

# **SIMULAÇÃO DE DESLOCAMENTOS EM FRATURAS EM BASALTOS DA FORMAÇÃO SERRA GERAL (RIBEIRÃO PRETO , SP) E IMPLICAÇÕES PARA A SUA TRANSMISSIVIDADE**

Amélia João Fernandes<sup>1</sup>; Alain Rouleau<sup>2</sup>

## **RESUMO**

A área de estudo localiza-se a sul da área urbana de Ribeirão Preto e constitui-se de basaltos Aqüífero Serra Geral (ASG) junto ao contato com os arenitos da Formação Botucatu, do Sistema Aqüífero Guarani (SAG). Com o tratamento estatístico de parâmetros geométricos das fraturas que cortam os basaltos e modelagem da rede de fraturas, almeja-se contribuir para a elaboração de modelos conceituais do fluxo de água subterrânea no ASG, os quais podem ser incorporados na estimativa da recarga do SAG através do ASG. Os dados utilizados foram gerados em levantamento sistemático de fraturas ao longo de scanlines e de análise estrutural e tectônica. Os resultados principais obtidos são: identificação de 6 grupos de fraturas e seus parâmetros geométricos bem como seus desvios padrões; simulação de vários tipos de redes de fraturas no Udec, programa que fornece como dado de saída a quantidade de cisalhamento, abertura e fechamento que ocorre quando a massa de basalto fraturada é submetida a determinadas condições de esforços. Estes resultados tem importância significativa, já que existe correlação positiva entre cisalhamento e transmissividade, como mostrado em trabalhos anteriores.

## **ABSTRACT**

The study area is located in Ribeirão Preto, SP, and consists of basalts of the Serra Geral Aquifer (ASG) close to the contact with the Botucatu Formation of the Guarani Aquifer System (SAG). The statistical treatment and modeling of the fracture network aimed at providing information for the elaboration of conceptual models of groundwater flow in ASG, which can be incorporated in the estimate of the SAG recharge through the ASG. The used data was collected in fracture surveys along scanlines; tectonic and structural analysis was also involved in the study. The main achieved results consist of: (1) identification on 6 fracture sets and their geometrical parameters and correspondent pattern deviations; (2) simulation of several fracture sets in UDEC, which provided as output the amount of opening, closure and shear that occurred at each fracture due to the application of in situ and boundary conditions stresses in the domain. The results are relevant as there is correlation between shear and transmissivities, which has been shown in previous works.

**Palavras-chave:** modelo de rede de fraturas, basaltos, Ribeirão Preto

---

<sup>1</sup> Instituto Geológico, Av. Miguel Stefano, 3900, SP-SP, (11)50735511, ameliajf@igeologico.sp.gov.br

<sup>2</sup> Alain Rouleau, Universidade de Quebec - Chicoutimi, Canadá, alain\_rouleau@uqac.ca

## 1. INTRODUÇÃO

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) é um dos mais importantes e estratégicos mananciais de água potável do Brasil, devido ao seu elevado potencial hídrico e por proporcionar o abastecimento de grandes centros econômicos dos estados de São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul (Proyecto Acuífero Guarani 2000).

No Estado de São Paulo, o SAG pode ser caracterizado por duas formas de ocorrência: a estreita zona de afloramento, onde o aquífero é livre e bastante vulnerável, e a porção confinada pelos basaltos da Formação Serra Geral. Em uma faixa de pouco menos de 40 km, a partir do contato entre os basaltos e os arenitos da Formação Botucatu para oeste, há indícios hidrogeológicos de recarga do SAG com águas que atravessariam os basaltos (Silva 1983, Sinelli 1987). Esta conexão hidráulica foi comprovada por Bittencourt *et al.* (2003) e Rosa Filho *et al.* (2003) recomendaram a realização de estudos de detalhe para caracterizar o fluxo através das estruturas que conectam os aquíferos.

Este trabalho, desenvolvido durante estágio na Universidade de Quebec em Chicoutimi (processo FAPESP 06/61197-2), insere-se no projeto “A Formação Serra Geral como conexão hidráulica entre o Sistema Aquífero Guarani e a superfície: análise estrutural e ensaios in situ – FRATASG” (Processo FAPESP 04/11798-5) que integra técnicas tais como: o estudo detalhado de estruturas tectônicas rúpteis, técnicas modernas de geofísica de poço, testes hidráulicos em poços e análises hidrogeológicas e isotópicas. O projeto FRATASG tem como objetivo a identificação dos caminhos preferenciais de circulação de água subterrânea no Aquífero Serra Geral e a identificação de possível recarga do SAG através do ASG. O levantamento sistemático de fraturas, bem como o tratamento dos dados, objetivando a construção de modelos de redes de fraturas e de fluxo, ainda são ferramentas não aplicadas à hidrogeologia no país e, desta forma o estudo realizado constitui inovação metodológica para o estudo de aquíferos fraturados, de um modo geral, e também poderá ser incorporado ao dimensionamento da recarga do SAG, com desdobramentos para a sua proteção. Um aspecto importante do projeto FRATASG é o fato de estudar, detalhadamente, a deformação rúptil e evolução da tectônica cenozóica como um meio de atribuir aberturas diferenciadas aos diversos grupos de fraturas existentes na região de estudo. A abertura de fraturas é o parâmetro geométrico que mais fortemente influencia a variação da condutividade hidráulica ao longo de uma rede de fraturas (lei cúbica, Snow 1968, apud Freeze & Cherry 1979), sendo também o mais difícil de ser determinado devido às suas diminutas dimensões e ao fato dos afloramentos não representarem as características encontradas em profundidade. Diversos trabalhos realizados no exterior demonstraram que o posicionamento dos esforços atuais tem papel decisivo no controle da

abertura atual de fraturas e, conseqüentemente, da elipse de transmissividade de um terreno fraturado (Banks *et al.* 1994, Barton *et al.* 1995, Morin & Savage 2003, Ferril *et al.* 1999). Trabalhos realizados no Brasil sugerem que a atuação de eventos tectônicos cenozóicos (Fernandes 1997, Fernandes & Rudolph 2001) também pode ser um fator determinante para a circulação de água em aquíferos fraturados.

Os principais objetivos do trabalho foram de realizar: (1) tratamento estatístico de parâmetros geométricos de fraturas, (2) modelagem da rede de fraturas do Aquífero Serra Geral (ASG), e (3) elaboração de modelo conceitual de fluxo de água subterrânea. Com isto, almeja-se contribuir para a elaboração de modelos conceituais do fluxo de água subterrânea no Aquífero Serra Geral (ASG).

Os dados utilizados originaram-se de levantamentos de fraturas em afloramentos extensos e representativos em parte do distrito de Bonfim Paulista (município de Ribeirão Preto), onde o projeto FRATASG também já elaborou mapa geológico de detalhe e conduziu levantamentos geofísicos de superfície, de perfilagens e de testes hidráulicos em poços. O principal objetivo do projeto FRATASG é avaliar a possível conexão hidráulica entre o Sistema Aquífero Guarani e a superfície através da Formação Serra Geral, que provavelmente ocorre através de fraturas subverticais que seccionam os basaltos da formação Serra Geral.

## **2. GEOLOGIA LOCAL**

Caracterização geológica de detalhe foi realizada em Bonfim Paulista, distrito do município de Ribeirão Preto, e contou com elaboração de mapa e seções geológicas, levantamento sistemático de fraturas; análise estrutural de fraturas de cisalhamento; geofísica de superfície; descrição de amostras de calha de 3 poços construídos no projeto FRATASG e perfilagens geofísicas nos poços construídos. Tais trabalhos permitiram a identificação e mapeamento de quatro derrames de basaltos (figuras 1 e 2). Estes derrames foram denominados, da base para o topo, de B1, B2, B3 e B4. Os três primeiros apresentam espessuras de 15 a pelo menos 50m, 45-70m, e aproximadamente 80m, respectivamente. Os basaltos apresentam granulação fina (B1, B2 e B4) ou são afaníticos (B3); no centro dos derrames predominam fraturas verticais, em geral com espaçamento métrico a decimétrico (B1, B2 e B4) ou disjunções centimétricas (B3). Os contatos entre B1 e B2 e entre B2 e B3 podem ser marcados por arenitos pouco espessos e peperitos. Camadas de basalto com vesículas, amígdalas e, por vezes, geodos (basaltos VA) são comumente observadas no topo de cada derrame, sendo melhor desenvolvidas no basalto B1. Fraturas horizontais, de espaçamento métrico a decimétrico também estão presentes em B3 nas quais importantes surgências de água ocorrem (Fernandes *et al.* 2006).

