

Artigos

# Desenvolvimento de um gerador estocástico de fraturas para modelagem de aquíferos fraturados – módulo I da ferramenta Fratcond

## Development of a stochastic fracture generator for fractured aquifers modeling - Fratcond tool module I

Alan Reis<sup>1</sup>; José Eduardo Alamy Filho<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> Universidade Federal de Uberlândia (UFU/MG), Uberlândia, MG

✉ [alanreis.ar@gmail.com](mailto:alanreis.ar@gmail.com), [zealamy@yahoo.com.br](mailto:zealamy@yahoo.com.br)

### Palavras-chave:

Aquíferos fraturados.  
Geração de fraturas.  
Redes de fraturas discretas.  
Modelagem numérica.  
MATLAB.

### Keywords

Fractured aquifers.  
Fracture generator.  
Discrete fracture network (DFN).  
Numerical modeling.  
MATLAB.

Revisado por pares.

Recebido em: 23/02/2018.

Aprovado em: 02/05/2018.

### Resumo

A modelagem de águas subterrâneas em meios fraturados é extremamente dependente da geometria e da disposição das fraturas nestes meios. Observa-se que tais descontinuidades se transformam em caminhos preferenciais para os escoamentos, ao se considerar as diferenças de condutividade hidráulica e permeabilidade entre estas e a matriz rochosa ao seu entorno. Em virtude das dificuldades de levantamento completo dos dados de caracterização das fraturas em campo, é comum a utilização de abordagens estatísticas e estocásticas, visando a geração de redes de fraturas, que possibilitem a modelagem dos escoamentos nestas descontinuidades. Neste sentido, este trabalho visa apresentar a implementação de um gerador estocástico de fraturas discretas tridimensionais, desenvolvido em ambiente MATLAB para a obtenção das geometrias de meios fraturados. Tal geração leva em conta as funções de densidade de probabilidade comumente visualizadas para a posição, o comprimento, a abertura e a orientação das fraturas. A partir de dados estatísticos para estas funções, a ferramenta fornece como resultados a caracterização das fraturas geradas, que pode ser visualizada por meio de gráficos e planilhas, além de possibilitar sua posterior modelagem hidráulica.

### Abstract

The groundwater modeling in fractured media is extremely dependent on the geometry and arrangement of the fractures in these media, since such discontinuities become preferred flow paths, considering the differences in hydraulic conductivity and permeability between these and the matrix rocky environment. Due to the difficulties of completely surveying characterization data of the fractures in the field, it is common to use statistical and stochastic approaches, aiming at the generation of fracture networks, which allow flow modeling in these discontinuities. In this sense, this work aims to present the implementation of a three-dimensional stochastic discrete fracture generator, developed in MATLAB environment to obtain fractured media geometries. This generation takes into account the commonly-used probability density functions for the position, length, aperture, and orientation of fractures. From statistical data for these functions, the tool provides as results the characterization of generated fractures, which can be visualized through graphs and spreadsheets, allowing its later hydraulic modeling.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v32i2.29106>

## 1. INTRODUÇÃO

Os aquíferos fraturados podem ser entendidos como mananciais subterrâneos de água, comumente representados por formações com dois meios distintos: uma matriz rochosa consolidada, de baixa permeabilidade e baixa condutividade hidráulica; limitadas por descontinuidades, denominadas comumente como fraturas, bastante permeáveis, através das quais a água transita preferencialmente. Rochas ígneas e metamórficas, duras e maciças, são exemplos de

materiais que compõem este tipo de aquífero, que tem sua capacidade de produção e armazenamento diretamente influenciadas pela quantidade de fraturas, pelo tamanho de suas aberturas e pela sua interconectividade.

Diferentes modelos estão presentes na bibliografia corrente para representação da geometria das fraturas e a modelagem hidráulica destes aquíferos, considerando as diferentes propriedades da matriz rochosa e das descontinuidades. Em tempos mais recentes, é

comum o uso do termo redes de fraturas discretas (em inglês, *Discrete Fracture Network Model - DFN*) para indicar os modelos descontínuos que buscam representar o meio fraturado, se baseando em dados levantados em campo. Tais dados permitem a determinação da localização e da orientação das fraturas no maciço rochoso, estabelecendo assim os caminhos que a água tende a percorrer, em seu trânsito.

O levantamento destes dados em campo é uma das principais dificuldades para uso das redes de fraturas discretas, uma vez que estes ficam visíveis apenas em afloramentos das rochas ou por meio de amostras retiradas de tais maciços rochosos. Neste sentido, é comum o uso de modelos estatísticos, acoplados ao *DFN*, que informam valores das propriedades importantes, válidos para todo o aquífero fraturado, obtidos a partir de medições realizadas em regiões limitadas. Desta forma, é possível estabelecer, a partir de médias e desvios padrões das propriedades, como as fraturas se distribuem e formam a rede de escoamento de água na unidade rochosa.

Diversos autores já obtiveram resultados para a caracterização estatística de meios fraturados, assim como as respectivas funções de densidade de probabilidade (FDP), para cada uma das características importantes das fraturas. Foi observada uma semelhança nas FDPs encontradas, quando estes verificavam uma mesma característica do sistema, mesmo em diferentes localidades geográficas. Destaca-se abaixo alguns trabalhos em que foi realizada esta verificação, em função da variável e da função densidade de probabilidade comumente obtida:

- Comprimento das fraturas: bem caracterizada por uma distribuição do tipo lognormal, conforme verificado nos trabalhos de Cacas et al. (1990a); Hestir e Long (1990); Odling e Webman (1991); Niemi et al. (2000).
- Abertura das fraturas: também é bem caracterizada por uma distribuição do tipo lognormal. Tal fato é verificado nos trabalhos de Long e Billaux (1987), Moreno et al. (1988), Tsang et al. (1988) e Keller et al., (1999).
- Orientação das fraturas: foram verificadas na literatura, para modelos tridimensionais, o uso da distribuição de Fisher, conforme indicado por Dverstrop e Anderson (1989), Cacas et al. (1990a) e Niemi et al. (2000).
- Localização: se refere a posição do centro das fraturas, em termos de coordenadas espaciais (x, y, z). A partir deste ponto, traça-se o comprimento da fratura, sendo metade em um sentido e metade no sentido oposto, seguindo os ângulos de direção e mergulho. Em termos de função de densidade de probabilidade, é comum o uso de uma distribuição uniforme, conforme identificado nos trabalhos de Dverstrop e Anderson (1989) e de Cacas et al. (1990a).

