
2	7.5 mm	1 km ²	independentes
3	5 mm	1 km ²	dependência entre células com 9 blocos
4	5 mm	1 km ²	dependência em todo o domínio

Para os demais parâmetros do manancial, foram adotados valores sugeridos por Montenegro (1990).

São apresentados mapas potenciométricos do Serra Geral, bem como esquemas de não efetividade do aquífero (regiões hidráulicamente vazias), obtidos em cada simulação. (Em anexo)

Para simulação hidrodinâmica do manancial utilizou-se modelo matemático bidimensional baseado na técnica numérica de elementos Finitos, aplicado ao Botucatu e Serra Geral, com conexão unidimensional vertical entre eles (Montenegro (1990)).

Nestas análises desprezou-se o bombeamento no sistema bem como negligenciou-se a armazenabilidade dos aquíferos.

RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos para as diferentes simulações são qualitativamente semelhantes e apresentam boa circulação para o Serra Geral em Ribeirão Preto, na região em que este aquífero encontra-se efetivo.

A Figura 4 apresenta a área contribuinte do Serra Geral para o balanço do sistema de Ribeirão Preto. Esta área de efetividade foi gerada nas simulações a partir dos níveis potenciométricos do sistema (ano base 1983) e das cotas de base do aquífero (o modelo permite variação de espessura do sistema).

Note-se que as quatro simulações geram praticamente a mesma área de efetividade do Serra Geral. Esta é estabelecida através da justaposição dos elementos finitos triangulares efetivos e considerando-se as regiões onde ocorra nítida continuidade hidrodinâmica. (Os elementos triangulares efetivos estão apresentados nas Figuras 6a, 6b, 6c e 6d).

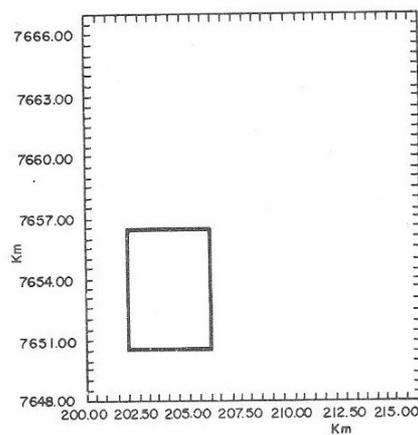


Fig. 4. Área do Serra Geral contribuinte para o balanço hídrico do manancial subterrâneo de Ribeirão Preto - SP

Para a simulação 4, o modelo gerou duas famílias de fissuras homogêneas em todo o domínio, com orientações $\theta_1 = 27^\circ$ NE e $\theta_2 = 50^\circ$ NW, valores próximos aos sugeridos por Sinelli e Wernick (1970) para as orientações preferenciais (predominância da direção N30E e, como direções subsidiárias, N50-60E e N50-60W).

Verifica-se dos resultados que a hipótese de independência entre blocos de homogeneidade (simulações 1 e 2) não destrói a continuidade hidráulica entre os mesmos (Figuras 5a e 5b). Vale salientar, entretanto, que a consideração de dependência (simulações 3 e 4) favorece o escoamento nas regiões próximas aos contornos, onde as espessuras saturadas do aquífero são reduzidas, como pode ser verificado comparando-se as Figuras 5a e 5d.

Da comparação entre as Figuras 5a e 5b, pode-se notar a redução do gradiente no escoamento, entre as simulações 1 e 2, resultante do aumento da abertura das fissuras.

Constata-se, desse modo, a marcante influência desse parâmetro no estabelecimento das condutividades anisotrópicas de um meio fissurado. (Observe-se que este parâmetro comparece na expressão (1) elevado ao expoente três).