A cronologia dos eventos tectônicos pós-basaltos identificados na área de estudo sugere que o último evento tectônico que atuou na região tem esforço máximo principal ( $\sigma_1$ ) de direção NE. Além deste evento, que seria o mais jovem, foram identificados mais três, todos transcorrentes e com esforço máximo principal que, ao longo do tempo, migra de EW, para NW e depois para NS. Considerando o último evento com  $\sigma_1$  de direção NE, fica caracterizada uma rotação horária dos esforços. Isto também foi identificado em Campinas, em trabalhos anteriores (Fernandes & Amaral 2002, Fernandes & Melo 2005).

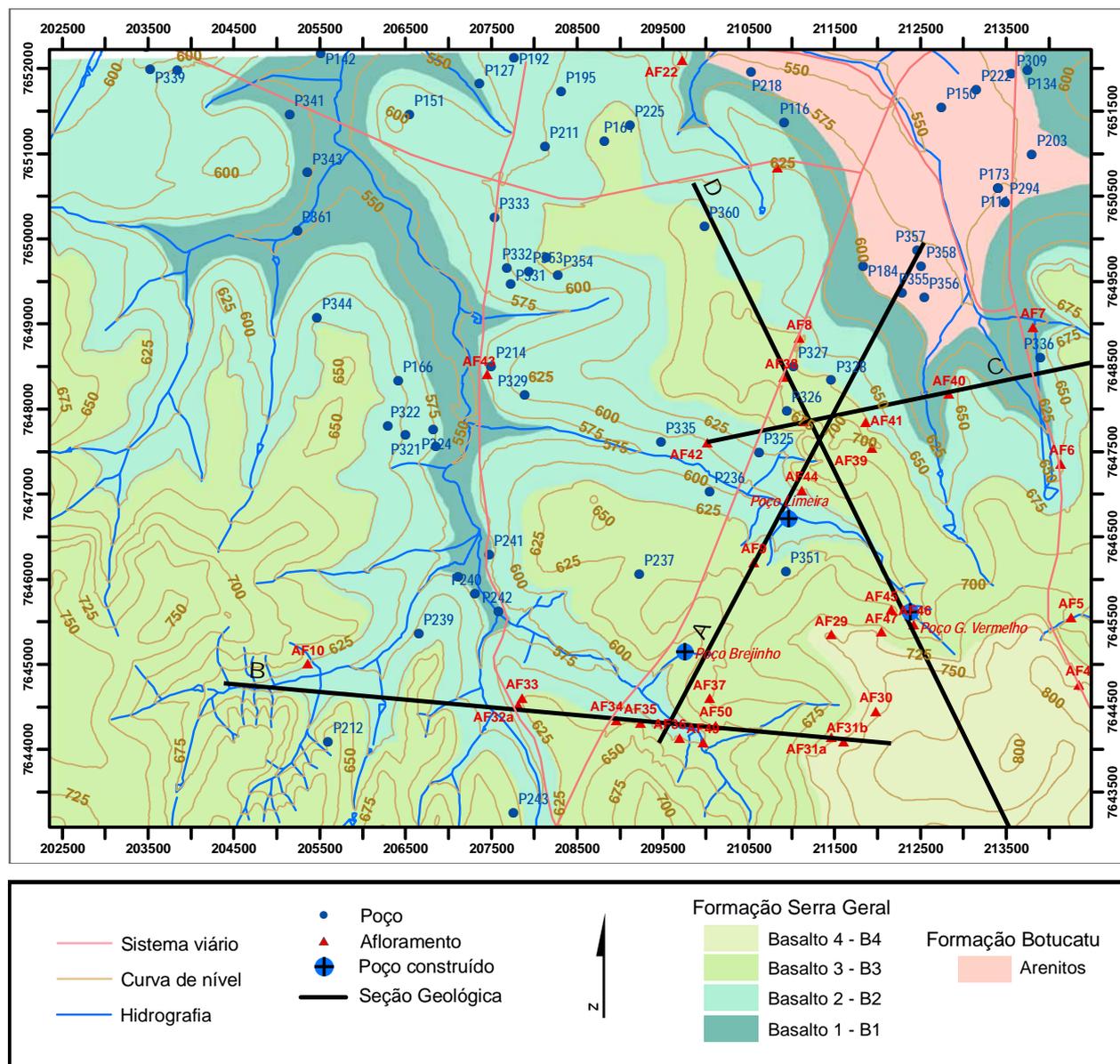


Figura 1. Mapa geológico da área de Bonfim Paulista, mostrando localização de poços, de afloramentos e das seções geológicas de detalhe (Fernandes et al. 2006).

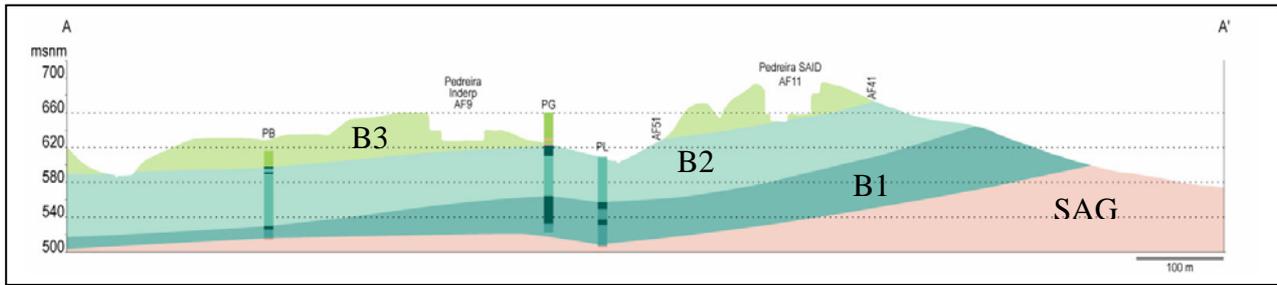


Figura 2. Seção geológica AA'. Ver Figura 1 para localização. (Fernandes et al. 2007)

### 3. MÉTODOS

#### 3.1. Análise estatística dos parâmetros geométricos de fraturas

Os dados utilizados para a análise estatística foram aqueles coletados em levantamento sistemático de fraturas ao longo de 12 *scanlines* para o qual foram utilizadas planilhas cujos campos são enumerados na tabela 1. As *scanlines* foram realizadas em afloramentos de rocha de boa qualidade, que correspondem a exposições verticais de cortes de estrada e predreiras.

O método de tratamento dos dados do levantamento de fraturas baseou-se em Rouleau & Gale (1985) e Tavchandjian *et al.* (1997), e consistiu nos seguintes procedimentos:

- 1) Digitação dos dados das planilhas no formato excel.
- 2) Análise das direções para identificação dos grupos predominantes de fraturas tectônicas. O programa de geoestatística Geovisual (desenvolvido no Instituto de Geociências-USP pelo Prof. Dr. Jorge Kazuo) foi utilizado nesta etapa para a elaboração de histogramas que permitissem uma comparação direta entre as várias *scanlines*, o que não é possível com rosáceas (ou diagramas circulares). Além disto, uma outra limitação das rosáceas é que elas privilegiam a visualização de grupos de fraturas com frequências mais altas, causando a impressão de que os contrastes, entre os vários grupos, são maiores.
- 3) Correções com relação aos vieses causados pela orientação da *scanline* com relação à direção e mergulho das fraturas, de modo a obter o espaçamento real para todos os grupos de fraturas. Aqui foi utilizado o método dos cossenos das direções que permite corrigir, ao mesmo tempo, tanto o efeito da direção da fratura com a direção da *scanline*, como o efeito do ângulo de mergulho da fratura com a horizontal (as *scanlines* são horizontais). As equações utilizadas foram:

$$\text{Cos}\phi = p * p' + q * q' + r * r' \quad (\text{equação 1})$$

$$\text{Sendo } p = \text{cosu} * \text{cosv}, \quad q = \text{senu} * \text{cosv}, \quad r = \text{senv} \quad (\text{equações 2})$$

$$\text{e } p' = \text{cosu}' * \text{cosv}', \quad q' = \text{senu}' * \text{cosv}', \quad r' = \text{senv}' \quad (\text{equações 3})$$

onde:

u = direção do pólo da fratura que representa a atitude média do grupo de fratura

v=caimento do pólo da fratura que representa a atitude média do grupo de fratura

u'=direção da scanline

v'=caimento da scanline

O espaçamento real entre fraturas consecutivas do mesmo grupo é obtido multiplicando-se o espaçamento medido por  $\phi$ . Da mesma forma obtém-se o comprimento real da scanline para aquele dado grupo de fraturas. Este procedimento é descrito em Rouleau & Gale (1985).