Outra abordagem bastante comum na análise de meios fraturados é a utilização de técnicas estocásticas, acopladas ou não ao método de Monte Carlo, que utilizam o caráter aleatório presente nas funções de densidade de probabilidade para a geração artificial de redes discretas de fraturas. São utilizados como dado de entrada apenas valores de média e desvio padrão de cada uma das características do sistema fraturado, além de coeficientes que compõem as FDPs para esta geração. Como resultado, obtém-se uma rede que não necessariamente corresponde a rede real, em virtude da aleatoriedade presente na geração, mas que segue a distribuição estatística indicada para cada variável, e que permite a modelagem hidráulica adequada do meio fraturado de determinada região.

Considerando tais fatos, este trabalho visa apresentar os aspectos utilizados no desenvolvimento de um gerador estocástico de fraturas discretas tridimensionais, considerando as distribuições estatísticas mais comuns para as propriedades físicas das descontinuidades. Este gerador corresponde ao módulo 1 da ferramenta FratCond, que visa a modelagem hidráulica de aquíferos fraturados, utilizando condutos equivalentes. Este módulo é responsável pela geração da geometria do modelo, realizada de forma estocástica, a partir de dados estatísticos das propriedades físicas das fraturas do meio considerado. Obtém-se, após a geração, dados para a posição, o comprimento, a abertura e a orientação das fraturas geradas, assim como as interseções entre as fraturas geradas. A ferramenta dispõe de vários gráficos e de uma planilha para exploração dos resultados obtidos.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O módulo 1 da ferramenta FratCond corresponde ao gerador estocástico de fraturas para modelagem de aquíferos fraturados e foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação do ambiente MATLAB. Esta escolha considerou as possibilidades de exploração de funções pré-definidas deste ambiente, como o uso de funções de densidade de probabilidade, necessárias para a geração estocástica a ser realizada, assim como funções de plotagem incorporadas, que permitem a exibição gráfica dos resultados obtidos na ferramenta. A possibilidade de construção de uma interface gráfica, para a inserção dos gráficos de entrada, sem contato direto com as rotinas programadas, também foi outro incentivador para o uso do referido ambiente.

A representação geométrica tridimensional das fraturas pode assumir diversos formatos, tais como polígonos regulares, círculos e elipses. Revisões bastante completas podem ser encontradas nos trabalhos de Staub et al. (2002) e Alghalandis (2014). Neste trabalho, optou-se pelo uso do Modelo de Baecher (Baecher et al., 1978). Tal modelo considera que os planos das fraturas são representados por discos circulares, locados espacialmente a partir de seus centros, com valores de diâmetros constantes, correspondentes aos comprimentos das fraturas. Sua escolha se baseia na facilidade de representação desta forma geométrica e na sua boa aplicabilidade quando se dispõe de poucos dados estatísticos do sistema fraturado a ser modelado (STAUB ET AL., 2002).

A geração estocástica das fraturas demanda ao usuário a inserção de alguns dados de entrada, listados na Figura 1. O primeiro dado a ser inserido é o tamanho do volume elementar representativo do meio fraturado a ser simulado. Tal volume pode ser estimado a partir dos levantamentos de campo, que forneceram os dados estatísticos das características geométricas das fraturas, que serviram de base para a modelagem. Em geral, o volume de simulação assume a forma cúbica. O dado a ser fornecido pelo usuário da ferramenta é dimensão das arestas deste cubo, em metros, conforme a sua necessidade de simulação. Ainda é possível a inserção de um volume de forma prismática, considerando que o plano horizontal possa assumir dimensões diferentes da profundidade do meio, o que pode ocorrer em termos de análise de longos afloramentos. Nesta opção, o usuário poderá inserir as três dimensões que formarão o volume a ser simulado.

O segundo dado a ser fornecido é o número de famílias de fraturas contidas no referido volume representativo simulado. Este número é inteiro e refere-se à quantidade de grupos de descontinuidades

que possuem características geométricas semelhantes, especialmente a orientação. A indicação deste valor é importante, pois em geral, as fraturas com propriedades próximas são estatisticamente caracterizadas juntas, em torno de um valor médio e de um desvio padrão. O gerador estocástico proposto permite a inserção de até 5 famílias, que é a quantidade máxima mais comum de grupos nas unidades rochosas fraturadas.

Os próximos dados de entrada devem ser inseridos para cada uma das famílias, pois se trata especificamente das características físicas das fraturas que as compõem. O terceiro dado, seguindo a ordem inicial, corresponde à densidade de fraturas da referida família. Por se tratar da geração de um modelo de fraturas tridimensional, a densidade a ser inserida é volumétrica, ou seja, corresponde ao número de fraturas daquela família a cada metro cúbico de volume representativo considerado. Como forma de indicação deste número, é comum a contagem dos centros de fratura que estão presentes na referida região. Assim, mesmo que a fratura não esteja com área superficial completamente no interior do volume, ela pode fazer parte da contagem. O dado de densidade volumétrica é essencial para a determinação da quantidade de fraturas que a referida família possui no interior do volume, uma vez que é feita uma relação direta, na forma de um produto entre as dimensões do volume considerado e a respectiva densidade para esta determinação.

Com a quantidade de fraturas, é possível local os centros das fraturas no volume a ser simulado. Para isso, utiliza-se uma função de densidade de probabilidade do tipo uniforme, para geração aleatória das coordenadas ( $x, y, z$ ) dos centros das fraturas, no interior do volume definido para a simulação. O ambiente MATLAB já dispõe de uma função geradora de números, considerando a referida distribuição. É necessário apenas informar os limites superior e inferior dos intervalos desejados. O limite inferior é sempre nulo, enquanto os limites superiores correspondem às dimensões do volume de simulação, ao longo de cada um dos eixos coordenados.

Demanda-se, a seguir, os valores de média e desvio padrão visualizados para os comprimentos e para as aberturas das fraturas da referida família. Como citado na introdução, ambas as propriedades físicas são bem caracterizadas por uma distribuição do tipo lognormal. Nesta distribuição, nota-se que o logaritmo de uma variável com distribuição lognormal, com parâmetros estatísticos  $\mu$  e  $\sigma$ , tem uma distribuição normal, com os mesmos parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$ .

Esta distribuição também será considerada no gerador de fraturas proposto. O ambiente MATLAB também já possui uma função de geração de números, considerando a referida distribuição, a partir dos valores estatísticos informados como dados de entrada. Assim, tal função será diretamente utilizada para a geração dos comprimentos e aberturas das fraturas geradas.

É importante lembrar que, considerando o uso do modelo de Baecher, como forma geométrica assumida pelas fraturas, os valores de comprimentos gerados a partir da distribuição lognormal correspondem aos diâmetros dos discos representativos das fraturas, sendo utilizados na plotagem dos resultados fornecidos pelo gerador proposto.