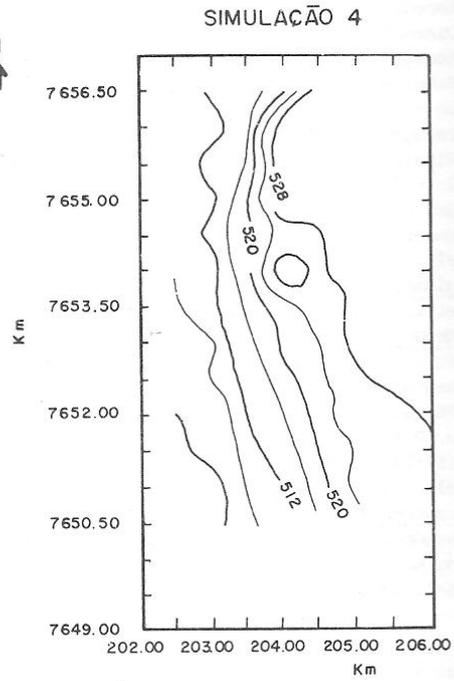
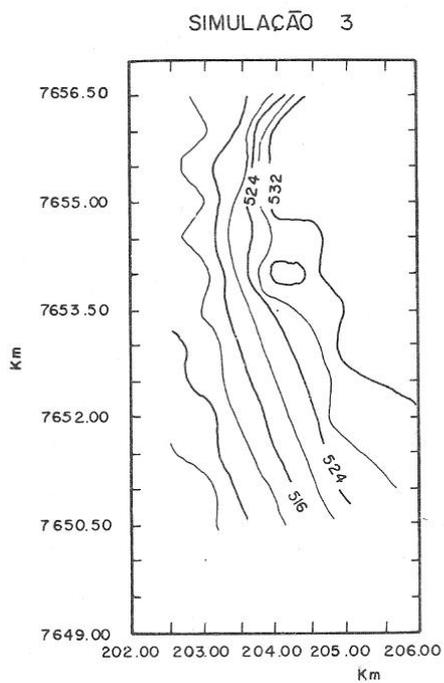
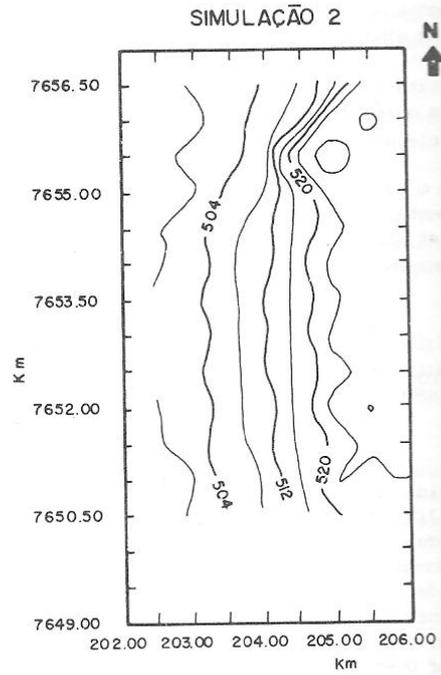
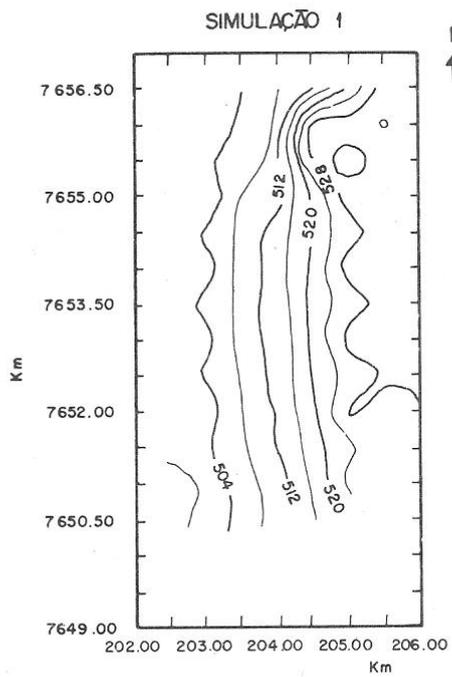
Para o caso específico de Ribeirão Preto, o fluxo subterrâneo obtido, em todas as simulações, (de Sudoeste, com componente E-W bem mais pronunciada que a N-S) coincide com o previsto em Teissedre et al. (1982) para o escoamento global do manancial subterrâneo ("... o fluxo subterrâneo parece convergir para o Sudoeste do Estado de São Paulo, em direção ao Rio Paraná").