4) Análise dos dados de espaçamento para obter as suas respectivas distribuições para cada grupo de fraturas. Esta foi aplicada somente a uma das scanlines, pois nas demais a quantidade de dados dentro de um dado grupo de fraturas era muito pequena; nestes casos obteve-se como resultado a densidade em vez do espaçamento. Análise similar para os dados de comprimento não pode ser efetuada devido ao fato da grande maioria das fraturas acabarem fora da parede de observação. Para os mesmos dados de entrada de direção, espaçamento e comprimento, a cada simulação da rede de fraturas obtem-se uma rede de fraturas distinta, devido à aleatoriedade associada ao desvio padrão de cada um destes parâmetros. Com isso, também é obtido um grau de conectividade distinto, mas dentro de certos limites.

Tabela 1. Campos das planilhas utilizados no levantamento sistemático de fraturas.

Planilha para fraturas verticais (scanline horizontal) e horizontais (scanline vertical)
Número da fratura
Posição na scanline (em m)
Atitude da fratura
Feição genética: pluma, rib, estrias de atrito (neste caso, caimento e sentido do caimento, indicação do sentido de movimento)
Tipo de fratura: Junta, falha, zona de juntas, zona de falha, veio, dique
Espessura em cm
Revestimento (mineralogia, cor, brilho)
Ondulação: comprimento das ondulações da superfície em dm ou m
Rugosidade: amplitude da rugosidade em sub-mm, mm e cm
Comprimento do traço (em m)
Terminações do topo e da base: na rocha, fora da parede, em outra fratura
Intersecção: número das fraturas que cruzam a fratura descrita
Área exposta da fratura (decimétrica, métrica, etc.)
Outras observações relevantes (ex., tipo de terminação, anastomosamento relacionado à zona de fratura, se foi coletada amostra, se há banda de alteração junto à fratura)
Planilha para disjunções colunares (observadas em trechos ao longo da scanline horizontal)
Posição na scanline (em m)
Número de colunas contadas no intervalo
Representatividade do trecho com relação a toda a scanline (em %)
Direção da coluna (caso não seja vertical)
Caimento da aresta da coluna

### 3.2. Simulação de acomodação de esforços em redes de fraturas

Os programas para a simulação da rede de fraturas considerados inicialmente foram: (1) *Stochastic Discrete Fracture-SDF* (Rouleau & Gale 1987, Rouleau 1988), trata-se de modelo

numérico 2D que utiliza a abordagem de Monte Carlo; (2) Frac3dvs (Therrien et al. 2003), permite simulações 3D mas apresenta limitações na geração de fraturas inclinadas e não ortogonais; e (3) UDEC (Universal Distinct Element Code) (<http://www.itscag.com/udec.html>) é 2D e voltado principalmente à solução de problemas de mecânica de rochas. Optou-se pela sua utilização do UDEC pois apresenta a grande vantagem de apresentar como resultado as magnitudes de cisalhamento, abertura relativa e fechamento das fraturas. Estas magnitudes variam em função da orientação das fraturas com relação aos esforços aplicados e também com relação à magnitude destes. Uma vez que os valores de abertura de fraturas são os que apresentam o maior grau de incerteza na simulação do fluxo, considerou-se bastante oportuno realizar simulações de tal tipo.

Após definir a área do modelo, neste caso de 10 X 10m, são introduzidos os seguintes dados: parâmetros geométricos de fraturas; propriedades mecânicas da rocha (basalto) e das fraturas ou juntas em basalto; estado de esforços in situ e estado de esforços nas condições de contorno. Assim, a definição de cenários de esforços mais prováveis na região de estudo, é um dos aspectos mais importantes para a simulação.

Os esforços a que uma massa rochosa é submetida são de duas origens. Uma deles é derivada da atuação da gravidade, dependendo, portanto, da densidade e da altura da coluna de rochas sobrejacentes à profundidade que se deseja simular. Este esforço vertical é transmitido lateralmente dependendo do coeficiente de Poisson que também varia de acordo com o tipo de rocha e com o seu grau de fraturamento. A segunda origem relaciona-se aos esforços tectônicos, que se somam aos esforços derivados da atuação da gravidade.

O esforço vertical ( $\sigma_v$ ), ou derivado da atuação da gravidade, é dado pela equação:

$$\sigma_v = \rho g H \quad (4)$$

onde,  $\rho$ =densidade da rocha,  $g$ =aceleração da gravidade,  $H$ =altura da coluna de rochas.

Sob condições não tectônicas, para rocha intacta, não fraturada, valem as relações:

$$\sigma_H = \sigma_h = K \sigma_v \quad (5) \quad \text{e} \quad K = \nu / (1 - \nu) \quad (6)$$

Onde,  $\sigma_H$ = esforço horizontal máximo,  $\sigma_h$ = esforço horizontal mínimo,  $\nu$  corresponde à relação de Poisson. Para rocha fraturada,  $K$  está em torno de 0,5.

Sob condições tectônicas, a relação existente entre esforços verticais e horizontais, é dada pela seguinte equação:

$$(\sigma_H + \sigma_h) / 2 = K \sigma_v \quad (7)$$

Neste último caso  $K$  varia de acordo com as condições tectônicas da região, mais frequentemente, entre 1,5 e 4,0 (Brown & Hoek 1978). Esta foi uma relação estabelecida empiricamente a partir da compilação de dados obtidos em várias partes do mundo e em situações geológicas distintas. Os valores mais altos de  $K$  aplicam-se a regiões onde os esforços tectônicos são bastante elevados. No caso da região de estudo, bem como para todo o Estado de São Paulo e

adjacências, onde os esforços tectônicos são baixos, fato demonstrado pela baixa atividade tectônica, considera-se mais provável que K esteja em torno de 1,5. Por este motivo e também para avaliar a sensibilidade dos parâmetros de saída (cisalhamento, abertura relativa e fechamento) com relação a este fator, foram utilizados os valores de 1,0, 1,5 e 2,5 para K, sabendo-se, no entanto, que o valor de 2,5 é superestimado para a região. Também foi simulado o caso onde não há esforços tectônicos (K=0,5). Inicialmente também foram simuladas duas profundidades, 10 e 100m, apropriadas para a área de interesse já que a espessura de basalto nos poços perfurados está em torno de 100m.

Existem duas formas de entrar com o parâmetro esforços: condições *in situ* e condições de contorno. No primeiro caso, os esforços são distribuídos homogeneamente na massa rochosa e, no segundo, estes seriam aplicados nas bordas do domínio, sendo que a simulação é finalizada quando é atingido um equilíbrio na distribuição dos esforços pelo domínio inteiro. As simulações foram conduzidas para uma fatia horizontal de massa rochosa de 1m de espessura, ou seja o esforço vertical, resultante da atuação da gravidade foi aplicado na direção Z, ou perpendicular a esta fatia. Os esforços horizontais, direções X e Y, foram aplicados nas condições de contorno, sendo que o esforço vertical, direção Z, nas condições *in situ*. O esforço máximo horizontal foi aplicado na direção Y e o mínimo na direção X.

Com base na análise da evolução tectônica deduzida para a região, descrita resumidamente acima, considerou-se que a direção do esforço horizontal máximo atual, i.e., direção Y, é paralela a N45E, e, conseqüentemente o esforço mínimo horizontal, direção X, é paralelo a N45W. Em função disto, as direções das fraturas introduzidas no UDEC, foram rotacionadas de modo a ficaram corentes com as direções X e Y.

Para as propriedades mecânicas de basalto e de fraturas em basalto, foram assumidos os valores *default* existentes no Udec (Tabela 2).

Tabela 2. Propriedades mecânicas de basalto (A) e de fraturas em basalto (B) (*default* do Udec), em unidades SI, i.e., kg/m/seg/Pa.