Os últimos dados de entrada a serem informados correspondem à orientação média das fraturas da família. É necessário o fornecimento de dois ângulos médios, comumente levantados em campo: o ângulo médio de mergulho (*dip*), que corresponde ao ângulo em

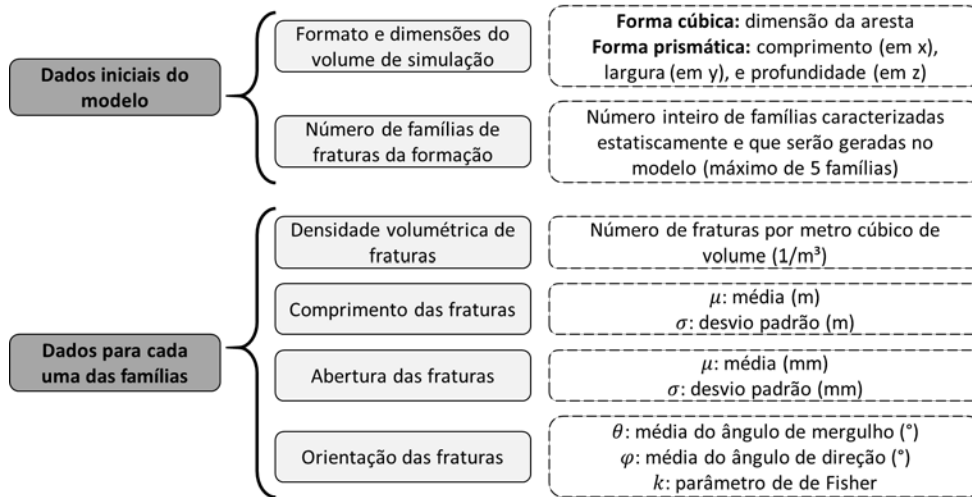
avanço de profundidade da fratura; e o ângulo médio de direção (*strike*), que corresponde à orientação assumida pela descontinuidade no plano horizontal do corpo rochoso. Estes dois ângulos permitem a obtenção de um vetor normal médio das fraturas, que servirá de base para a geração das demais orientações, no entorno dessa média.

Outro dado necessário para caracterização da orientação das fraturas é o parâmetro  $k$  de Fisher, considerando o uso desta distribuição na geração das fraturas tridimensionais. Este fator pode ser entendido como uma medida de dispersão das direções dos vetores normais aos planos das fraturas gerados, em relação à média indicada a partir dos ângulos. Valores de  $k$  elevados indicam famílias com fraturas aproximadamente paralelas, enquanto valores de  $k$  pequenos indicam elevada dispersão nas orientações das fraturas. Telles (2006) apresenta a forma de cálculo deste parâmetro para uma família de fraturas, considerando as respectivas orientações levantadas em campo.

Diferentemente das distribuições até então utilizadas nesta metodologia, o ambiente MATLAB não dispõe de uma função em sua biblioteca, que permita o uso direto da distribuição de Fisher. Neste sentido, foi necessário a implementação de uma rotina adicional que gerasse as orientações de fratura, seguindo a referida distribuição. A Figura 2 apresenta a sequência de passos utilizada nessa implementação, adaptada a partir do exposto por Telles (2006). Os ângulos médios inseridos como dado de entrada são inicialmente transformados em um vetor normal unitário ao plano da fratura, que servirá de orientação média as demais fraturas da família. Em um segundo momento, estes vetores são alinhados ao eixo  $z$ , de forma a simplificar a utilização da distribuição de Fisher. Como terceiro passo, vetores individuais são obtidos a partir do vetor base, considerando os passos listados na Figura 2, que considera o valor do parâmetro  $k$  de Fisher inserido, assim como valores gerados por distribuições uniformes. Ao final, o vetor individual gerado é rotacionado, de forma a se aproximar da posição do vetor base. É importante salientar que apenas um vetor base é gerado por família, enquanto a quantidade de vetores individuais corresponde a quantidade de fraturas que o referido grupo possui. Como dados de saída da rotina, são fornecidas as coordenadas do vetor normal unitário individual, gerado para cada fratura, assim como os seus respectivos ângulos de direção e de mergulho.

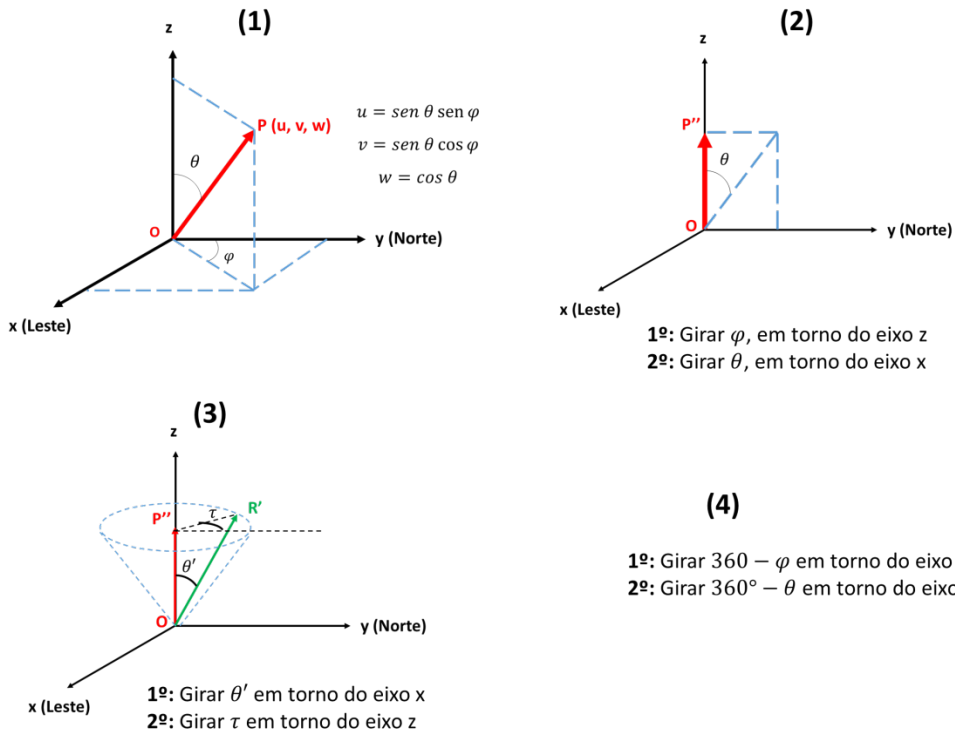
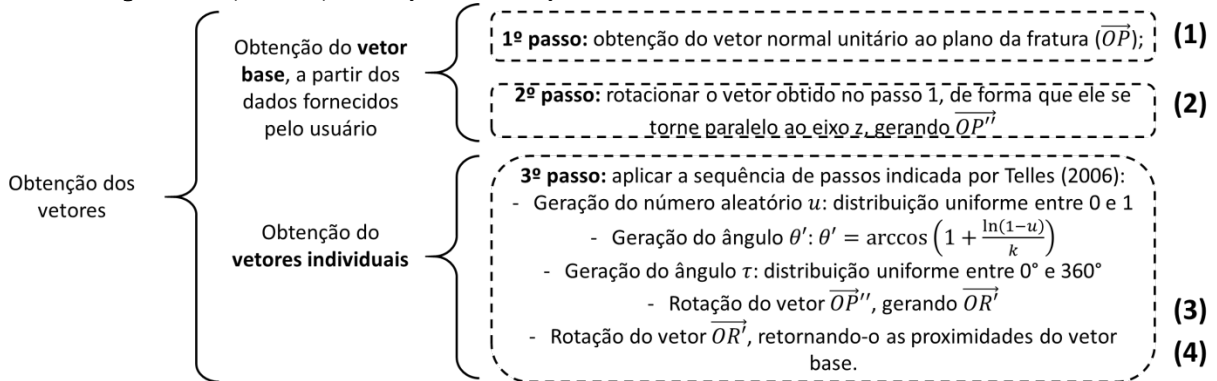
O gerador estocástico proposto ainda detecta as interseções entre as fraturas obtidas, considerando a importância destes cruzamentos para o escoamento de água nos meios fraturados. Tais encontros são indicados por meio do ponto médio dos segmentos de interseção, obtidos pela sequência de passos indicada na Figura 3, que são avaliados sempre por pares de fraturas. Primeiramente, observa-se o cruzamento entre os planos que contém os discos que representam as fraturas, por meio de uma análise vetorial. Se este cruzamento se confirma, verifica-se a passagem da reta de interseção entre os planos no interior de ambos os discos. Confirmada tal etapa, verifica-se a proximidade das fraturas, a partir da comparação da distância de seus centros com os respectivos raios. Em seguida, define-se o ponto médio da interseção, considerando a reta de interseção entre os planos das fraturas, em um trecho limitado pelos discos representativos. As coordenadas do referido ponto e uma lista com as fraturas que se interceptam são os dados de saída da referida rotina.

