

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA
COMPUTACIONAL FRATCOND, PARA
MODELAGEM DE AQUÍFEROS FRATURADOS,
UTILIZANDO REDES DE FRATURAS
DISCRETAS E CONDUTOS EQUIVALENTES**

ALAN REIS

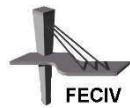
UBERLÂNDIA, MARÇO DE 2018



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Alan Reis

**DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA
COMPUTACIONAL FRATCOND, PARA MODELAGEM
DE AQUÍFEROS FRATURADOS, UTILIZANDO REDES
DE FRATURAS DISCRETAS E CONDUTOS
EQUIVALENTES**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho

Uberlândia, março de 2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

R375d
2018

Reis, Alan, 1992-

Desenvolvimento da ferramenta computacional Fratcond, para modelagem de aquíferos fraturados, utilizando redes de fraturas discretas e condutos equivalentes / Alan Reis. - 2018.

220 f. : il.

Orientador: José Eduardo Alamy Filho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1115>

Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Aquíferos - Teses. 3. Recursos hídricos - Teses. I. Alamy Filho, José Eduardo. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624

Maria Salete de Freitas Pinheiro – CRB6/1262



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

ATA Nº: 206/2018

CANDIDATO: Alan Reis

Nº. Matrícula: 11522ECV017

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho

TÍTULO: "Desenvolvimento de ferramenta computacional FRATCOND, para modelagem de aquíferos fraturados, utilizando redes de fraturas discretas e condutos equivalentes".

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

LINHA DE PESQUISA: Recursos Hídricos e Saneamento

PROJETO DE PESQUISA: Gestão de Reservatórios

DATA DA DEFESA: 21 de março de 2018.

LOCAL: Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y.

HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO: 08:45 - 11:30

Reuniu-se na **Sala de Reuniões Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y - Campus Santa Mônica** da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGEC, assim composta: Professores Doutores: **Carlos Eugênio Pereira – FECIV/UFU; Edson Cesar Wendland – EESC/USP e José Eduardo Alamy Filho** orientador do candidato. Ressalta-se que o **Prof. Dr. Edson Cesar Wendland** participou da defesa por meio de vídeo conferência desde a cidade de São Carlos (SP) e os demais membros da banca e o aluno participaram in loco.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa **Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho** apresentou a Comissão Examinadora e concedeu ao discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou o candidato aprovado. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada foi assinada pela Banca Examinadora.

Professor Orientador: **Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho – FECIV/UFU**

Membro externo: **Prof. Dr. Edson Cesar Wendland – EESC/USP**

Membro interno: **Prof. Dr. Carlos Eugênio Pereira – FECIV/UFU**

A GRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, aquele que me deu o dom da vida e a capacidade de adquirir e transmitir conhecimento.

Agradeço aos meus pais, José Silvestre e Edinamar, pelo amor constante e pelo total incentivo ao longo de toda a minha formação educacional.

Agradeço à minha namorada Alessandra, por todo o suporte, companheirismo, carinho e paciência, especialmente nos momentos de ansiedade, ao longo destes anos de mestrado.

Agradeço ao orientador deste trabalho, Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho, pela amizade constante, pelo estímulo em conhecer mais sobre os aquíferos fraturados e por todo o suporte e atenção no desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço também aos demais professores do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil (PPGEC/UFU), por todos os ensinamentos partilhados e pelos constantes auxílios prestados.

Agradeço aos colegas de mestrado, pelos diversos momentos compartilhados e pela amizade criada neste período.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro fornecido, na forma da bolsa de mestrado.

“Existem muitas hipóteses em ciência que estão erradas. Isso é perfeitamente aceitável, elas são a abertura para achar as que estão certas”. (Carl Sagan)

Reis, A. Desenvolvimento da ferramenta computacional FratCond, para modelagem de aquíferos fraturados, utilizando redes de fraturas discretas e condutos equivalentes. 220 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

RESUMO

A Formação Serra Geral, no Sul e Sudeste do Brasil, e o Embasamento Cristalino, na região Nordeste do Brasil, são exemplos de estruturas geológicas que abrigam aquíferos fraturados, sobre os quais existem diversos poços tubulares para fins de abastecimento público e de uso nas atividades agrícolas e industriais. Apesar deste uso comum, a modelagem do escoamento neste tipo de aquífero ainda é pouco estudada no Brasil. Diferentes formas de representação dos aquíferos fraturados já são vistas na literatura internacional. Uma destas é o modelo de redes de fraturas discretas, que visa representar o meio rochoso fraturado, detalhando a localização e a geometria das descontinuidades, onde a água tende a transitar com maior facilidade. A modelagem das redes de fraturas discretas geralmente requer a solução das equações de escoamento em redes tridimensionais formadas por discos, polígonos regulares ou por redes de condutos unidimensionais equivalentes. Este último modelo apresenta grande vantagem computacional, ao reduzir a quantidade de variáveis a serem determinadas e representando adequadamente o fenômeno estudado, tanto em termos de escoamento quanto de transporte de contaminantes. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo apresentar a ferramenta computacional FratCond, desenvolvida em MATLAB, para a modelagem de aquíferos fraturados. Tal ferramenta é capaz de gerar estocasticamente uma rede de fraturas discretas, a partir de dados estatísticos das principais variáveis descritivas do sistema fraturado em análise. A modelagem hidráulica, em termos de escoamento permanente, utiliza o conceito de condutos unidimensionais equivalentes, obtidos após a geração das fraturas, e permitindo a obtenção de cargas hidráulicas e vazões nas descontinuidades. Os resultados, obtidos a partir de um exemplo hipotético, demonstram as várias potencialidades da ferramenta desenvolvida, possibilitando uma análise completa dos aquíferos fraturados, tanto em termos de geometria quanto de características hidráulicas.

Palavras-chave: Aquíferos fraturados. Redes de fraturas discretas. Modelagem numérica. Geração de fraturas. Condutos equivalentes.

Reis, A. FratCond computational tool development, for fractured aquifers modeling using discrete fracture networks and equivalent pipes. 220 pp. MSc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2018.

ABSTRACT

The Serra Geral Formation, in the South and Southeast Brazilian regions, and the Crystalline Basin, in the Northeast Brazilian region, are examples of geological structures that shelter fractured aquifers, where there are tubular wells with the purpose of public supply and for use in agricultural and industrial activities. Despite this ordinary use, flow modelling of this aquifer type is poorly researched in Brazil. Different representation forms of fractured aquifers are already seen in the international literature. One of these is the discrete fracture network model (DFN), which aims to accurately represent the fractured rocky environment, detailing the discontinuities location and geometry, where water tends to transit more easily. The modeling of discrete fracture networks usually requires the solution of the flow equations in three-dimensional networks formed by discs, regular polygons or by networks of 1D equivalent pipes. The latter model presents computational advantage, by reducing the quantity of variables to be determined and adequately representing the phenomenon studied, both in terms of flow and transport. In this sense, this work has as objective to present the computational tool FratCond, developed in MATLAB, for fractured aquifers modeling. This tool is able to stochastically generate a network of discrete fractures, based on statistical data of the main descriptive variables of the fractured system under analysis. The hydraulic modeling, in terms of steady flow, uses the concept of 1D equivalent pipes, obtained after the fractures generation, and allowing to obtain the total pressure and the flow rates in the discontinuities. The results, obtained from a hypothetical example, show the various potentialities of the developed tool, allowing a complete analysis of the fractured aquifers, both in terms of geometry and hydraulic characteristics.

Keywords: fractured rocks, discrete fracture network (DFN), numerical modelling, fracture generator, 1D equivalent pipes.

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

SÍMBOLOS

% - por cento

km² - quilômetro quadrado

km³ - quilômetro cúbico

m³ - metro cúbico

m³/h – metro cúbico por hora

m³/dia – metro cúbico por dia

SIGLAS

ABAS – Associação Brasileira de Águas Subterrâneas

ANA – Agência Nacional das Águas

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais / Serviço Geológico Brasileiro

DFN – *Discrete Fracture Network* (em português, redes de fraturas discretas)

EPM – *Equivalent Porous Medium* (em português, modelo poroso equivalente)

FDP – Função de densidade de probabilidade

MATLAB – Matrix Laboratory

MMA – Ministério do Meio Ambiente

SANEPAR – Companhia de Saneamento do Estado do Paraná

SI – Sistema Internacional de Unidades

VER – Volume Elementar Representativo (em inglês, REV – *Representative Elementary Volume*)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo Hidrológico.....	24
Figura 2 – Distribuição da água em profundidade no subsolo.....	26
Figura 3 – Aquíferos em função da condição hidráulica.....	29
Figura 4 – Aquíferos em função da porosidade da formação.....	31
Figura 5 – Domínios hidrolíticos do território brasileiro.....	35
Figura 6 – Sistemas fraturados, em rocha metamórfica (a) e rocha sedimentar (b).....	37
Figura 7 – Representação esquemática de um sistema puramente fraturado (a), de um sistema fraturado com dupla porosidade (b) e de um sistema heterogêneo (c).....	38
Figura 8 – Abertura e rugosidade das fraturas.....	40
Figura 9 – Ângulos de orientação de fraturas.....	41
Figura 10 – Diagrama de roseta, indicando a quantidade de fraturas em determinada direção.....	43
Figura 11 – Medição de espaçamento real entre fraturas.....	43
Figura 12 – Variação do grau de fraturamento em função da persistência das fraturas..	45
Figura 13 – Avaliação da conectividade de um sistema de fraturas, a partir dos tipos de terminação.....	46
Figura 14 – Resultados de frequência de fraturas, obtidos a partir da aplicação da técnica de <i>scanline</i>	48
Figura 15 – Uso da régua comparadora para o levantamento de abertura de fratura, na técnica de <i>scanline</i>	49
Figura 16 – Volume Elementar Representativo (VER), em três diferentes formações...	55
Figura 17 – Exemplo de modelo bidimensional, gerado estocasticamente, em planta e em perspectivas.....	61
Figura 18 – Evolução histórica dos modelos de fraturas tridimensionais. (a) Modelo ortogonal 3D, (b) Modelo de Baecher, (c) Modelo de Baecher aperfeiçoado, (d) Modelo BART, (e) Modelo de Dershowitz, (f) Modelo de Densidade Incorporada e (g) Modelo poligonal randômico.....	62

Figura 19 – Diferentes abordagens para modelagem hidráulica de aquíferos fraturados: (a) sistema fraturado real, (b) modelo poroso equivalente, (c) modelo de dupla porosidade e (d) modelo de redes de fraturas discretas.....	67
Figura 20 – Diferentes geometrias do modelo de dupla porosidade.....	72
Figura 21 – Curva de rebaixamento típica para aquíferos de dupla porosidade.....	75
Figura 22 – Representação da fratura no modelo de placas paralelas.....	79
Figura 23 – Discretização de um plano de fratura para aplicação do método dos elementos finitos.....	82
Figura 24 – Formas de representação das fraturas por condutos unidimensionais.....	85
Figura 25 – Parâmetros para cálculo da condutância, segundo Moreno et al. (1988)..	87
Figura 26 – Formação dos condutos unidimensionais, segundo Moreno et al. (1993)	89
Figura 27 – Configuração dos condutos unidimensionais equivalentes, segundo Dershowitz (1996).....	90
Figura 28 – Fraturas representadas por uma rede múltipla de condutos unidimensionais, onde ocorrem a maioria do escoamento de fluido.....	92
Figura 29 – Etapas de execução de simulação na ferramenta FratCond.....	96
Figura 30 – Distribuição uniforme no intervalo [a,b].....	99
Figura 31 – Distribuição lognormal, com $\mu = 0$ e diferentes valores de desvio padrão.	101
Figura 32 – Obtenção do vetor normal unitário ao plano da fratura avaliada.....	103
Figura 33 – Rotação do vetor normal unitário, tornando-o paralelo ao eixo z.....	105
Figura 34 – Obtenção do vetor o vetor $\overrightarrow{OR'}$ durante a aplicação da distribuição de Fisher.....	106
Figura 35 – Resumo dos passos de implementação da distribuição de Fisher.....	108
Figura 36 – Forma do armazenamento dos dados gerados estocasticamente.....	110
Figura 37 – Representação esquemática dos discos representativos das fraturas.....	110
Figura 38 – Traçado dos condutos unidimensionais equivalentes.....	112
Figura 39 – Procedimento para determinação das interseções entre as fraturas.....	113
Figura 40 – Representação sintética da ocorrência de interseção entre os discos representativos de fraturas.....	114
Figura 41 – Esquema de passos para determinação da interseção entre dois planos.....	116
Figura 42 – Ilustração do passo 3 da detecção das interseções entre as fraturas.....	118
Figura 43 – Representação dos pontos que limitam a interseção entre discos representativos.....	119

Figura 44 – Exemplo de obtenção da matriz de interseções de fraturas (matriz INT).....	122
Figura 45 – Faces do volume de simulação, para indicação das condições de contorno.	124
Figura 46 – Determinação da largura do conduto unidimensional equivalente, segundo Dershowitz (1996).....	126
Figura 47 – Adaptação na determinação da largura do conduto unidimensional.....	127
Figura 48 – Exemplo de obtenção das matrizes INT2 e INT3, visando o isolar os trechos de condutos com mais conexões.....	130
Figura 49 – Evidenciação da necessidade de transporte das condições de contorno aos pontos mais extremo das redes de condutos.....	131
Figura 50 – Variáveis envolvidas na transferência das condições de contorno.....	132
Figura 51 – Interface gráfica da ferramenta FratCond.....	150
Figura 52 – Janelas de advertência da ferramenta Fratcond: (a) janela indicando valores incorretos ou falta de valores, (b) janela indicativa de progresso da rotina e (c) janela indicativa de sucesso na execução da rotina.....	152
Figura 53 – Menus para exploração dos resultados obtidos, em cada um dos módulos da ferramenta FratCond.....	154
Figura 54 – Posição dos centros das fraturas geradas para o exemplo hipotético proposto.....	158
Figura 55 – Valores de abertura de fratura, em mm, obtidos para o exemplo hipotético proposto.....	160
Figura 56 – Valores de comprimento de fratura, em m, obtidos para o exemplo hipotético proposto.....	162
Figura 57 – Visão geral do volume de simulação, com os discos representativos de fraturas, para o exemplo hipotético proposto.....	164
Figura 58 – Visão do plano yz do volume de simulação, para o exemplo hipotético proposto.....	167
Figura 59 – Localização dos pontos de interseção definidos para o exemplo hipotético proposto.....	169
Figura 60 – Condutos unidimensionais equivalentes obtidos para o exemplo hipotético proposto.....	171
Figura 61 – Aba 1 da planilha 1, com os dados obtidos para o exemplo hipotético proposto.....	173

Figura 62 – Aba 2 da planilha 1, com os dados obtidos para o exemplo hipotético proposto.....	174
Figura 63 – Aba 3 da planilha 1, com os dados obtidos para o exemplo hipotético proposto.....	175
Figura 64 – Valores de condutância, em m^3/s , obtidos para o exemplo hipotético proposto.....	179
Figura 65 – Valores de condutância, em m^3/s , considerando o caminho mais longo, obtidos para o exemplo hipotético proposto.....	182
Figura 66 – Valores de gradiente hidráulico, em m/m , obtidos para o exemplo hipotético proposto.....	184
Figura 67 – Valores de vazão, em m^3/s , obtidos para o exemplo hipotético proposto.....	186
Figura 68 – Valores de carga hidráulica nos nós, em m, com os trechos de condutos, obtidos no exemplo hipotético proposto.....	188
Figura 69 – Valores de carga hidráulica nos nós, em m, sem os trechos de condutos, obtidos no exemplo hipotético proposto.....	189
Figura 70 – Aba 4 da planilha 2, com os dados obtidos para o exemplo hipotético proposto.....	192
Figura 71 – Aba 5 da planilha 2, com os dados obtidos para o exemplo hipotético proposto.....	193

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Abertura e classificação, em função do seu tamanho.....	40
Tabela 2 – Resumo dos dados de entrada para o módulo 1 da ferramenta FratCond.....	108
Tabela 3 – Lista dos gráficos e planilhas disponíveis no módulo 1 da ferramenta FratCond.....	139
Tabela 4 – Lista dos gráficos e planilhas disponíveis no módulo 2 da ferramenta FratCond.....	140
Tabela 5 – Dados do exemplo hipotético simulado na ferramenta FratCond.....	155

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Considerações iniciais.....	17
1.2 Objetivos.....	20
1.3 Justificativa.....	20
1.4 Estrutura do trabalho.....	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 Águas Subterrâneas.....	23
2.1.1 Aquíferos e suas classificações.....	25
2.2 Sistemas fraturados.....	36
2.2.1 Caracterização das fraturas.....	39
2.2.2 Métodos de investigação.....	47
2.2.3 Abordagem estatística e estocástica.....	54
2.2.4 Geração de fraturas para modelagem.....	58
2.3 Modelagem de Águas Subterrâneas em meios fraturados.....	64
2.3.1 Modelos hidráulicos para meios fraturados.....	65
2.3.2 Condutos e canais na modelagem de meios fraturados.....	84
3. METODOLOGIA.....	94
3.1 Gerador estocástico de fraturas discretas.....	96
3.2 Geração de redes de condutos unidimensionais.....	111
3.3 Simulação hidráulica.....	123
3.4 Exibição dos resultados fornecidos.....	139
4. RESULTADOS.....	148
4.1 Interface gráfica da ferramenta FratCond.....	148
4.2 Exploração dos resultados fornecidos pela ferramenta FratCond a partir de exemplo hipotético.....	154

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	198
REFERÊNCIAS.....	203

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta as considerações iniciais deste trabalho, colocando o leitor a par do assunto que será tratado ao longo do texto. Apresenta-se ainda os principais objetivos buscados e a justificativa para a realização deste projeto, assim como a estrutura geral do trabalho, com os principais pontos tratados nos capítulos subsequentes.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A água subterrânea pode ser entendida como toda a água que ocorre abaixo da superfície da Terra, preenchendo os poros ou vazios intergranulares das rochas sedimentares, ou as fraturas, falhas e fissuras das rochas compactas (ABAS, 2016). Em tempos atuais, seu uso é praticamente comum em todos os países do mundo, seja para atendimento total ou complementar de demandas de abastecimento doméstico, atividades agrícolas e industriais, dentre outros.

Os mananciais subterrâneos são representados pelos aquíferos, formações geológicas saturadas, com suficiente permeabilidade e porosidade interconectada, que permitem o armazenamento e a transmissão de água, em quantidades significativas e sob gradientes naturais (CLEARY, 2007). Neste sentido, os aquíferos garantem água para nascentes naturais, mantendo os cursos de água superficial estáveis; ou para poços construídos pelo homem, visando suprir determinada fonte de consumo.

A modelagem hidráulica destas formações é uma ferramenta importante para o entendimento do fluxo da água subterrânea entre um ponto e outro, além de permitir a identificação de

locais potenciais para a instalação de poços para exploração dos aquíferos. O estabelecimento de modelos hidráulicos para aquíferos passa pela classificação destes em função de sua porosidade. Neste sentido, é comum a divisão de três tipos básicos: os aquíferos porosos, os aquíferos fraturados e os aquíferos cársticos.

Os aquíferos fraturados, que serão abordados neste trabalho, são 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, sob as 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.

A diferença de propriedades hidráulicas entre os dois meios e a possível ocorrência de escoamentos em regimes turbulentos impedem que a Lei de Darcy, classicamente demonstrada para meios porosos com fluxos laminares, seja usada sem adaptações na modelagem hidráulica deste tipo de formação. Neste sentido, diferentes modelos estão presentes na bibliografia corrente, desde modelos contínuos equivalentes, que tratam o meio fraturado como um meio poroso contínuo, com propriedades médias da matriz rochosa e das fraturas; a modelos mais complexos, que buscam um maior detalhamento da localização e da geometria das fraturas e do fluxo preferencial que por elas ocorre.

Considerando a segunda categoria, é comum o uso do termo redes de fraturas discretas (em inglês, *Discrete Fracture Network Model* - DFN). Este modelo descontínuo busca representar o meio fraturado, baseando-se em dados levantados em campo para determinação da localização e da orientação das fraturas na formação, para o estabelecimento dos caminhos que a água tende a percorrer, em seu trânsito. Valores de abertura de fratura, densidade, ângulos de orientação e mergulho são exemplos de dados obtidos. As respectivas propriedades hidráulicas também devem ser determinadas, para o levantamento de vazões e velocidades do fluido nas descontinuidades.

O levantamento destes dados em campo é uma das principais dificuldades para uso das redes

de fraturas discretas, uma vez que tais dados ficam visíveis apenas em afloramentos das rochas ou por meio de amostras retiradas de tal formação. 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 da água na formação.

Em períodos mais recentes, dentro da modelagem hidráulica das redes de fraturas discretas, foi implementado em alguns estudos a possibilidade de se analisar as descontinuidades como condutos ou canais, a fim de se verificar o trânsito de fluido de uma forma simplificada, reduzindo o esforço computacional das simulações. Exemplos de trabalhos neste sentido são os produzidos por Cacas et al. (1990a), Dershowitz (1996), Ubertosi et al.(2007) e Bodin et al. (2007). Outro aspecto que se tornou possível com essa analogia foi a melhor análise do fenômeno de *channeling*, comum nos meios fraturados, facilmente visível em ensaios de campo com traçadores, mas pouco considerado na modelagem computacional. Tal fenômeno é caracterizado pela ocorrência do escoamento em regiões preferenciais, quando este é avaliado ao longo da superfície da descontinuidade. Tal fato ocorre em virtude da existência de condições mais favoráveis em determinadas regiões, tais como uma maior abertura da fratura ou uma menor rugosidade na superfície da descontinuidade, que facilitam a passagem da água.

Uma das formas de utilizar os condutos na modelagem hidráulica de sistemas fraturados é por meio do estabelecimento de condutos equivalentes unidimensionais. Estes canais são construídos após a geração da rede de fraturas discretas, unindo os centros da fratura ao centro da intersecção com a fratura vizinha, criando assim uma rede unidimensional de condutos. Tais centros são considerados os nós da rede de condutos, sendo utilizados como referência para a solução do sistema de equações hidráulicas. Estas equações realizam o balanço de massa em cada um dos nós, além de avaliarem as vazões que transitam entre estes, levando em conta as propriedades hidráulicas do meio, tais como a transmissividade, a abertura da fratura e o comprimento do conduto criado. Condições de contorno, representadas por cargas hidráulicas fixas, devem ser estabelecidas nas fronteiras do volume do sistema fraturado modelado, permitindo assim a execução da simulação.

1.2 OBJETIVOS

Considerando os aspectos apresentados nas considerações iniciais, este trabalho tem como objetivo geral apresentar o desenvolvimento da ferramenta FratCond, no ambiente MATLAB, elaborada para a modelagem de aquíferos fraturados. Tal ferramenta é capaz de gerar redes de fraturas discretas tridimensionais, a partir de dados estatísticos das principais variáveis descritivas do sistema fraturado em análise, tais como ângulos de orientação e mergulho, comprimento e abertura de fratura. A modelagem hidráulica, também incorporada a referida ferramenta, utiliza o conceito de condutos unidimensionais equivalentes, que são obtidos após a geração das fraturas, e permitindo a obtenção de cargas hidráulicas e vazões nas descontinuidades, de forma simplificada, considerando um estado permanente.

Como objetivos específicos, pode-se listar:

- O estabelecimento de uma boa revisão bibliográfica, que possibilitasse o pleno desenvolvimento da ferramenta proposta;
- A elaboração de um gerador estocástico de fraturas discretas, incorporado à ferramenta, que possibilitasse a geração dos condutos unidimensionais e a respectiva simulação hidráulica;
- A realização de testes iniciais com a ferramenta proposta, a partir de exemplos hipotéticos, a fim de se verificar seu funcionamento e os resultados por ela fornecidos.

1.3 JUSTIFICATIVA

A realização deste trabalho se justifica inicialmente pela baixa quantidade de trabalhos no Brasil que tratem a modelagem hidráulica de aquíferos fraturados. Ao se consultar a literatura, nota-se a maioria ainda se dedica a caracterização dos meios fraturados, não chegando a tratar propriamente dos escoamentos que ocorrem nestas formações.

É importante considerar que o país possui extensas regiões recobertas por rochas magmáticas e metamórficas, tais como a Formação Serra Geral, no Sul e Sudeste do país, e o Embasamento Cristalino, no Nordeste. Estas formações são comumente exploradas como fonte de abastecimento público complementar ou total de água, além de suprir atividades

agrícolas e industriais. Desta forma, contribuir para o melhor entendimento dos aquíferos fraturados e de como podem ser devidamente utilizados, é um dos pontos que incentivaram o trabalho.

A geração estocástica de fraturas discretas tridimensionais e a utilização do conceito de condutos equivalentes na modelagem deste tipo de aquífero ainda é ausente na literatura local. Assim, abordar tal assunto e elaborar uma ferramenta que explora tais conceitos também é um ponto justificativo para este trabalho, permitindo melhores estudos de aquíferos fraturados, em termos comparativos com outras metodologias presentes na literatura.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O texto desta dissertação de mestrado está dividido em 5 capítulos, a saber:

Capítulo 1 – Introdução: apresenta rapidamente o problema a ser tratado ao longo do texto, destacando os aquíferos fraturados, os escoamentos nestes meios e a aceitação das descontinuidades como condutos unidimensionais nas simulações hidráulicas. Em seguida, são apresentados os objetivos gerais e específicos do trabalho, assim como sua justificativa.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: apresenta a fundamentação teórica do trabalho, apresentando os principais aspectos relacionados as águas subterrâneas, especialmente à modelagem de aquíferos fraturados. Destaca-se a sua caracterização, em termos de propriedades geométricas e hidráulicas, e as principais formas de obtenção e de abordagem destas características; além dos principais modelos hidráulicos para simulação de meios fraturados presentes na literatura.

Capítulo 3 – Metodologia: apresenta os principais aspectos metodológicos utilizados para a construção da ferramenta FratCond, destacando-se os pontos relacionados à geração de redes de fraturas discretas de forma estocástica e à simulação hidráulica com o uso de condutos unidimensionais equivalentes.

Capítulo 4 – Resultados e discussões: apresenta a resolução de um exemplo hipotético

simulado no FratCond, de forma a testar e exibir as funcionalidades disponíveis e os resultados passíveis de análise a partir do uso da ferramenta proposta.

Capítulo 5 – Conclusões e recomendações: apresenta um desfecho do trabalho, comentando as conclusões obtidas e as recomendações para trabalhos futuros.

Ao final, também são apresentadas as referências bibliográficas consultadas na elaboração deste trabalho.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

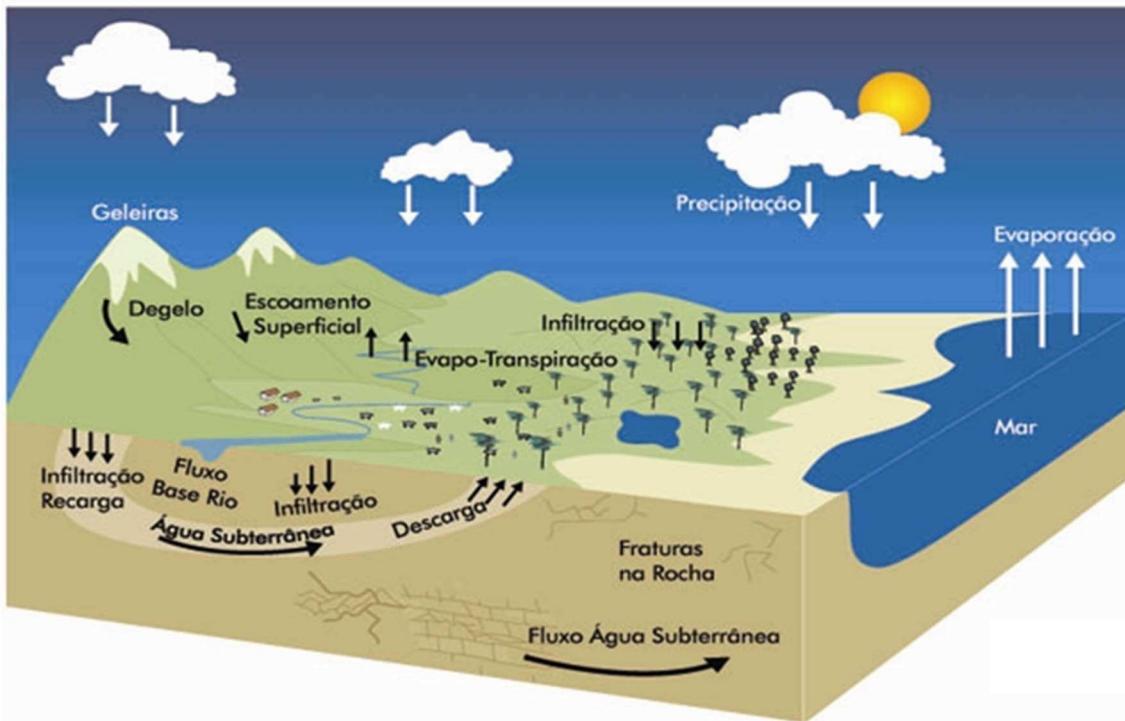
Este capítulo apresenta, em alguns tópicos, uma síntese de pontos importantes referentes a águas subterrâneas e a sua modelagem, especialmente em aquíferos fraturados. Serão apresentados desde conceitos básicos a conteúdos trabalhados em publicações científicas, relacionados ao tema, e que possivelmente sejam utilizados ao longo da metodologia proposta neste trabalho. Desta forma, fornece-se uma base conceitual sólida para a compreensão do tema e do trabalho como um todo.

2.1 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Água subterrânea é o termo utilizado para designar toda a água encontrada abaixo da superfície terrestre (BEAR, 1979). Tal ocorrência é efeito direto do ciclo hidrológico (Figura 1), que corresponde ao fluxo contínuo deste líquido entre a terra, os oceanos e a atmosfera. Após a precipitação, uma parcela da água que atinge o solo se infiltra e percola no interior da superfície, por entre vazios intergranulares de solos e rochas não consolidadas e/ou por fraturas e descontinuidades de formações consolidadas. Esta água desempenha papel importante, ao ser fonte de umidade para o solo e para o desenvolvimento de vegetais, além de alimentar nascentes de rios e lagos, garantindo a manutenção natural dos cursos de água superficiais.

A importância das águas subterrâneas é ligada ao seu volume, quando comparada às águas superficiais. Ao se considerar todo o volume de água doce disponível no planeta, estima-se que 69,7% esteja na forma de gelo nos polos e nas regiões montanhosas, enquanto cerca de

Figura 1 – Ciclo Hidrológico



Fonte: MMA (2016)

30% esteja disponível no subsolo e apenas 0,3% esteja na superfície, formando lagos e rios (SHIKLOMANOV, 2000). Desta forma, nota-se que as reservas de água subterrânea são da ordem de cem vezes maiores que as de água superficial.