(A)		(B)	
Densidade	2700	Modelo	Joint area contact-Coulomb slip
Propriedades elásticas		Joint area stiffness	1,0E9
Bulk modulus	3,2314E10	Joint friction	35,0
Shear modulus	1,3219E10	Joint cohesion	100000,0
Módulo elástico	3,49E10	Joint dilation	10,0
Relação de Poisson	0,32	Joint normal stiffness	1,0E10
Propriedades plásticas			
Ângulo de fricção	31		
Coesão	6.62E7		
Tensão	1,31E7		

As simulações conduzidas no UDEC exigem, para cada grupo de fraturas, os seguintes parâmetros geométricos de entrada: direção, espaçamento, comprimento e abertura. Os parâmetros

que apresentam maior grau de incerteza são os dois últimos. Em virtude das scanlines terem sido realizadas em afloramentos verticais, que são os disponíveis, de altura situada mais frequentemente entre 10 e 14m, e também devido à irregularidade destas paredes, a determinação do comprimento é bastante limitada, pois são poucas as fraturas para as quais ambas terminações são visíveis. Uma forma de contornar as incertezas com relação ao comprimento é realizar uma análise de sensibilidade com relação a este fator, ou seja realizar simulações em que o comprimento varie desde um mínimo até um máximo possíveis e verificar o quanto isto afeta os dados de saída para a acomodação dos esforços e para o fluxo. Com relação à abertura, o Udec exige dois parâmetros de entrada: *azero*, a abertura da fratura quando o stress normal à fratura é nulo; e *ares*, que seria a abertura mínima residual após a aplicação dos esforços. Inicialmente foram atribuídos diferentes *azero* e *ares*, dependendo da orientação das fraturas e de acordo com a evolução tectônica determinada para a área de estudo. No entanto, notou-se que estes não afetam os dados de saída, ou seja, quantidade de cisalhamento, abertura relativa (quantidade de abertura ganha após a aplicação dos esforços) e fechamento; provavelmente porque *ares* depende primordialmente da *joint dilation* e da *joint normal stiffness*. Devido a isto, passou-se a adotar os valores  $azero = 5 \times 10^{-5}$  e  $ares = 5 \times 10^{-6}$  para todos os grupos de fraturas. Estes correspondem aos valores mais frequentes de abertura de fraturas segundo Van Golf Racht (1982, apud Domenico & Schwarz 1990). Variações no parâmetro abertura, no entanto, devem ser consideradas quando da simulação do fluxo, não realizada neste trabalho. Junto com os valores médios de direção, espaçamento e comprimento também são introduzidos seus respectivos desvios padrão. Devido a isto podem ser geradas, de forma randomica e para o mesmo grupo de dados, uma infinidade de redes de fraturas distintas entre si.

Com relação à rede de fraturas foram feitas, sequencialmente, 3 simulações diferentes descritas abaixo:

- 1) Rede de fraturas constituídas de 3 grupos de fraturas de espaçamento regular e infinitas, ou terminando fora do domínio simulado (10 X 10m).
- 2) Rede de fraturas média com 6 grupos de fraturas, para os quais foram considerados os valores médios de direção, espaçamento e comprimento e respectivos desvios padrão, calculados a partir dos resultados das 12 scanlines realizadas.
- 3) Após as simulações que tiveram como base a simulação da rede de fraturas média, considerou-se mais apropriado simular casos extremos, ou seja, foram geradas e simuladas separadamente redes de fraturas, com 6 grupos de fraturas, cujos parâmetros de entrada correspondessem aos das scanlines onde as fraturas apresentavam: (1) o maior espaçamento (AF7-1AH e AF7-1BH), (2) o menor espaçamento (AF22-1AH e AF22-2AH), e (3) padrão de fraturas de elevada assimetria e nitidamente tectônico (AF8-2AH). Esta última abordagem, além de representar casos reais, também

testou a sensibilidade dos parâmetros de saída com relação aos vários tipos de redes de fraturas observadas na área.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Tratamento estatístico dos dados das fraturas

Em quase todas as scanlines foram identificados 6 grupos de fraturas havendo um bastante nítido, com boa coincidência entre os afloramentos, cujo valor médio corresponde a N80-70W; outro grupo nítido, mas menos que anterior, corresponde a N70-85E. Os outros grupos são mais espalhados: N50-30W, N22-5W, N10-15E, e N40-50E. As scanlines tem direção entre N40W a N40E, com uma lacuna ao redor de NS, isto implica que fraturas próximas a EW tenderiam a ser mais amostradas e de fato os grupos melhor definidos estão ao redor desta direção. Com exceção da SL AF8-2AH, em vez de se determinar o espaçamento entre as fraturas, foi determinada a densidade. Esta é obtida pela relação entre número de fraturas medidas sobre o comprimento corrigido da scanline. Esta correção ameniza bastante o efeito da direção da scanline, no entanto, quando a direção do grupo de fraturas é muito próxima à da scanline, são criados vieses no sentido de aumentar as densidades. A tabela 3 mostra os parâmetros relativos a cada grupo de fraturas.

**Tabela 3.** Parâmetros obtidos através da análise dos dados de fraturas obtidos em scanlines.

Grupo frat	Dir média	Merg médio	No de fraturas	L corrigido (m)	Densidade
AF6, SL 1AH, L=13,55m, dirSL=N14W					
1	N75W	90	5	11,85	0,42
2	N35W	83NE	2	4,81	0,42
3	N2W	83E	4	2,68	1,49
4	N25E	84SE	11	8,48	1,30
5	N75E	90	2	13,55	0,14
AF6, SL 1BH, L=7,8m, dirSL=N14W					
1	N75W	77SW	2	6,65	0,30
2	N35W	90	4	2,79	1,43
3	N2W	86E	3	1,55	1,93
4	N25E	84SE	2	4,88	0,41
5	N75E	90	3	7,79	0,38
AF7, SL 1AH, L=8,4m, dirSL=N10E					
1	N72W	86NE	1	8,29	0,12
2	N50W	86NE	2	7,26	0,28
3	N20W	79NE	2	4,12	0,49
4	N22E	90	2	1,75	1,15
5	N47E	83SE	1	5,02	0,20
6	N75E	90	3	7,61	0,39
AF7, SL 1BH, L=24,7m, dirSL=N10E					
1	N72W	90	13	24,46	0,53
2	N50W	83SW	13	21,23	0,61
3	N20W	90	3	12,35	0,24
4	N22E	83NW	6	5,10	1,18
5	N47E	90	6	14,86	0,40
6	N75E	90	7	22,39	0,31

AF8, SL 1AH, L=49,45m, dirSL=N22E					
1	N85W	90	4	47,58	0,80
2	N60W	90	2	49,27	0,04
3	N30W	90	6	39,20	0,15
4	N52E	90	3	24,88	0,12
Grupo frat	Dir média	Merg médio	No de fraturas	L corrigido (m)	Densidade
AF8, SL 2AH, L=10,23m, dirSL=N32E					
1	N82E	83SE	6	7,78	0,77
2	N77W	84SW	11	9,60	1,14
3	N59W	90	41	10,23	4,01
4	N35W	90	16	9,42	1,70
5	N5W	84E	3	6,12	0,49
6	N46E	80NW	1	2,44	0,41
AF9, SL 2AH, L=9,56m, dirSL=N20W					
1	N65W	84SW	6	6,73	0,89
2	N30W	83SW	4	1,65	2,43
3	N5W	85SW	4	2,46	1,62
4	N30E	90	10	7,32	1,37
5	N57E	84SE	4	9,26	0,43
6	N82E	84SE	4	9,30	0,43
AF9, SL 3AH, L=5,40m, dirSL=N78E					
1	N65W	90	8	3,25	2,46
2	N30W	90	3	5,13	0,58
3	N5W	90	6	5,36	1,12
4	N30E	85SW	4	3,99	1,00
5	N57E	88NW	1	1,93	0,52
6	N82E	88N	5	0,37	13,28
AF11, SL 1AH, L=12,84m, dirSL=N26E					
1	N71W	90	11	12,74	0,86
2	N44W	90	5	12,07	0,41
3	N8W	90	3	7,18	0,42
4	N14E	90	4	2,67	1,50
5	N48E	90	3	4,81	0,62
6	N72E	84NW	8	9,24	0,87
AF11, SL 2AH, L=25,57m, dirSL=N30W					
1	N71W	85NE	10	16,71	0,59
2	N44W	80NE	12	6,09	1,97
3	N8W	81E	8	9,4	0,85
4	N14E	85SE	15	17,69	0,85
5	N48E	90	3	25,01	0,12
6	N72E	90	8	25,01	0,32
AF22, SL 2AH, L=11,90m, dirSL=N40W					
1	N75W	90	9	10,14	0,89
2	N43W	90	19	11,11	1,71
3	N6W	90	6	0,05	0,75
4	N12E	90	2	5,25	0,38
5	N40E	84NW	9	6,21E-16	1,44E16
6	N71E	90	9	5,76	1,56
AF11, SL 1AH, L=9,85m, dirSL=N40W					
1	N75W	90	3	5,65	0,53
2	N43W	90	4	0,52	7,76
3	N6W	90	1	5,51	0,18
4	N12E	85E	4	7,73	0,52
5	N40E	90	7	9,70	0,72
6	N71E	90	11	9,20	1,20

De um modo geral as direções das fraturas são bastante espalhadas, o que resultou na determinação 6 de grupos de fraturas, no entanto, no AF8 nota-se um comportamento peculiar com uma grande concentração das atitudes em torno de N60W (Figura 3). As densidades para os vários

grupos de fraturas identificados, para as várias scanlines realizadas, variam entre 0,04 e 4,01 fraturas/metro (Figura 4), sendo que valores superiores a estes são causados pelo fato de que o valor corrigido do comprimento da scanline para alguns grupos subparalelos de fraturas é muito pequeno e produz valores muito altos de densidade que foram descartados.