Figura 1 - Dados de entrada para o gerador estocástico de fraturas



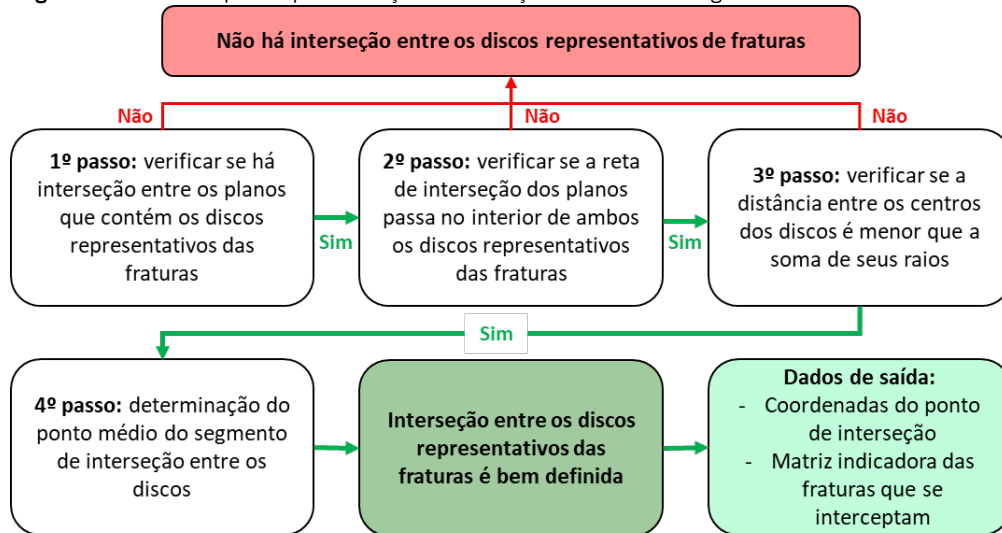
Fonte: Autor (2018)

Figura 2 - Etapas de implementação da distribuição de Fisher



Fonte: Autor (2018)

**Figura 3** – Resumo de passos para detecção da interseção entre as fraturas geradas



Fonte: Autor (2018)

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados a seguir apresentam os produtos obtidos com a implementação da metodologia proposta, que podem ser explorados pelo usuário do gerador estocástico de fraturas proposto (módulo 1 da ferramenta FratCond). Inicialmente, os dados de entrada devem ser fornecidos, a partir do preenchimento dos campos disponíveis na interface gráfica da ferramenta, isolando o usuário comum das linhas de código programadas. Esta interface é apresentada na Figura 4, com os dados de um exemplo hipotético executado no gerador, que servirão de base para os resultados apresentados nesta seção. Nota-se que apenas 3 famílias foram indicadas pelo usuário. Lembra-se que o número máximo de famílias que podem ser geradas pela ferramenta é igual a 5, sendo que os campos para preenchimentos dos dados físicos destas famílias ficam ativos, conforme a quantidade de famílias indicada.

Após a inserção de dados, o botão “Gerar fraturas” deve ser ativado para que a geração estocástica de fraturas seja realizada. Após alguns segundos, o usuário recebe uma confirmação de que a geração foi bem-sucedida. A partir deste momento, é possível analisar os resultados obtidos, a partir da seção “Explorar resultados”, onde o usuário dispõe de 6 gráficos e 1 planilha, passíveis de exportação. Para isso, basta escolher o gráfico de interesse na lista e em seguida apertar no botão “Ok”.

A Figura 5 apresenta o primeiro resultado do gerador estocástico de fraturas, que mostra o posicionamento dos centros das fraturas geradas a partir da aplicação da distribuição uniforme. A partir desta imagem, o usuário pode estimar qual a região do volume apresenta maior quantidade de fraturas, assim como quais as posições assumidas pelas descontinuidades. Os centros das fraturas são indicados por círculos com contornos diferenciados, em função da família. Todas as fraturas são identificadas por um número identificador, também exibido na figura. Lembra-se que a quantidade de fraturas geradas leva em conta as dimensões do volume de simulação e a densidade de fraturas, indicados pelo usuário como dado de entrada. Para o caso mostrado, foram geradas 57 fraturas em um volume de simulação de 5 m<sup>3</sup>.