No Brasil, estima-se que as reservas subterrâneas sejam, em volume, da ordem de 110.000 km³ (110 trilhões de m³). Destas reservas, cerca de 2500 km³ contribuem anualmente para a descarga dos rios. Ao se considerar que a descarga anual dos rios perenes no território brasileiro é da ordem de 6200 km³, observa-se o quanto as águas subterrâneas são importantes para a riqueza de água doce que o país possui. (REBOUÇAS, 1998)

Em termos de abastecimento público, não é diferente. As águas subterrâneas já são responsáveis pelo suprimento pleno de várias cidades do país, ao se considerar sua boa qualidade para consumo humano e o baixo custo para a sua exploração, em locais onde observa-se disponibilidade. Além disso, a contaminação das águas superficiais por esgotos domésticos e efluentes industriais, lançados nos corpos d'água sem tratamento adequado, é outro incentivador ao uso de águas subterrâneas.

Ribeirão Preto (SP), Natal (RN), Mossoró (RN), Maceió (AL), Fortaleza (CE), Belém (PA), Manaus (AM), Região Metropolitana de Recife (PE) e Barreiras (BA) são exemplos de núcleos urbanos que utilizam as águas subterrâneas como manancial principal. Estados como São Paulo e Piauí tem suas cerca de 80% de suas cidades abastecidas por poços. No Maranhão, essa taxa chega a 70% (MMA, 2006). Segundo a ANA (2013), há uma estimativa de que no Brasil, existam cerca de 476 mil poços em utilização. Em termos de vazões, no Brasil, encontram-se desde poços com produção inferior a 1 m³/h a produções superiores a 1000 m³/h. (REBOUÇAS et al., 2002)

Ao se analisar o uso de águas subterrâneas no planeta, observa-se que praticamente todos os países, desenvolvidos ou não, utilizam água subterrânea para suprir suas necessidades, tanto de abastecimento quanto para outros fins. Um exemplo é a Austrália, em que se estima um uso anual de 5 bilhões de m³ de água subterrânea, explorada principalmente nas regiões mais áridas do país (HARRINGTON et al., 2014). Nos Estados Unidos, estima-se uma vazão explotada de cerca de 4200 m³/s (79300 Mgal/d) de água subterrânea, em todo o país, sendo que 68% destina-se a irrigação de culturas. Califórnia, Arkansas, Texas, Nebraska e Idaho utilizam sozinhos 47% desta produção (MAUPIN et al., 2014). Na União Europeia, 75% da população é dependente de águas originárias do subsolo. Países como França, Alemanha e Espanha utilizaram respectivamente 5,6; 5,8 e 6,9 bilhões de m³ de água subterrânea, no ano de 2013. (EUROSTAT, 2017)

Todos os dados acima citados comprovam a importância da água subterrânea para a vida humana. Porém, é importante salientar que as águas subterrâneas só podem ser extraídas para uso de formações geológicas que apresentem características hidrodinâmicas que possibilitem o atendimento pontual de médias e grandes vazões, retiradas por meio dos poços. Estas formações são conhecidas como aquíferos e seus principais aspectos são apresentados com detalhe no item a seguir.

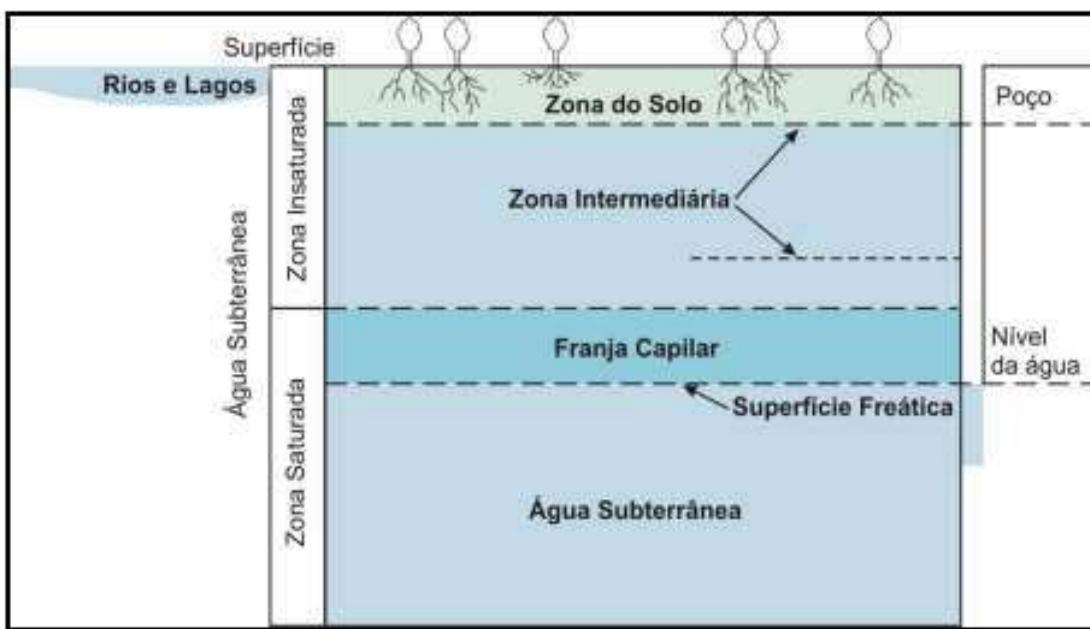
2.1.1 Aquíferos e suas classificações

Conforme já comentado nas considerações iniciais deste trabalho, segundo Cleary (2007), aquíferos podem ser entendidos como uma formação geológica saturada, com suficiente permeabilidade e porosidade interconectada para armazenar e transmitir quantidades

significativas de água, sob gradientes hidráulicos naturais.

O entendimento desta definição passa pela compreensão primeiramente da expressão “formação geológica saturada”. A medida em que se avança em profundidade, no subsolo, é comum a separação da água subterrânea em duas zonas, em função da saturação das formações que a recebe, ou seja, do volume ocupado pela água em relação ao volume de vazios da rocha ou solo em análise (Figura 2).

Figura 2 – Distribuição da água em profundidade no subsolo



Fonte: Zavoudakis (2007)

A zona vadosa (ou aerada ou não saturada ou insaturada) é aquela em que os poros da formação geológica estão preenchidos por ar e água. Nesta região, localizada logo abaixo ao limite da superfície do terreno, a água tende a ficar aderida aos grãos do solo, por fenômenos de atração molecular e ação de tensões superficiais.

Esta zona pode ainda ser subdividida em outras partes, a saber: (FEITOSA e MANOEL FILHO, 2000)

- Zona de umidade do solo, situada entre os extremos radiculares da vegetação e a superfície do terreno, com espessura proporcional à abundância de cobertura vegetal;
- Zona intermediária, compreendida entre o limite de ascensão capilar da água e o

limite de alcance das raízes das plantas.

- Franja capilar, que se estende da superfície do lençol freático até o limite de ascensão capilar da água. Nesta região, pode ocorrer saturação dos poros, por meio da ação de tensões superficiais na interface água-ar, que promovem a subida da água, acima do nível freático. Tal subida é diretamente ligada ao tamanho dos poros da formação. Quanto menores os poros, maior é a franja capilar. Alguns autores consideram a franja capilar como pertencente a zona saturada.

Conforme se avança em profundidade, a quantidade de água nos poros tende a aumentar, em virtude da ação da gravidade sob a água infiltrada, até o encontro da chamada zona saturada (ou freática), local onde todos os vazios da formação estão preenchidos apenas por água. Esta região forma então os aquíferos, sendo passível de uso humano ou de recarga natural de rios e lagos. Há estudiosos da hidrogeologia que consideram como água subterrânea o líquido presente apenas na zona saturada, desconsiderando a umidade existente na zona vadosa. É importante salientar que a mobilidade da água na zona saturada não é influenciada por processos superficiais, sendo controlada principalmente pelas características do meio geológico.

A superfície limite entre a zona saturada e a zona vadosa corresponde ao chamado nível freático (ou superfície freática ou nível de água subterrâneo), definida como um lugar geométrico dos pontos em que a água subterrânea se encontra submetida a pressão atmosférica (FEITOSA e MANOEL FILHO, 2000). Tal superfície pode ser facilmente definida, a partir do levantamento da posição da água em uma rede de poços. Em geral, há uma tendência da superfície freática acompanhar as irregularidades da superfície do terreno. Porém, quando o nível d'água intercepta a superfície do terreno, ocorrem afloramentos, gerando nascentes de córregos e rios. (TEIXEIRA et al., 2000)

Outro ponto importante para o entendimento da definição de aquíferos tem relação com a capacidade de armazenamento e transmissão de água, que diferencia esta formação dos aquitardes, aquicludes e aquífugos. Areias e cascalhos inconsolidados, rochas ígneas e metamórficas fraturadas e rochas carbonáticas são exemplos de formações que, se saturadas, formam aquíferos.

Camadas de argila, silte e folhelho são exemplos de unidades geológicas que possuem grande capacidade de armazenamento de água. Porém, em virtude da sua baixa permeabilidade, não conseguem suprir poços de bombeamento. Assim, não são considerados aquíferos, sendo chamados de aquitardes. Os aquitardes podem recobrir aquíferos por extensas áreas, funcionando como fonte de recarga para estas formações. (CLEARY, 2007)

Já o termo aquiclude era utilizado a anos atrás pelos hidrogeólogos, para indicar as formações que transmitem fluxos extremamente baixos de água, enquanto o termo aquífugo indicava todas as unidades impermeáveis (CLEARY, 2007). Porém, com a constatação de que não existe material impermeável, pois ocorre transmissão de água em um grau ou outro, mesmo em milhares de anos, o termo aquífugo entrou em desuso. Em tempos atuais, aquiclude indica formações de menor permeabilidade, sendo o oposto dos aquíferos e aquitardes. Rochas cristalinas não fraturadas são o exemplo clássico de um aquiclude.

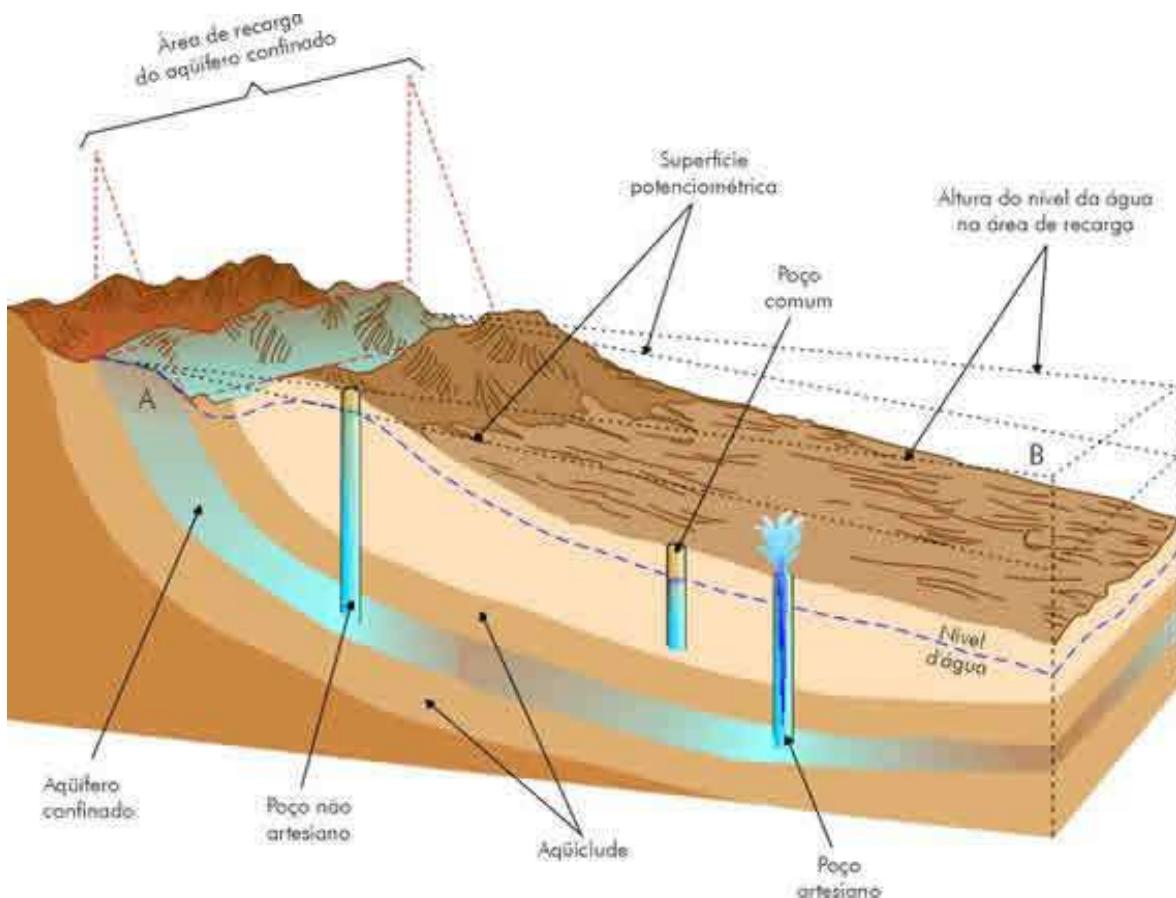
O último ponto da definição de aquífero que deve ser destacado é a expressão “quantidades significativas”. Esta locução está intimamente ligada ao uso final do poço que explota a água do aquífero. Quando este é destinado ao abastecimento público, vazões da ordem de 1000 a 5000 m³/dia são consideráveis, enquanto que para o abastecimento de uma propriedade residencial, vazões inferiores a 20 m³/dia já são válidas. (CLEARY, 2007)

Compreendida a definição de aquífero e as suas entrelinhas, pode-se então partir a análise de suas classificações. Duas classificações de aquíferos são comuns na hidrogeologia. A primeira leva em conta a condição hidráulica do aquífero, ou seja, de acordo com a pressão da água na sua superfície limítrofe. (FEITOSA e MANOEL FILHO, 2000)

Neste sentido, dentro desta classificação, surgem dois tipos de aquífero: os confinados (ou artesianos) e os livres (ou freáticos ou não confinados), ilustrados na Figura 3. Os aquíferos confinados são formações geológicas permeáveis, contornadas abaixo e acima por materiais relativamente impermeáveis (que podem ser aquitardes ou aquicludes), e que estão sobre pressões maiores que a pressão atmosférica (CLEARY, 2007). Desta forma, um poço que penetra nesta formação tem nível de água superior ao topo do aquífero, em virtude desta abundância de pressão. Caso haja energia suficiente para que a água atinja a superfície sem

a necessidade de bombas, o poço é dito artesiano (ou jorrante). Caso contrário, tem-se um poço não-artesiano.

Figura 3 – Aquíferos em função da condição hidráulica



Fonte: Teixeira et al. (2000)

Conforme também indicado na Figura 3, a recarga dos aquíferos confinados pode ocorrer em áreas de afloramento, onde a referida formação fica em contato direto com a superfície do terreno (ponto A da referida figura), podendo receber contribuição direta das precipitações. Outra forma de recarga destes aquíferos é a presença de aquitardes, recobrindo as formações mais permeáveis. Mesmo sem capacidade para fornecer água aos poços, os aquitardes podem fornecer lentamente a água que armazenam aos aquíferos, por meio do fenômeno de drenança vertical.

Já os aquíferos livres são formações geológicas permeáveis, cujo limite de saturação coincide com a superfície freática. Desta forma, a água ali armazenada está submetida à pressão atmosférica. Assim, um poço escavado nesta formação não possui energia para

atingir a superfície, ficando dependente de bombeamento para ser explorado. Os poços comuns, também conhecidos em algumas regiões como “cacimbas” ou “cisternas” são exemplos de escavações utilizadas para exploração de aquíferos freáticos. Em termos de recarga, os aquíferos freáticos recebem contribuição direta da água infiltrada na superfície do terreno.

Um tipo especial de formação freática comumente citado na bibliografia é o chamado aquífero suspenso. Este tipo de aquífero livre é formado sobre uma camada impermeável ou semipermeável de extensão limitada e situada entre a superfície freática regional e o nível do terreno. Esses aquíferos, por vezes, existem em caráter temporário, na medida em que drenam para o nível freático subjacente. (FEITOSA e MANOEL FILHO, 2000)

Esta primeira forma de agrupamento de aquíferos, em termos de condição hidráulica, mostra-se interessante para determinação correta do comportamento da formação, após a escavação de poços. A retirada de água das formações confinadas ou não apresenta mecanismos diferentes. Enquanto os vazios nos aquíferos livres tendem a se esvaziar progressivamente, após o início da retirada da água, com a respectiva queda no nível freático; os aquíferos confinados tendem a permanecer completamente saturados, sem drenagem dos espaços porosos. O suprimento de água vem da compressão do aquífero e da recarga recebida de formações adjacentes. Esta diferença de comportamento é expressa, em termos matemáticos, por meio do coeficiente de armazenamento do aquífero, que leva em conta esta diferença de mecanismo.

A necessidade e a escolha de bombas hidráulicas a serem instaladas, considerando que as pressões existentes no aquífero podem facilitar a extração da água, reduzindo a potência de bombas, ou mesmo dispensando sua aplicação; é outra análise permitida com a definição correta do tipo de aquífero com relação a condição hidráulica.

A segunda classificação utilizada na hidrogeologia para aquíferos leva em conta o tipo de porosidade da formação. A porosidade é uma propriedade física definida pela relação entre o volume de vazios e o volume total de um certo material (TEIXEIRA et al., 2000). Como a porosidade é uma característica intrínseca ao material geológico, é comum que este atributo

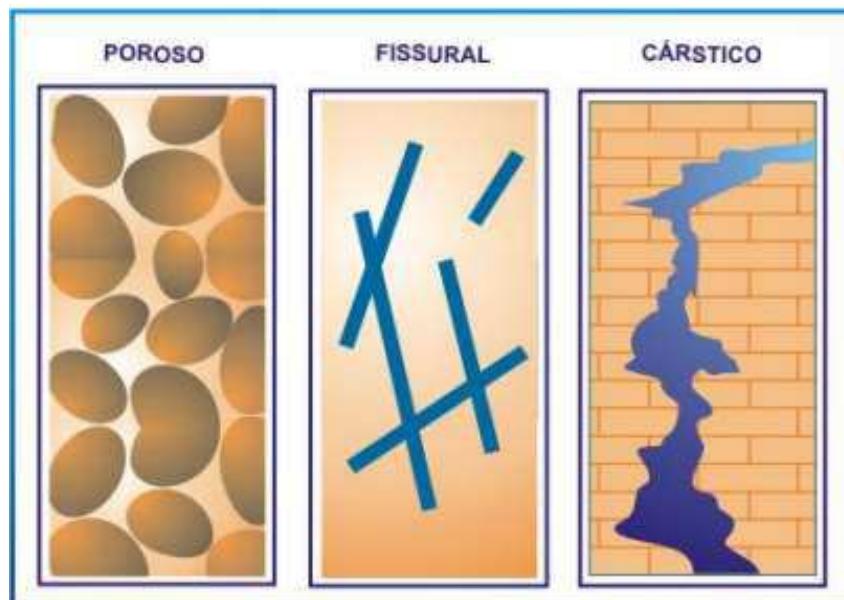
seja diretamente ligado ao tipo de solo ou rocha analisado. Neste sentido, alguns autores consideram esta classificação como dependente da litologia da formação avaliada.

Em rochas e solos, a porosidade é controlada por diversos fatores, dentre os quais a forma e a distribuição dos grãos constituintes, a compactação e a cimentação destes grãos, o nível de fraturamento e dissolução química do material, dentre outros. Nas formações geológicas, são identificados dois tipos básicos de porosidade, diferenciados pelo momento de aparição dos vazios, a saber:

- Porosidade primária: característica inerente de rochas e solos, este tipo de porosidade é desenvolvido ao longo do surgimento da formação geológica. (SINGHAL e GUPTA, 2010)
- Porosidade secundária: é desenvolvida após o surgimento da formação, a partir de processos geológicos, tais como fraturamento, intemperismo e atividades de dissolução química. (SINGHAL e GUPTA, 2010)

A partir destes dois tipos de porosidades, os aquíferos são agrupados em três tipos, nesta segunda classificação (Figura 4): os aquíferos porosos, os aquíferos fraturados e os aquíferos cársticos.

Figura 4 – Aquíferos em função da porosidade da formação



Fonte: Boscardin Borghetti et al. (2004)

Os aquíferos porosos (ou intergranulares) são aqueles em que a água está contida entre os grãos que compõem a rocha, em vazios de origem primária. Aquíferos deste tipo são representados por sedimentos inconsolidados, tais como areias e cascalhos; e pelas rochas sedimentares, que apresentem de boa a regular permeabilidade, tais como arenitos e conglomerados.

De forma geral, tais formações apresentam o maior potencial hídrico, armazenando grandes volumes de água e ocorrendo em grandes áreas, o que incentiva a busca por água subterrânea nestes depósitos. Este tipo de aquífero apresenta a particularidade de ter porosidade quase sempre homogênea, ao longo de sua extensão (isotropia). Tal fato permite que a água flua em qualquer direção, a partir da existência de um gradiente hidráulico. Neste sentido, a modelagem hidráulica e a consequente determinação de grandezas de interesse, tais como vazões e velocidades, é simplificada.

Os aquíferos fraturados (ou fissurais) são aqueles em que o fluxo da água está associado à presença de descontinuidades na rocha, de origem secundária, associada a dobras, falhas e fraturas (MMA, 2006). Tais aquíferos ocorrem em rochas ígneas e metamórficas, que ao passar por deformações, de origem tectônica ou não tectônica (resfriamento e contração), são fraturadas. Estas fraturas podem estar inicialmente seladas, em virtude das elevadas cargas das camadas superiores à formação. O alívio destas cargas, pelo soerguimento regional de camadas ou pela erosão de rochas sobrejacentes, permite a expansão das aberturas e o consequente fluxo de água. Tal fluxo só se estabelece caso as fraturas que compõem o sistema estejam interconectadas. (TEIXEIRA et al., 2000)

Poços perfurados nessas rochas, em geral, são menos produtivos que os escavados em aquíferos porosos, sendo que a possibilidade de se ter um poço produtivo dependerá, tão somente, desse poço interceptar fraturas capazes de conduzir a água. Nesses aquíferos, a água só pode fluir onde houverem fraturas, que, quase sempre, tendem a ter orientações preferenciais. São ditos, portanto, aquíferos anisotrópicos, em virtude da variação direcional das propriedades hidráulicas. (ABAS, 2016)

Já os aquíferos cársticos são aqueles associados ao trânsito da água em descontinuidades de rocha, também de origem secundária, mas ligadas a dissolução de rochas carbonáticas, tais

como mármores, calcários e dolomitos. Tal dissolução pode gerar condutos milimétricos a métricos, cujas dimensões podem variar bastante ao longo do tempo, como consequência do fenômeno químico envolvido (ABAS, 2016). Em rede, estes condutos formam um sistema aquífero produtor de grandes volumes, apesar de apresentar heterogeneidade e descontinuidade, possivelmente ocasionando a proximidade entre poços produtores de grande volume com poços totalmente secos. (FEITOSA et al., 2000)

Os aquíferos cársticos são usualmente associados ao termo “áquiferos de dupla porosidade”, utilizado comumente na definição no tipo de modelagem utilizada para a formação. Este tipo de modelagem leva em conta, além do trânsito de água existente na porosidade de origem secundária (condutos oriundos da dissolução química), o trânsito, mais lento, do fluido pelos interstícios da matriz rochosa do aquífero, porosidade esta de origem primária. (SHOEMAKER et al., 2008)

Neste sentido, surgem contribuições lineares ao longo das fraturas, que aumentam a quantidade de água transeunte nestes caminhos preferenciais. Tais contribuições serão mais elevadas quanto maior a porosidade primária da formação aquífera. Em carstes, como a matriz rochosa é formada por rochas carbonáticas, que apresentam porosidade primária não desprezível, as contribuições oriundas da matriz não devem ser desconsideradas.

A dupla porosidade poderia ser analogamente ligada ao aquíferos fraturados. Porém, como em formações deste tipo, como no basalto, por exemplo, a porosidade primária é baixa, as contribuições de água da matriz às fraturas também são pequenas, podendo ser ignoradas. Tal fato será evidenciado novamente em itens posteriores desta revisão, onde se abordará rapidamente o equacionamento envolvido na modelagem de dupla porosidade.

Esta segunda forma de classificação de aquíferos, baseada na porosidade da formação, se mostra importante para a modelagem hidráulica de águas subterrâneas. A homogeneidade ou não dos vazios das formações é diferencial na escolha do modelo matemático que represente o escoamento subterrâneo. A alteração de regime de escoamento, de laminar para turbulento, também é outra condição dependente do tipo litológico avaliado e que influencia diretamente na estimativa de grandezas de interesse em aquíferos.

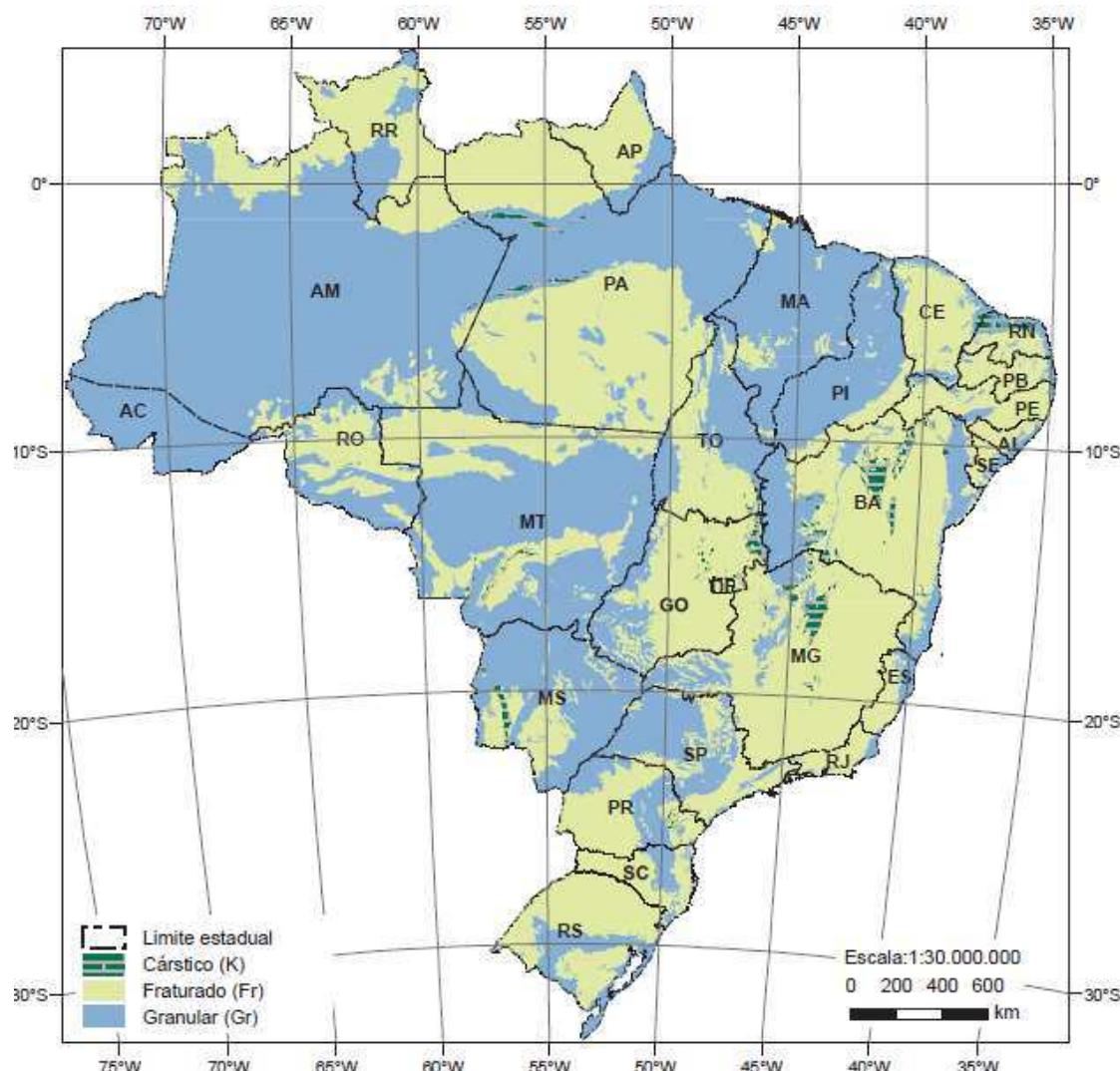
Outra avaliação possível é o estabelecimento do quanto as formações geológicas são favoráveis a ocorrência e a exploração, em volumes significativos, de águas subterrâneas. Neste sentido, é comum a elaboração de mapas nacionais ou regionais, por órgãos responsáveis por estudos e avaliações de recursos hídricos, que indiquem os limites das formações de mesma característica litológica. Desta forma, obtém-se informações sintetizadas das condições hídricas subterrâneas predominantes no país/região, dando subsídios iniciais para estudos locais detalhados. O levantamento destas regiões no Brasil ainda é recente, quando comparado a outros países, e é consequência do trabalho de especialistas em hidráulica e geologia, os chamados hidrogeologistas. A nível de Brasil, este trabalho pode ser visto de forma detalhada e considerando o seu respectivo avanço histórico, nas publicações de Pessoa et al. (1980), Feitosa et al. (2000), Mente (2009), CPRM (2004) apud Mente (2009), ANA (2013) e CPRM (2016).

De forma resumida, a Figura 5 apresenta a divisão do território brasileiro em função do tipo de litologia, ou seja, se as formações aquíferas são do tipo granular, fraturada ou cárstica. Ao se observar tal figura, nota-se um predomínio das formações fraturadas recobrindo o território nacional. Estima-se que 54% do território brasileiro são recobertos por domínios fraturados, o que equivale a 4.600.000 km². É formado por diversos tipos de rochas, que incluem gnaisses, xistos, filitos, granitos, metacalcários e quartzitos, todos de idade superior a 540 milhões de anos e que dão origem aos terrenos denominados genericamente de cristalinos. Compreendem as Províncias Hidrogeológicas Setentrional, Central, Oriental e Meridional. O domínio fraturado apresenta, em geral, sistemas aquíferos com potencial hídrico inferior àqueles pertencentes aos domínios hidrolíticos. Estima-se que, em termos de volume, este tipo de formação tenha reservas da ordem de 10.000 km³. (MMA, 2006)

Neste tipo de formação, destaca-se entre os aquíferos mais produtivos o Sistema Aquífero Serra Geral, que possui uma área aflorante de cerca de 412.000 km², no Sul e Sudeste do Brasil. Sua espessura média é de 150 m, sendo que em determinadas regiões, como no centro da Bacia Sedimentar do Paraná, este valor pode chegar a 2000 m. Os poços explorados têm profundidades médias de 123 m e vazão média de 23 m³/h (MMA, 2006). A SANEPAR (Companhia de Saneamento do Paraná) utiliza 421 poços em 252 localidades de 154 municípios para abastecimento público com águas captadas do aquífero Serra Geral no Estado do Paraná. O regime de bombeamento é, em média, de 16 horas/dia, e a vazão

explotada é da ordem de 65.000.000 m³/ano (ROSA FILHO e HINDI, 2006 apud MANASSÉS, 2009).