Os histogramas das scanlines dos AF7, AF22 e AF8 são mostrados na figura 3, com o objetivo de exemplificar a distribuição dos grupos de fraturas de afloramentos cujos dados são utilizados para simulações no UDEC como descrito mais adiante.

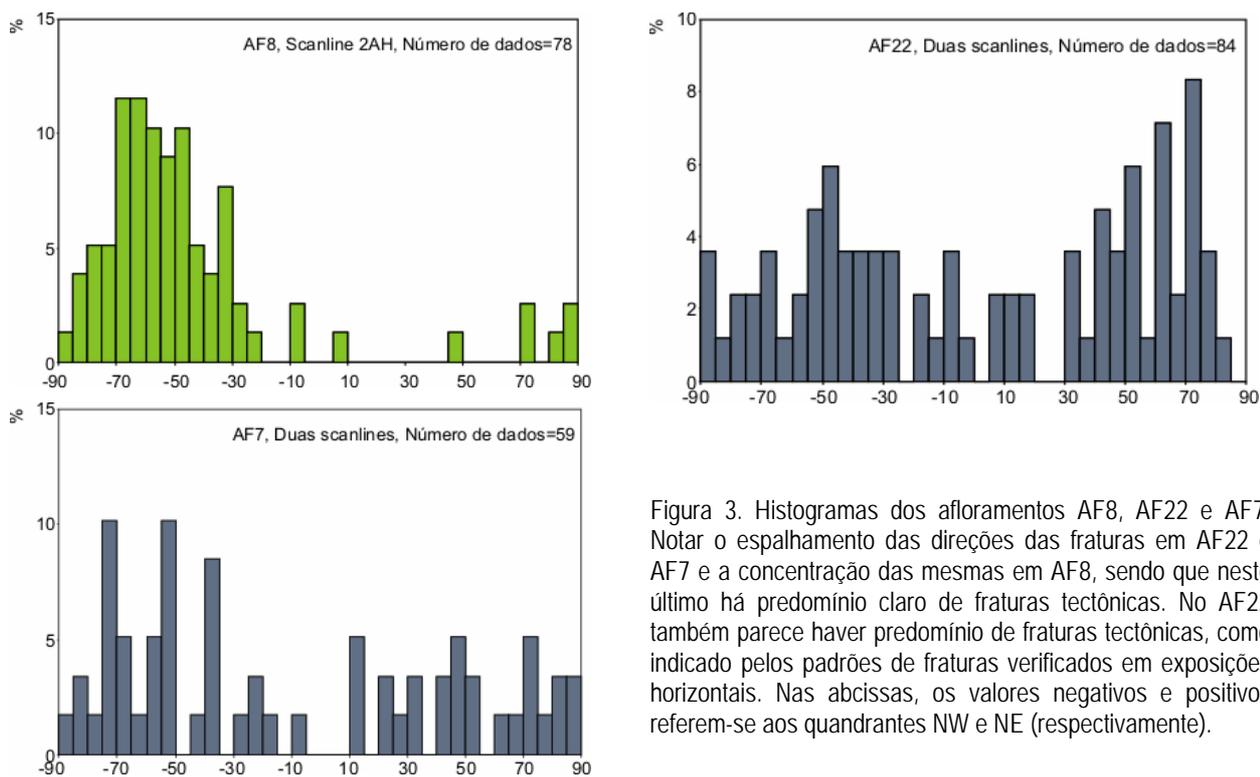


Figura 3. Histogramas dos afloramentos AF8, AF22 e AF7. Notar o espalhamento das direções das fraturas em AF22 e AF7 e a concentração das mesmas em AF8, sendo que neste último há predomínio claro de fraturas tectônicas. No AF22 também parece haver predomínio de fraturas tectônicas, como indicado pelos padrões de fraturas verificados em exposições horizontais. Nas abcissas, os valores negativos e positivos referem-se aos quadrantes NW e NE (respectivamente).

## 4.2. Simulações de redes de fraturas com o Udec

A problemática que se coloca quando da investigação dos caminhos preferenciais da circulação de água subterrânea em meios fraturados é a determinação das fraturas de maior abertura. Trabalhos relativamente recentes propõem que as fraturas mais abertas são aquelas paralelas ao SHmax atual, sendo que alguns incluem também nesta categoria as fraturas que se situam em até um ângulo de 30° com este SHmax (Banks *et al.* 1994, Barton *et al.* 1995, Morin & Savage 2003, Ferril *et al.* 1999). Outros apontam que fraturas paralelas ao esforço máximo compressivo de eventos tectônicos bastante recentes (quaternários ou do final do Terciário) permanecem com abertura significativa atualmente, ou seja, os esforços atuais não teriam sido suficientes para fechar fraturas que foram previamente abertas em tempos não atuais, porém recentes. Assim, as simulações no Udec foram rodadas com o objetivo de avaliar se as condições de

esforços atuais seriam suficientes para fechar fraturas previamente abertas e adicionalmente abrir fraturas em orientação favorável a estes esforços. Com o propósito de construir cenários realistas para as simulações foram feitas algumas suposições:

1) Os esforços atuais na região de estudo podem variar desde condições atectônicas ( $K=0,5$ ) a tectônicas ( $K$  entre 1,0 e 2,5), sendo que os  $K$ s mais plausíveis para a região de estudo estariam entre 1 e 1,5 (ver equações 5, 6 e 7).