As Figuras 6 e 7 são semelhantes e apresentam os resultados obti-

dos para a abertura e o comprimento das fraturas geradas, obtidos a partir da aplicação da distribuição lognormal. Tais gráficos são compostos por pontos posicionados sobre os centros das fraturas, com preenchimento variável, em função do valor da grandeza analisada. Uma legenda complementar permite a verificação dos intervalos em que se encontram cada uma das propriedades geradas. O identificador das fraturas também é exibido junto aos pontos. Nestas figuras, o usuário pode identificar rapidamente a ordem de grandeza destas duas propriedades das fraturas, estimando quais as descontinuidades possuem maior tendência de facilitar o escoamento de água em seu interior, considerando a sua abertura como diretamente proporcional à quantidade de fluido que por ela transita; assim como as maiores tendências em conectividade, ao se considerar que fraturas mais extensas apresentam maior possibilidade de cruzamento com outras fraturas, criando assim uma rede de descontinuidades conectadas.

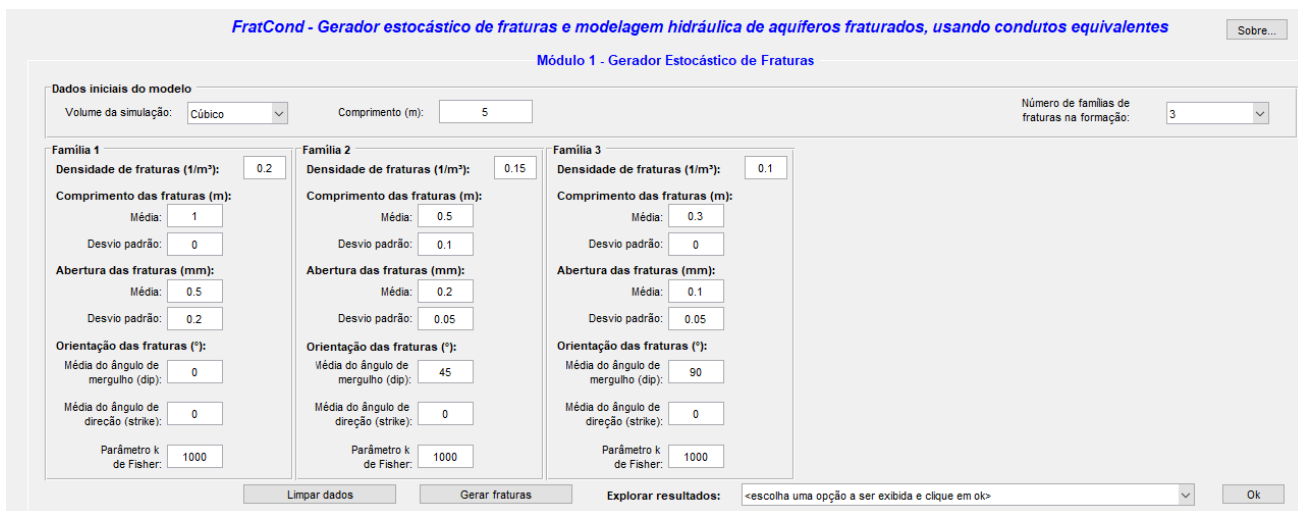
A fim de se avaliar a disposição espacial das fraturas no volume de simulação, a ferramenta proposta dispõe de 2 gráficos. A Figura 8 exibe uma visão geral do volume de simulação, preenchido pelos discos representativos das fraturas, que têm diâmetros iguais aos comprimentos de fratura gerados anteriormente. Tais discos possuem contornos diferenciados em função da família da fratura. Desta forma, é possível ter uma noção do espaço ocupado pelas descontinuidades, além da sua proximidade às fraturas vizinhas. Já a Figura 9 apresenta a visão do plano yz do volume de simulação, de forma a facilitar a visualização dos ângulos de orientação das fraturas geradas, obtidos a partir da aplicação da distribuição de Fisher. Tal figura também destaca os pontos médios dos segmentos de interseção entre as fraturas, indicados pelos pontos negros. Observa-se que, para o caso mostrado, como o parâmetro k de Fisher inserido para todas as famílias apresenta valor elevado, os ângulos de mergulho obtidos foram próximos dos valores médios considerados. Nota-se ainda que foram obtidas 40 interseções entre as 57 fraturas geradas.

Para uma análise complementar das interseções, a Figura 10 exibe a locação dos pontos médios do segmento de interseção entre as fraturas, acompanhado pelo seu respectivo número identificador. Desta forma, o usuário pode observar quais as regiões do volume simulado apresentam maior densidade destes pontos de interesse.

Por fim, a ferramenta proposta também possibilita a exportação de uma planilha que reúne todos os dados obtidos na geração estocástica realizada (Figura 11). Desta forma, o usuário tem a possibilidade de analisar os resultados, na sua forma numérica mais pura. Esta planilha é dividida em 3 abas. A primeira aba reúne todos os dados de entrada inseridos pelo usuário e utilizados na geração das fraturas. Assim, o formato e as dimensões do volume de simulação, o número de famílias e seus dados estatísticos são listados. Nesta aba, também se exibe a quantidade de fraturas gerada por família.

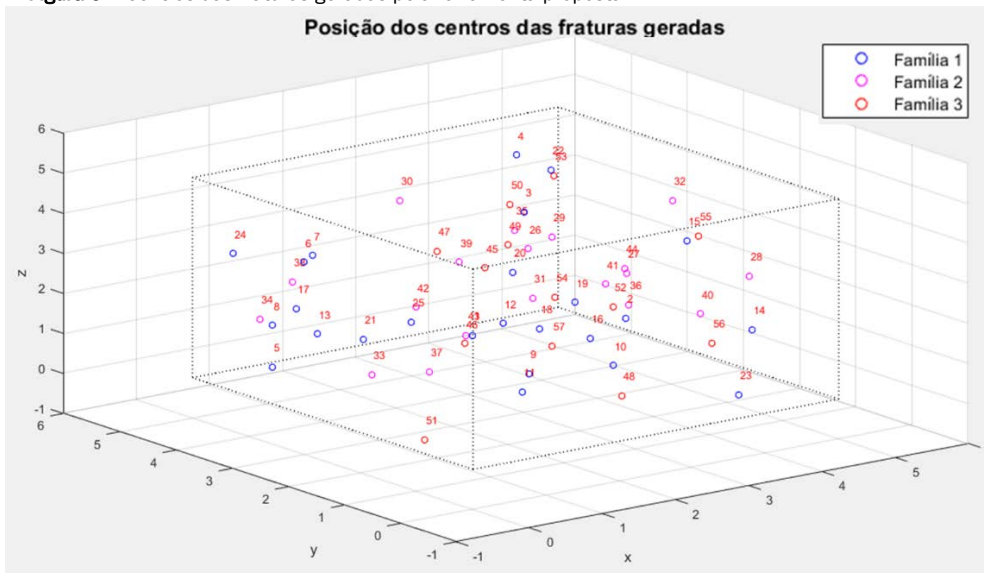
A segunda aba apresenta todos os dados das fraturas, gerados a partir do uso das funções de distribuição de probabilidade mais comuns para cada uma das características de interesse. Assim, de forma ordenada, a partir do identificador da fratura, lista-se as coordenadas dos centros das fraturas, os valores de raio dos discos representativos das fraturas, os valores das aberturas, as componentes do vetor normal unitário de orientação e os respectivos ângulos de direção e mergulho.