Figura 5 – Domínios hidrolíticos do território brasileiro



Fonte: CPRM (2016)

Outro sistema fraturado importante é o Embasamento Cristalino no Nordeste, que possui uma área de cerca de 600.000 km², dos quais aproximadamente 400.000 km² estão situados no semiárido nordestino. Porém, a produtividade dos poços nesta formação é baixa, em virtude das baixas precipitações, da distribuição irregular das chuvas, do delgado manto intempérico, quando não ausente, e cobertura vegetal esparsa, que favorece o escoamento superficial em detrimento da infiltração. Os poços muito comumente apresentam vazões entre 1 e 3 m³/h, e a água possui elevada salinidade, frequentemente acima do limite de

potabilidade. Apesar disso, em muitas pequenas comunidades do interior nordestino esses poços constituem a fonte de abastecimento disponível. (MMA, 2006)

Na Província Hidrogeológica Setentrional, destaca-se o Sistema Aquífero Boa Vista, que ocorre na porção nordeste do Estado de Roraima, aflorando por cerca de 15.000 km², com espessura máxima estimada em 120 m. Ele é um aquífero livre, com vazão média de 33 m³/h para uma profundidade média de poços de 36 m. É importante fonte de abastecimento para a cidade de Boa Vista, contribuindo com 50% da demanda. (MMA, 2006)

2.2 SISTEMAS FRATURADOS

A partir dos dados apresentados ao fim do tópico anterior, é possível visualizar o quanto os aquíferos fraturados estão presentes no território brasileiro, cobrindo mais da metade de sua extensão territorial e apresentando um potencial elevado de uso, principalmente em regiões que possuem regimes regulares de chuva, tais como o Sul e o Sudeste do país. No Nordeste, tais formações surgem, em algumas localidades, como única fonte de abastecimento, apesar da baixa produtividade e da elevada salinidade das águas encontradas.

Porém, para que este aproveitamento seja feito, é necessário entender corretamente o comportamento e a composição dos sistemas fraturados e quais as variáveis inerentes às fraturas são passíveis de influência no escoamento de água neste tipo de formação. Neste sentido, este novo tópico tem como objetivo caracterizar os sistemas fraturados e apresentar os principais parâmetros influentes no escoamento em meio rochoso.

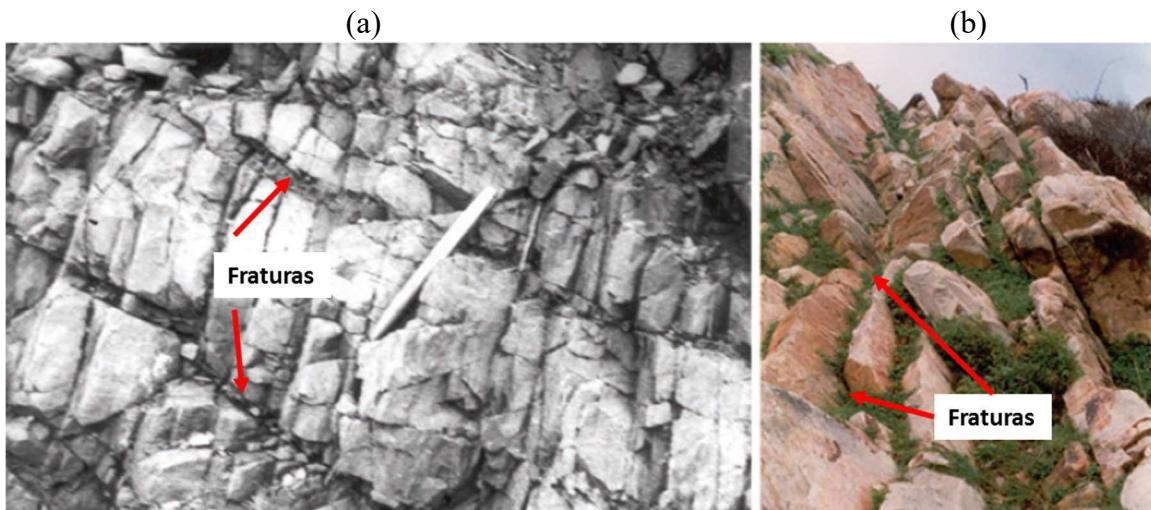
Em termos gerais, os sistemas fraturados podem ser entendidos como meio rochosos com planos sob os quais tensões elevadas causaram perda parcial de coesão, dentro do maciço. Estes planos são genericamente denominados pelos hidrogeólogos como fraturas. É importante salientar que, em termos geológicos, o termo fratura ou junta é utilizado para definir um tipo de descontinuidade gerado sem a movimentação visível dos blocos de rocha vizinhos. Sua origem está ligada a tensões elevadas, geradas a partir de fenômenos tectônicos, de tensões residuais oriundas de fenômenos anteriores ao fraturamento, contrações térmicas, movimentos de terra superficiais, redução de pressões litostáticas consequente de fenômenos erosivos, intemperismo, dentre outros.

A ausência de movimento entre os blocos de rocha diferencia as fraturas, em termos geológicos, de outros tipos de descontinuidade vistos nas formações, tais como as falhas, onde verifica-se movimentação aparente dos blocos vizinhos; aos planos de estratificação, que correspondem as interfaces de camadas de diferentes materiais geológicos; e aos planos de foliação ou clivagem, comuns em rochas metamórficas e resultantes do alinhamento paralelo de minerais. Porém, neste trabalho, considerando caráter hidrogeológico da definição, as fraturas englobarão, de forma genérica, todos os tipos de descontinuidade pelas quais pode ocorrer e pode promover influência no trânsito de fluidos.

Os sistemas fraturados comumente são divididos em três regiões distintas: a matriz rochosa, que corresponde a parte que permanece maciça, após a perda de coesão; as fraturas, que correspondem aos planos, preenchidos por água ou ar, a partir dos quais houve a perda de coesão causada pelas tensões elevadas. A terceira região, que pode estar presente ou não, corresponde aos materiais finos que são carreados e depositados por entre as fraturas, afetando a permeabilidade e o trânsito de fluido nesta região (SINGHAL e GUPTA, 2010).

A Figura 6 ilustra dois sistemas rochosos fraturados, em materiais de diferente gênese. A formação da esquerda corresponde a uma rocha metamórfica, enquanto a da direita tem origem sedimentar. Pode se observar nas imagens que as fraturas apresentam elevada continuidade lateral e aparecem como limites da matriz rochosa, após a perda de coesão.

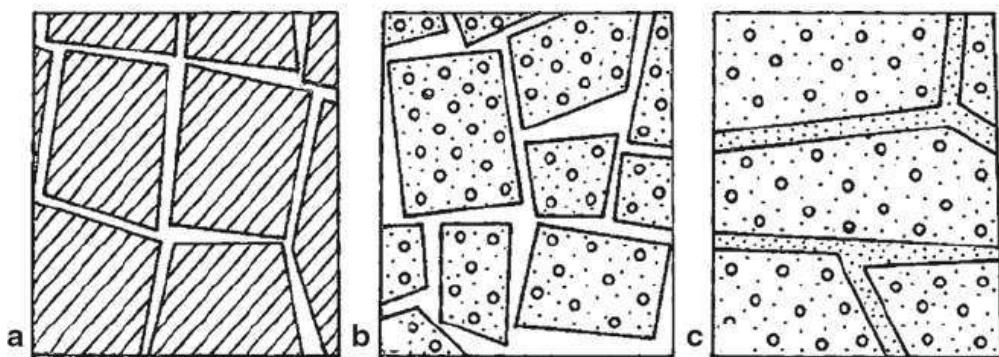
Figura 6 – Sistemas fraturados, em rocha metamórfica (a) e rocha sedimentar (b)



Fonte: Singhal e Gupta (2010)

Ainda no que tange a divisão das regiões dos sistemas fraturados, Streltsova (1976) propõe que as formações sejam classificadas em outros três tipos, considerando a permeabilidade da matriz porosa e a presença de materiais de preenchimento nas fraturas (Figura 7). É sabido que as fraturas assumem o papel de caminho preferencial aos escoamentos, em virtude da sua elevada contribuição a porosidade das formações. Em alguns tipos de rochas, tais como basaltos, por exemplo, as fraturas representam toda a permeabilidade da formação, uma vez que a matriz rochosa apresenta baixíssima porosidade, dificultando ou impedindo o trânsito da água nesta região, pouco contribuindo para o escoamento. A este tipo de formação dá-se um nome de sistema puramente fraturado, os quais serão modelados neste trabalho.

Figura 7 – Representação esquemática de um sistema puramente fraturado (a), de um sistema fraturado com dupla porosidade (b) e de um sistema heterogêneo (c)



Fonte: Streltsova (1976)

Em outros tipos de rocha, tais como as sedimentares ilustradas na Figura 6, que também apresentam fraturamento, as contribuições da matriz rochosa não podem ser desconsideradas, uma vez que a permeabilidade desta região tem maior magnitude, contribuindo de forma significativa para o escoamento. Estes sistemas são conhecidos como dupla porosidade, diferenciadas em termos de modelagem, em porosidade da matriz e porosidade das fraturas. Assim, ocorre fluxo entre a matriz rochosa e as fraturas, mesmo que a maior contribuição, em termos de vazão, parta da segunda região.

A terceira classificação considerada por Streltsova (1976) leva em conta o preenchimento total das fraturas por materiais finos, tais como argilas e siltes inconsolidados, com menor permeabilidade do que a matriz rochosa. Desta forma, observa-se o desenvolvimento de um sistema heterogêneo, composto por dois materiais em regiões bem definidas, com ambas

contribuindo para o escoamento, mas com comportamento distinto aos dois tipos anteriores, uma vez que a permeabilidade das fraturas é reduzida.

2.2.1 Caracterização das fraturas

Considerando o fato que a quantidade de fraturas influencia diretamente na porosidade e na permeabilidade dos sistemas fraturados, tem-se interesse em caracterizar esta sua geometria, conhecendo algumas de suas variáveis. A sua distribuição, sua orientação e localização, além das suas aberturas das fraturas são exemplos de algumas destas características, influentes nos escoamentos em meios fraturados. Neste sentido, este tópico visa apresentar cada uma destas propriedades, que caracterizam os meios fraturados. Alguns autores, tais como Manoel Filho (2006), identificam estas características como propriedades geométricas das fraturas.

2.2.1.1 Abertura e rugosidade

As primeiras características importantes das fraturas a serem definidas são a abertura e a rugosidade. A abertura é caracterizada pela distância perpendicular que separa as paredes de rocha adjacentes a uma descontinuidade, que pode estar preenchida por ar ou água. São comumente medidos em afloramentos, com o auxílio de paquímetros ou medidores de espessura; ou em laboratório, por meio de corantes fluorescentes ou uso de resinas; ou são determinadas indiretamente, por meio das propriedades hidráulicas da formação (SINGHAL e GUPTA, 2010).

A Tabela 1 resume valores típicos de aberturas em meios rochosos e a respectiva classificação desta propriedade, comumente utilizada em Mecânica das Rochas. Em geral, com o avanço da profundidade, as fraturas tendem ficar mais estreitas, em consequência do avanço das pressões litostáticas provocadas pelas camadas superiores.

É comum a diferenciação de dois conceitos de abertura de fraturas: a abertura mecânica ou real, definida como a distância média entre as paredes da fratura ao longo de seu comprimento; enquanto a abertura hidráulica é determinada a partir da relação entre esta variável e a transmissividade da formação e que é realmente ocupada pelo fluido, em seu

trânsito. Tal relação será apresentada no capítulo relativo a modelagem de escoamentos subterrâneos. Experimentos demonstram que a abertura real da fratura coincide com a abertura hidráulica até valores pequenos da abertura real, a partir do qual a correlação hidráulica perde rapidamente a validade (PAITAN, 2013).

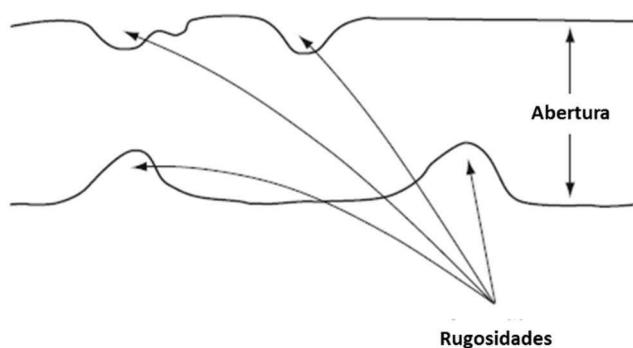
Tabela 1 – Abertura e classificação, em função do seu tamanho

Abertura (mm)	Classificação
< 0,1	Muito estreita
0,1 – 0,25	Estreita
0,25 – 0,50	Parcialmente aberta
0,50 – 2,50	Aberta
2,50 – 10,0	Moderadamente larga
> 10,0	Larga

Fonte: Adaptado de Singhal e Gupta (2010)

As paredes das fraturas não são totalmente lisas, apresentando irregularidades ao longo de seu comprimento (Figura 8). Neste sentido, é comum utilizar o termo rugosidade para as fraturas, assim como é feito para os condutos de diferentes materiais, utilizados nos diversos projetos hidráulicos. Analogamente aos tubos, a rugosidade nas fraturas aumenta o atrito do fluido com as paredes, causando maiores perdas de carga no escoamento e influenciando na quantidade de vazão que passa em determinada fratura. Além disso, esta propriedade possui influência direta no regime do escoamento, podendo torná-lo turbulento, em determinadas regiões.

Figura 8 – Abertura e rugosidade das fraturas

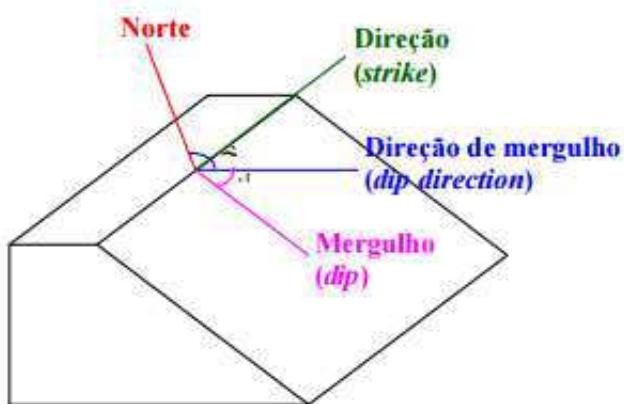


Fonte: Adaptado de Singhal e Gupta (2010)

2.2.1.2 Orientação

Outra variável importante para caracterização da geometria das fraturas é a orientação. Este parâmetro visa indicar a posição ocupada por uma fratura simples, em termos angulares. Comumente, são utilizados dois ângulos para definição desta posição: a direção e o mergulho da fratura, ou como feito na geologia estrutural, pela direção do mergulho e o mergulho. Tais ângulos são ilustrados na Figura 9.

Figura 9 – Ângulos de orientação de fraturas



Fonte: Telles (2006)

A direção (*strike*) é definida pelo ângulo que a interseção do plano da fratura com o plano horizontal faz com a direção Norte. Esse ângulo varia de 0° a 360° e é medido a partir do Norte magnético no sentido horário. O mergulho (*dip*) é o ângulo de inclinação do plano da fratura com o plano horizontal. Esse ângulo varia de 0° a 90°, considerando somente o hemisfério inferior. A direção de mergulho (*dip direction*) é o ângulo formado pela projeção horizontal da linha de mergulho, medida em relação ao Norte. Esse ângulo varia de 0° a 360° e é medido a partir do Norte magnético no sentido horário (TELLES, 2006). É importante notar que os ângulos de direção (*strike*) e de direção de mergulho (*dip direction*) são sempre perpendiculares entre si.

Considerando que a orientação das fraturas seja expressa em função dos ângulos de direção e mergulho, o par de valores é expresso da seguinte forma: 25°/N 330°, indicando que a fratura possui um ângulo de mergulho de 25° na direção 330°, medida a partir do norte magnético, no sentido horário.

No campo, as imprecisões geralmente aparecem nas medições da orientação das fraturas e, portanto, a análise estatística é desejável. Neste sentido, é comum a utilização de métodos gráficos, para representação da tendência direcional das descontinuidades nas formações. O diagrama de roseta é uma das formas de apresentação mais utilizadas, podendo mostrar, ao longo de eixos radiais, valores de quantidades ou de comprimento de fraturas, ao longo de determinada direção. Parte-se sempre do eixo vertical, que corresponde ao norte magnético, e lê-se a ocorrência de fraturas, em grupos de 10 em 10 graus. Assim, o comprimento das barras em cada grupo permite a identificação rápida da predominância direcional no sistema fraturado. Nota-se ainda que as barras são refletidas, em relação ao eixo vertical da roseta, uma vez que os ângulos de direção nos quadrantes opostos são correspondentes.

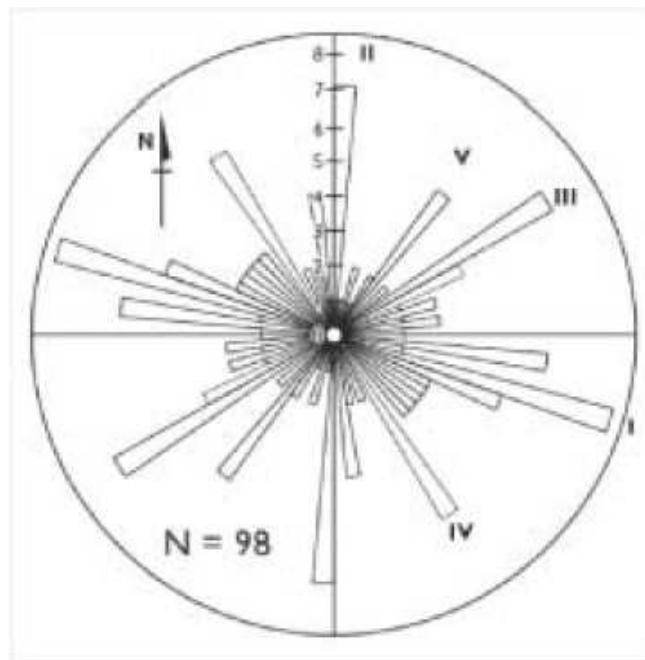
A Figura 10 apresenta um diagrama de roseta, resultante do levantamento da direção de 98 fraturas em uma formação rochosa. Nota-se que as maiores tendências foram identificadas por algarismos romanos e correspondem a grupos com orientações preferenciais, geralmente identificadas pelo termo família de fraturas, também comumente utilizado neste tipo de caracterização. Além da orientação, estes grupos podem ter frequência e espaçamento semelhantes ao longo do volume da formação. Tais conceitos serão apresentados em seguida. Em geral, o número de família de fraturas varia entre 2 e 5 grupos por formação, sem considerar possíveis anomalias locais.

2.2.1.3 Espaçamento e frequência

O espaçamento e a frequência de um sistema de fraturas são variáveis recíprocas. O espaçamento corresponde a distância perpendicular média entre as descontinuidades de uma mesma família. Em geral, esta distância linear é medida a partir de uma linha de amostragem, em afloramentos, paredes de túneis e poços, devendo ser posicionada de forma mais perpendicular possível ao plano das fraturas. Caso contrário, a medida do espaçamento deve ser corrigida, a partir de relações trigonométricas simples (Figura 11).

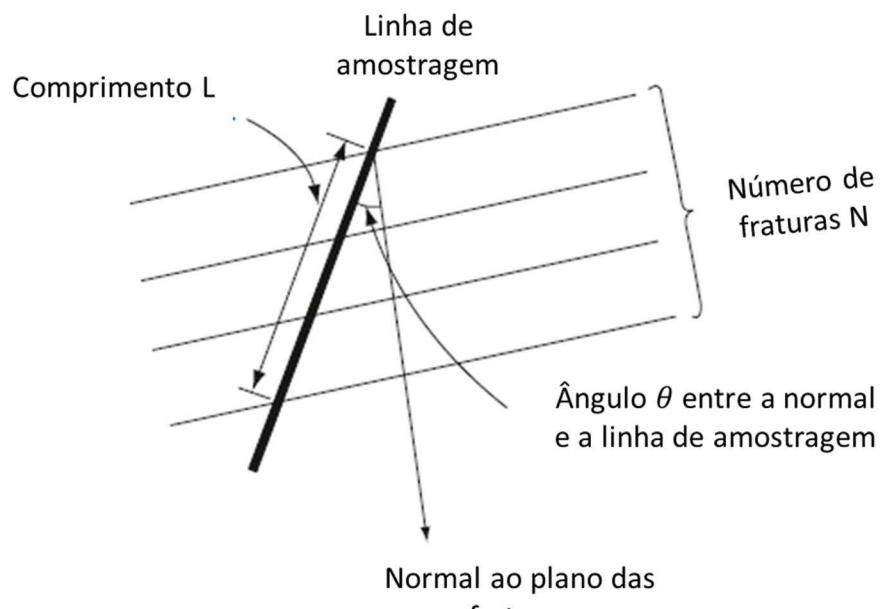
Já a frequência é a medida da quantidade de fraturas presente em um maciço rochoso e representa o grau de fraturamento deste maciço. O tipo de frequência mais utilizado é a

Figura 10 – Diagrama de roseta, indicando a quantidade de fraturas em determinada direção



Fonte: Cook (2003)

Figura 11 – Medição de espaçamento real entre fraturas



$$\text{Espaçamento aparente} = L / N = dm$$

$$\text{Espaçamento real} = dm \cos \theta$$

Fonte: Adaptado de Singhal e Gupta (2010)

linear, que corresponde ao número médio de fraturas de determinada família que interceptam um comprimento unitário de uma linha de amostragem. A frequência linear também é conhecida como densidade de fraturas, sendo geralmente expressa em quantidade de fratura por metro de formação, servindo como parâmetro de comparação entre diferentes formações. A densidade de área e a densidade volumétrica são outras formas de exibição desta variável, correspondendo ao número de fraturas em uma determinada área e volume, respectivamente. Quanto maior a frequência de fraturas, menor é o espaçamento entre elas e maior é o grau de fraturamento do meio rochoso. Como consequência, tem-se maior porosidade e permeabilidade e melhores condições para o trânsito de fluidos.

2.2.1.4 Comprimento

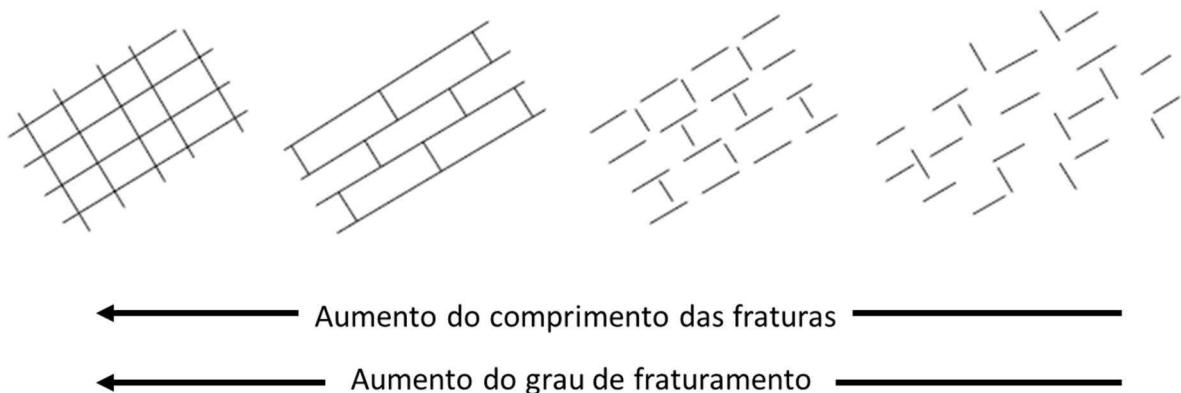
Outra variável que permite estabelecer o grau de fraturamento de uma formação é o comprimento da fratura, também identificado na literatura como persistência. Esta característica é a medida da extensão do desenvolvimento da superfície da descontinuidade e carrega consigo a noção de tamanho da fratura. De difícil mensuração, uma vez que apresenta grande variação em termos de direção e mergulho, a persistência é observada a partir do comprimento do traço da descontinuidade em locais onde a formação está exposta, podendo ser medida ao longo da direção, quando o afloramento ocorre em planta, ou em termos de mergulho, quando o afloramento é vertical. (SINGHAL e GUPTA, 2010)

O comprimento de fratura observado nos afloramentos pode ser considerado apenas um valor aparente desta característica, em virtude de vários erros que podem ser obtidos nas medições de campo. Dentre eles, a impossibilidade de medir o comprimento de fraturas que não estejam totalmente expostas nos afloramentos e escavações; e a maior probabilidade de que, numa área de medição, prevaleça as fraturas longas sob as fraturas pequenas, introduzindo erros nos valores médios estabelecidos para esta característica (SINGHAL e GUPTA, 2010). Na bibliografia corrente, é comum a existência de métodos para melhor estimativa do comprimento das fraturas. Como neste trabalho, não serão levantados nem tratados resultados obtidos diretamente em campo, este métodos não serão aqui abordados.

A maior persistência das fraturas aumenta a tendência de cruzamento entre as descontinuidades, aumentando assim o grau de fraturamento e favorecendo o trânsito de

fluidos no interior da formação. A Figura 12 apresenta esta variação no grau de fraturamento da formação, a partir da variação do comprimento de duas famílias de fraturas, com diferentes orientações.

Figura 12 – Variação do grau de fraturamento em função da persistência das fraturas



Fonte: Adaptado de Singhal e Gupta (2010)

2.2.1.5 Conectividade

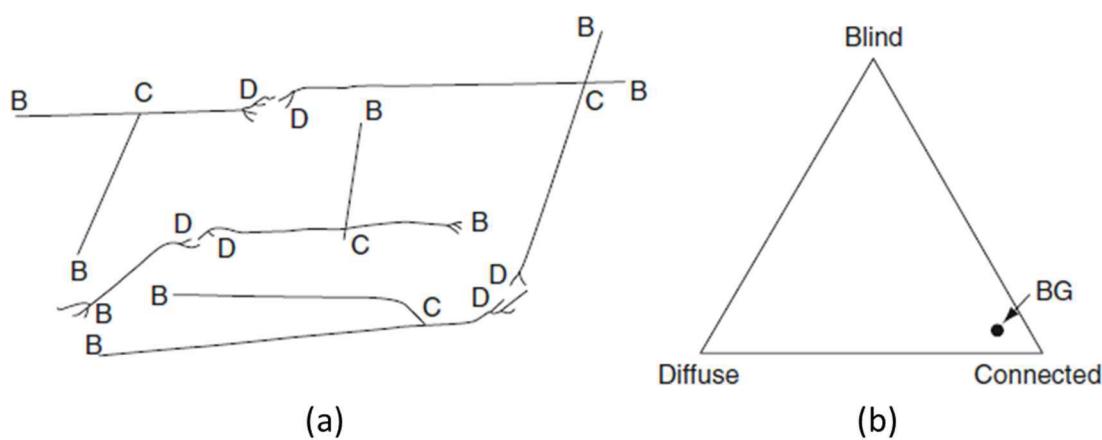
O cruzamento das fraturas também é avaliado por meio de uma outra variável, conhecida como conectividade. Knudby et al. (2006 apud Pitombeira et al. 2009) indicam que em hidrogeologia, o termo conectividade é utilizado em referência à presença física de zonas de alta ou baixa condutividade hidráulica. Em outras palavras, se um sistema fraturado possui um caminho de alta condutividade hidráulica, que facilita o escoamento, este sistema é admitido como possuindo boa conectividade.

Neste sentido, quanto maior o grau de fraturamento de uma formação, melhor é a sua conectividade. O aumento do comprimento das fraturas, da sua densidade e da quantidade de famílias com diferentes orientações são outras variações que refletem diretamente no aumento de cruzamentos entre as fraturas e respectivamente na conectividade da formação. E um sistema com elevada conectividade possui maior facilidade no transporte de fluidos do que um sistema com baixa conexão entre as fraturas, uma vez que uma fratura não conectada não contribui efetivamente ao escoamento de fluidos.

Além desta noção intuitiva, a conectividade de um sistema de fraturas pode ser avaliada a partir da forma de terminação das fraturas. Estas terminações foram classificadas por Laubach (1992 apud Singhal e Gupta., 2010) em cegas (em inglês, *blind*), difusas (em inglês, *diffuse*) e conectadas (em inglês, *connected*). As fraturas do tipo cega são aquelas que apresentam terminações sem interseção com outra fratura. Já as fraturas do tipo difusa apresentam terminações ramificadas em mais de uma fratura, do tipo cega e com menor comprimento; enquanto as fraturas conectadas são aquelas que se cruzam com outras fraturas, apresentando realmente uma conexão entre diferentes famílias por exemplo. A Figura 13(a) ilustra cada um destes tipos de fratura.

A partir do levantamento dos tipos de terminações das fraturas, é comum a apresentação dos dados na forma de um diagrama ternário, conforme ilustrado na Figura 13(b). Este gráfico assume a forma triangular, tendo cada uma das classificações em uma das arestas. Um ponto no centro do gráfico permite representar a porcentagem de cada tipo de fratura, estimando assim rapidamente qual a tendência visualizada no sistema de fraturas avaliado. Se esta disposição inclina-se ao tipo conectado, tem-se então um sistema com maior facilidade ao trânsito de fluidos.

Figura 13 – Avaliação da conectividade de um sistema de fraturas, a partir dos tipos de terminação



B: blind / cegas

D: diffuse / difusas

C: connected / conectada

Fonte: Adaptado de Singhal e Gupta. (2010)

2.2.2 Métodos de investigação

O levantamento de cada uma das características geométricas das fraturas, apresentadas no item anterior, é feita em campo e depende da utilização de métodos de investigação, que permitam a obtenção de dados de interesse e a consequente modelagem do meio fraturado. Os parágrafos a seguir discorrem sucintamente sobre tais métodos, destacando os mais utilizados por profissionais da hidrogeologia.