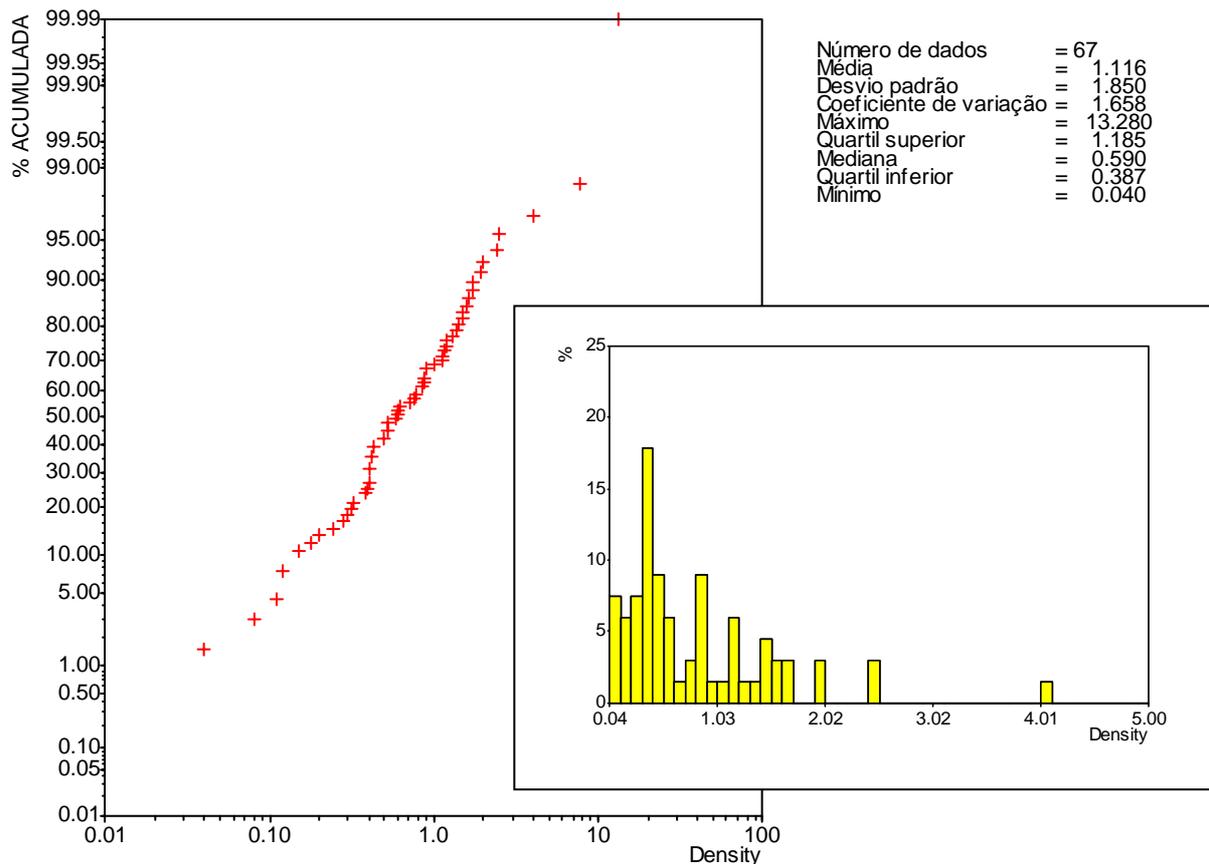


Figura 4. Densidades para os grupos de fraturas identificados, para as várias scanlines realizadas, em histograma e gráfico de distribuição acumulada. Os valores superiores a 4,01 fraturas/metro não são confiáveis (não foram representados no histograma) pois correspondem aos de grupos de fraturas subparalelas à direção de uma dada scanline.

2) A análise da evolução tectônica cenozóica no Estado de São Paulo mostra que o evento quaternário denominado de E3-NW, por Fernandes & Amaral (2002) e Fernandes & Melo (2005), teve atuação intensa em todo o Estado e é de regime trans-extensional. Com isto, supõe-se que parte das fraturas de orientação N45W foram abertas durante a atuação deste evento. Por este motivo atribui-se a elas, nas simulações iniciais, um azero e ares de maior magnitude.

3) A análise da evolução tectônica cenozóica no Estado (Fernandes & Melo 2005) e na região de estudo também aponta para um SHmax atual de orientação NE. Assim o esforço máximo compressivo, representado por  $\sigma_Y$  nas simulações é de orientação N45E.

Conforme descrito no item métodos, as simulações realizadas com o Udec foram feitas em 3 etapas, no entanto aqui são apresentados apenas os resultados das simulações de redes de fraturas construídas com base nos parâmetros determinados para casos extremos: fraturas com maior espaçamento (AF7-1AH e AF7-1BH), (2) o menor espaçamento (AF22-1AH e AF22-2AH), e (3) padrão de fraturas de elevada assimetria e nitidamente tectônico (AF8-2AH), em oposição aos demais onde parte das fraturas pode ter sido gerada por resfriamento. Estas simulações, além de estarem mais próximas a casos reais, também testam a sensibilidade dos parâmetros de saída com relação aos vários tipos de redes de fraturas observados na área. Os dados de entrada destas simulações estão enumerados na tabela 4 e os resultados na tabela 5.

**Tabela 4A.** Dados de entrada para a rede do AF7.

Grupo de fratura	Densidade média	Espaçamento médio	DP espaçamento	Direção média	DP direção
1	0,53	1,89	0,93	N75W	7
2	0,61	1,64	0,91	N48W	9
3	0,24	4,17	1,26	N21W	8
4	1,18	0,85	0,67	N22E	9
5	0,40	2,50	1,70	N47E	7
6	0,31	3,23	0,88	N79E	7

**Tabela 4B.** Dados de entrada para a rede do AF22.

Grupo de fratura	Densidade média	Espaçamento médio	DP espaçamento	Direção média	DP direção
1	0,90	1,11	0,93	N75W	9
2	1,71	0,58	0,91	N45W	9
3	0,75	1,33	1,26	N10W	6
4	0,38	2,63	0,67	N8E	2
5	0,72	1,39	1,70	N45E	9
6	1,60	0,63	0,88	N68E	8

**Tabela 4C.** Dados de entrada para a rede do AF8.

Grupo de fratura	Espaçamento médio	DP espaçamento	Direção média	DP direção
1	1,50	0,70	N70E	10
2	0,65	0,60	N78W	5
3	0,25	0,27	N59W	7
4	1,13	2,00	N34W	6
5	2,04	1,50	N10E	10
6	2,44	1,70	N40E	10

**Tabela 5.** Resultados para as simulações dos AF7, AF22 e AF8.

Condições *in situ*: profundidade de 100m ( $\sigma_Z=2,7\text{MPa}$ ),  $\sigma_X=\sigma_Y=0$ .

Condições de contorno:  $\sigma_X=1,35\text{MPa}$  e  $\sigma_Y$  varia de acordo com K, sendo discriminado abaixo.

**Tipo: AF7**

Esforços horizontais (MPa)		Fechamento (m)		Cisalhamento (m)		Abertura (m)	
$\sigma_X$	$\sigma_Y$	Max	Elt	Max	Elt	Max	Elt
1,35	1,35	7,39E-4	1,48E-4	4,97E-4	4,63E-5	4,41E-4	8,82E-5
	4,05	1,31E-3	2,62E-4	2,84E-3	3,72E-4	6,14E-4	1,23E-4
	5,00	1,66E-3	3,33E-4	4,61E-3	5,83E-4	9,36E-4	1,87E-4
2,00	6,00	2,09E-3	4,14E-4	4,25E-3	5,59E-4	7,47E-4	1,49E-4
	6,75	2,36E-3	4,71E-4	5,13E-3	7,13E-4	1,03E-3	2,07E-4
	8,00	2,89E-3	5,78E-4	Não finalizado			

Tipo: AF22

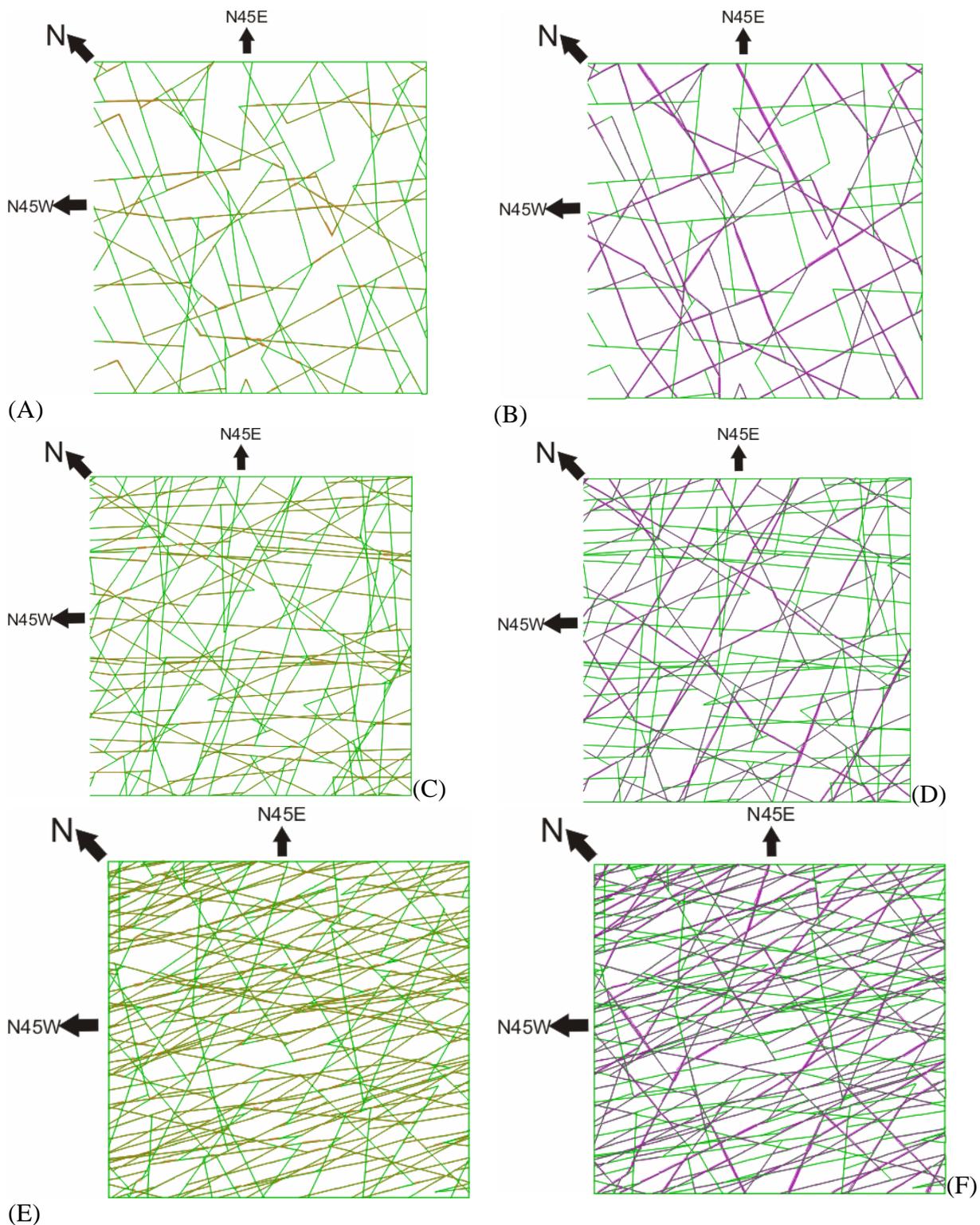
Esforços horizontais (MPa)		Fechamento (m)		Cisalhamento (m)		Abertura (m)	
$\sigma_X$	$\sigma_Y$	Max	Elt	Max	Elt	Max	Elt
1,35	1,35	2,41E-4	4,84E-5	3,08E-4	6,16E-5	nulo	Nulo
	4,05	1,35E-3	2,71E-4	2,55E-3	5,10E-4	5,77E-4	1,15E-4
	5,00	1,91E-3	3,81E-4	4,67E-3	9,35E-4	9,97E-4	1,99E-4
2,00	6,00	2,25E-3	4,50E-4	3,86E-3	7,72E-4	8,53E-4	1,71E-4
	6,75	2,69E-3	5,37E-4	5,27E-3	1,05E-3	1,07E-3	2,15E-4
	8,00	3,41E-3	6,82E-4	2,73E-2	5,46E-3	3,44E-3	6,88E-4