Figura 4 – Interface gráfica do gerador estocástico de fraturas



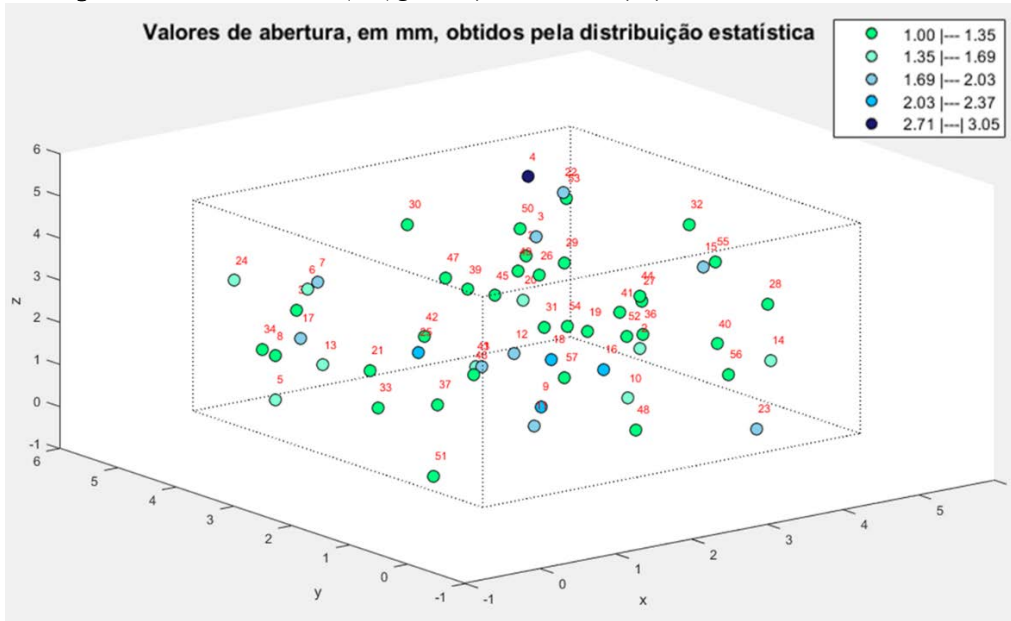
Fonte: Autor (2018)

Figura 5 – Centros das fraturas geradas pela ferramenta proposta



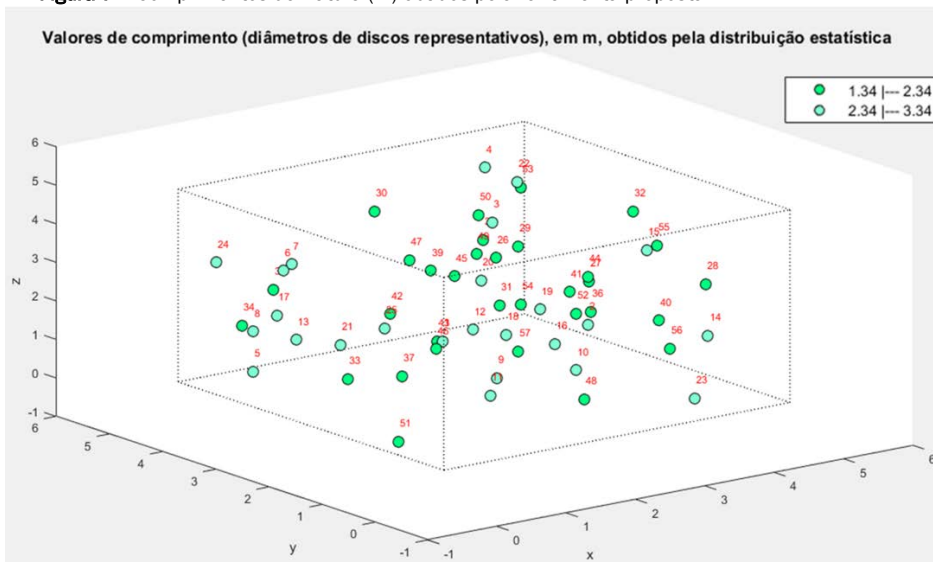
Fonte: Autor (2018)

**Figura 6** – Aberturas de fratura (mm) gerados pela ferramenta proposta



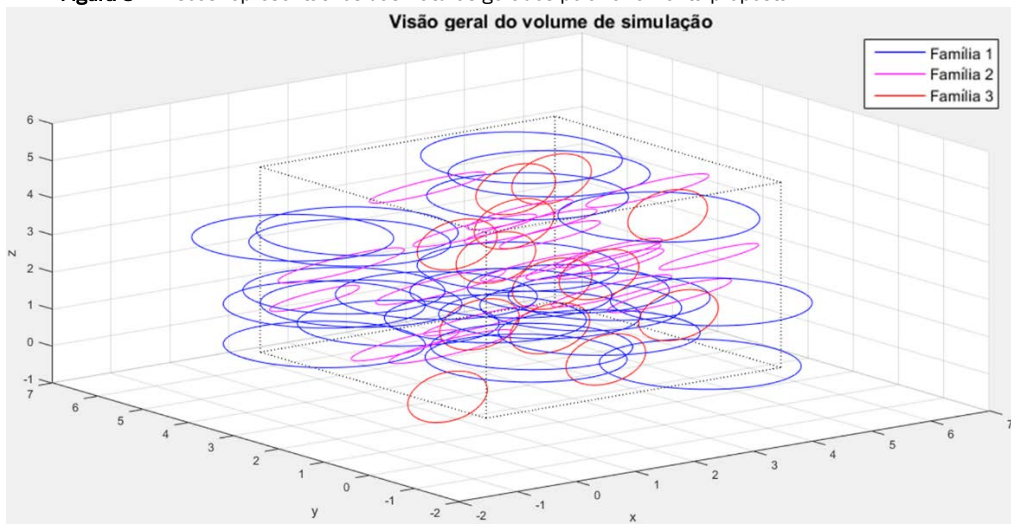
Fonte: Autor (2018)