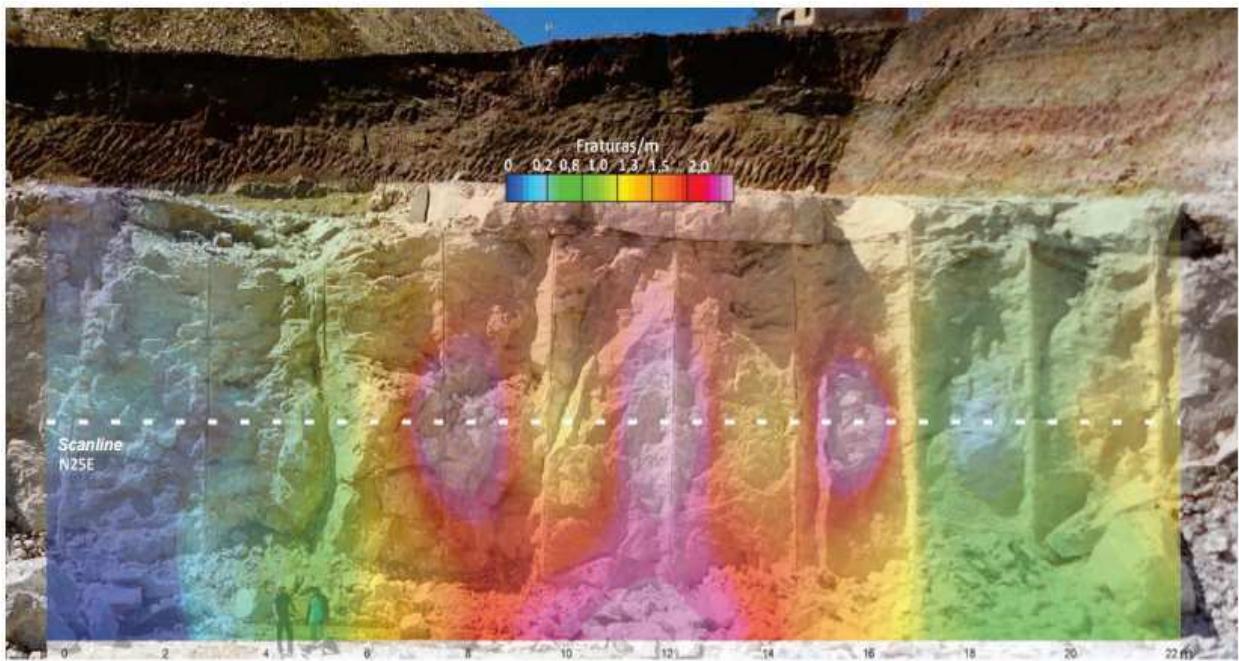
Os métodos de investigação de campo, para meios rochosos, são comumente divididos em dois tipos principais. O primeiro tipo engloba as técnicas bidimensionais, ou 2D, que são baseados em observações realizadas em afloramentos das rochas, em superfície ou em subsuperfície, possibilitando a aquisição de dados para o local de observação e suas redondezas. São exemplos de métodos 2D a técnica da *scanline*, a observação de poços e furos escavados, a análise de amostras retiradas da formação, além de técnicas de sensoriamento remoto, por meio da utilização de fotos aéreas e de satélite.

A técnica de *scanline* ou técnica da linha de amostragem consiste na observação direta das características de uma rocha ao longo de uma linha, estabelecida sob a superfície exposta da formação, que pode ser um afloramento superficial, uma parede de um poço ou o teto de um túnel ou mina, devidamente selecionada e que seja representativa de toda a formação. Tal método é um dos mais aplicados na caracterização dos maciços rochosos, por sua simplicidade e baixo custo.

A partir desta linha de referência, diversas observações são feitas sobre as fraturas que a cruzam. A locação da interseção entre a *scanline* e o traço da fratura, a orientação da fratura e o ângulo feito com a *scanline*, o tipo de terminação da fratura, dando alguma ideia sobre sua conectividade; a sua abertura, a partir da comparação com a régua comparadora; sua densidade e frequência; são exemplos de características que podem ser levantadas com esta técnica.

A Figura 14 apresenta um afloramento de rochas calcárias onde foi aplicada a técnica de *scanline*. Foi inserido sobre a foto da formação um histograma, com zonas interpoladas, que indica a frequência das descontinuidades, em termos de número de fraturas por metro linear.

Figura 14 – Resultados de frequência de fraturas, obtidos a partir da aplicação da técnica de *scanline*



Fonte: Miranda et al. (2012)

A abertura das fraturas é outra variável de interesse detectada pela técnica, conforme ilustrado pela Figura 15. O uso conjunto de uma régua comparadora com uma lupa é comum para a indicação correta desta variável, dada para cada uma das descontinuidades que cruzam a linha de amostragem.

Outra técnica bidimensional, as técnicas de sensoriamento remoto já fazem parte do cotidiano das ciências da terra. Em termos de caracterização de meios rochosos, comumente demarca-se uma superfície de um afloramento, que será avaliada por meio de imagens aéreas ou espaciais, de onde se obtém informações detalhadas das características das fraturas. Em geral, os resultados obtidos são semelhantes àqueles vistos na técnica de *scanlines*, sendo que o sensoriamento remoto é mais convenientemente aplicado em afloramentos superficiais.

A presença de vegetação ou de regiões afetadas pelo intemperismo pode dificultar a acessibilidade e a visibilidade destes afloramentos. Em determinadas regiões, é comum a remoção de camadas superficiais e de vegetação para facilitar a visualização das fraturas,

Figura 15 – Uso da régua comparadora para o levantamento de abertura de fratura, na técnica de *scanline*



Fonte: Miranda et al. (2012)

mesmo de meios fraturados localizados a alguns metros de profundidade, antes encobertos (SINGHAL e GUPTA, 2010).

A observação de furos, poços, trincheiras e paredes de túneis também é uma forma de caracterizar o meio fraturado em determinada região, sendo o único meio visual de descrever a formação em termos de profundidade. Esta análise pode realizar um mapeamento das fraturas, de forma local, ou pode ser acoplada a técnica da *scanline*, tendo a linha de amostragem como referência. Tais furos podem ser executados na vertical ou de forma inclinada, buscando assim interceptar um maior número de fraturas e caracterizar melhor a formação. Como, em geral, escavações em rochas são custosas, tanto em termos financeiros quanto de equipamentos adequados, deve-se buscar utilizar este método em conjunto com os anteriores, maximizando as informações obtidas.

As amostras indeformadas de material retiradas nas escavações de furos e poços também são de interesse para a caracterização dos sistemas fraturados. Quando levadas ao laboratório, podem fornecer principalmente a orientação, abertura e a frequência das fraturas, assim

como permitir a análise da rugosidade das descontinuidades e da presença de materiais de preenchimento nas descontinuidades.

É importante salientar que, como já informado com relação ao comprimento das fraturas, os dados extraídos de métodos bidimensionais para a caracterização geométrica dos sistemas fraturados podem apresentar erros, em direção às fraturas orientadas perpendicularmente a linha de amostragem ou ao eixo de escavação do furo / poço utilizado. Neste sentido, é necessária a aplicação de correções, propostas por outros teóricos (TERZAGHI, 1965 apud SINGHAL e GUPTA, 2010). Neste trabalho, será considerado, no momento de utilização de dados de caracterização, que estes já passaram pelo tratamento adequado e não apresentam estes erros.

O outro grande grupo de métodos de investigação dos meios rochosos inclui os métodos tridimensionais, ou 3D, que viabilizam a obtenção de dados de toda uma massa contida em um volume de rocha, por meio de métodos diretos ou indiretos. São exemplos de técnicas tridimensionais os testes de poços, os testes hidroquímicos e os métodos geofísicos, dentre os quais se incluem técnicas sísmicas, elétricas, gravitacionais, magnéticas, dentre outras.

Os testes hidráulicos de poços compreendem diferentes formas de bombeamento de aquíferos, fraturados ou não, para a determinação de parâmetros hidráulicos, tais como a condutividade hidráulica e a transmissividade da formação aquífera. Para os aquíferos fraturados, dados da interconectividade das fraturas e da abertura média destas descontinuidades podem ser obtidos de forma indireta, a partir dos dados obtidos em campo.

Em termos de testes hidráulicos, são mais conhecidos três tipos, comumente aplicados em aquíferos fraturados:

- Ensaio de bombeamento (*pumping test*): a partir da retirada de uma vazão constante de um poço, mede-se o rebaixamento do nível freático em poços de observação localizados nas proximidades do local de bombeamento. O rebaixamento avança até uma situação de equilíbrio entre a vazão retirada e as condições de fornecimento do aquífero. A partir de relações matemáticas, especialmente das soluções analíticas das funções de poço, variáveis em função do tipo de aquífero, são obtidos os parâmetros hidráulicos de interesse. Em aquíferos granulares, o rebaixamento tende a ser

uniforme nas direções radiais ao poço, assumindo formas próximas a de um cone. Em aquíferos fraturados, em virtude da anisotropia da formação, o rebaixamento assume formas não uniforme, tendo maiores depleções nas direções das fraturas, onde ocorre o fluxo preferencial ao poço (SINGHAL e GUPTA, 2010).

- *Slug test*: conhecido no Brasil como teste do *slug*, este ensaio tem como objetivo monitorar a posição do nível de água ao longo do tempo, em termos de recuperação ou rebaixamento, cuja variação é causada a partir da introdução ou remoção súbita de um sólido cilíndrico de volume conhecido dentro do poço. Dos dados de monitoramento da variação do nível de água e com o auxílio de soluções matemáticas propostas, tais como os métodos de Hvorslev e Bouwer-Rice, obtém-se os parâmetros hidráulicos buscados (OLIVA et al., 2005).
- *Packer test*: também conhecido como teste de injeção, este método utiliza de bexigas infláveis (packers) para isolar determinado trecho, no interior do poço, e somente neste trecho, monitorar as variações no nível de água, seja por injeção seja por retirada de água do poço, obtendo-se assim os parâmetros hidráulicos de determinado horizonte vertical. Em termos de aquíferos fraturados, tal teste pode limitar áreas onde o poço realmente intersecta fraturas, que contribuem para a chegada da água ao local de extração, permitindo a obtenção efetiva de parâmetros hidráulicos da região da descontinuidade (SINGHAL e GUPTA, 2010).

A escolha dentre os testes hidráulicos depende do tipo de estudo realizado e qual a escala de investigação definida. Para problemas de pequena escala, tais como investigações geotécnicas, infiltrações em minas e túneis e problemas de transporte de contaminantes, testes de *slug* e *packer test* são mais utilizados. Já para planejamento e gerenciamento de águas subterrâneas, em níveis regionais, os ensaios de bombeamento são preferencialmente usados (SINGHAL e GUPTA, 2010)

Já os testes hidroquímicos se utilizam de traçadores, substâncias inertes que são misturadas a água subterrânea e que não alteram suas propriedades, para a determinação da direção do escoamento subterrâneo e respectivos valores de vazão, propriedades de transporte de solutos e contaminantes, além de limites de aquíferos. Para aquíferos fraturados, podem servir como indicador da conectividade das fraturas e da continuidade do escoamento, entre um poço onde o traçador foi inserido até a outros poços, utilizados para fins de observação.

Pode-se medir ainda qual o tempo de residência deste traçador, estimando-se assim a velocidade do escoamento subterrâneo (SINGHAL e GUPTA, 2010).

Estes testes têm como principal vantagem não perturbarem o sistema fraturado natural, não alterando assim o comportamento do escoamento e dando valores realísticos para as características do aquífero. Entretanto, como desvantagem, os testes hidroquímicos requerem um grande número de poços de observação para o monitoramento do avanço da pluma de traçador, uma vez que não se conhece inicialmente a direção do escoamento. Além disso, amostras de água devem ser coletadas em diferentes profundidades, em cada poço de observação, a fim de se verificar a variação de concentração do traçador ao longo da profundidade. Neste sentido, tais testes podem apresentar custos elevados e demandarem tempo para a sua completa execução (NRC, 1996).

Os métodos geofísicos também são exemplos de técnicas de investigação tridimensionais utilizadas na hidrogeologia. Sem que haja a perfuração da formação investigada, estes métodos se baseiam na medição de grandezas físicas e na identificação de seus contrastes, que permitem, de forma indireta, o reconhecimento do material que compõe as formações, assim como a detecção da presença de água.

Dentre as grandezas físicas medidas pelos métodos geofísicos, destaca-se as mais utilizadas:

- Velocidade de ondas sísmicas: medida nas chamadas técnicas sísmicas, que utilizam de ondas artificialmente geradas, por meio de explosões ou pelo choque de martelos pesados, na superfície ou em alguma profundidade da formação. A chegada das ondas, refletidas nas interfaces das camadas, em outros pontos da superfície, é registrada por meio do uso de detectores de vibração (também conhecidos como geofones). A relação distância e tempo de chegada das ondas até os referidos pontos permite a determinação das suas velocidades, permitindo a identificação indireta do tipo das formações. A variação do tipo de ondas geradas pode estimar a presença de fluidos, como a água ou o petróleo, por exemplo. A presença de fraturas e descontinuidades atenua a passagem de ondas sísmicas e aumenta o tempo de retorno destas ondas a superfície.
- Resistividade: utilizada no conjunto de técnicas geofísicas elétricas, esta propriedade é definida como a resistência a passagem de uma corrente elétrica oferecida por um

volume unitário de rocha, sendo uma característica intrínseca deste tipo de material. Tal propriedade é medida a partir da injeção de uma corrente elétrica na formação e em seguida pela detecção da diferença de potencial elétrico resultante na superfície, entre dois pontos, sob os quais são instalados eletrodos. Assim, de forma indireta, obtém-se a distribuição de tipo de material presente na formação geológica. A variação do posicionamento e da quantidade de eletrodos na prospecção permite a caracterização geológica regional. O grau de saturação, o tipo de fluido presente nos vazios e a porosidade do volume rochoso são fatores que influenciam diretamente na resistividade e que são identificadas rapidamente neste tipo de prospecção.

- Campos gravitacionais e magnéticos: utilizados nos chamados métodos gravitacionais e magnéticos, que observam as variações destes campos e os relacionam com a diferença de densidade entre os materiais que compõem determinada formação, tanto em profundidade quanto lateralmente. Tais variações são pequenas, mas são passíveis de medição, por meio do uso de gravímetros e magnetômetros. Como resultado principal deste tipo de prospecção, obtém-se o perfil estratigráfico da formação. Em termos de meios fraturados, observa-se variações bruscas dos referidos campos, quando há a ocorrência de descontinuidades. Valores elevados de campos gravitacionais indicam materiais mais densos, enquanto valores baixos indicam materiais inconsolidados ou de elevada porosidade.

Considerando os aspectos apresentados sobre os principais métodos geofísicos, nota-se que, com seu uso, é possível o delineamento das características hidrogeológicas regionais e o estabelecimento correto de locais para a instalação de poços de exploração de água subterrânea e de outros recursos do subsolo. Desta forma, reduz-se o dispêndio de montantes na perfuração de furos que porventura não sejam produtivos.

Apesar de seu potencial na identificação de formações geológicas e na detecção de água subterrânea, é importante que os métodos geofísicos não sejam utilizados de forma isolada, como única fonte de informação, devendo então se integrar a outras técnicas de investigação e ao conhecimento prévio da geologia da região. Assim, a interpretação dos dados obtidos a partir das grandezas físicas medidas é facilitada, podendo ser extrapolada posteriormente a outros locais.

2.2.3 Abordagem estatística e estocástica

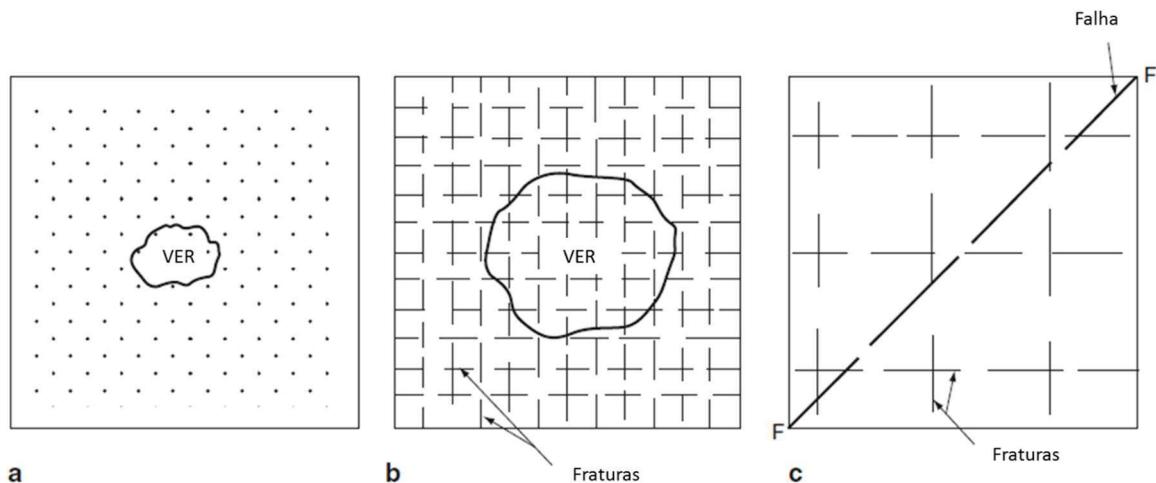
Como visto nos tópicos anteriores (2.2.1 e 2.2.2), diversas são as variáveis que possuem influência na modelagem hidráulica de sistemas fraturados e vários são os métodos aplicados para levantamento destas características em campo. Porém, o conhecimento das características individuais de cada fratura, mesmo com todos os métodos de investigação disponíveis, ainda é limitado. Além disso, nem sempre é realizado o levantamento de dados de todas as descontinuidades presentes na formação, sendo necessária a realização de inferência, para determinação das propriedades válidas a toda formação. Tais fatos inserem aspectos aleatórios na análise de meios fraturados. Neste sentido, é comum a aplicação de abordagens estatísticas e estocásticas na modelagem deste tipo de formação.

Para esta aplicação, é importante antes a introdução do conceito de Volume Elementar Representativo (VER). Segundo Singhal e Gupta (2010), VER é a menor amostra de volume do meio granular ou rochoso, que é capaz de representar toda a formação, em termos de propriedades, tanto ligadas a caracterização das fraturas quanto em termos de propriedades hidráulicas. Ou seja, este conceito nos dá uma noção básica de dimensão volumétrica necessária para a amostragem da formação, permitindo que as propriedades definidas dentro desta dimensão sejam válidas para regiões vizinhas, que não necessariamente passaram por uma caracterização.

Para exemplificar tal conceito, a Figura 16 ilustra três diferentes formações, indicando que o Volume Elementar Representativo pode assumir diferentes dimensões. A Figura 16(a) ilustra um meio granular sem descontinuidades, em que a homogeneidade do material permite que apenas a avaliação das propriedades de um pequeno volume permita a obtenção de dados válidos para toda massa de rocha.

Já a Figura 16(b) apresenta um meio fraturado, com duas famílias de fraturas, perpendiculares entre si. Nota-se que o VER deve assumir uma dimensão maior do que a do primeiro caso, a fim de se englobar uma quantidade de fraturas suficientes para a adequada caracterização da formação.

Figura 16 – Volume Elementar Representativo (VER), em três diferentes formações



Fonte: Adaptado de Singhal e Gupta (2010)

A Figura 16(c) também apresenta um meio fraturado, com duas famílias de fraturas, com maiores comprimentos e menor frequência, interceptadas por uma falha, de dimensões regionais. Observa-se que neste caso não se verifica a delimitação de um VER, pois apenas a região ilustrada na imagem não é suficiente para caracterizar a formação. Desta forma, tal conceito pode se tornar inviável para levantamentos de campo, no caso da presença de falhas regionais ou diques (formações vulcânicas intrusivas de forma tabular, que funcionam como descontinuidades), sem estas regiões tratadas como limites para os modelos.

O crescimento do comprimento das fraturas e o aumento do espaçamento entre as descontinuidades são razões para o crescimento deste volume. Em determinados locais, o VER pode não ser definido, em virtude da grande anisotropia e variabilidade espacial das características do sistema fraturado (SINGHAL e GUPTA, 2010). Do mesmo modo, em formações onde as fraturas não se apresentam uniformemente espaçadas e idênticas, o conceito de VER pode não ser tão claramente definido (COOK, 2003).

A definição do volume elementar representativo permite então a realização dos trabalhos de campo para a caracterização do sistema fraturado em estudo, ou seja, o levantamento de valores de abertura de fratura, comprimentos, orientações, espaçamentos e frequências das descontinuidades. Como estes valores não tendem a ser constantes, apresentando pequenas variações entre cada fratura analisada, deve-se então, como consequência, realizar um tratamento estatístico dos dados obtidos pela investigação.

Este tratamento visa a determinação de parâmetros estatísticos mais comuns e que são referentes à amostra avaliada. Dentre estes, tem-se o número de fraturas observadas, assim como a média, a variância e o desvio padrão das suas diferentes características. Além disso, é comum a representação de histogramas, com a distribuição das frequências de ocorrência das referidas variáveis.

Esta representação permite a definição da função de densidade de probabilidade (FDP), que permite estimar qual a probabilidade de ocorrência de determinado valor para variável referida, em função da sua distribuição estatística, verificada pelos dados de campo. Desta forma, é possível a reprodução de geometrias de sistemas fraturados reais, assim como a extensão destas distribuições a formações com características semelhantes.

Vários trabalhos já publicados obtiveram resultados para a caracterização estatística de meios fraturados, assim como as respectivas funções de densidade de probabilidade, para cada uma das características mais importantes das fraturas. Foi observada uma semelhança nas FDPs encontradas por diversos autores, quando estes verificavam uma mesma característica do sistema, mesmo em diferentes localidades geográficas. Neste sentido, 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 Baecher et al. (1978), Long (1985a), Long e Billaux (1987), 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 Bianchi e Snow (1968), Snow (1970), Bourke et al. (1985), Long e Billaux (1987), Moreno et al. (1988), Tsang et al. (1988) e Keller et al., (1999).
- Orientação das fraturas: foram verificadas na literatura dois tipos de distribuições representativas a esta variável: a distribuição normal, conforme visto em Samaniego (1984), Witherspoon e Long (1985), Long (1985a), Wei et al. (1995) apud Indraratna et al. (2001); e a distribuição de Fisher, indicada por Anderson e Dverstorp (1987), Dverstorp e Anderson (1989), Cacas et al. (1990a) e Niemi et al. (2000).

- Espaçamento: é bem descrita por uma distribuição do tipo exponencial, conforme apresentado por Priest e Hudson (1976), Hudson e Priest (1979), Kulatilake, Wathugala e Stephansson (1996) e Lim, Ahn e Chambré. (2001). Com esta distribuição, é possível ainda obter a frequência de ocorrência das fraturas, uma vez que estas duas variáveis são inversas entre si. Porém, em geral, o espaçamento e a frequência são preteridos, em termos de probabilidade, no momento da modelagem de sistemas fraturados para simulações hidráulicas. Costuma-se adotar um valor fixo de frequência de fraturas para o modelo, ou seja, a quantidade de fraturas em uma determinada área ou volume. É dada maior preferência ao uso da localização das fraturas, conforme definido a seguir.
- Localização: se refere a posição do centro das fraturas, em termos de coordenadas espaciais (x, y, z) (GEIER et al., 1992 apud LIM, 2002). A partir deste ponto, traçase o comprimento da fratura, sendo metade em um sentido e metade no sentido oposto, seguindo os ângulos de orientação e mergulho. Em termos de função de densidade de probabilidade, é comum tanto o uso de um processo de Poisson, conforme identificado nos trabalhos de Baecher et al. (1978), Dverstorp e Anderson (1989), Cacas et al. (1990a); quanto o uso da função random, presente na maioria das linguagens de programação, em conjunto com um intervalo numérico bem definido, conforme visto em Kulatilake et al. (1993) e Pitombeira (1994).

Outra abordagem bastante comum na análise de meios fraturados é a utilização de técnicas estocásticas, 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 FDP 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.

O método de Monte Carlo também pode ser utilizado nesta abordagem estocástica. A partir de um elevado número de simulações numéricas aleatórias, com variação em dados de

entrada, busca-se a determinação da rede que mais se aproxima das descontinuidades reais, por meio de uma análise de incerteza e sensibilidade de cada uma das variáveis influentes.

Considerando estes dois tipos de abordagem estocástica, nota-se nos trabalhos lidos a prevalência da primeira metodologia, em virtude do menor tempo computacional gasto nesta modelagem, comparada a segunda forma, que demanda um número elevado de simulações. Apesar do ganho em precisão dado pelo último método, em termos de geração da rede de fraturas discretas, nota-se que para as simulações hidráulicas, o uso adequado das FDPs já garante bons resultados a um modelo. Neste sentido, tal abordagem, considerando as FDPs mais comuns para cada uma das variáveis importantes, será a utilizada na ferramenta proposta neste trabalho.

Mais detalhes sobre as abordagens estocásticas podem ser encontrados nos trabalhos de Cacas et al. (1990a) e Cacas et al. (1990b), que utilizam o primeiro método estocásticos para a modelagem do sistema fraturado da Fanay-Augères, considerando dados estatísticos levantados previamente em campo; assim como em Jing (2003), Dershowitz, Pointe e Doe (2004) e Chilès (2005), onde são vistas revisões sobre ambas as formas de abordagem estocástica.

2.2.4 Geração de fraturas para modelagem

Como visto nos tópicos anteriores, as fraturas e as redes de fraturas reais são extremamente complexas, em virtude das dificuldades de levantamento completo dos dados de caracterização em campo. Neste sentido, utiliza-se as abordagens estatísticas e estocásticas para a geração de redes de fraturas, para modelagem dos escoamentos nestas descontinuidades.

No mercado, já existem diferentes pacotes computacionais que são utilizados para a criação artificial de redes de fraturas tridimensionais para simulações. Dentre estes, pode-se destacar o FracMan (FRACMAN, 2017), o Napsac (Hartley et al., 2002), o FracaFlow (BEICIP, 2017) e o FRACNTWK (Kulatilake, 1998). Todas estas aplicações surgiram como resultado de pesquisas voltadas a exploração de reservatórios de petróleo, onde nota-se um elevado investimento na investigação e análise de meios fraturados, em virtude da grande

importância econômica deste fluido natural. Como utilização secundária, tais pacotes também englobaram módulos de geração de redes de fraturas para a análise de problemas de engenharia civil, tais como a análise da estabilidade de maciços rochosos e a verificação do comportamento de aquíferos fraturados, antes e após a instalação de poços de exploração.

Telles (2006) também elaborou uma ferramenta computacional para geração de redes discretas de fraturas tridimensionais. Nomeada de FracGen3D, a ferramenta incorpora a análise de fluxo e transporte em meios porosos e fraturados, de forma combinada. As fraturas também são geradas de forma estocástica, enquanto as equações dos escoamentos são resolvidas utilizando o Método dos Elementos Finitos. Assim como as ferramentas anteriores, o FracGen3D também foi desenvolvido no âmbito de pesquisas da indústria do petróleo.

O uso de programas prontos apresenta como principal desvantagem o elevado custo de suas licenças, que muitas vezes inviabilizam sua utilização em determinadas aplicações. A indisponibilidade dos códigos fonte utilizados na construção de tais pacotes computacionais também pode ser desvantajosa, não permitindo a completa análise da metodologia utilizada pelo software e qual a sua influência nos resultados obtidos. Outro ponto é a possibilidade daquele programa computacional não englobar em seu escopo a resolução de um determinado problema, demandando a sua adaptação para tal fim, seja por meio da simplificação de um modelo, seja pela procura de um programa adicional, seja pelo desenvolvimento de módulos específicos. Todas estas situações podem demandar maior custo financeiro e temporal. Porém, o desenvolvimento de uma ferramenta própria permite a realização de modificações, em momentos convenientes, assim como a inserção de módulos adicionais, de acordo com a necessidade. Tais fatos incentivam a criação de ferramentas próprias para a modelagem de diferentes problemas de engenharia.

No que tange a geração de fraturas para a modelagem, além das características das descontinuidades levantadas em campo e das respectivas distribuições estatísticas mais comuns para cada uma destas variáveis, dois outros fatores são importantes e complementares para a definição completa dos modelos gerados: o número de dimensões consideradas para o modelo, sendo mais comuns a construção de modelos bidimensionais e tridimensionais; e a forma geométrica assumida pelas fraturas, especificamente nos modelos

tridimensionais, uma vez que esta característica também é de difícil mensuração em campo, ficando a critério do modelador a escolha da forma adequada ao seu modelo. Tais fatores serão explanados nos parágrafos que seguem.

Os modelos bidimensionais são comumente representados por segmentos de reta contínuos, condizentes com os comprimentos de fraturas vistos em afloramentos e paredes de túneis e poços, indicando a ausência de dados tridimensionais levantados. Podem ser utilizados para a criação de modelos verticais ou horizontais, conforme a origem dos dados utilizados para a geração da rede de fraturas.

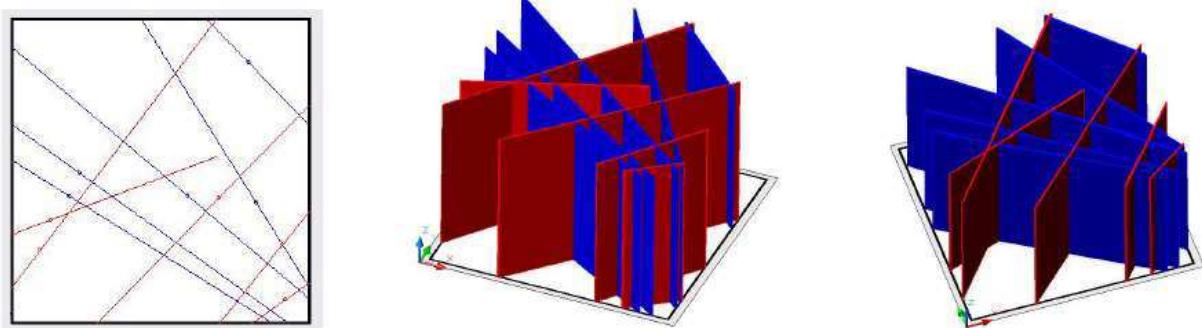
Dos dados que caracterizam as descontinuidades, a posição do centro, o comprimento e o ângulo de orientação são elementos utilizados para a geração dos modelos bidimensionais. Em modelos simplificados, o comprimento pode ser adotado como infinito, no interior do Volume Elementar Representativo considerado no estudo. A terceira dimensão das fraturas, indicativa do ângulo de mergulho e da forma geométrica assumida pela fratura, não é incorporada aos modelos 2D. De forma análoga ao comprimento, tal dimensão pode ser considerada como infinita, dentro VER analisado. Outra característica importante para estes modelos é a densidade de fraturas, em termos de números de fraturas por comprimento ou por área, permitindo a definição de quantas fraturas serão inseridas no referido volume.

A Figura 17 apresenta um modelo 2D horizontal, gerado estocasticamente, em planta e em perspectiva. O comprimento das fraturas neste modelo não foi considerado infinito, respeitando uma função de densidade de probabilidade. A terceira dimensão, representada pela altura das fraturas, ocupou todo o VER considerado. As diferentes colorações das descontinuidades são usadas para diferenciar duas famílias, com diferentes dados de entrada para a geração.