AGRADECIMENTO

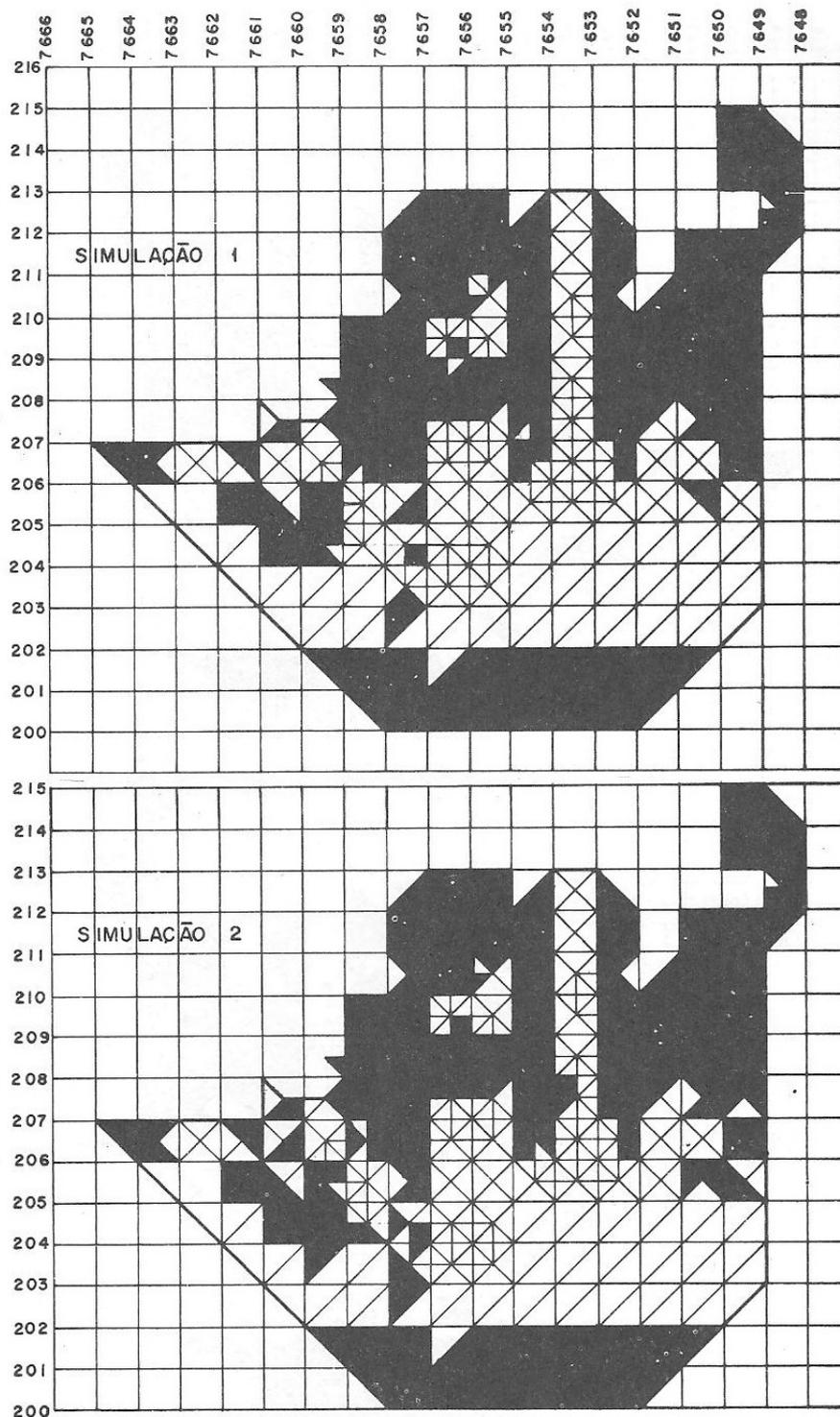
Ao Prof. Dr. Dante Contin Neto, pela valiosa participação neste estudo.