**Figura 7** – Comprimentos de fratura (m) obtidos pela ferramenta proposta



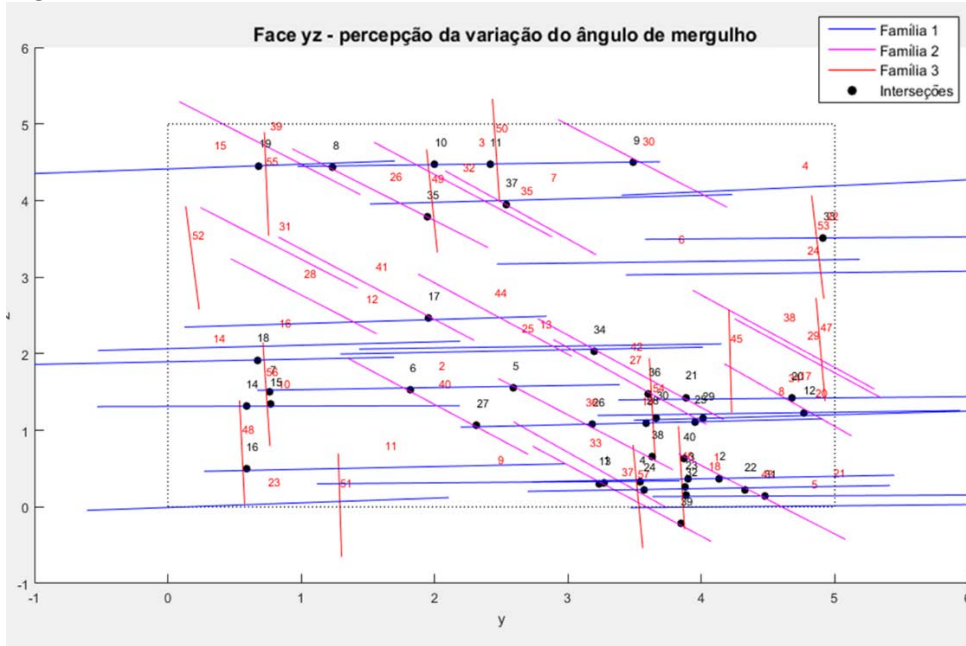
Fonte: Autor (2018)

**Figura 8** – Discos representativos das fraturas gerados pela ferramenta proposta



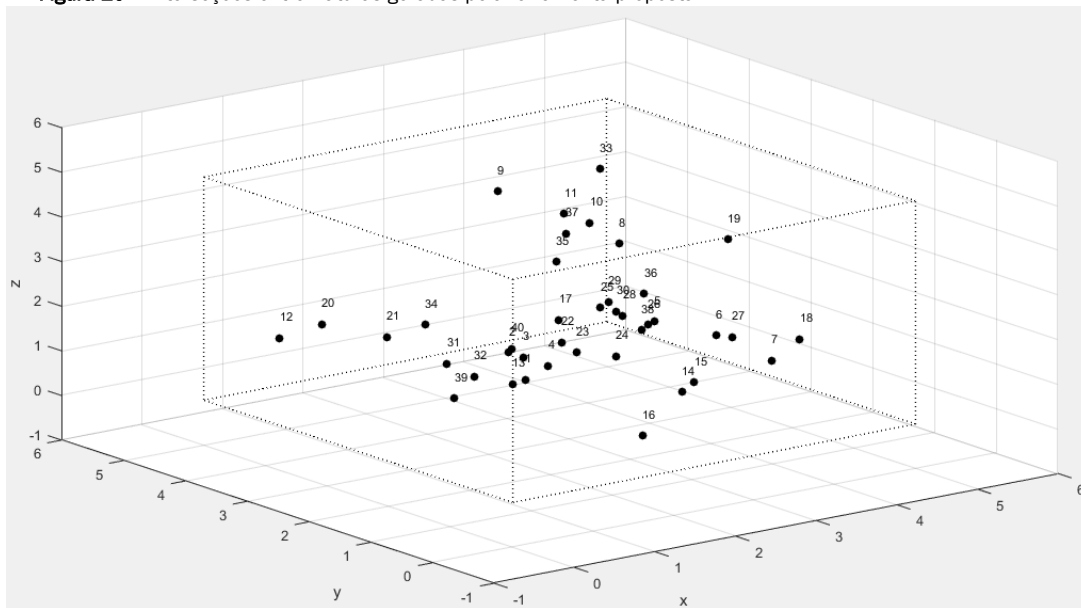
Fonte: Autor (2018)

Figura 9 – Visão do plano yz do volume de simulação, para verificação do mergulho das fraturas e das interseções entre elas



Fonte: Autor (2018)

Figura 10 – Interseções entre fraturas geradas pela ferramenta proposta



Fonte: Autor (2018)

#### 4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados, conclui-se que o módulo I da ferramenta FratCond possibilita diferentes análises da geometria de meios fraturados, gerados de forma estocástica. Tais fraturas são obtidas a partir de dados estatísticos de campo e considerando as funções de densidade de probabilidade mais comuns para as características físicas das fraturas. Após esta geração, o usuário dispõe de gráficos e planilhas, que permitem verificar a caracterização completa das fraturas geradas. Dados de posição, comprimento, abertura e orientação são exemplos de dados fornecidos pela geração. Em módulos subsequentes, ainda em implementação, a ferramenta FratCond pode tirar proveito da geometria gerada para a simulação hidráulica de formações aquíferas, considerando diferentes abordagens disponíveis na literatura.

#### AGRADECIMENTOS

O primeiro autor deste trabalho agradece à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais) pelo apoio concedido, na forma de bolsa de mestrado.

Os autores também agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro dado ao projeto intitulado "Construção de um Modelo Computacional Livre para Simulação de Escoamento e do Transporte de Poluentes em Aquíferos Utilizados no Abastecimento de Água", registrado sob o processo 446659/2014-2, MCTI/CNPQ/Edital Universal 14/2014.