Tais modelos são úteis para a avaliação preliminar do comportamento do escoamento em meios fraturados, por meio de ferramentas simples e computacionalmente leves, não demandando elevada quantidade de dados, tanto para cálculos quanto para a representação gráfica dos sistemas fraturados. Uma das variáveis mais observadas em modelos 2D gerados estocasticamente é a conectividade, como resultado da variação dos outros dados de entrada, tais como comprimento e orientação das fraturas. Trabalhos como os de Pitombeira et al.

(2009), Renard e Allard (2013) e Alghalandis (2014) são exemplos de publicações onde este aspecto foi observado.

Figura 17 – Exemplo de modelo bidimensional, gerado estocasticamente, em planta e em perspectivas



Fonte: Pitombeira et al. (2009)

O avanço das ferramentas computacionais, com melhora nas capacidades gráfica e de processamento, incentiva o uso de redes de fraturas tridimensionais, buscando cada vez mais a representação real das descontinuidades nos protótipos numéricos. A inserção da terceira dimensão nos modelos teve como principal desafio a determinação da forma geométrica assumida pelas fraturas, uma vez que esta forma é dificilmente identificável nos meios fraturados naturais. Aproximações podem ser obtidas por meio de testes com traçadores e marcadores, que possam ser identificados posteriormente por ferramentas de prospecção. Porém, como tais marcadores não se dispersam de forma uniforme sobre a superfície das fraturas, a forma geométrica exata das fraturas não pode ser definida.

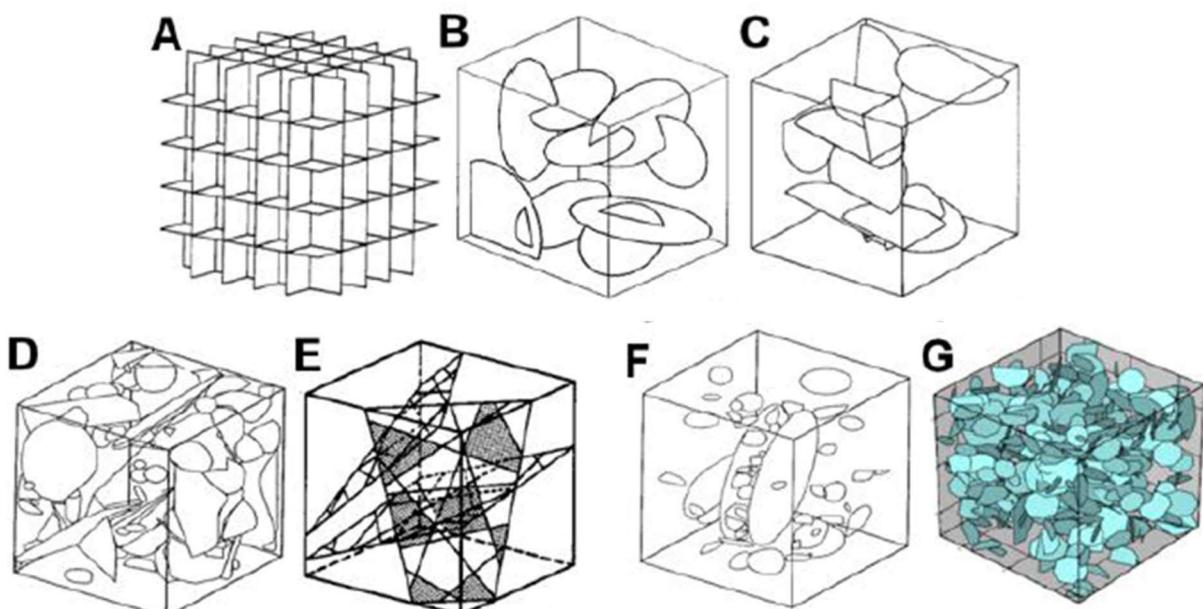
Assim como visto na Figura 17, onde inseriu-se a terceira dimensão de forma infinita, numa representação bidimensional, as fraturas assumem, em geral, formas planares. O uso de planos infinitos, dentro VER considerado; de polígonos regulares, círculos e elipses, considerando os comprimentos limitados das fraturas; são os tipos de forma mais adotadas na modelagem tridimensional de redes de fraturas discretas. Tais formas são dispostas espacialmente, a partir de seus centros, considerando as distribuições estatísticas já citadas, no item 2.2.3, e também levando em conta a densidade de fraturas considerada, em termos volumétricos. Outras características determinantes para os sistemas tridimensionais são os comprimentos das fraturas, inseridos no lado maior da forma geométrica definida para uso; e a orientação das descontinuidades, expressas por um dos dois pares de ângulos comumente

utilizados na caracterização (ângulo de orientação e ângulo de mergulho / ângulo de mergulho e ângulo de direção de mergulho).

Ao se observar a literatura, no que tange a modelagem tridimensional de redes de fraturas discretas, verifica-se uma evolução nestes protótipos, partindo de modelos simplificados a modelos bastante complexos, que utilizam mais de um algoritmo para a definição das descontinuidades. Além disso, o relacionamento específico entre as diferentes características, tais como a locação das fraturas, suas terminações e as formas geométricas escolhidas, geram as particularidades presentes nos modelos.

A Figura 18 destaca alguns destes modelos, onde pode se observar um pouco da complexidade que tais sistemas podem assumir. Revisões bastante completas com relação a origem e a aplicabilidade destes e de outros modelos tridimensionais podem ser encontradas nos trabalhos de Dershowitz e Einstein (1988), NRC (1996), Staub et al. (2002) e Alghalandis (2014).

Figura 18 – Evolução histórica dos modelos de fraturas tridimensionais. (a) Modelo ortogonal 3D, (b) Modelo de Baecher, (c) Modelo de Baecher aperfeiçoado, (d) Modelo BART, (e) Modelo de Dershowitz, (f) Modelo de Densidade Incorporada e (g) Modelo poligonal randômico



Fonte: Adaptado de Alghalandis (2014)

A escolha do modelo de geração da rede de fraturas discretas é geralmente relacionada a premissas feitas com base nos dados de campo e em observações geológicas (STAUB ET AL., 2002). Considerando o caráter estocástico proposto para a ferramenta desenvolvida neste trabalho e também o uso do modelo hidráulico de condutos equivalentes, o protótipo de rede discreta de fraturas a ser utilizado será o Modelo de Baecher, proposto por Baecher et al. (1978), para o qual se apresentará uma breve descrição. Para maiores detalhes de outros modelos e para referências adicionais, recomenda-se a consulta as referências indicadas no parágrafo anterior.

O Modelo de Baecher considera que os planos das fraturas são representados por discos circulares, locados espacialmente a partir de seus centros, por uma distribuição uniforme. A partir destes centros, os círculos são criados, com valores de diâmetros constantes, para modelos simplificados, ou que também sigam uma distribuição estatística. É comum a adoção de distribuições do tipo lognormal, com os valores estatísticos dos comprimentos das fraturas do sistema em análise correspondendo ao diâmetro dos discos representativos, tal como feito por Cacas et al. (1990a). A orientação também pode ser inserida como dado de entrada na geração da rede, levando em conta uma distribuição normal ou de Fisher. A quantidade de fraturas é controlada pela sua densidade, em termos volumétricos.

O modelo de fraturas final tem a mesma aparência do apresentado na Figura 21(b). Nota-se que nas proximidades dos limites do volume elementar representativo escolhido, as fraturas são truncadas. Porém, ao longo da geração, é comum que este volume seja alargado, a fim de evitar efeitos de fronteiras, que impeçam a boa representação da descontinuidade. O truncamento é realizado ao final, limitando-se ao VER definido.

Segundo Staub et al. (2002), o Modelo de Baecher foi um dos primeiros modelos que bem representou as fraturas de forma discreta, substituindo o modelo ortogonal (Figura 21 (a)), que até então era utilizado, mas era bastante limitado, principalmente em termos de representar diferentes ângulos de mergulho das descontinuidades. Além disso, o formato circular dos discos que formam a rede de fraturas foi observado e documentado por outros autores, mas não indicado por Staub et al. (2002). A possibilidade desta forma geométrica ser explicada sob a ótica da mecânica das rochas é outro incentivador para o uso deste modelo.

Ainda segundo Staub et al. (2002), o Modelo de Baecher apresenta boa aplicabilidade quando se dispõe de poucos dados estatísticos do sistema fraturado a ser modelado. No caso de modelos estocásticos, como o proposto neste trabalho, os dados estatísticos serão ponto de partida para a geração da rede de fraturas discretas, desconhecendo-se sua origem, em termos de quantidade e qualidade dos levantamentos de campo. Sob o ponto de vista hidráulico, o Modelo de Baecher também apresenta boa acurácia para a modelagem. Neste sentido, trabalhos como os de Einstein et al. (1980), Warburton (1980), Long (1983), Long (1985b), Cacas et al. (1990a), Cacas et al. (1990b), Outters e Shuttle (2000) e Xu et al. (2014), dentre outros, aproveitaram deste modelo de fraturas para a execução de simulações hidráulicas de diferentes formações ao redor do globo.

O Modelo de Baecher apresenta algumas limitações. A primeira consiste na boa representação de blocos rochosos, quando estes são bem definidos, nas formações. Esta representação fica restrita a modelos que possuem discos com tamanhos iguais ou superiores ao do volume elementar considerado. Outra limitação é o fato de todas as descontinuidades modeladas serem planares, eliminando possíveis mecanismos de geração de terminações de fraturas múltiplas e não planares (Dershowitz et al., 1988). Na modelagem realizada neste trabalho, tais fatos não causam grandes problemas, uma vez que não se deseja avaliar a boa representação dos blocos rochosos e verificar a forma das terminações das fraturas. Desta forma, o modelo é adequado para o fim proposto.

2.3 MODELAGEM DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM MEIOS FRATURADOS

Este tópico visa apresentar os principais aspectos relacionados a modelagem do escoamento de águas subterrâneas em meios fraturados. É importante que o leitor tenha conhecimento dos conceitos das principais propriedades físicas e hidráulicas dos aquíferos, que comumente aparecem no equacionamento destes escoamentos, uma vez que estas definições não foram aqui revisadas. Caso seja necessária uma revisão, recomenda-se a consulta às obras de Singhal e Gupta (2010), Cleary (2007), Freeze e Cherry (1979), Manoel Filho (2006), Feitosa et al. (2000), NRC (1996) e Sahimi (2011).

Neste tópico, em um primeiro momento, são abordados os principais modelos presentes na literatura para os sistemas fraturados, no que tange a sua modelagem hidráulica. Serão

apresentados brevemente três modelos: o modelo contínuo equivalente, o modelo de dupla porosidade e o modelo de redes discretas de fraturas, comparando-se as vantagens e desvantagens de seu uso na modelação. Posteriormente, é dado enfoque ao uso de condutos e canais unidimensionais, em conjunto com as redes de fraturas discretas geradas estocasticamente, na simulação hidráulica de sistemas fraturados e na análise do fenômeno de *channeling*.

2.3.1 Modelos hidráulicos para meios fraturados

Este tópico apresenta as principais abordagens utilizadas para a modelagem hidráulica de águas subterrâneas em aquíferos fraturados. Como pode ser observado pelos diversos aspectos apresentados até então neste trabalho, a maior dificuldade na modelagem dos meios fraturados está ligada a anisotropia destes meios, diretamente ligada ao comportamento heterogêneo associado as fraturas. Neste sentido, nota-se na bibliografia diferentes modelos conceituais, que visam considerar esta heterogeneidade e apresentar uma possibilidade de representação do referido fenômeno estudado.

Segundo Manoel Filho (1996), modelo conceitual é um conjunto de hipóteses que descreve, de maneira ideal, as principais feições do meio hidrogeológico real. O método do modelo conceitual é considerado uma das ferramentas mais poderosas de que se dispõe para investigar sistemas complicados, cujo tratamento matemático se afigura praticamente impossível. De acordo com este método, o sistema real é substituído por um sistema mais simples, passível de tratamento matemático. A modelagem de aquíferos fraturados é um destes casos, uma vez que a geometria complexa das descontinuidades demanda simplificações.

Da análise do sistema ideal, são obtidos resultados na forma de leis ou relações matemáticas entre os diversos parâmetros do sistema estudado. Essas leis possibilitam a identificação do quão as variáveis envolvidas são dependentes entre si, além da sua influência no modelo como um todo. Como último passo, é necessária a verificação experimental do modelo, a partir da comparação de resultados com testes experimentais, de laboratório ou campo, validando as relações matemáticas obtidas (MANOEL FILHO, 1996).

Considerando os modelos conceituais voltados a simulação de aquíferos fraturados, observa-se na bibliografia uma variedade de abordagens, que podem ser agrupadas em três grandes grupos (Figura 19): a abordagem do meio poroso equivalente, a abordagem da dupla porosidade e a abordagem das redes de fraturas discretas. Tais modelos serão explicados nos tópicos a seguir, mostrando-se as principais vantagens e limitações destas aproximações. Neste trabalho, o terceiro modelo conceitual será utilizado, dentro do contexto de desenvolvimento da ferramenta proposta. Apesar de apresentados separadamente, podem ser encontrados na literatura corrente, abordagens que incorporam dois destes modelos juntos, aproveitando de suas vantagens.

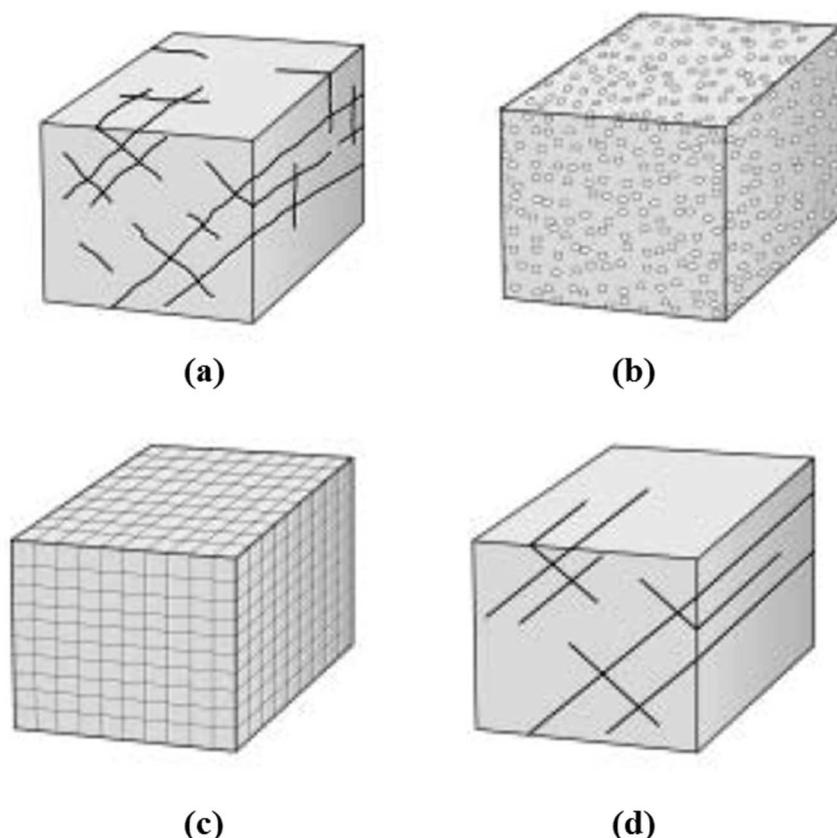
Deve-se salientar que três fatores inseridos em tais abordagens devem ser levados em conta no momento das simulações: a geologia do meio fraturado, a escala de interesse da simulação e o propósito sob o qual o modelo está sendo ou foi desenvolvido. No que tange a geologia do meio fraturado, resultados da sua investigação permitem identificar quais as principais características do sistema, tais como propriedades dos materiais componentes, geometria, tensões e histórico geológico do maciço; e determinando quais delas tem potencial de influência direta no trânsito da água na formação. Neste sentido, duas geologias podem ser consideradas limites extremos: um sistema composto por poucas fraturas condutivas e uma matriz rochosa impermeável (rochas cristalinas maciças) e um sistema intensamente fraturado com uma matriz rochosa permeável (rochas sedimentares) (NRC, 1996).

Em termos de escala de interesse da simulação, deve se avaliar o quanto o tamanho do volume elementar representativo influencia na modelagem. Um mesmo aquífero fraturado pode se apresentar bastante conectado, quando analisado em larga escala, mas pode ser dominado por um número pequeno de fraturas largas, quando avaliado em uma escala menor. A noção mais tradicional para lidar com tal fato é de que conforme se aumenta a escala de interesse da simulação, o aquífero deve ser tratado de forma cada vez mais próxima a um meio uniforme equivalente (COOK, 2003).

Com relação a proposta de uso do modelo escolhido, deve ser notada se a sua aplicação é destinada a avaliação de vazões que escoam nas fraturas ou ao transporte de solutos e/ou contaminantes. Para o primeiro caso, abordagens de meios equivalentes são suficientes para a compreensão do fenômeno, enquanto para o segundo caso, um modelo conceitual mais

refinado é necessário para boa previsão dos tempos de passagem de soluto, diretamente influenciados pela heterogeneidade dos sistemas fraturados (NRC, 1996).

Figura 19 – Diferentes abordagens para modelagem hidráulica de aquíferos fraturados: (a) sistema fraturado real, (b) modelo poroso equivalente, (c) modelo de dupla porosidade e (d) modelo de redes de fraturas discretas



Fonte: Adaptado de Cook (2003)

2.3.1.1 Modelo contínuo equivalente

O modelo contínuo equivalente, também indicado nas bibliografias por modelo poroso equivalente (em inglês, pela sigla EPM – *Equivalent Porous Media*) é uma abordagem utilizada para simulação de meios fraturados em que as fraturas não são caracterizadas individualmente. Dá-se preferência a representação do sistema fraturado por um sistema poroso com características hidráulicas equivalentes, ou seja, possuindo condutividade hidráulica, capacidade de armazenamento, porosidade e permeabilidade semelhantes, dentro

de um volume elementar representativo de tamanho estimado (Figura 19(b)). Os resultados da modelagem são válidos apenas para escalas maiores ao VER utilizado (COOK, 2003).

Em termos de tratamento matemático, o modelo contínuo equivalente utiliza a equação geral de águas subterrâneas (Equação 1), comumente utilizada para meios porosos, sendo baseada na Lei de Darcy e no princípio de conservação de massa. Tal equação é geralmente resolvida utilizando o método das diferenças finitas ou o método dos elementos finitos, sendo que as propriedades hidráulicas necessárias para o uso da referida equação devem ser obtidas, considerando a relação matriz rochosa e fraturas, quando o modelo contínuo equivalente é utilizado.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \mp W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

Em que:

K_x, K_y, K_z : condutividades hidráulicas nas direções x, y e z, respectivamente (m/s);

W : termo fonte/sumidouro, que indica o volume de fluxo que entra (sinal positivo) e sai (sinal negativo) do sistema em determinado ponto por unidade de volume do meio (s^{-1});

$\frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y}, \frac{\partial h}{\partial z}$: gradientes hidráulicos nas direções x, y e z, respectivamente (m/m);

S_s : coeficiente de armazenamento específico do meio (m^{-1});

$\frac{\partial h}{\partial t}$: variação temporal da carga hidráulica (m/s).

Os coeficientes da equação acima são conhecidos com certa precisão, quando se trata de um estudo local; ou utiliza-se valores típicos destes, conforme o tipo de formação avaliada; o modelo contínuo equivalente é dito determinístico. Tais propriedades podem ser determinadas por testes de poços e/ou aquíferos ou calculadas a partir de descrições de campo detalhadas do sistema fraturado avaliado, para pequenas escalas; ou para escalas regionais, podem ser calibradas em conjunto com dados de recarga de aquífero e variação de nível de poços e de gradientes hidráulicos. Porém, quando tais coeficientes são vistos como variáveis aleatórias ao longo do volume avaliado, sendo regidas por distribuições de probabilidade, o modelo assume caráter estocástico. Neste caso, o tamanho da incerteza nos parâmetros de entrada depende da heterogeneidade do meio avaliado e do grau de conhecimento de suas propriedades (NRC, 1996).

Segundo Singhal e Gupta (2010), o modelo contínuo equivalente é adequado para simulações de meios fraturados que possuam elevadas densidades de fraturas, já que o aumento do fraturamento corresponde a acréscimos significativos de porosidade e permeabilidade, fazendo com que os meios fraturados tenham características hidráulicas mais próximas dos meios porosos. Possuir preferencialmente aberturas de fratura constantes e ter orientações preferencialmente distribuídas são outras características indicadas por este autor para que tal abordagem seja utilizada.

Em termos de propósito de utilização do modelo, tal abordagem é principalmente destinada a avaliação dos valores de vazões e velocidades. Em problemas de regime permanente, nota-se que as equações convencionais de águas subterrâneas são totalmente adequadas para simulação destes meios. Porém, em problemas transientes, deve-se tomar o cuidado de se considerar as diferentes condições de armazenamento de água de matriz rochosa e das fraturas. Neste tipo de problema, nos primeiros instantes, a água contida nas fraturas é retirada rapidamente. Em momentos posteriores, a matriz rochosa passa a contribuir ao escoamento, até que haja equilíbrio entre o retirado e o fornecido pela formação. Esta diferença pode levar a resultados incoerentes no momento da modelagem com as equações convencionais. Em meios onde o grau de fraturamento é elevado, nota-se uma aproximação do comportamento do meio fraturado com o de um meio poroso comum, não havendo grandes infortúnios devido a diferença de armazenamento entre matriz e descontinuidade (COOK, 2003).

No que tange a modelagem de trânsito de solutos e contaminantes, o modelo contínuo equivalente não apresenta boa correspondência com os dados reais, sendo pouco utilizado para tal fim, quando comparado a outras abordagens, que melhor detalham as descontinuidades. Para tal uso, deve-se determinar os valores de porosidade efetiva e de propriedades de dispersão de solutos deste meio equivalente, que servem de parâmetros na equação de advecção-dispersão, comumente usada nos meios porosos e também aplicada na abordagem do meio equivalente. Apesar de tais propriedades poderem ser determinadas por testes de traçadores, em pequena escala, é embarracoso estender tais dados a escalas maiores, onde o modelo contínuo equivalente é comumente utilizado. Além disso, os caminhos preferenciais gerados pelas fraturas e a contribuição posterior da matriz rochosa, caso esta

apresente permeabilidade considerável, são fatos que também não incentivam o uso do modelo simplificado (NRC, 1996 e COOK, 2003)

Quando se observa os trabalhos publicados utilizando o modelo contínuo equivalente, nota-se que a maioria se destina a avaliação dos escoamentos nos aquíferos fraturados, em termos regionais, em diferentes localidades do globo. Esta escala, inclusive é a mais indicada para o uso de tal abordagem, onde as propriedades equivalentes realmente se aproximam do comportamento real do meio. Long et al. (1982) é um dos trabalhos mais clássicos utilizando a referida abordagem, onde a partir de modelos bidimensionais estocásticos, analisa-se quais as características são mais influentes para que o sistema fraturado tenha comportamento semelhante ao de um meio poroso. Este autor notou que, além do crescimento da densidade de fraturas, das aberturas constantes e da variação nas orientações, quanto maiores foram as amostras avaliadas, maior era a similitude com meios porosos, comprovando o fato de que maiores escalas são mais adequadas ao referido modelo.

Outros trabalhos desenvolvidos considerando a abordagem do meio contínuo equivalente e que são interessantes para a sua compreensão são Carrera et al. (1990), que utilizou tal modelo para a modelagem de águas subterrâneas em uma formação de gnaisse fraturado, na região de Ontário, no Canadá; Berkowitz et al. (1988), que modelou o transporte de contaminantes, utilizando a abordagem contínua e avaliando a aplicabilidade do modelo para este fim, observando a necessidade de obtenção correta dos coeficientes de dispersão de solutos, por meio da análise de curvas de tempo de residência de traçadores, em testes de laboratório. Panagopoulos (2012) e Ghasemizadeh et al. (2015) também utilizaram o modelo equivalente para a modelagem de aquíferos cársticos, na Grécia e nos Estados Unidos, respectivamente, fazendo algumas adaptações, para considerar a presença de cavernas e fraturas de maior porte, comumente presentes neste tipo de formação. No caso grego, o pacote computacional MODFLOW, comumente utilizado para os meios porosos, foi empregado para a formação fraturada, representada de forma contínua.

Resumidamente, o modelo contínuo equivalente se mostra como um modelo simplificado, em que não há necessidade de detalhamento da rede de fraturas, diminuindo a quantidade de dados requeridos. Tal abordagem possui maior aplicabilidade para análises em maiores escalas, geralmente em termos regionais, para análises de escoamentos em regimes

permanentes. As principais limitações estão ligadas a aplicabilidade do modelo para análises de problemas de regime transitório, em virtude das diferenças de armazenamento entre matriz rochosa e fraturas; e para a verificação do transporte de contaminantes e solutos, pela dificuldade em se determinar, de forma adequada, os coeficientes de dispersão da equação de advecção-dispersão. É assumido ainda que é possível a determinação de um VER na formação avaliada e de que os resultados modelados são válidos apenas para volumes de maior escala do que o representativo utilizado. (COOK, 2003)

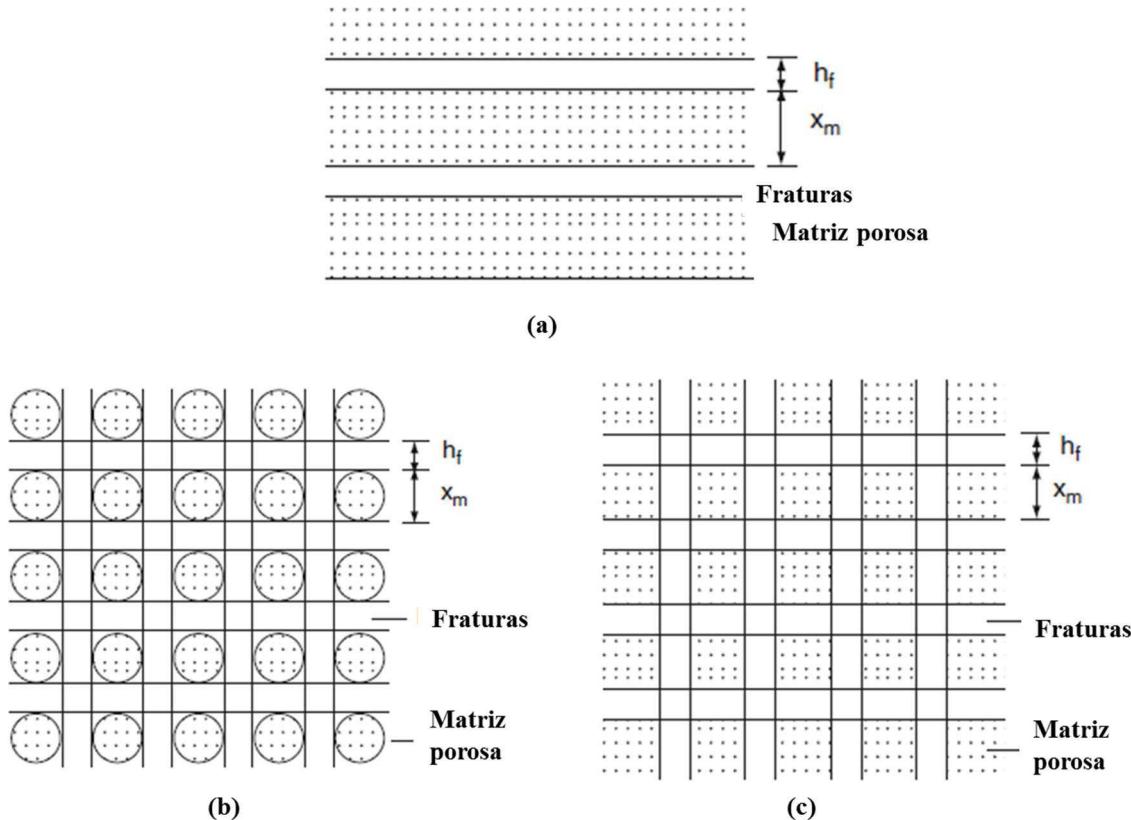
2.3.1.2 Modelo de dupla porosidade

Considerando a classificação apresentada no item 2.2 deste trabalho, uma formação apresenta dupla porosidade quando sua matriz rochosa apresenta elevada permeabilidade e contribui efetivamente para o trânsito de fluidos, assim como as descontinuidades. Como exemplo destas formações, tem-se as rochas sedimentares fraturadas, tais como arenitos e argilitos fraturados. A estas formações, um modelo hidráulico, também conhecido por modelo de dupla porosidade, foi desenvolvido para compreensão dos escoamentos em seus vazios.

Este modelo, concebido inicialmente por Barenblatt et al. (1960) e posteriormente aprimorado por outros autores, dentre os quais Warren e Root (1963), Streltsova (1976), Streltsova-Adams (1978) e Gringarten (1982); assume a existência de duas regiões distintas, a matriz rochosa porosa e as fraturas, com comportamentos hidráulicos diferentes, modelados por equações distintas. A geometria assumida por estas duas regiões é vista na bibliografia em três formas mais comuns, conforme apresentado na Figura 20: em camadas alternadas (Figura 20(a)), em blocos esféricos (Figura 20(b)) e em blocos cúbicos (Figura 20(c)). Apesar de se apresentarem em duas dimensões, estas geometrias podem ser estendidas para modelos tridimensionais.

A modelagem matemática do modelo de dupla porosidade resulta da aplicação da Lei de Darcy e do princípio da continuidade. As Equações 2 e 3 apresentam as relações comumente aplicadas nesta abordagem, considerando uma aplicação unidimensional. Analogamente, tais equações podem ser estendidas para modelos 2D ou 3D. Nota-se nessas duas equações a presença de termo comum, que indica a interação entre a matriz rochosa e

Figura 20 – Diferentes geometrias do modelo de dupla porosidade



Fonte: Adaptado de Singhal e Gupta (2010)

as fraturas, sob a forma de um suprimento uniforme de água entre os dois meios, relacionado com a diferença de carga hidráulica entre estes, conforme expresso pela Equação 4.

$$T_f \frac{\partial^2 h_f}{\partial x^2} = S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} - V_d \quad (2)$$

$$T_m \frac{\partial^2 h_m}{\partial x^2} = S_m \frac{\partial h_m}{\partial t} + V_d \quad (3)$$

Em que:

os índices f e m indicam respectivamente as variáveis para fraturas e matriz porosa;

T : transmissividade do meio avaliado;

S : coeficiente de armazenamento do meio avaliado;

h : carga hidráulica do meio avaliado, que pode variar tanto em espaço quanto temporalmente.