Tipo: AF8

Esforços horizontais (MPa)		Fechamento (m)		Cisalhamento (m)		Abertura (m)	
$\sigma_X$	$\sigma_Y$	Max	Elt	Max	Elt	Max	Elt
1,35	1,35	3,11E-4	6,22E-5	7,05E-4	1,14E-4	6,21E-5	1,24E-5
	4,05	1,43E-3	2,88E-4	2,37E-3	4,75E-4	1,31E-3	2,61E-4
	5,00	1,87E-3	3,74E-4	4,20E-3	8,39E-4	1,77E-3	3,54E-4
2,00	6,00	2,14E-3	4,27E-4	3,56E-3	7,12E-4	1,93E-3	3,87E-4
	6,75	2,48E-3	4,96E-4	4,88E-3	9,78E-4	2,30E-3	4,60E-4
	8,00	3,04E-3	6,08E-4	7,78E-3	1,56E-3	2,94E-3	5,88E-4

Uma avaliação visual do fechamento e do cisalhamento com relação à direção dos grupos de fraturas foi realizada para os tipos de redes dos AF7, AF22 e AF8 e constatou-se que para as direções N70E não ocorre nenhum fechamento, e para as direções entre N34W e N78W, o fechamento é muito pequeno e localizado, estando ao redor de 3,74E-4. O cisalhamento, por outro lado, é importante para as direções N78W, EW e N70E (ao redor de 1,68E-3), sendo relativamente importante para a direção entre N10E e N20E (ao redor de 8,39E-4) (Figura 6). Concluiu-se, portanto, que aumentos de transmissividade devido à ocorrência de cisalhamento podem ser importantes para os grupos de fraturas N70E, principalmente, e N10-20E secundariamente. Esta correlação positiva entre cisalhamento e transmissividade foi estudada por Lamontagne (2001). Neste trabalho vários experimentos foram conduzidos de modo a causar cisalhamento em diferentes direções de uma fratura em granito, da qual foram utilizadas réplicas idênticas. Devido ao fato da fratura apresentar rugosidades assimétricas e de amplitudes distintas, a transmissividade variou com relação à direção do cisalhamento na superfície da fratura. Antes de ocorrer deslocamento ao longo da fratura, ocorreu dilatação e também deformação tangencial. O deslocamento ocorreu após a T máxima ter sido atingida.

Para cisalhamentos da ordem de 1,5 a 2,0 mm, compatíveis com os resultados de saída do Udec para as fraturas N78W, EW e N70E, a T sofre incremento de 3 a 4 ordens de magnitude (Figura 7), quando se considera um  $\sigma_N$  (esforço normal à fratura) de 3MPa, como demonstrado por Lamontagne (2001). Este autor também mostra que quanto menor o  $\sigma_N$ , maior é o incremento de T. O  $\sigma_N$ , para uma fratura que faz um determinado ângulo com o esforço máximo principal, pode ser computado graficamente através do círculo de Mohr, sendo que para a área de estudo, se forem válidos os valores de um esforço mínimo horizontal entre 1,5 e 2 MPa e máximo entre 5 e 6 MPa, como os aplicados nas simulações, este esforço está próximo ou é menor que 3 MPa.



(E)

Figura 6. Exemplo de resultados obtidos para a rede de fraturas do AF7 (A e B), AF22 (C e D) e AF7 (E e F). Fechamento, (B) Cisalhamento. Prof=100m,  $1 < K < 1.5$ , In situ:  $x=y=0\text{MPa}$ ,  $z=-2.7\text{MPa}$ , BC:  $x=-1.35\text{MPa}$ ,  $y=-5\text{MPa}$ . Marrom = fraturas onde ocorreu fechamento, magenta = cisalhamento, verde = não houve deslocamento. As linhas em marrom representam fraturas onde ocorreu fechamento, em magenta, cisalhamento e onde não houve deslocamento, verde. Quanto mais espessa a linha, mais deslocamento ocorreu. In situ = esforços aplicados homogeneamente pelo domínio do modelo. BC = esforços aplicados nas bordas do modelo.

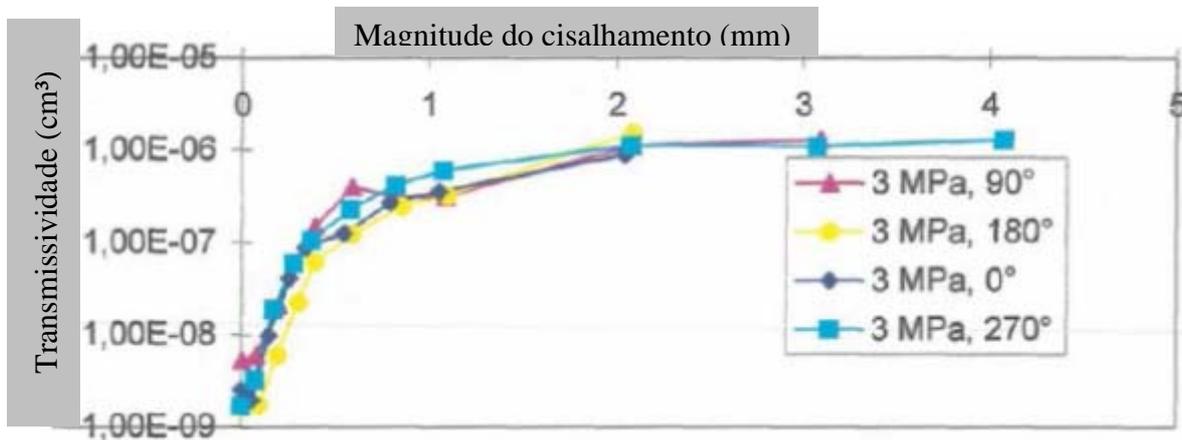


Figura 7. Relação entre magnitude do cisalhamento e transmissividade (T) para uma dada fratura submetida a esforço normal de 3 MPa. O cisalhamento ocorreu em 2 direções e 4 sentidos distintos (90°, 180°, 0° e 270°) tendo como referência as rugosidades da fratura (Lamontagne 2001).

## 5. CONCLUSÕES

Com exceção de um afloramento, onde foram identificados 5 grupos de fraturas, na área de estudo foram caracterizados 6 grupos de fraturas cujos trends estão em torno de N80-70W, N70-85E, N50-30W, N22-5W, N10-15E, e N40-50E. No caso da scanline 2AH do AF8, nota-se uma assimetria muito forte nas direções das fraturas com claro predomínio daquelas em torno de N60W, cujo espaçamento em determinados trechos da scanline é centimétrico, caracterizando claramente um padrão de fraturas gerado por esforços tectônicos. Nas demais scanlines observa-se um espalhamento nas direções das fraturas, no entanto, em alguns afloramentos foi possível observar padrões tectônicos associados a grande parte dos trends estruturais. As densidades mínima e máxima dos grupos de fraturas correspondem a 0,04 e 4,01, respectivamente, ambos da AF8-2AH, relacionados aos trends N60W e N80E.