REFERÊNCIAS

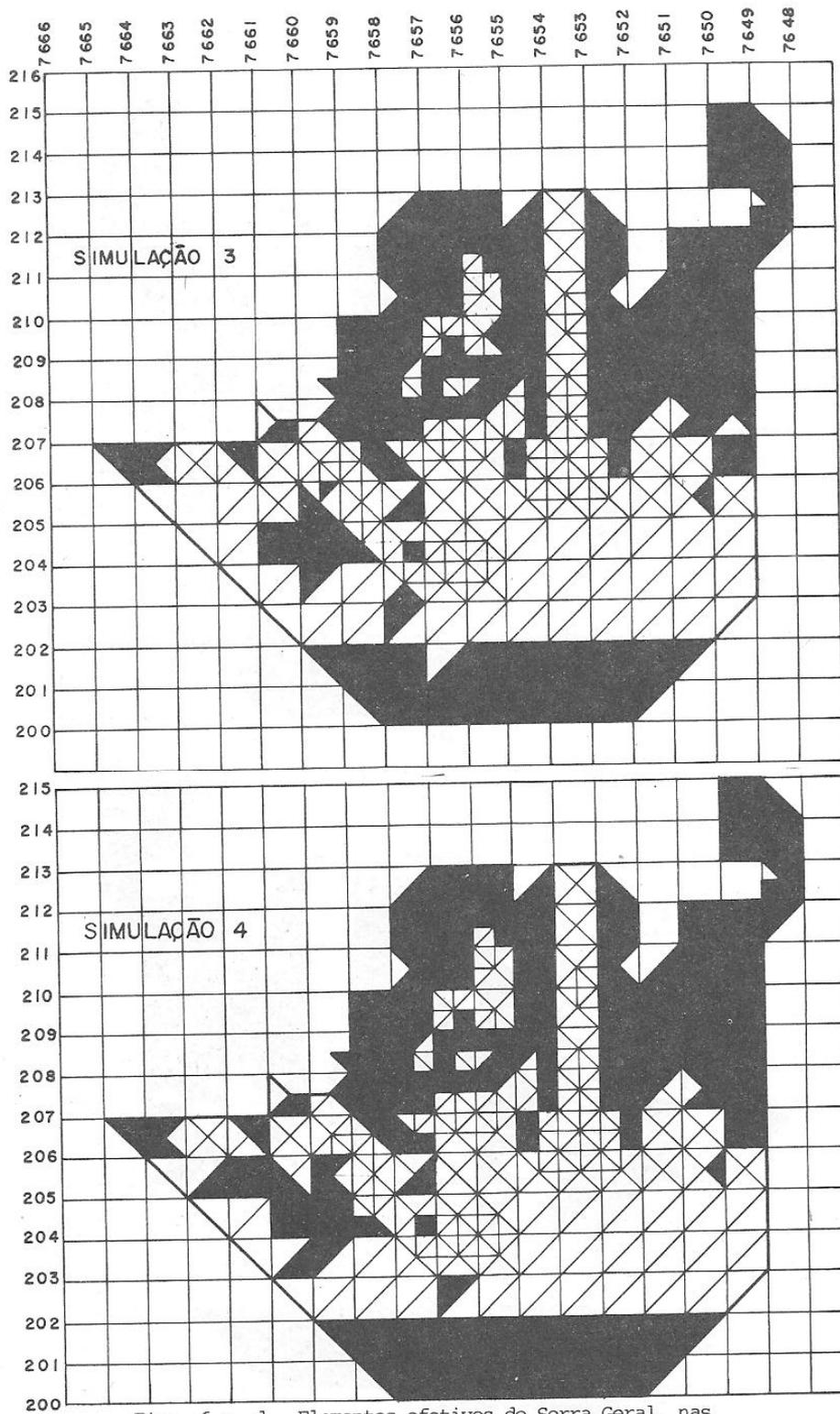
- Duguid, J.O. and Lee, P.C.Y. (1977). Flow in Fractured Porous Media, Water Resources Research, 13(3):558-566.
- Freeze, R.A. (1975). A Stochastic-Conceptual Analysis of One-Dimensional Groundwater Flow in Nonuniform Homogeneous Media, Water Resources Research, 11(5):725-741.
- Gomide, F.L.S., Pinto, N.L.S., Holtz, A.C.T. and Martins, J.A. (1976). Hidrologia Básica - Editora Edgard Blücher Ltda.
- Long, J.C.S., Gilmour, P. and Witherspoon, P.A. (1982). Porous Media Equivalents for Networks of Discontinuous Fractures, Water Resources Research, 18(3):645-658.
- Montenegro, A.A.A. (1990). Modelação Matemática do Manancial Subterrâneo de Ribeirão Preto-SP, Dissertação de Mestrado, EESC-USP.
- Montenegro, A.A.A. and Righetto, A.M. (1988). Modelação Matemática do Manancial Subterrâneo de Ribeirão Preto 1 - Descrição do Domínio, V Congresso de Águas Subterrâneas (ABAS), São Paulo - SP.
- Montenegro, A.A.A. and Righetto, A.M. (1988). Modelação Matemática do Manancial Subterrâneo de Ribeirão Preto 2 - Modelação Matemática, V Congresso de Águas Subterrâneas (ABAS), São Paulo - SP.
- Sagar, B. and Runchal, A. (1982). Permeability of Fractured Rock: Effect of Fracture Size and Uncertainties, Water Resources Research, 18(6):266-274.
- Sinelli, O. and Wernick, E. (1970). Análise Estrutural em Geomorfologia, Notícias Geomorfológicas, Campinas - SP, 10(20):39-54.
- Sinelli, O. (1972). Água Subterrânea no Município de Ribeirão Preto, XXV Congresso Brasileiro de Geologia, São Paulo - SP, 17-34.
- Sinelli, O., Souza, A., Davino, A., Gonçalves, N. and Teixeira, J.A. (1980). Hidrogeologia da Região de Ribeirão Preto - SP, I Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas (ABAS), Recife-PE, 319-335.
- Snow, D.T. (1969). Anisotropic Permeability of Fractured Media, Water Resources Research, 5(6):1273-1289.
- Streltsova, T.D. (1976). Hydrodynamics of Groundwater Flow in a Fractured Formation, Water Resources Research, 12(3):405-414.
- Teissedre, J.M., Sanches, J.L. and Lopes, M.F.C. (1982). Geometria e Condições de Exploração do Aquífero Botucatu no Estado de São Paulo, 2º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Salvador - BA.



Figs. 5.a, b, c, d. Comportamento hidrodinâmico do Serra Geral, nas simulações 1, 2, 3 e 4, respectivamente



Figs. 6.a, b. Elementos efetivos do Serra Geral, nas simulações 1 e 2, respectivamente



Figs. 6.c, d. Elementos efetivos do Serra Geral, nas simulações 3 e 4, respectivamente