V_d : taxa de transferência de água da matriz para as fraturas, por unidade de tempo, num prisma de área horizontal unitária, expresso da seguinte forma:

$$V_d = \frac{K_m}{l} (h_f - h_m) \quad (4)$$

Em que:

K_m : condutividade hidráulica da matriz porosa (m/s);

l : dimensão característica do bloco rochoso.

O conjunto das três equações é a forma mais completa de se analisar o escoamento nas duas regiões, estabelecendo uma relação entre elas. Porém, ao se considerar que a matriz porosa possui baixa transmissividade, quando comparada a sua capacidade de armazenamento, o termo $T_m \frac{\partial^2 h_m}{\partial x^2}$, na Equação 3 pode ser desprezado (Barenblatt et al. 1960; Streltsova-Adams 1978). Desta forma, as Equações 2, 3 e 4 podem ser relacionadas, a partir do termo de transferência entre matriz e fraturas, originando uma única equação representativa do escoamento, em termos transientes (Equação 5).

$$\frac{\partial h_m}{\partial t} = \frac{K_m}{S_m} (h_f - h_m) \quad (5)$$

Outros dois parâmetros que caracterizam o comportamento do modelo de dupla porosidade são a taxa de armazenamento (ω) e a taxa de transmissividade (λ), indicados pelas Equações 6 e 7. O primeiro parâmetro é indicador da capacidade relativa de armazenamento das fraturas em relação ao conjunto da formação (fraturas e matriz porosa). Seus valores são em torno de 10^{-1} a 10^{-4} (KRUSEMAN e DE RIDDER, 1990 apud SINGHAL e GUPTA, 2010). Num caso especial, se for igual a 1, tem-se um modelo contínuo equivalente. O segundo parâmetro indica a facilidade ou dificuldade com a qual o fluido escoa da matriz porosa para as fraturas, considerando a relação entre suas condutividades e o tipo de geometria adotado para o modelo. Seus valores são da ordem de 10^{-3} a 10^{-10} (HORNE, 1990 apud SINGHAL e GUPTA, 2010), sendo que valores maiores indicam menor heterogeneidade entre as duas regiões, o aproximando a situação de um modelo equivalente.

$$\omega = \frac{S_f}{S_f + S_m \beta} \quad (6)$$

Em que:

S_f, S_m : capacidade de armazenamento das fraturas e da matriz, respectivamente.

β : fator dependente da geometria utilizada no modelo, sendo igual a 1 quando se utilizar a geometria em camadas sucessivas.

$$\lambda = \alpha r_w^2 \frac{K_m}{K_f} \quad (7)$$

Em que:

α : fator geométrico, que relaciona a área das fraturas, o volume da matriz porosa e a dimensão característica assumida. Para a geometria de camadas sucessivas, $\alpha = \frac{12}{x_m^2}$, onde x_m é a espessura da camada da matriz porosa; para a geometria cúbica ou esférica, $\alpha = \frac{60}{x_m^2}$, onde x_m é o comprimento do lado do cubo ou o diâmetro do bloco esférico.

r_w : raio do poço de produção utilizado como referência.

Como pode ser visto pelas equações anteriores, a presença de um termo transitivo faz com que a análise dos escoamentos em modelos de dupla porosidade seja feita ao longo de uma escala temporal. Tal fato é justificado pela necessidade de haver equilíbrio na transferência de fluido entre a matriz porosa e as fraturas, a partir do reajuste das cargas hidráulicas nestes meios.

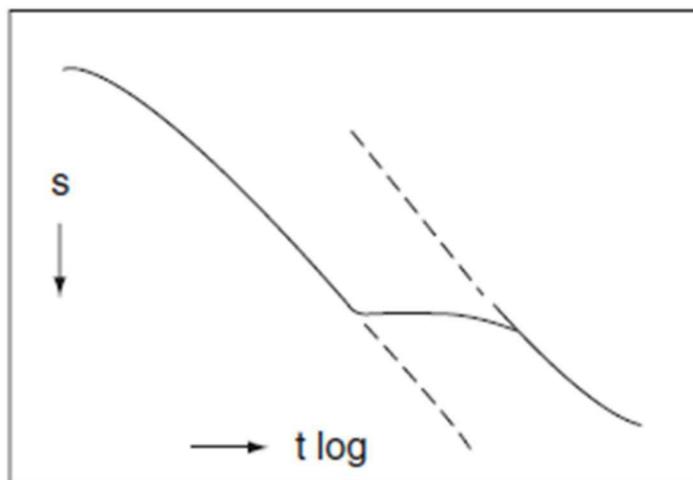
O aspecto transitivo destas equações também estimula o seu uso na análise de problemas de poços, uma vez que o modelo de dupla porosidade se comporta melhor que o modelo contínuo equivalente, em virtude da análise desmembrada das duas regiões, cada qual com a sua equação e respectivas propriedades. Neste sentido, Streltsova-Adams (1978) e Gringarten (1982) criaram relações analíticas para análise de testes de poços em aquíferos de dupla porosidade, considerando tal aspecto e permitindo a obtenção do avanço do rebaixamento ao longo do tempo neste tipo de formação.

Segundo Singhal e Gupta (2010), as diferenças de permeabilidade entre fraturas e matriz porosa, o mecanismo de escoamento transitivo é diferente quando avaliado em tempos iniciais, intermediários e longos de bombeamento. Nos tempos iniciais, o fluido é removido somente das fraturas, não havendo contribuição da matriz. Nos tempos longos, o meio se comporta como um meio poroso, com permeabilidade igual a das descontinuidades e com ambas as regiões contribuindo igualmente ao escoamento. Em tempos intermediários, ocorre

uma transição, com o início da contribuição da matriz porosa. Nessa fase, o rebaixamento permanece ligeiramente constante, até a obtenção do equilíbrio entre as contribuições das regiões.

Quando a curva de rebaixamento por tempo é plotada, em um gráfico semi-logarítmico, a forma assumida é semelhante à mostrada na Figura 21, onde a fase intermediária é bem identificada pela ocorrência de um rebaixamento praticamente constante. A duração desta fase é dependente da taxa de armazenamento (ω) e a taxa de transmissividade (λ). Em geral, nota-se que após a transição, as relações analíticas utilizadas para aquíferos em meios porosos contínuos também são aplicáveis em aquíferos de dupla porosidade, em virtude do equilíbrio das contribuições das duas regiões.

Figura 21 – Curva de rebaixamento típica para aquíferos de dupla porosidade



Fonte: Adaptado de Singhal e Gupta (2010)

Além de ser bastante utilizado na modelagem de aquíferos fraturados, como pode ser visto nos trabalhos de Moench (1984), Gerke e Genuchten. (1993), Mohrlok e Teutsch (1997), Moutsopoulos e Tsirhrintzis (2009), Ackerer et al. (2014), Kumar (2014), o modelo de dupla porosidade também é muito aplicado na simulação do comportamento de reservatórios de petróleo, como pode ser visto em Wu e Pruess (1988), Dutra Jr. e Aziz (1992), Lewis e Ghafouri (1997), Borbiaux (2010), Paiva (2012). Saalfeld et al. (2016) desenvolveu um trabalho de modelagem dos reservatórios do pré-sal brasileiro, utilizando a modelagem do meio contínuo equivalente e de dupla porosidade em conjunto. Tais fatos são estimulados pela simplicidade da geometria utilizada pelo modelo e pela ocorrência elevada de

formações fraturadas com matrizes porosas. O uso destes dois fluidos, especialmente o petróleo, também estimularam as pesquisas de simulação hidráulica deste tipo de formação.

Em termos de transporte de solutos e contaminantes, o modelo de dupla porosidade também podem incorporar as características difusivas de matrizes rochosas que apresentam elevado potencial de transporte de substâncias. Este aspecto torna esta abordagem mais interessante que o modelo contínuo equivalente, permitindo a interação entre matriz e fraturas e a previsão adequada da contribuição tardia oriunda dos blocos rochosos. Trabalhos interessantes neste sentido são o de Reeves et al. (1991), Haws et al. (2005) e Neville (2006), que abordam análises deste tipo, em diferentes localidades.

Como desvantagens, o modelo de dupla porosidade tem tendência regularizar e simplificar geometria da formação, em um formato válido para a utilização da formulação matemática proposta, mas que difere bastante da disposição real de matriz e descontinuidades. A determinação das espessuras das camadas, no caso da geometria em camadas sucessivas, e do tamanho dos blocos cúbicos e esféricos, no caso dos outros dois formatos mais comuns, deve ser cuidadosamente feita, a fim de se evitar erros na modelagem. Tem-se observado na bibliografia, em trabalhos mais recentes, a incorporação do modelo de dupla porosidade ao modelo de redes de fraturas discretas, detalhando-se adequadamente a geometria do sistema fraturado e considerando a contribuição da matriz porosa ao escoamento.

A determinação de VER adequado também é outro ponto crucial nesta abordagem, uma vez que ele não deve assumir grandes escalas, que favorecem o uso do modelo contínuo em detrimento ao modelo de dupla porosidade. Neste sentido, recomenda-se o uso de escalas intermediárias para o modelo de dupla porosidade. Analogamente ao modelo contínuo, os resultados obtidos na abordagem de dupla porosidade são válidos apenas para escalas iguais ou superiores a do volume considerado.

2.3.1.3 Modelo de redes discretas de fraturas

Em termos de geometria do modelo, a abordagem da rede de fraturas discretas é aquela que busca mais se aproximar explicitamente da forma como se apresentam os sistemas fraturados em meio real. Todas as características apresentadas ao longo do item 2.2.1 são utilizadas

para a criação de uma rede de descontinuidades, em duas ou três dimensões, sob a qual os fluidos transitam. Neste sentido, propriedades como a localização, a abertura, a orientação, o comprimento, a densidade e a rugosidade das fraturas, além da forma geométrica assumida pelas fraturas (conforme item 2.2.4), são essenciais para a caracterização deste modelo e a montagem da rede para simulação hidráulica, que pode ser construído a partir de dados determinísticos ou por meio de abordagens estatísticas e estocásticas (conforme item 2.2.3).

O modelo de redes de fraturas discretas é em geral utilizado para formações que apresentam matriz rochosa com baixa permeabilidade, e com fluxo preferencial sobre as fraturas. Basaltos e rochas cristalinas são exemplos de materiais rochosos comumente bem modelados com este modelo. Porém, formações com matriz permeável também podem ser simuladas, desde que se considere a contribuição desta região ao escoamento, a partir da inserção de um termo contribuinte, que estabeleça a relação entre blocos e descontinuidades. Desta forma, o modelo assume características da abordagem de dupla porosidade, mas preserva a representação da geometria real, proposta pelas redes discretas de fraturas. Para fins de simulação, este trabalho utilizará o modelo de redes discretas sem considerar a contribuição da matriz rochosa, reproduzindo assim situações de formações com baixa permeabilidade e simplificando o modelo estudado.

A utilização de dados da geometria real das fraturas é a principal vantagem do modelo de fraturas discretas, permitindo assim uma reprodução mais próxima do sistema real para simulação, quando comparado as abordagens apresentadas anteriormente, que utilizam geometrias simplificadas e buscam a definição de um volume elementar representativo. Neste sentido, é possível obter dados sobre o escoamento em cada uma das descontinuidades, de forma individual, e nas suas interseções; além da possível verificação da influência direta dos diferentes fatores da geometria no comportamento do trânsito de fluidos.

Porém, considerando que os levantamentos de dados em campo são limitados aos afloramentos e a locais onde haja a exposição da formação, a abordagem das redes de fraturas discretas é comumente utilizada para modelagem em pequenas escalas, de ordem local. Além disso, há a dependência da obtenção de dados de campo e do trabalho estatístico para com estes para a representação desta geometria. Neste trabalho, esta etapa será considerada como já realizada anteriormente, sendo os dados estatísticos referentes a formação analisada

considerados como dados de entrada para geração da rede de fraturas, de forma estocástica, e a posterior simulação hidráulica; reduzindo-se assim a dependência a esta limitação.

Outra limitação ligada a abordagem das redes de fraturas discretas é de ordem computacional. A representação explícita da geometria das fraturas pode gerar modelos com redes complexas para simulação, especialmente em maiores escalas, demandando alto poder de processamento de informações, além de tempo computacional elevado para obtenção de resultados. Neste sentido, é comum a simplificação destes modelos, principalmente em termos de modelagem hidráulica, sem a perda dos resultados essenciais relativos ao escoamento nas fraturas. O crescimento atual das ferramentas computacionais também vem reduzindo esta desvantagem do referido modelo, o tornando mais utilizado em aplicações recentes.

Para a modelagem hidráulica, a abordagem de redes discretas é classicamente ligada ao modelo de placas paralelas (SNOW, 1965). Este modelo considera a fratura representada por duas placas retangulares, contínuas e lisas, de área igual à da descontinuidade, espaçadas pela respectiva abertura da fratura, constante ao longo de todo o seu comprimento (Figura 22). Não há contribuição da matriz rochosa ao escoamento nas fraturas. A vazão de fluido que transita numa única fratura, na mesma direção de um gradiente hidráulico, pode ser obtida pela fórmula conhecida como lei cúbica, em virtude da relação desta variável com o cubo do valor da abertura da fratura (Equação 8). Esta lei é derivada da Equação de Navier-Stokes, considerando algumas simplificações, tais como a eliminação de termos transitentes, uma vez que tal relação busca avaliar escoamentos permanentes; de termos advectivos, considerando a tendência de baixa velocidade dos escoamentos subterrâneos, quase sempre considerados no regime laminar; além da consideração comum de fluidos incompressíveis. Tal demonstração pode ser encontrada com detalhes em Bear et al. (1993) e Sakar et al. (2004).

$$Q = \left(\frac{\gamma a^3}{12 \mu} \right) \times W \times I \quad (8)$$

Em que:

Q : vazão escoada em uma única fratura (m^3/s);

W : largura da fratura (m)

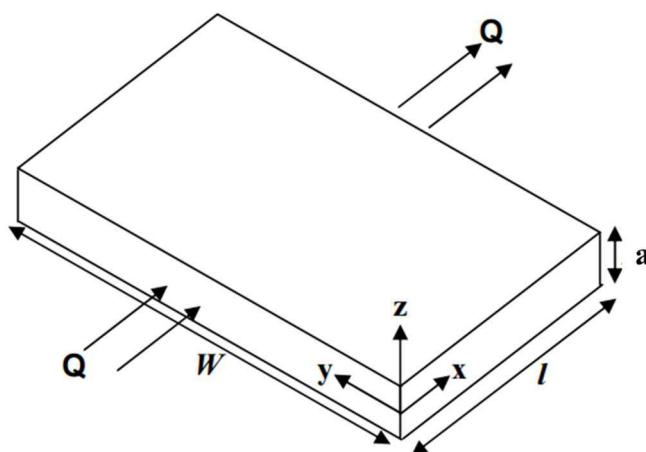
γ : peso específico do fluido (kN/m^3);

μ : viscosidade dinâmica do fluido ($\text{Pa} \times \text{s}$);

a : abertura média da fratura (m);

I : gradiente hidráulico entre dois pontos da fratura, entre os quais a vazão é avaliada (m/m).

Figura 22 – Representação da fratura no modelo de placas paralelas



Fonte: Sarkar et al. (2004)

Ao se observar uma família de fraturas, a vazão total da família é igual a soma das vazões de cada uma das fraturas, determinada individualmente a partir da lei cúbica.

A validade da lei cúbica é questionável, uma vez que boa parte das hipóteses consideradas para sua formulação não são encontradas no campo. As fraturas não possuem aberturas constantes ao longo de seu comprimento, podendo se encontrar fechadas ou reduzidas em alguns pontos e ligeiramente mais abertas em outros, sem contar a possível presença de materiais de preenchimento nas descontinuidades. As superfícies de suas paredes também não são totalmente lisas, apresentando ondulações e irregularidades nestas faces. Outro ponto questionável é admissão de que o escoamento ocorre igualmente em toda a seção da fratura. Ao se considerar a variação de abertura e de rugosidade, o fluido tende a procurar caminhos mais fáceis para o seu trânsito, evitando regiões com pequenas aberturas e com elevada rugosidade. Desta forma, os escoamentos podem assumir velocidades elevadas em determinados trechos das fraturas, passando ao regime turbulento, que também não é considerado nas hipóteses da lei cúbica.

O fenômeno descrito acima, relativo a busca do fluido por caminhos preferenciais, com maiores aberturas e menores rugosidades, no interior das fraturas, é conhecido na literatura como *channeling*. Tal nome está ligado a formação de pequenos canais, sobre a superfície da fratura, sob os quais a maior parte do fluxo ocorre. A observação de tal fenômeno é comum e comprovada a partir de ensaios de traçadores, com amostras em laboratório. Tais amostras são expostas ao escoamento, com substâncias que se aglomeram a superfície da fratura, servindo como indicador dos locais onde houve passagem de fluido (Bodin et al, 2003 e Oden et al., 2008). Neste sentido, é possível que algumas regiões da superfície da fratura não recebam nenhuma vazão, refutando a ideia assumida pela lei cúbica de que toda a seção da fratura é molhada.

Alguns pesquisadores clássicos buscaram discutir a validade da lei cúbica em suas publicações, sem ainda levar totalmente em conta o fenômeno acima descrito. Witherspoon et al. (1980) avaliaram a validade da referida formulação a fraturas de formações expostas a variação de tensões. Estes autores observaram que a lei permanecia válida a aberturas superiores a $4 \mu m$ e sob tensões inferiores a 20 MPa. Louis (1984 apud Singhal e Gupta, 2010) estabeleceu algumas relações empíricas, baseadas na lei cúbica, mas considerando a variação do tipo de regime do escoamento e a rugosidade das paredes das fraturas, representando o comportamento do escoamento em um ábaco, que relaciona o número de Reynolds com a rugosidade relativa da fratura.

Bear et al. (1993) apresenta algumas formulações integrais para a obtenção da chamada abertura efetiva, que leva em conta a variação desta característica ao longo do comprimento da fratura, mas não considera a mudança de rugosidade. Outra abordagem comumente vista na literatura é conhecida como lei cúbica local, que modifica a formulação a partir da sua origem, as Equações de Navier-Stokes, levando em conta as variações de ambas as características. Trabalhos como os de Zimmerman, Kumar e Bodvarsson (1991), Mourzenko et al. (1995), Oron e Berkowitz (1998), Nicholl et al., (1999) e Wang et al. (2015) abordam tal modificação local.

Segundo Singhal e Gupta (2010), em simulações práticas, o conceito de *channeling* é raramente levado em conta na interpretação de testes hidráulicos e de testes de transportes de soluto, sendo o meio fraturado simulado pelo modelo de placas paralelas com uma

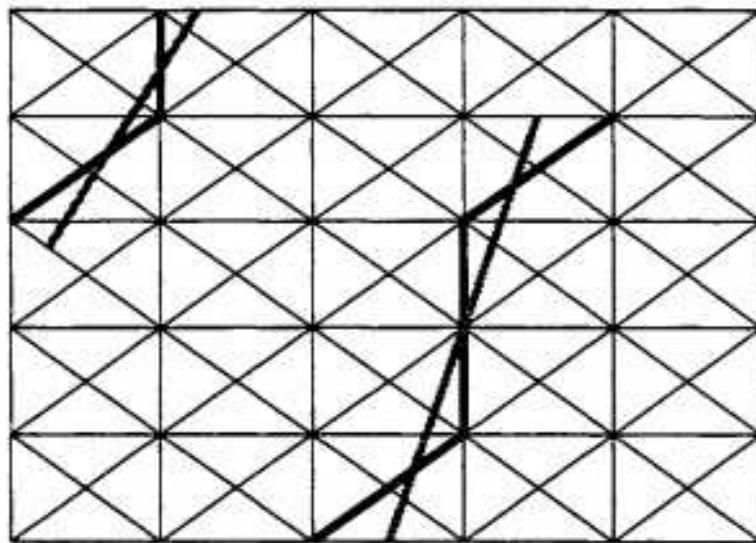
abertura média de fratura constante. A simplicidade de aplicação da lei cúbica e a sua boa aplicabilidade, especialmente em fraturas expostas a baixas tensões geostáticas e que possuem espaçamentos abertos a largos, são fatos que incentivam o uso desta formulação. Neste sentido, apesar de sua validade questionável, a lei cúbica ainda é comumente vista na literatura, especialmente na comparação e na validação de resultados.

Este último fato pode ser observado por exemplo nos trabalhos de Brush e Thomson (2003), onde houve uma comparação entre resultados obtidos para escoamentos em fraturas simples, a partir das equações de Naiver-Stokes e pela lei cúbica local, com variação randômica da abertura e da rugosidade, ao longo do plano da descontinuidade. Pitombeira et al. (2009) utilizou a referida formulação na avaliação da variação da conectividade e da transmissividade de sistemas fraturados, modelados em duas dimensões e com abordagem estocástica, variando-se os dados geométricos, tais como a densidade de fraturas, a orientação e o comprimento das descontinuidades. Briggs et al. (2014) também comparou resultados de uma modelagem de escoamento em meio fraturado, utilizando ferramentas da dinâmica dos fluidos computacional, com valores obtidos pela lei cúbica comum.

Uma segunda abordagem para modelagem hidráulica no modelo de redes de fraturas discretas está exatamente ligada a discretização das Equações de Navier-Stokes, em conjunto com a equação de conservação de massa, que permitem a melhor identificação do fenômeno de *channeling*. Em geral, esta discretização é feita de forma bidimensional, sobre o plano da fratura, ignorando possíveis modificações de pressões e velocidades ao longo da distância entre os planos, uma vez que esta dimensão é bastante inferior às outras duas dimensões. Outra simplificação comum é considerar apenas a variação de abertura e rugosidade ao longo da direção do escoamento, mantendo esta variação igual na direção perpendicular e sobre o plano da fratura.

Para resolução desta formulação, são construídas malhas sobre estes planos e suas respectivas interseções, e utiliza-se alguns dos métodos numéricos mais comuns, como diferenças finitas, volumes finitos ou elementos finitos; e suas derivações. A Figura 23 apresenta uma malha triangular construída sobre o plano de uma fratura, para aplicação do método dos elementos finitos na solução do escoamento. Observa-se em destaque algumas linhas, que representam a interseção do referido plano com outros planos de fraturas.

Figura 23 – Discretização de um plano de fratura para aplicação do método dos elementos finitos



Fonte: Wilcock (1996)

A construção destas malhas e a discretização das equações de Navier-Stokes demanda elevados recursos computacionais, sendo ainda um desafio para a simulação de formações intensamente fraturadas. Segundo NRC (1996), mesmo para sistemas fraturados esparsos, as malhas construídas para a resolução do escoamento podem demandar cerca de 10^5 a 10^6 nós, sob os quais velocidades e pressões serão calculados individualmente, requisitando além de elevada capacidade de processamento, elevado tempo computacional. Este fator é a principal desvantagem desta abordagem, sendo desestimulante para o seu uso comum, em face a outros métodos simplificados, que também fornecem bons resultados.

Alguns pacotes computacionais comerciais, que trabalham com a geração de fraturas estocásticas, já trazem módulos acoplados para a resolução utilizando tal abordagem. Exemplos destes são o FracMan (FRACMAN, 2017) e o Napsac (Hartley et al., 2002). Alguns trabalhos que também empregam tal abordagem, utilizando total ou parcialmente alguns destes pacotes computacionais, são os de Dershowitz et al. (1991), Herbert et al. (1991), Long et al. (1992), que apresentaram trabalhos de caracterização e modelagem hidráulica da mina de Strippa, na Suécia; e Wilcock (1996), que utiliza o NAPSAC em conjunto com uma técnica baseada no método dos elementos finitos para ganho de tempo computacional nas simulações.

Zimmerman et al. (2000) apresentaram uma boa revisão da utilização das equações de Navier-Stokes e de suas respectivas simplificações, para a modelagem do escoamento em meios fraturados. Destaca-se a ênfase dada por este autor a apresentação, desde a origem, dois resultados de simplificações que são bastante utilizadas em outros trabalhos neste tipo de modelagem: da Equação de Stokes, uma versão linearizada da referida equação-mãe; e da Equação de Reynolds, outra forma sob a qual é conhecida a lei cúbica local.

Basha et al. (2003) trabalharam com a simplificação bidimensional das equações de Navier-Stokes e considerou a implementação de um termo de troca de fluido entre matriz e fraturas, baseado na Lei de Darcy. Tal consideração é pouco vista neste tipo de abordagem, em virtude da necessidade de simplificação das equações, para maior facilidade das soluções. Além disso, como existe variação temporal desta troca de fluido entre as duas regiões, a representação real de tal fenômeno pode levar a problemas na solução numérica.

Telles (2006) incorporou a sua ferramenta de geração de fraturas um programa de análise de escoamentos, que utiliza o método dos elementos finitos para resolver as equações governantes, em regimes permanentes e transientes, em condições não saturadas e saturadas. A aplicação desta autora, além de incorporar um módulo para o escoamento, adicionou um módulo complementar para análise do transporte de soluto, resolvendo as equações de advecção-difusão na malha proposta.

Koyama, Neretnieks e Jing (2008) também utilizaram a análise das equações de Navier-Stokes, de forma comparativa a lei cúbica local, para avaliar o comportamento do escoamento em uma fratura simples, sob o efeito de cisalhamento de suas paredes. Para isso, foi feito o mapeamento da superfície de uma fratura em formação de granito, que serviu de base para a inserção da variação da rugosidade, em um modelo bidimensional.

Em todos os trabalhos citados, observa-se que os autores se atentam a dificuldade de modelagem com o uso das equações de Navier-Stokes, principalmente em função do esforço computacional necessário para a sua solução. Observa-se ainda que as comparações com soluções decorrentes de simplificações destas equações são recorrentes na literatura, buscando-se mostrar que as formulações mais simples também fornecem resultados satisfatórios, em termos de modelagem, apesar dos pontos questionáveis em algumas

hipóteses assumidas. Neste sentido, a abordagem com as equações fundamentais da mecânica dos fluidos nem sempre é a mais utilizada na simulação dos meios fraturados, sendo muitas vezes preteridas por modelos simplificados.

A terceira abordagem comumente utilizada na modelagem de meios fraturados é a construção de redes de condutos ou canais unidimensionais equivalentes, que sejam representativos do escoamento no plano das fraturas. O objetivo principal desta aproximação é a redução do esforço computacional das simulações destes meios, uma vez que a resolução do escoamento é reduzida a equações simplificadas. Além disso, esta abordagem aproveita o fato de que sobre os planos das fraturas, em virtude da ocorrência do fenômeno de *channeling*, as regiões por onde há passagem de fluido tem comportamento semelhante aos de condutos e canais unidimensionais.

Considerando o uso desta aproximação neste trabalho, o tópico a seguir será dedicado a apresentação destes modelos e dos trabalhos desenvolvidos considerando tal abordagem. É importante salientar que o uso destas redes de condutos ou canais está ainda englobada nos modelos de redes de fraturas discretas, aproveitando da geração das fraturas para a construção do modelo hidráulico.

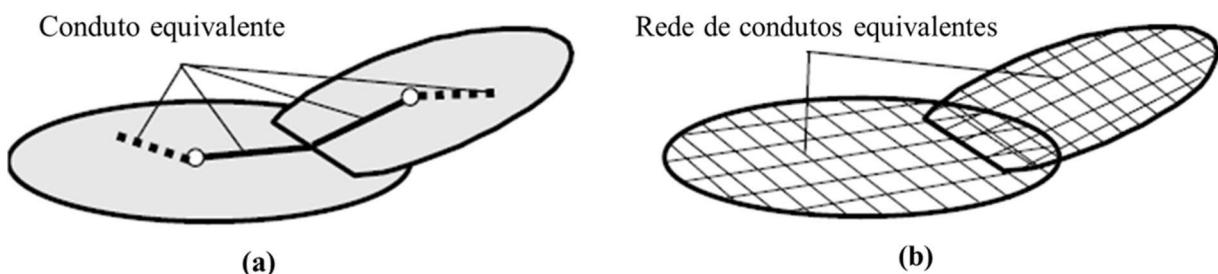
2.3.2 Condutos e canais na modelagem de meios fraturados

Conforme comentado ao fim do tópico anterior, o uso do conceito de condutos e canais unidimensionais equivalentes é uma das formas de modelagem do escoamento e do transporte de solutos em meios fraturados. Tal forma de simulação considera a heterogeneidade da ocorrência do escoamento nestes meios, em virtude da existência de caminhos preferenciais, como consequência da variação de aberturas e rugosidades nas fraturas. Segundo Ubertosi et al. (2007), os caminhos preferenciais observados no fenômeno de *channeling* representam apenas 30% da área da superfície da fratura, indicando que outras regiões destes planos podem permanecer secos.

Para a construção desta rede unidimensional, procede-se primeiramente a geração de uma rede de fraturas discretas, de forma estocástica, a partir de dados de levantamentos de campo. Em seguida, esta rede de fraturas é reduzida aos condutos em uma dimensão, podendo

assumir uma das duas formas indicadas na Figura 24: um único conduto representativo (Cacas et al., 1990a), que interliga os centros das fraturas até as intersecções com as fraturas vizinhas (Figura 24 (a)) ou uma rede arbitrária de condutos (Segan e Karasaki, 1993), que se assemelha a uma malha, sobre o plano da fratura (Figura 24 (b)).

Figura 24 – Formas de representação das fraturas por condutos unidimensionais



Fonte: Adaptado de Jing (2003)

É evidente que tais condutos devem ser parametrizados, de forma que mantenham as mesmas propriedades das fraturas, em termos de trânsito de fluidos. Segundo Bodin et al. (2007), para casos reais, nem sempre tais características são obtidas diretamente a partir de dados de campo, sendo, tal fato, também recorrente a modelagem com a discretização das Equações de Navier-Stokes, onde algumas propriedades também são estimadas ou variadas de forma estocásticas. Neste sentido, observa-se que, em geral, são feitas correlações das propriedades do meio fraturado para a descrição das características dos condutos unidimensionais, variando conforme a forma dos condutos escolhida, conforme visto na Figura 29. Alguns autores, como Moreno e Neretnieks (1993) e Dershowitz (1996) reúnem tais propriedades em uma única constante, chamada de condutância, que serve como fator de proporcionalidade entre a vazão e o gradiente hidráulico, em um determinado trecho do conduto unidimensional.

Um trabalho clássico que utilizou a abordagem de condutos unidimensionais na simulação de meios fraturados é o de Tsang et al. (1988). A partir de resultados teóricos e experimentais da época, que apresentavam as noções básicas do fenômeno de *channeling*, estes autores avaliaram o fluxo e o transporte de solutos em sistemas fraturados, com canais de abertura variável, respeitando uma função de densidade de probabilidade, assim como com

comprimentos espacialmente correlacionados. A comparação dos resultados obtidos no modelo proposto com resultados experimentais foi satisfatória, incentivando o uso de tal abordagem. Porém, a metodologia de geração dos canais unidimensionais apresentada é confusa e não leva em conta outros aspectos geométricos das fraturas, tais como a orientação. Além disso, o modelo de cálculo hidráulico utilizado não é bem detalhado, dificultando a compreensão do que está sendo feito na simulação.