Os esforços atuais na região de estudo podem variar desde condições atectônicas ( $K=0,5$ ) a tectônicas ( $K$  entre 1,0 e 2,5), sendo que os  $K$ s mais plausíveis para a região de estudo estariam entre 1 e 1,5. A análise da evolução tectônica cenozóica no Estado e na região de estudo sugere um  $SH_{max}$  atual de orientação NE. Assim o esforço máximo compressivo, representado por  $\sigma_Y$  nas simulações realizadas com o Udec, é de orientação N45E e, conseqüentemente, o esforço mínimo horizontal  $Sh_{min}$  é perpendicular (N45W).

Foram realizadas simulações de redes de fraturas construídas com base nos parâmetros determinados para casos extremos: fraturas com maior espaçamento (AF7-1AH e AF7-1BH), (2) menor espaçamento (AF22-1AH e AF22-2AH), e (3) padrão de fraturas de elevada assimetria e nitidamente tectônico (AF8-2AH), em oposição aos demais onde parte das fraturas pode ter sido gerada por resfriamento. Estas simulações, além de estarem mais próximas a casos reais, também testam a sensibilidade dos parâmetros de saída com relação aos vários tipos de redes de fraturas observados na área.

Uma vez que todos os esforços das condições de contorno são compressivos, em nenhuma das simulações são verificadas aberturas significativas (estas são pontuais e desconectadas). No entanto, a quantidade de cisalhamento (entre 1,5 e 2 mm) e, simultaneamente, a não ocorrência de fechamento segundo algumas direções preferenciais (em torno de N70E e N15E) podem ocasionar um incremento de transmissividade de 3 a 4 ordens de grandeza para estas direções.

É clara a importância destes resultados para a simulação do fluxo na área de interesse, pois os parâmetros de entrada mais difíceis de serem definidos são justamente as condutividades hidráulicas ou transmissividades associadas a cada um dos grupos de fraturas de uma dada rede. Os resultados obtidos, no entanto, ainda não permitem a superação total deste problema, mas fornecem alguns cenários que podem nortear a elaboração de modelos conceituais de fluxo de água subterrânea no ASG, cuja validação poderá ser obtida com a realização de testes hidráulicos. Outro aspecto importante a considerar em modelos conceituais é a caracterização das fraturas quanto à sua continuidade vertical. As estruturas observadas nos AF 7 e 22 são mais provavelmente limitadas à porção central e densa do derrame, como foi observado em afloramentos, e são portanto do tipo “limitadas por estratos” (Odling et al. 1999). Por outro lado é provável que a faixa de fraturamento bastante adensada do AF8, claramente de origem tectônica, deve seccionar os contatos entre os derrames, sendo do tipo “não limitadas por estratos”. Apenas tal tipo de estrutura, de ocorrência aparentemente bastante localizada, tem potencial para causar conexão da superfície com o Sistema Aquífero Guarani, através dos basaltos.

Ainda é importante ressaltar que as simulações com o Udec basearam-se em premissas que levam em conta uma determinada evolução tectônica para a região de interesse, sendo que este conhecimento ainda necessita de aprofundamento para a sua consolidação, apesar do mesmo tipo de evolução ter sido identificada em outras porções do Estado de São Paulo.

## **6. AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à FAPESP pelo financiamento do projeto “A Formação Serra Geral como conexão hidráulica entre o Sistema Aquífero Guarani e a superfície: análise estrutural e ensaios in situ – FRATASG” (processo FAPESP 04/11798-4) e de bolsa concedida para realizar estágio na Universidade de Quebec em Chicoutimi onde foi realizado o projeto “Análise estatística e modelagem da rede de fraturas em basaltos da Formação Serra Geral, Ribeirão Preto, SP” (processo FAPESP 06/61197-2).

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Banks, D.; Rhor-Torp, E.; Skarphagen, H. (1994) Groundwater resources in hard rock: experiences from the Hvaler study, Southeastern Norway. *Applied Hydrogeology* 2(2):33-42.
- Barton CA, Zoback MD, Moos D (1995) Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock. *Geology*, 23(8):683-686.
- Brown ET, Hoek E (1978) Trends in relationships between measured in situ stresses and depth. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 15:211-215.
- Domenico, P.A. & Schwartz, F.W. 1990. *Physical and chemical hydrogeology*. John Wiley & Sons, New York, 824 pp.
- Fernandes AJ & Rudolph D (2001) The influence of Cenozoic Tectonics on the groundwater-production capacity of fractured zones: a case study in Sao Paulo, Brazil. *Hydrogeology Journal*, 9:151-167.
- Fernandes AJ (1997) Tectônica cenozóica na porção média da bacia do rio Piracicaba e sua aplicação à hidrogeologia de meios fraturados. Tese de Doutorado. 244 pp. (Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo).
- Fernandes AJ & Amaral G (2002) Cenozoic tectonic events at the border of the Parana Basin, São Paulo, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 14(8):911-931.
- Fernandes AJ & Melo CL (2005) Coberturas cenozóicas e estruturas deformadoras na Depressão Periférica Paulista, Campinas, São Paulo. *Revista do Instituto Geológico*, 25(1/2):49-66.
- Ferril DA, Winterle J, Wittmeier G, Sims D, Colton S, Armstrong A, Morris AP (1999) Stressed rock strains groundwater at Yucca Mountain, Nevada, *GSA Today*, 9(5):1-8.
- Fernandes AJ, Maldaner C, Wahnfried I, Ferreira LM, Pressinotti MMN, Varnier C, Iritani MI Hirata R (2006) Modelo conceitual preliminar de circulação de água subterrânea no aquífero Serra Geral, Ribeirão Preto, SP. XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Curitiba, ABAS. 16 pag. Em CD.
- Fernandes AJ, Maldaner C, Azevedo Sobrinho JM, Pressinotti MMN, Wahnfried I, Ferreira LMR, Varnier CL, Iritani MA, Hirata R. (2007) Estratigrafia e estruturas dos basaltos da Formação Serra Geral, Ribeirão Preto, SP. IV Simpósio de Vulcanismo e Ambientes Associados, Foz do Iguaçu, SBG. 6 pag. Em CD.
- Freeze RA & Cherry JA (1979) *Groundwater*. 604 pp. Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Lamontagne E (2001) Etude hydromecanique d'une fracture em cisaillement sous contrainte normale constante. (Tese de doutorado, Universidade de Quebec em Chicoutimi).
- Morin RH & Savage WZ (2003) Effects of crustal stresses on fluid transport in fractured rock: case studies from northeastern and southwestern USA, *Hydrogeology Journal*, 11:100-112.
- Odling NE, Gillespie P, Bourgin B, Castaing C, Chiles J-P, Christensen, NP, Fillion, E, Genter A, Olsen C, Thrane L, Trice R, Aarseth E, Walsh JJ, Watterson J (1999) Variations in fracture system geometry and their implications for fluid flow in fractured hydrocarbon reservoirs, *Petroleum Geoscience*, 5:373-384.
- Rouleau A & Gale JE (1985) Statistical characterization of the fracture system in the Stripa granite, Sweden, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 22(6):353-367.
- Rouleau A (1988) A numerical Simulator for Flow and Transport in Stochastic Discrete Fracture Networks; *Technical Bull.*, No.155, Inland Waters Directorate, Ottawa, 204 p
- Silva RBG (1983) Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas do Aquífero Botucatu no Estado de São Paulo, Tese de Doutorado - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 133 p.
- Sinelli O (1987) Estudos Hidrogeológicos da Bacia Hidrográfica do rio Pardo (SP), *Revista da ABAS* 11:05-26.
- Tavchadjian O, Rouleau A, Archambault G, Daigneault G, Marotte D (1997) Geostatistical analysis of fractures in shearzones in the Chibougamau area: applications to structural geology, *Tectonophysics*, 269:51-63.

Therrien R, Sudicky EA, McLaren RG (2003) FRAC3DVS: An efficient simulator for Three-dimensional, saturated-unsaturated groundwater flow and density-dependent, chain-decay solute transport in porous, discretely-fractured porous or dual-porosity formations. User's Guide.