Figura 11 – Abas da planilha de dados gerados pela ferramenta proposta

FratCond - Dados de entrada inseridos pelo usuário									
Data e hora de geração da geometria:		18-01-18-15-04-16							
Data e hora de exportação dos resultados:		18-01-18-15-26-13							
Tipo de volume escolhido:		Cúbico		Dimensões do volume (m x m x m):				5x5x5	
Número de famílias indicado:		3		Número de fraturas geradas:				57	
Densidade (1/m³)	Comprimento das fraturas (m)			Abertura das fraturas (mm)		Orientação de fraturas (°)			número de fraturas da família
	média	desvio padrão	média	desvio padrão	ângulo de mergulho (dip)	ângulo de direção (strike)	K Fisher		
Fam. 1	0.2	1	0	0.5	0.2	0	0	1000	25
Fam. 2	0.15	0.5	0.1	0.2	0.05	45	0	1000	19
Fam. 3	0.1	0.3	0	0.1	0.05	90	0	1000	13

FratCond - Resultados do gerador estocástico de fraturas - Dados das fraturas											
Data e hora de geração da geometria:		18-01-18-15-04-16									
Data e hora de exportação dos resultados:		18-01-18-15-26-13									
Volume de simulação (m³):		125				Número de fraturas geradas:					57
ID	Centros de fraturas			Raio (m)	Abertura (mm)	Orientação - vetor unitário			Orientação - Ângulos		
	x	y	z			x	y	z	Mergulho (dip) (°)	Direção (strike) (°)	
1	3.1229	4.0879	0.3704	1.3591	1.6871	0.0000	-0.0319	0.9995	1.8119	0.0000	
2	3.6412	2.0291	1.5591	1.3591	1.4541	0.0000	-0.0271	0.9996	1.6206	0.0000	
3	2.4909	2.3316	4.4759	1.3591	1.7816	0.0000	-0.0223	0.9998	1.1459	0.0000	
4	4.2491	4.7577	4.1738	1.3591	3.0491	0.0000	-0.0774	0.9970	4.4392	0.0000	
5	0.9546	4.8250	0.0117	1.3591	1.6812	0.0000	-0.0156	0.9999	0.8103	0.0000	
6	0.6207	3.8264	3.2010	1.3591	1.6338	0.0000	-0.0221	0.9998	1.1459	0.0000	
7	0.0140	2.8727	4.0159	1.3591	1.9575	0.0000	-0.0453	0.9990	2.5626	0.0000	
8	0.7648	4.5796	1.2257	1.3591	1.2060	0.0000	-0.0237	0.9997	1.4035	0.0000	
9	2.6708	2.4772	0.3206	1.3591	2.0661	0.0000	-0.0138	0.9999	0.8103	0.0000	
10	2.5532	0.8301	1.3157	1.3591	1.3916	0.0000	-0.0040	1.0000	0.0000	0.0000	
11	1.9261	1.6300	0.5136	1.3591	1.8469	0.0000	-0.0361	0.9993	2.1439	0.0000	
12	1.5530	1.4822	2.4186	1.3591	1.7425	0.0000	-0.0522	0.9986	3.0322	0.0000	
13	0.0178	2.7915	2.0944	1.3591	1.6268	0.0000	-0.0247	0.9997	1.4035	0.0000	
14	4.0762	0.3374	1.9064	1.3591	1.4284	0.0000	-0.0344	0.9994	1.9849	0.0000	

FratCond - Resultados do gerador estocástico de fraturas - Interseções											
Data e hora de geração da geometria:		18-01-18-15-04-16									
Data e hora de exportação dos resultados:		18-01-18-15-26-14									
Volume de simulação (m³):		125				Número de fraturas geradas:					57
						Número de interseções obtidas:					40
ID	fratura i	fratura j	Coordenadas da interseção								
			x	y	z						
1	1	37	2.6625	3.2683	0.3203						
2	1	43	3.1229	4.1357	0.3720						
3	1	46	3.1229	3.9013	0.3645						
4	1	57	3.1531	3.5386	0.3279						
5	2	36	3.7457	2.5894	1.5509						
6	2	40	3.9178	1.8184	1.5295						
7	2	56	3.7965	0.7633	1.4998						
8	3	26	2.2690	1.2376	4.4290						
9	3	30	2.4909	3.4886	4.5017						
10	3	49	2.4909	2.0019	4.4685						
11	3	50	2.4909	2.4171	4.4778						
12	8	34	0.7648	4.7672	1.2301						

Fonte: Autor (2018)

REFERÊNCIAS

ALGHALANDIS, Y. F. *Stochastic Modelling of Fractures in Rock Masses*. 2014. 300 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – The University of Adelaide, Adelaide (Austrália), 2014.

BAECHER, G. B.; LANNEY, N. A.; EINSTEIN, H. H. Statistical description of rock properties and sampling, In: 18TH U.S. SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS. *Proceedings...* American Institute of Mining Engineers, 1978.

CACAS, M. C.; LEDOUX, E.; MARSILY, G.; TILLIE, B.; BARBREAU, A.; DURAND, E.; FEUGA, B.; PEAUDE CERF, P. Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: Calibration and validation. 1. The flow model. *Water Resources Research*, v. 26. n. 3. p. 479-489, 1990a.

DVERSTORP, B.; ANDERSSON, J. Application of the discrete fracture network concept with field data: Possibilities of model calibration and validation. *Water Resources Research*, v. 25. n. 3. p. 540-550, 1989.

- HESTIR, K.; LONG, J. C. S. Analytical expressions for the permeability of random twodimensional Poisson fracture networks based on regular lattice percolation and equivalent media theories. *Journal of Geophysical Research*, v. 95(B13). n. 21. p. 565-21,581, 1990.
- KELLER, A. A.; ROBERTS, P.V.; BLUNT, M. J. Effect of fracture aperture variations on the dispersion of contaminants. *Water Resources Research*, v. 35. n. 1. p. 55-63, 1999.
- LONG, J. C. S. *Verification and characterization of continuum behavior of fractured rock at AECL underground research laboratory*. Technical Report, LBL-14975, 1985a.
- LONG, J. C. S.; BILLAUX, D. M. From field data to fracture network modeling: an example incorporating spatial structure. *Water Resources Research*, v. 23. n. 7. p. 1201-1216, 1987.
- MORENO, L.; TSANG, Y. W.; TSANG, C. F.; HALE, F. V.; NERETNIEKS, I. Flow and tracer transport in a single fracture: A stochastic model and its relation to some field observations. *Water Resources Research*, v. 24, n. 12, p. 2033-2048, 1988.
- NIEMI, A.; KONTIO, K.; KUUSELA-LAHTINEN, A.; Hydraulic characterization and upscaling of fracture networks based on multiple-scale well test data. *Water Resources Research*, v. 36, n. 12, p. 3481-3497, 2000.
- ODLING, N. E.; WEBMAN, I. A. Conductance mesh approach to the permeability of natural and simulated fracture patterns. *Water Resources Research*, v. 27, n. 10, p. 2633-2643, 1991.
- STAUB, I.; FREDRIKSSON, A.; OUTTERS, N. *Strategy for a rocks mechanics site descriptive model*. Golder Associates, Sweden. 219 p. 2002. Relatório.
- TELLES, I. A. *Desenvolvimento de um sistema integrado para modelagem de fluxo e transporte em meios porosos e fraturados*. 2006. 164 f. Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. 2006.
- TSANG, Y. W.; TSANG, C. F.; NERETNIEKS, I.; MORENO, L. Flow and tracer transport in fractured media: a variable aperture channel model and its properties, *Water Resources Research*. v. 24, n. 12, p. 2049-2060, 1988.