Cacas et al. (1990a) e Casas et al. (1990b) foram pioneiros na utilização da abordagem com único canal representativo para a fratura. Estes autores propuseram a geração estocástica de uma rede discreta de fraturas, utilizando o modelo de Baecher (conforme apresentado no item 2.2.4) e construindo discos circulares tridimensionais, respeitando a densidade de fraturas local e uma distribuição de probabilidade para os seus diâmetros, seguindo os dados estatísticos dos comprimentos das fraturas. Em seguida, os canais são construídos a partir da interligação entre os centros destes discos e a interseção com a fratura vizinha, formando-se então uma rede por onde ocorre o trânsito de fluido, sob uma configuração semelhante à da Figura 24 (a). Os nós da rede são sempre os centros das fraturas, locais estes onde são determinadas as cargas hidráulicas do meio. As vazões são calculadas por trechos, entre estes nós. As relações apresentadas nas Equações 9 e 10 são as utilizadas para estes cálculos, relacionando-se os comprimentos dos trechos, a área da seção considerada e a sua respectiva condutividade hidráulica, além do balanço de massa em cada um dos nós.

$$Q = \frac{1}{\frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2}} (H_1 - H_2) \quad (9)$$

$$\sum Q = 0 \quad (10)$$

Em que:

L_1, L_2 : comprimento dos trechos do conduto, em cada uma das fraturas vizinhas (m).

K_1, K_2 : produto entre área da seção considerada para o conduto e a condutividade hidráulica da respectiva fratura ($m^2 \times m/s$).

H_1, H_2 : cargas hidráulicas em cada uma das extremidades dos condutos (m).

Q : vazão que transita entre dois nós do canal (m^3/s).

Tal autor não indicou uma geometria específica para o conduto unidimensional em sua simulação, embutindo este valor na constante K , indicada nas equações acima. Tal constante foi inserida no modelo por meio de uma distribuição lognormal, simulando-se assim a variação de propriedades hidráulica e de abertura de fraturas no meio simulado, por meio desta constante. É importante ainda evitar a confusão entre esta constante e a verdadeira condutividade hidráulica, comumente também indicada por esta letra. Cacas et al. (1990a) e Cacas et al. (1990b) apresentam a aplicação do modelo a dados obtidos na mina de Fanay-Augères, na França, tanto na modelagem do escoamento quanto para o transporte de soluto. Em ambos os casos, foi observada boa aplicabilidade do modelo de condutos unidimensionais.

Moreno et al. (1988) indicou um termo de resistência para a constante de proporcionalidade entre a vazão que transita em trecho e a diferença de carga hidráulica entre as suas extremidades de condutos unidimensionais. As Equações 11 e 12 correspondem a forma como o referido autor relaciona a vazão com a diferença de carga entre os nós, assim como é obtida a referida constante de proporcionalidade, cuja fórmula é baseada na lei cúbica e na lei de Darcy. É importante salientar que o balanço de massa em cada um dos nós (Equação 10) também continua válido nesta abordagem.

$$Q = R_{ij} \times (P_i - P_j) \quad (11)$$

$$R_{ij} = 6\mu \frac{\Delta x}{\Delta y} \left(\frac{1}{b_i^3} + \frac{1}{b_j^3} \right) \quad (12)$$

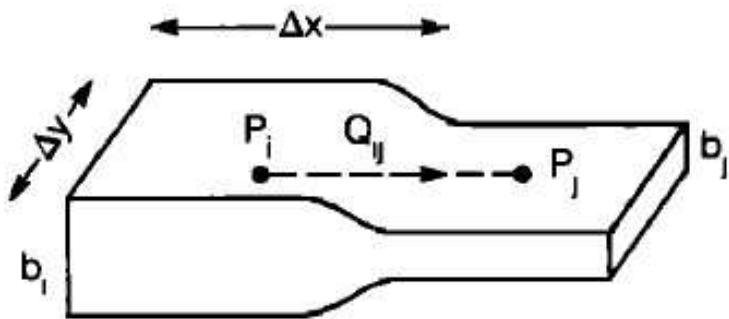
Em que:

R_{ij} : resistência do trecho do conduto unidimensional;

Os demais termos destas equações podem ser visualizados na Figura 25, que exemplifica o caso de uma abertura com variação ao longo do comprimento e que tem seu fator de resistência definido pela referida equação. Nota-se a sua dependência com relação ao comprimento e a largura da fratura, assim como com os valores das aberturas. É importante salientar que Moreno e Neretnieks (1993) e Dershowitz (1996) indicam um termo semelhante e conhecido como condutância e indicado pelo símbolo C_{ij} .

A condutância acima indicada foi definida a partir de simulações de planos de fraturas simples bidimensionais, com aberturas variando a partir de uma distribuição lognormal e com comprimentos correlacionados espacialmente. Como principais resultados, observou-se claramente a ocorrência do fenômeno de *channeling*, com o fluido procurando caminhos preferenciais para o seu trânsito (Moreno et al., 1988).

Figura 25 – Parâmetros para cálculo da condutância, segundo Moreno et al. (1988)



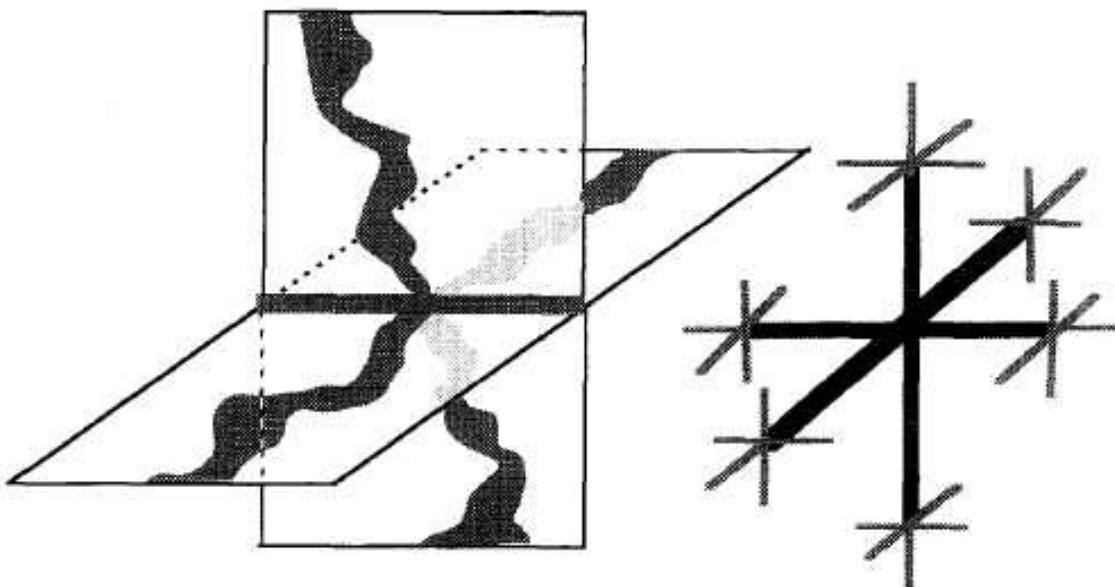
Fonte: Moreno et al. (1988)

Moreno e Neretnieks (1993), já considerando a indicação da condutância pelo símbolo C_{ij} , aplicou o conceito de resistência a trechos de condutos unidimensionais, de forma propriamente dita. Analogamente ao feito por Cacas et al. (1990a), estes autores deixaram tal constante de proporcionalidade como dependente de uma distribuição de probabilidade do tipo lognormal, não estabelecendo uma relação com as propriedades geométricas das fraturas, deixando que a heterogeneidade fosse obtida a partir do aspecto aleatório da referida distribuição. Tal autor observou que o crescimento do desvio padrão das condutâncias promovia um crescimento na ocorrência do fenômeno de *channeling*, comprovando as observações por ele obtidas em seu trabalho anterior.

Nota-se ainda que a obtenção da rede de condutos unidimensionais proposta pelo referido autor é diferente da observada em Cacas et al. (1990), ao considerar que a intersecção entre as fraturas também se apresenta como caminho preferencial para o escoamento. Além disso, o nó base estabelecido é colocado no centro da intersecção entre as fraturas, podendo este receber apenas 6 trechos de condutos unidimensionais, sendo 4 oriundos dos planos das fraturas e 2 referentes à intersecção (Figura 26). Apesar desta consideração com relação ao possível caminho preferencial assumido na intersecção, nota-se que a maioria do escoamento

ocorre realmente sob o plano das fraturas, sendo que ausência desta consideração não afeta grandemente os resultados obtidos.

Figura 26 – Formação dos condutos unidimensionais, segundo Moreno et al. (1993)



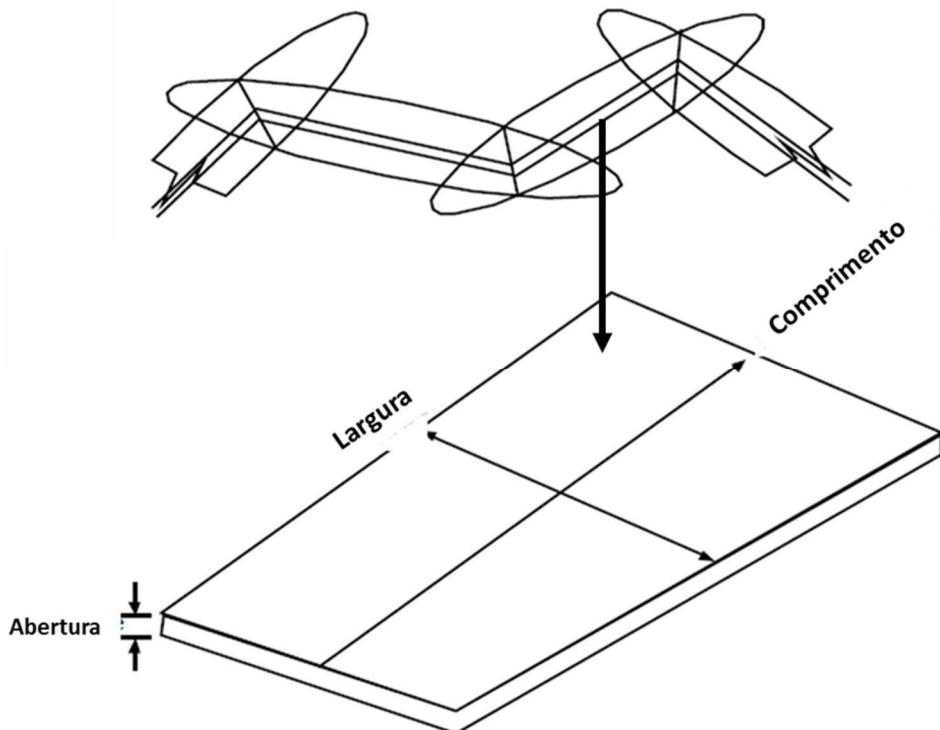
Fonte: Moreno et al. (1993)

Dershowitz (1996) também utilizou o conceito de condutância para a constante de proporcionalidade entre vazão e diferença de carga hidráulica, mas estabeleceu algumas relações para o cálculo das propriedades dos condutos unidimensionais equivalentes, levando em conta as características geométricas da fratura. O traçado dos condutos é feito de forma análoga ao já visto, interligando sucessivamente o centro de uma fratura com a intersecção da fratura vizinha, formando assim uma rede condutora. Os nós que dividem os trechos são sempre os pontos referentes ao centro da fratura (Figura 27).

Os condutos unidimensionais propostos possuem a forma retangular, mantendo a característica de placas paralelas, idealizada para as fraturas, mas com largura e comprimento definidos, diferentemente do visto na aplicação da lei cúbica, onde uma destas dimensões era estendida por todo o volume representativo. Desta forma, estes condutos ocupam apenas uma região da fratura, como indicado na Figura 27. Em termos de propriedades geométricas dos condutos, Dershowitz (1996) indica um passo a passo para a sua estimativa, assim como Outters et al. (2000). Tal caminho será utilizado neste trabalho

e será melhor detalhado no capítulo de metodologia. Com a estimativa de condutância, Dershowitz (1996) propõe a resolução do sistema de equações, representado pelas Equações 13 e 14, para obtenção das cargas hidráulicas nos nós da rede e as vazões que transitam em cada trecho.

Figura 27 – Configuração dos condutos unidimensionais equivalentes, segundo Dershowitz (1996)



Fonte: Adaptado de Outters et al. (2000)

$$Q = C_{ij} \times I_{ij} \quad (13)$$

$$\sum Q = 0 \quad (14)$$

Em que:

C_{ij} : condutância (m^3/s);

I_{ij} : gradiente hidráulico entre dois nós do conduto unidimensional (m/m).

Em outro trabalho, Dershowitz e Fidelibus (1999) desenvolveram outra técnica de obtenção dos valores de condutância para os condutos unidimensionais, a fim de garantir a sua

equivalência as propriedades das fraturas. Baseada no Método dos Elementos de Contorno (em inglês, conhecido por BEM – *Boundary Element Method*), o método propõe a imposição iterativa de condições específicas para cada fratura da rede, em termos de vazões e cargas hidráulicas, deixando assim a condutância como variável desconhecida para determinação. Em termos de comparação, o autor avaliou as vazões obtidas em um escoamento permanente de uma rede de fraturas, utilizando a metodologia proposta para a obtenção dos valores de condutância e a posterior montagem da rede de condutos equivalentes, e a abordagem da discretização das equações na superfície das fraturas. Os erros encontrados foram inferiores a 10%, sendo considerados pequenos ao se avaliar a simplificação feita pelo modelo.

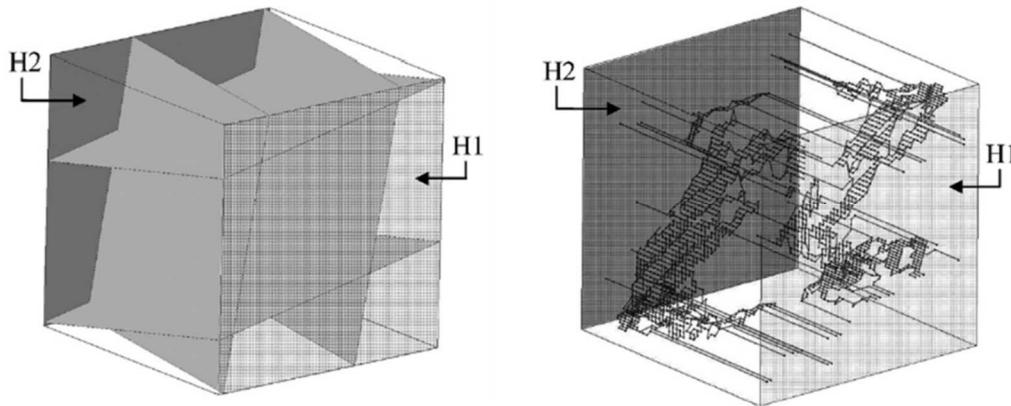
Gylling (1997) e Gylling et al. (1999) trabalhou no desenvolvimento do código computacional CHAN3D, que implementou a metodologia proposta por Moreno et al. (1993) para a construção da rede de condutos unidimensionais, representativos da rede de fraturas discretas. Tal autor também utilizou a distribuição lognormal para a indicação dos valores de condutância ao longo dos canais formados, dependendo de um valor de média e desvio padrão para a sua aplicação. Além disso, observa-se que o autor considerou o posicionamento dos canais em uma malha retangular, a fim de facilitar a visualização e a montagem da rede de canais, que também recebe apenas 6 trechos de condutos, tal como feito por Moreno e Neretnieks (1993). Simulações bem-sucedidas foram realizadas com o referido código computacional, comparando resultados com dados reais disponíveis da mina de Äspö, na Suécia.

Xu et al. (2014) aplicou a abordagem do conduto unidimensional equivalente para um modelo simplificado do reservatório geotérmico de Habanero, na Austrália. Tal autor utilizou todos os avanços obtidos por autores anteriores, especialmente a técnica de Dershowitz et al. (1999), com o uso do BEM, para determinação da condutância dos elementos unidimensionais, refinando a abordagem e relacionando as cargas hidráulicas impostas aos valores de transmissividade das fraturas. Com este procedimento, bons resultados foram obtidos pelo autor, quando comparado a abordagem de discretização do plano das fraturas com as equações gerais de escoamento.

Considerando a segunda forma de utilização de condutos e canais unidimensionais na modelagem de meios fraturados, em que a fratura deixa de ser representada por apenas um

conduto equivalente e passa a ser simulado por uma rede múltipla de canais sobre o plano da descontinuidade (Figura 28), serão destacados dois trabalhos.

Figura 28 – Fraturas representadas por uma rede múltipla de condutos unidimensionais, onde ocorrem a maioria do escoamento do fluido



Fonte: Adaptado de Ubertosi et al. (2007)

Ubertosi et al. (2007) propôs uma nova abordagem de determinação da formação desta rede múltipla de canais, considerando a existência de pontos invariáveis sob os quais o fluido passa, a partir da existência de um gradiente hidráulico. Esta consideração foi verificada a partir da simulação de escoamento em modelos bidimensionais, com condutividade hidráulica distribuída por uma função lognormal, correlacionadas ou não espacialmente. Em termos de equações hidráulicas, a Lei de Darcy e o balanço de massa são aplicados para a determinação das vazões e das cargas hidráulicas.

Nós em que mais 30% do escoamento entre a fonte e o sumidouro são considerados invariantes, sob o ponto de vista de passagem do fluido, e pontos de partida para elaboração destas redes, que podem seguir ou não a orientação do plano das fraturas. Apesar de detalhar de forma interessante o escoamento e permitir claramente a identificação do fenômeno de *channeling*, a forma de obtenção da rede múltipla de condutos unidimensionais proposta pelo autor não é de simples aplicabilidade e, para o caso de um grande número de fraturas a serem simuladas, pode se tornar computacionalmente intensivo.

Bodin et al. (2007) desenvolveu a ferramenta computacional batizada como SOLFRAC, destinada a simulação de transporte de solutos, considerando a abordagem de rede múltipla

de canais unidimensionais sobre o plano das fraturas, em uma forma bidimensional, mas que, segundo os autores, pode ser adaptada ao 3D. Para a realização desta análise, deve-se primeiramente obter os valores de carga hidráulica e vazão nos canais, que também é feita utilizando-se a Lei de Darcy e o balanço de massa, compondo um sistema de equações lineares. Pode-se observar que, apesar de ter sido testado em redes sintéticas, em duas dimensões, a simulação de transporte de solutos usando tal abordagem se mostrou efetiva, quando comparada a algumas soluções analíticas.

Após a verificação de todas as publicações referenciadas neste trabalho, nota-se que a utilização de canais e condutos unidimensionais, em conjunto com a abordagem dos modelos de redes discretas, está bastante presente e se apresenta de forma efetiva para a simulação dos escoamentos e do transporte de solutos em meios fraturados. A principal vantagem do referido método é a menor demanda de capacidade de processamento pelas simulações, ao se utilizar um conjunto de equações lineares para a determinação das variáveis de interesse. Nota-se como principal desafio nesta abordagem a adequação dos fatores de resistência ao escoamento, em termos de uma constante de proporcionalidade entre vazão e gradiente hidráulico, que pode ser indicada por meio de uma distribuição de probabilidade ou calculada, a partir de relações com as propriedades do meio, buscando-se representar adequadamente a heterogeneidade das descontinuidades.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os principais aspectos metodológicos utilizados para o desenvolvimento da ferramenta computacional FratCond, apresentada neste trabalho. Esta aplicação visa modelar o comportamento de aquíferos fraturados, utilizando o modelo de redes de fraturas discretas com a abordagem de condutos unidimensionais equivalentes.

Para isso, a ferramenta FratCond conta com dois módulos específicos. O primeiro consiste em um gerador estocástico de fraturas tridimensional, onde será possível produzir, dentro de um volume elementar inserido pelo usuário e considerando uma densidade volumétrica de fraturas, uma rede de descontinuidades discretas, considerando as principais funções de densidade de probabilidade, para cada uma das características do sistema fraturado e comumente em uso na literatura. Os dados estatísticos destas características são considerados dados de entrada, devendo ser inseridos pelo usuário.

A produção das redes de fraturas discretas é base para o traçado da rede de condutos unidimensionais equivalentes, utilizada na simulação hidráulica. Estes condutos interligarão o centro das fraturas até o centro da respectiva intersecção com a fratura vizinha, de forma sucessiva, criando assim uma interligação entre as fraturas, caso estas se apresentem conectadas. Foi implementada uma rotina adicional que, após a construção destes condutos, elimine aqueles que possivelmente não estejam conectados a um caminho preferencial de escoamento, representando assim descontinuidades que não contribuem para a permeabilidade do meio avaliado.

Com a rede de condutos unidimensionais equivalentes definida, é possível a realização da simulação hidráulica proposta, realizada pelo segundo módulo da ferramenta FratCond. A verificação realizada é de um escoamento do tipo permanente, no interior do volume elementar representativo considerado. São necessários como dados de entrada, primeiramente, as condições de contorno do modelo, que consistem na inserção de cargas hidráulicas relativas a pelo menos uma das faces que delimitam o volume simulado; e em seguida, a forma desejada para a determinação da condutância dos condutos unidimensionais equivalentes. O usuário da ferramenta poderá optar por uma das duas formas: o cálculo desta constante de proporcionalidade segundo a metodologia de Dershowitz et al. (1996), que ainda será detalhada neste capítulo; ou optar pelo uso de uma distribuição do tipo lognormal, como verificado nos trabalhos de Moreno e Neretnieks (1993), Gylling (1997) e Gylling et al. (1999), inserindo assim dados de média e desvio padrão para a utilização da referida distribuição.

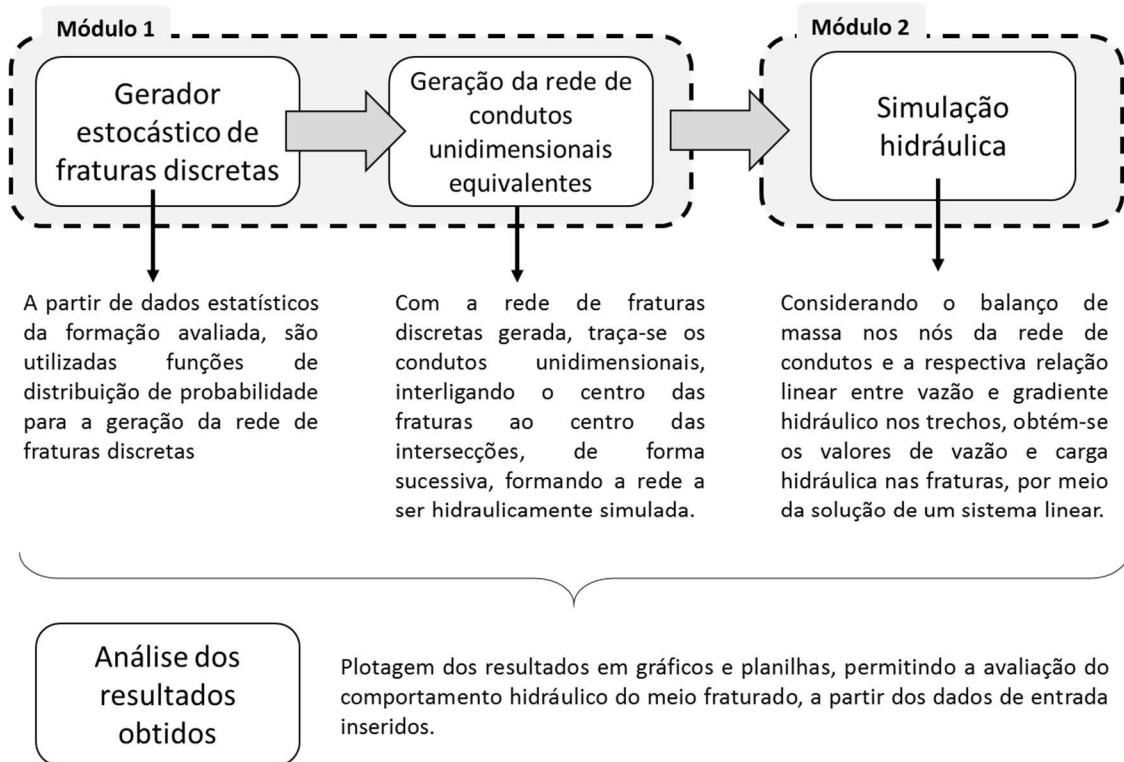
Para a execução da simulação hidráulica e a posterior obtenção dos resultados, a ferramenta computacional resolve o sistema linear composto por duas equações: o balanço de massa em cada um dos nós da rede de condutos, além da relação entre vazão e gradiente hidráulico, tendo a condutância como constante de proporcionalidade. Os dois resultados obtidos são a carga hidráulica em cada um dos nós e a vazão que transita em cada dos trechos dos condutos. Tal sistema é resolvido utilizando uma técnica numérica conhecida na literatura por LSQR (sigla em inglês para *Least Squares with QR Factorization*), desenvolvida por Paige e Sounders (1982), para a resolução de sistemas lineares esparsos e não simétricos, como é o caso obtido nesta simulação.

Após estas etapas, é possível obter os resultados, em termos de geometria gerada estocasticamente e em termos de resultados hidráulicos, considerando a abordagem simplificada dos condutos unidimensionais equivalentes. Planilhas e gráficos permitirão ao usuário do FratCond a visualização rápida e facilitada de todos os parâmetros de interesse obtidos, tanto no primeiro quanto no segundo módulo. A partir de um exemplo hipotético, algumas das possibilidades de análise dos resultados fornecidos pela ferramenta serão explorados nesta dissertação.

A Figura 29 resume as etapas metodológicas aqui descritas sucintamente e que serão melhor

detalhadas nos tópicos a seguir. Todas estas etapas demandam dados de entrada, que serão citados e comentados ao longo deste texto. Tais dados deverão ser inseridos pelo usuário, em uma interface gráfica amigável e de simples compreensão, também desenvolvida para a referida ferramenta. Desta forma, o usuário não tem contato direto com o código desenvolvido, evitando possíveis alterações ou violações, que interfiram nas rotinas.

Figura 29 – Etapas de execução de simulação na ferramenta FratCond



Fonte: Autor (2018)

A ferramenta FratCond foi desenvolvida no pacote computacional MATLAB, considerando as seguintes razões, em detrimento a outros pacotes:

- A possibilidade de criação de rotinas programáveis, utilizando uma linguagem própria, de fácil utilização e de implementação semelhante ao visto em outras linguagens, tais como o C, o Fortran e o Visual Basic;
- Possuir funções pré-definidas, de interesse para uso neste trabalho, tais como as funções de densidade de probabilidade, que permitem a geração estocástica proposta de forma rápida e fácil; assim como aquelas voltadas a solução de sistemas lineares, não demandando a criação de rotinas adicionais;
- Permitir o uso direto de matrizes e vetores para alocação das variáveis que precisam

ser armazenadas, sem a necessidade prévia de declaração destas.

- A possibilidade de exibição gráfica dos resultados, já contemplada pelo ambiente, por funções de plotagem incorporadas;
- A possibilidade de criação de uma interface gráfica, de forma independente as linhas de programação, impedindo o acesso ao código implementado.

3.1 GERADOR ESTOCÁSTICO DE FRATURAS DISCRETAS

Como visto na revisão bibliográfica, o uso da abordagem estatística e estocástica na geração de redes de fraturas discretas para a modelagem de meios fraturados é bastante corriqueira e também faz parte da metodologia deste trabalho. Esta geração corresponde a primeira etapa executada pelo módulo 1 da ferramenta FratCond, como visto no esquema da Figura 29, sendo dependente de alguns dados de entrada, que devem ser inseridos pelo usuário.

O primeiro dado a ser inserido é o tamanho do volume elementar representativo 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. Outra alternativa é considerar a possível presença de poços de observação, que delimitem um volume que será simulado, uma vez que estes poços fornecerão as condições de contorno necessárias para a simulação hidráulica.

Em geral, tal volume assume a forma cúbica, sendo a dimensão de sua aresta, em metros, o dado a ser fornecido pelo usuário da ferramenta, 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 pelo usuário da ferramenta 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, tais como a orientação, o espaçamento e a frequência. 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. Mesmo o diagrama de roseta, para a indicação de orientações levantadas em um conjunto de fraturas, é construído em intervalos de 5 em 5 ou de 10 em 10 graus, e não de forma individual.

Como observado na literatura corrente, em geral, o número de famílias de fraturas em uma formação varia de 2 a 5, sem a consideração de possíveis anomalias locais. Em termos de simulações, é raro encontrar modelos gerados com mais de duas famílias de fraturas, assumindo quase sempre direções perpendiculares entre si. Neste sentido, a ferramenta FratCond permite que o usuário opte pela inserção de 1 até 5 famílias para geração estocástica da rede discreta de fraturas. Ao menos uma família deve ser caracterizada para que a simulação seja possível.

Os próximos dados de entrada devem ser inseridos para cada uma das famílias, pois se trata especialmente das características físicas das fraturas que as compõem. O terceiro dado, seguindo a ordem inicial, corresponde a 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 no volume representativo inserido para a simulação. Como forma de indicação deste número, é comum a contagem dos centros de fratura que estão inseridos na referida região. Assim, mesmo que a fratura não esteja com área inteiramente no interior do volume, ela pode fazer parte da contagem, desde que seu centro esteja lá contido.

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 VER inserido pelo usuário e a respectiva densidade para esta determinação. Com este valor, o próximo passo é locar o centro das fraturas no volume a ser simulado. Para isso, será utilizado uma função de densidade de probabilidade do tipo uniforme (ou random, como comumente é identificada nos pacotes computacionais), para geração aleatória das coordenadas (x , y , z) dos centros das fraturas, no interior do volume definido para a simulação. Esta FDP é dada pela Equação 15 e ilustrada pela Figura 30:

$$f(x) = \frac{1}{b - a} \quad (a < x < b) \quad (15)$$

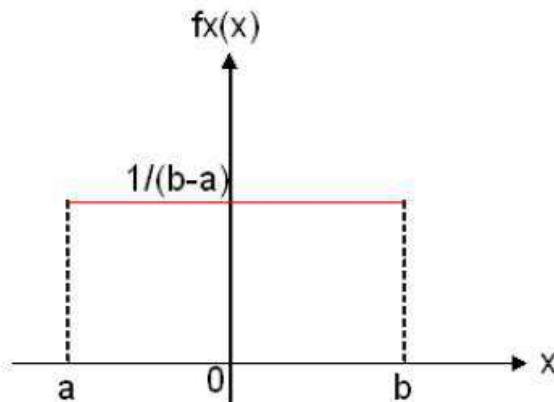
Em que:

x : variável aleatória;

b : é o limite superior do intervalo que contém os valores buscados;

a : é o limite inferior do intervalo que contém os valores buscados;

Figura 30 – Distribuição uniforme no intervalo $[a,b]$



Fonte: Telles (2006)

A geração de um número aleatório seguindo a distribuição uniforme é feita utilizando a Equação 16. Primeiramente, gera-se um número aleatório u no intervalo entre 0 e 1. Posteriormente, multiplica-se este número pela amplitude do intervalo $[a, b]$ para o qual deseja-se o número gerado. Soma-se este resultado ao limite inferior do intervalo a , obtendo-se por fim o valor buscado u_u .

$$u_u = a + (b - a) \times u \quad (16)$$

No MATLAB, tal procedimento é realizado pelas linhas de código indicadas nas Equações 17, 18, e 19, considerando cada uma das coordenadas que compõem os centros das fraturas. É necessário informar os limites superior e inferior dos intervalos desejados, que correspondem aos limites do volume de simulação; assim como a quantidade de números aleatórios a serem gerados, que correspondem a quantidade de fraturas da família analisada.

$$X = \text{random}('unif', xmin, xmáx, nf, 1) \quad (17)$$

$$Y = \text{random}('unif', ymin, ymáx, nf, 1) \quad (18)$$

$$Z = \text{random}('unif', zmin, zmáx, nf, 1) \quad (19)$$

Em que:

X, Y, Z : variáveis matriciais que recebem as coordenadas geradas para os eixos x, y e z, respectivamente.

$x_{min}, x_{máx}; y_{min}, y_{máx}; z_{min}, z_{máx}$: limites inferior e superior do volume a ser simulado, ao longo de cada um dos eixos coordenados.

$nf, 1$: número de linhas e colunas que as variáveis matriciais X, Y, Z assumem, após a geração das coordenadas dos centros. Neste caso, tais variáveis se comportam como um vetor coluna, com número de linhas igual ao número de fraturas da referida família (nf).

Com os centros das fraturas locados, a próxima etapa consiste em dar forma geométrica as fraturas que serão geradas. Neste trabalho, será considerado o uso do Modelo de Baecher, para representação das fraturas de forma tridimensional, em virtude da sua simplicidade de implementação e da sua adequação ao modelo hidráulico a ser utilizado. Tal modelo representa as fraturas por discos circulares, locados espacialmente a partir de seus centros, cujas coordenadas são obtidas a partir da etapa anterior. Tais discos podem ter diâmetros constantes ou assumirem uma distribuição de probabilidade. Será considerado o uso de uma distribuição do tipo lognormal, sendo os valores estatísticos de comprimentos de fraturas utilizados como base para obtenção dos diâmetros do disco representativo da fratura.

A função de densidade de probabilidade do tipo lognormal tem a forma apresentada na Equação 20, sendo diretamente dependente da média e do desvio padrão da variável avaliada. A Figura 31 ilustra esta FDP considerando um mesmo valor de média com diferentes desvios padrão. Observa-se a grande variação dos gráficos apresentados, diferentemente do que se observa em outras distribuições de probabilidade.

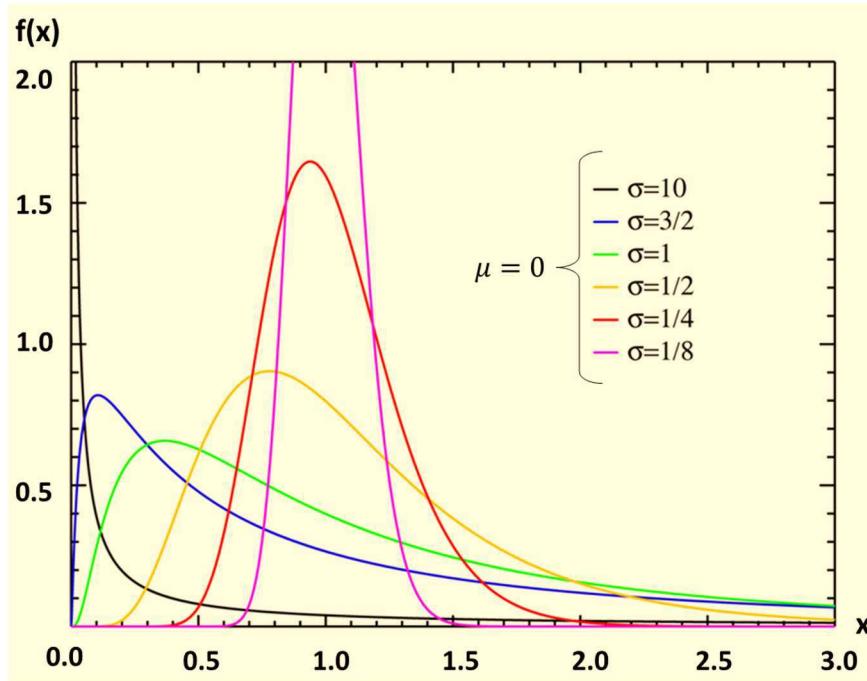
$$f(x) = \frac{1}{x \sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ \frac{-(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (20)$$

Em que:

x : variável aleatória;

μ, σ : média e desvio padrão da variável analisada.

Figura 31 – Distribuição lognormal, com $\mu = 0$ e diferentes valores de desvio padrão



Fonte: Autor (2018)

A obtenção de um número aleatório seguindo a distribuição lognormal é feita utilizando a relação apresentada na Equação 21. Primeiramente, gera-se um número aleatório u_n a partir de uma distribuição do tipo normal, com média μ e desvio padrão σ . Posteriormente, o exponencial de u_n corresponde ao valor buscado na distribuição lognormal, u_l .

$$u_l = \exp u_n \quad (21)$$

Assim, nota-se que o logaritmo de uma variável com distribuição lognormal, com parâmetros estatísticos μ e σ , tem uma distribuição normal, com os mesmos parâmetros μ e σ .

No MATLAB, a geração de números respeitando a referida FDP é feita utilizando-se a linha de código indicada na Equação 22, a qual permitirá a obtenção dos diâmetros dos discos representativos das fraturas.

$$D = \text{random}('logn', \mu, \sigma, nf, 1) \quad (22)$$

Em que:

D : variável matricial que recebe os valores dos diâmetros, obtidos a partir da referida distribuição.

μ, σ : média e desvio padrão do comprimento das fraturas, cujos valores devem ser informados pelo usuário da ferramenta.

$nf, 1$: analogamente ao visto na geração dos centros das fraturas, tais valores correspondem ao número de linhas e colunas que a variável matricial D assume, após a geração dos valores dos diâmetros. Neste caso, tal variável se comporta como um vetor coluna, com número de linhas igual ao número de fraturas da referida família (nf).

Outro dado da caracterização das fraturas a ser definido neste momento é a abertura das fraturas, que será considerada no cálculo das transmissividades, no momento da aplicação do modelo hidráulico. Como referenciado na bibliografia, esta característica também assume uma distribuição estatística do tipo lognormal, a qual também será adotada neste trabalho. Desta forma, as equações previamente apresentadas para a determinação dos diâmetros dos discos representativos das fraturas também são válidas para os valores das aberturas. A média e o desvio padrão deste espaçamento devem ser fornecidas pelo usuário, para a correta execução da distribuição. Analogamente aos dados anteriores, o dado de saída será um vetor coluna, com a quantidade de linhas igual ao número de fraturas de cada uma das famílias geradas.

A determinação da sua orientação é outro parâmetro necessário para a descrição das fraturas. Conforme visto na literatura, as distribuições estatísticas mais utilizadas para a caracterização desta propriedade das fraturas são a do tipo normal e de Fisher, sendo esta última mais aplicada para modelos tridimensionais. Neste sentido, a distribuição de Fisher (Equação 23) também será utilizada neste trabalho, conforme a descrição matemática feita por Mardia (1972).

$$f(\theta, \varphi) = \frac{k e^{k \cos \theta} \sin \theta}{4 \pi \operatorname{senh} k} \quad (23)$$

Em que:

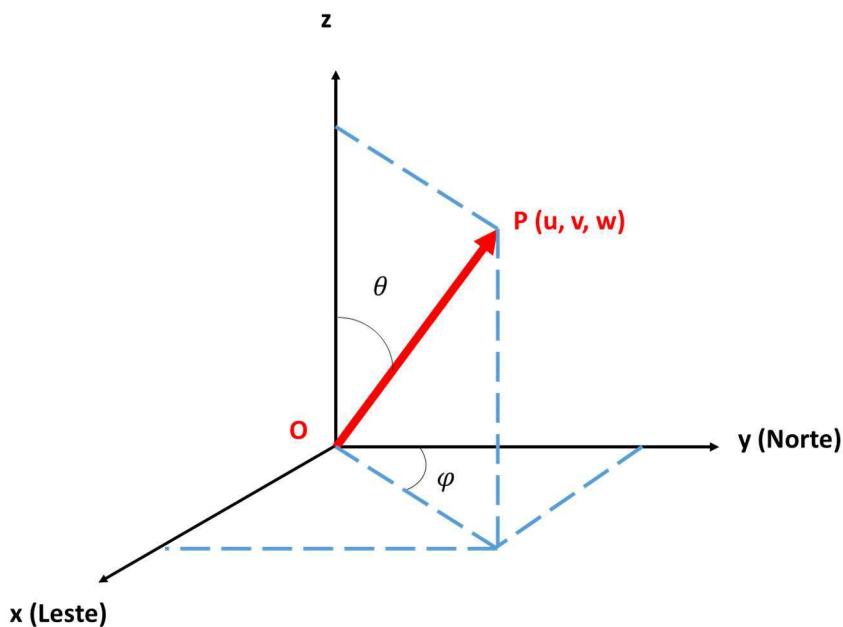
θ : ângulo de divergência com relação a direção média considerada;

k : parâmetro de Fisher, que considera uma possível dispersão em relação a direção média.

Observando a biblioteca de funções do MATLAB, nota-se que o mesmo não possui uma função direta para geração de números, considerando a distribuição de Fisher. Desta forma, foi necessário o desenvolvimento de uma rotina adicional, para obtenção dos ângulos de orientação das fraturas geradas estocasticamente, seguindo a referida FDP. Tal rotina foi desenvolvida, com adaptações, a partir das ideias trazidas por Telles (2006).

A distribuição de Fisher é feita considerando os vetores normais aos planos das fraturas. A obtenção destes vetores (Figura 32) corresponde ao primeiro passo de aplicação da distribuição de Fisher, sendo calculados a partir de relações trigonométricas, exibidas nas Equações 24, 25 e 26. Estas equações são dependentes dos valores médios dos ângulos de direção (*strike*) e de mergulho (*dip*) do plano da fratura considerados, que são dados de entrada a serem fornecidos pelo usuário da ferramenta FratCond.

Figura 32 – Obtenção do vetor normal unitário ao plano da fratura avaliada



Fonte: Autor (2018)

$$u = \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \varphi \quad (24)$$

$$v = \operatorname{sen} \theta \cos \varphi \quad (25)$$

$$w = \cos \theta \quad (26)$$

Em que:

u, v, w : componentes do vetor normal unitário ao plano da fratura avaliada, nas direções dos eixos x, y e z, respectivamente.

θ : ângulo de mergulho (*dip*), mensurado em relação ao eixo z. Este dado é fornecido diretamente pelo usuário. $(0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2})$

φ' : ângulo de direção (*strike*), mensurado em relação ao eixo y. Este dado é fornecido diretamente pelo usuário. $(0 \leq \varphi \leq 2\pi)$

Ressalta-se que cada uma das famílias de fraturas terá um vetor normal unitário como base, a partir dos dados angulares fornecidos. Assim, se a simulação proposta pelo usuário possuir 3 famílias, 3 vetores base serão originados a partir da sistemática apresentada acima. E assim, de forma análoga, para outras quantidades de famílias.

Após a geração dos vetores normais, o passo seguinte na aplicação da distribuição de Fisher é rotacionar o vetor obtido, de forma que ele fique paralelo ao eixo z. Esta ação é importante para simplificar a implementação da referida distribuição estatística. Esta rotação foi realizada em duas etapas, conforme exemplificado na Figura 33. Em ambas, a rotação foi realizada no sentido anti-horário. Em termos matemáticos, os vetores obtidos na etapa anterior são multiplicados por matrizes de rotação em torno dos eixos coordenados, conforme mostrado nas Equações 27 e 28.

Primeira rotação:

$$\overrightarrow{OP'} = A \times \overrightarrow{OP} \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \operatorname{sen} \varphi & 0 \\ \operatorname{sen} \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$$

Segunda rotação:

$$\overrightarrow{OP''} = B \times \overrightarrow{OP'} \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} u'' \\ v'' \\ w'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\operatorname{sen} \theta \\ 0 & \operatorname{sen} \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix}$$

Em que:

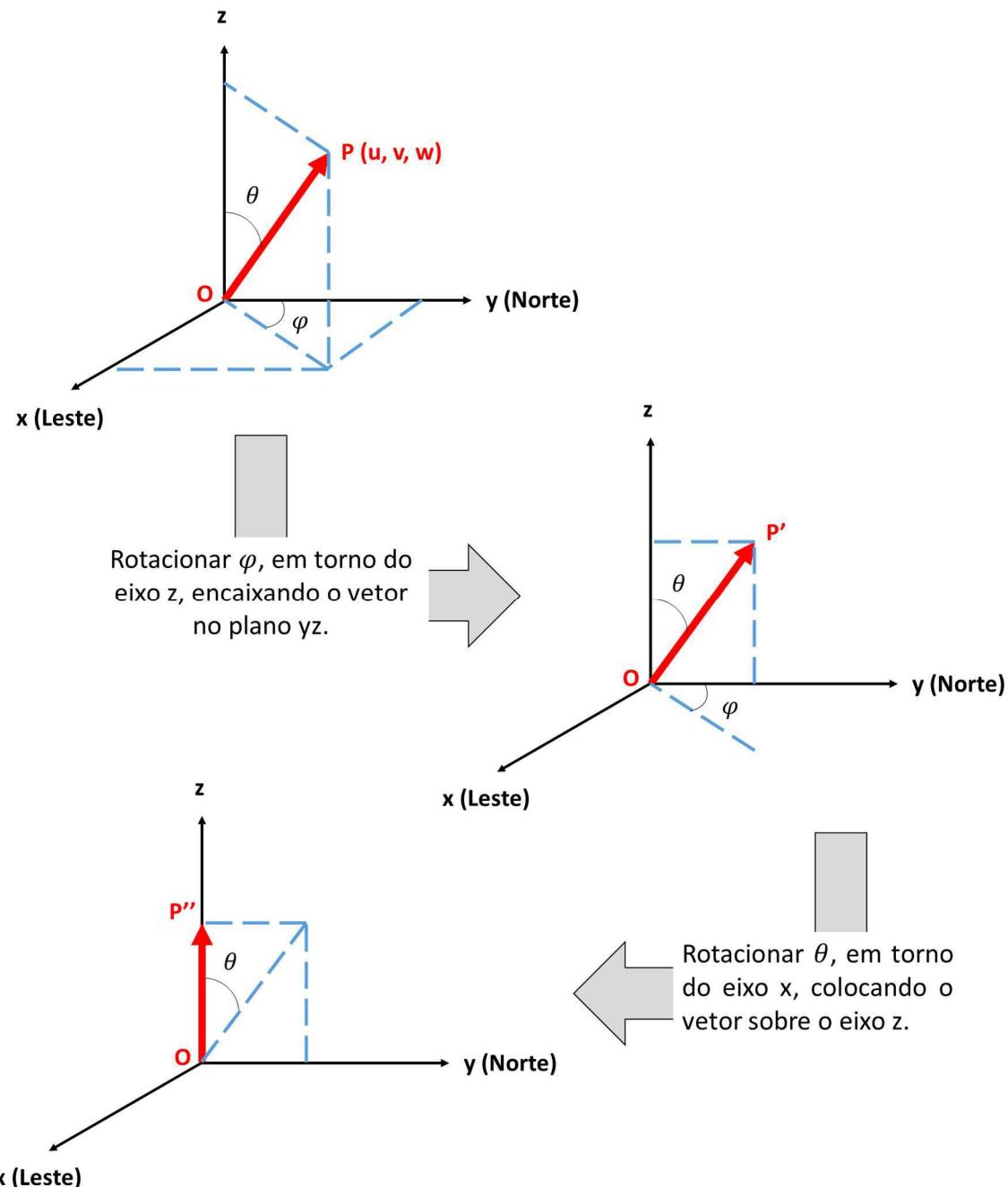
A, B : matrizes de rotação de vetores em torno dos eixos coordenados.

\overrightarrow{OP} : vetor normal unitário gerado na etapa anterior.

\overrightarrow{OP}' : vetor resultante da primeira rotação.

\overrightarrow{OP}'' : vetor resultante da segunda rotação.

Figura 33 – Rotação do vetor normal unitário, tornando-o paralelo ao eixo z



Fonte: Autor (2018)

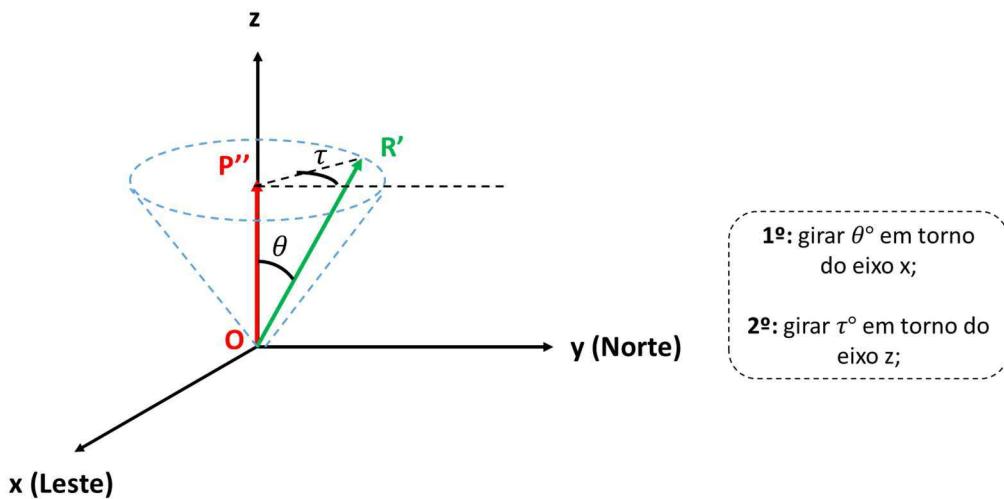
Após esta rotação, a terceiro passo para aplicação da distribuição de Fisher consiste na aplicação de uma rotina, estabelecida por Telles (2006), com as seguintes as etapas:

- gera-se um número aleatório u , a partir de uma distribuição uniforme, no intervalo $[0, 1]$;
- gera-se um ângulo aleatório θ (Equação 29), usando o valor de u gerado no passo anterior, além do valor do parâmetro k de Fisher, inserido pelo usuário como dado de entrada. Mais detalhes sobre este parâmetro serão dados em seguida.

$$\theta = \arccos\left(1 + \frac{\ln(1-u)}{k}\right) \quad (29)$$

- gera-se um novo número aleatório τ , a partir de uma distribuição uniforme, no intervalo $[0^\circ, 360^\circ]$.
- Determina-se o vetor $\overrightarrow{OR'}$, a partir da rotação do vetor $\overrightarrow{OP''}$ pelos ângulos θ e τ . (Figura 34).

Figura 34 – Obtenção do vetor o vetor $\overrightarrow{OR'}$ durante a aplicação da distribuição de Fisher



Fonte: Autor (2018)

O parâmetro k de Fisher presente na Equação 29 e pedido como dado de entrada ao usuário da ferramenta FratCond pode ser entendida como uma medida de dispersão das direções dos vetores normais aos planos das fraturas. Segundo Telles (2006), este parâmetro pode ser estimado para uma amostra de fraturas a partir da relação apresentada na Equação 30, que leva em conta o vetor resultante R de todos os vetores da amostra e a quantidade de dados M dentro da amostra avaliada.

$$k = \frac{M - 1}{M - R} \quad (30)$$

Segundo Vargas (2001 apud Telles, 2006), se os vetores que compõem a amostra analisada são quase paralelos, implicando em fraturas também paralelas, então a resultante R tende a se aproximar de M , fazendo com que k tenda ao infinito. No sentido oposto, se os vetores se apresentam bastante dispersos, então a resultante R e parâmetro k tendem a ser pequenos.

Para finalizar a geração do vetor aleatório, respeitando a distribuição de Fisher, deve-se promover a rotação inversa do vetor \overrightarrow{OR} , utilizando as matrizes A e B indicadas nas Equações 27 e 28, retornando assim o vetor gerado a posição próxima ao vetor de origem. Como as rotações promovidas pelas referidas matrizes são realizadas no sentido anti-horário, deve-se substituir os ângulos por $360^\circ - \varphi$ e $360^\circ - \theta$, garantindo que a rotação seja feita de forma inversa.

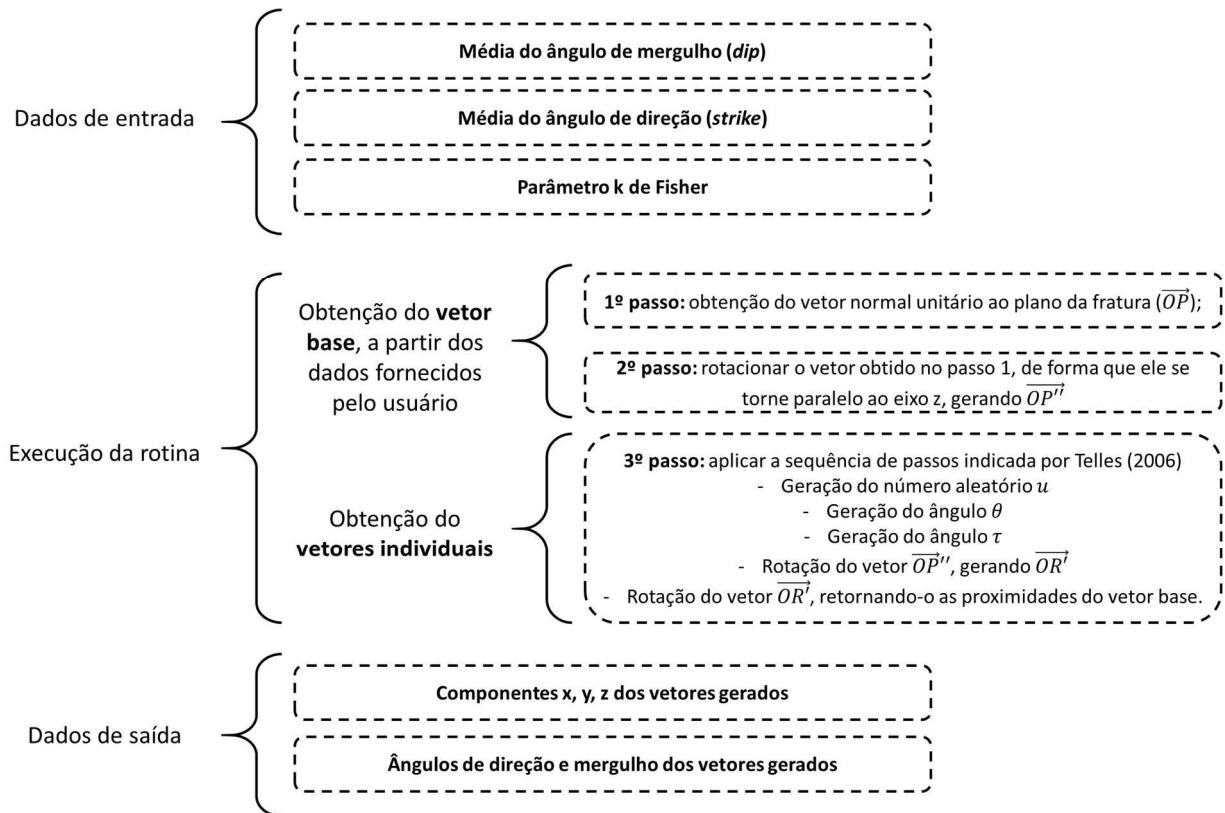
É importante salientar que o terceiro passo é repetido, dentro da programação da ferramenta FratCond, a quantidade de vezes necessárias para gerar os vetores de uma referida família. Assim, se uma família possui 5 fraturas, serão gerados um único vetor base, com os dados fornecidos para a família, no primeiro e segundo passos. Em seguida, no terceiro passo, 5 vetores serão gerados, seguindo a distribuição de Fisher, a partir do vetor base.

A Figura 35 resume os passos explicados nos últimos parágrafos e que permitiram a implementação da rotina de geração de vetores normais, seguindo a distribuição de Fisher. Como dados de saída desta rotina, serão repassados ao usuário as componentes x, y, z unitárias dos vetores gerados, assim como os respectivos ângulos de mergulho e de direção destes vetores, que representarão a orientação das fraturas geradas pelo primeiro módulo da ferramenta FratCond.

Inseridos tais dados, a caracterização das famílias de fratura está finalizada. É importante relembrar que os dados de densidade volumétrica, comprimentos, orientação e abertura devem ser inseridos para cada uma das famílias presentes na formação. Para facilitar a visualização dos dados de entrada, a Tabela 2 resume quais as informações devem ser fornecidas pelo usuário para execução do módulo 1 da ferramenta FratCond. Uma interface

iterativa foi construída para ferramenta proposta e será apresentada na etapa de resultados deste texto. Com ela, é possível que o usuário perceba rapidamente quais dados devem ser inseridos.

Figura 35 – Resumo dos passos de implementação da distribuição de Fisher



Fonte: Autor (2018)

Tabela 2 – Resumo dos dados de entrada para o módulo 1 da ferramenta FratCond

Dados iniciais do modelo	Formato e dimensões do volume de simulação	<u>Forma cúbica:</u> - Dimensão da aresta (m) <u>Forma prismática:</u> - Comprimento (m): dimensão ao longo do eixo x - Largura (m): dimensão ao longo do eixo y - Profundidade (m): dimensão ao longo do eixo z
	Número de famílias de fraturas na formação	Número inteiro de famílias caracterizadas estatisticamente e que serão geradas no modelo

(Continuação Tabela 2)

Dados para cada uma das famílias	Densidade volumétrica de fraturas	Número de fraturas por metro cúbico de volume (1/m ³)
	Comprimento das fraturas	μ : média (m) σ : desvio padrão (m)
	Abertura das fraturas	μ : média (mm) σ : desvio padrão (mm)
	Orientação das fraturas	μ_θ : média do ângulo de mergulho (°) μ_φ : média do ângulo de direção (°) k : parâmetro de dispersão da distribuição de Fisher

Fonte: Autor (2018)

Com relação aos dados de saída, obtidos na geração estocástica das fraturas, todos eles assumirão a forma de um vetor coluna, se aproveitando da característica matricial das variáveis criadas no ambiente do MATLAB. A quantidade de linhas de cada um dos vetores é igual ao número total de fraturas, sendo que as famílias têm seus dados ordenados em sequência, partindo da família 1 até a família 5. Isso permite que as fraturas sejam identificadas a partir da linha que estão seus dados, podendo estes serem recuperados facilmente dentro das variáveis criadas para o seu armazenamento.

A Figura 36 apresenta a representação do armazenamento das informações geradas estocasticamente, na forma de uma tabela. As linhas correspondem ao número identificador de cada uma das fraturas geradas, variando assim até atingir o número total de fraturas (n_f). Já as colunas correspondem a cada uma das informações obtidas na geração estocástica. Cruzando linhas e colunas, obtém-se rapidamente o dado buscado para a determinada fratura, facilitando o uso das variáveis ao longo das rotinas necessárias na ferramenta FratCond.

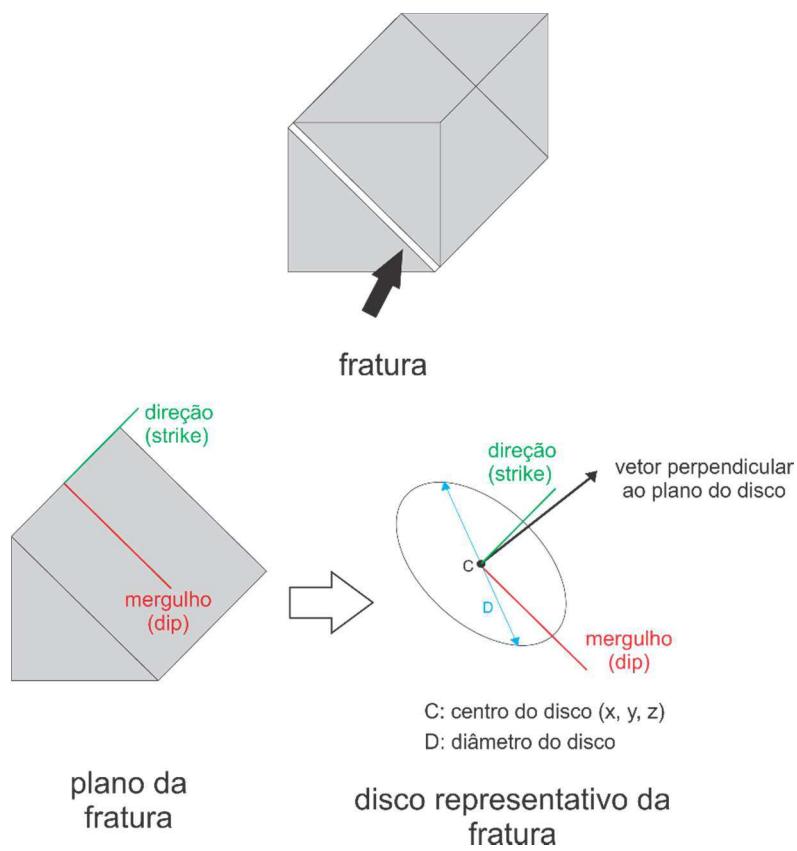
Já a Figura 37 apresenta esquematicamente os discos representativos das fraturas obtidos nesta primeira etapa do módulo 1 da ferramenta FratCond. Todos os dados obtidos nesta etapa são utilizados nesta representação. É possível ainda nesta figura perceber a relação da fratura real com o respectivo disco representativo.

Figura 36 – Forma do armazenamento dos dados gerados estocasticamente

Vetores	Localização dos centros			Diâmetro dos discos representativos	Abertura das fraturas	Orientação – vetor unitário			Orientação - ângulos	
Nº fraturas	X	Y	Z	D	a	u	v	w	ang1	ang2
1										
2										
3										
4										
.										
.										
.										
n_f										

Fonte: Autor (2018)

Figura 37 – Representação esquemática dos discos representativos das fraturas



Fonte: Autor (2018)

3.2 GERAÇÃO DE REDES DE CONDUTOS UNIDIMENSIONAIS

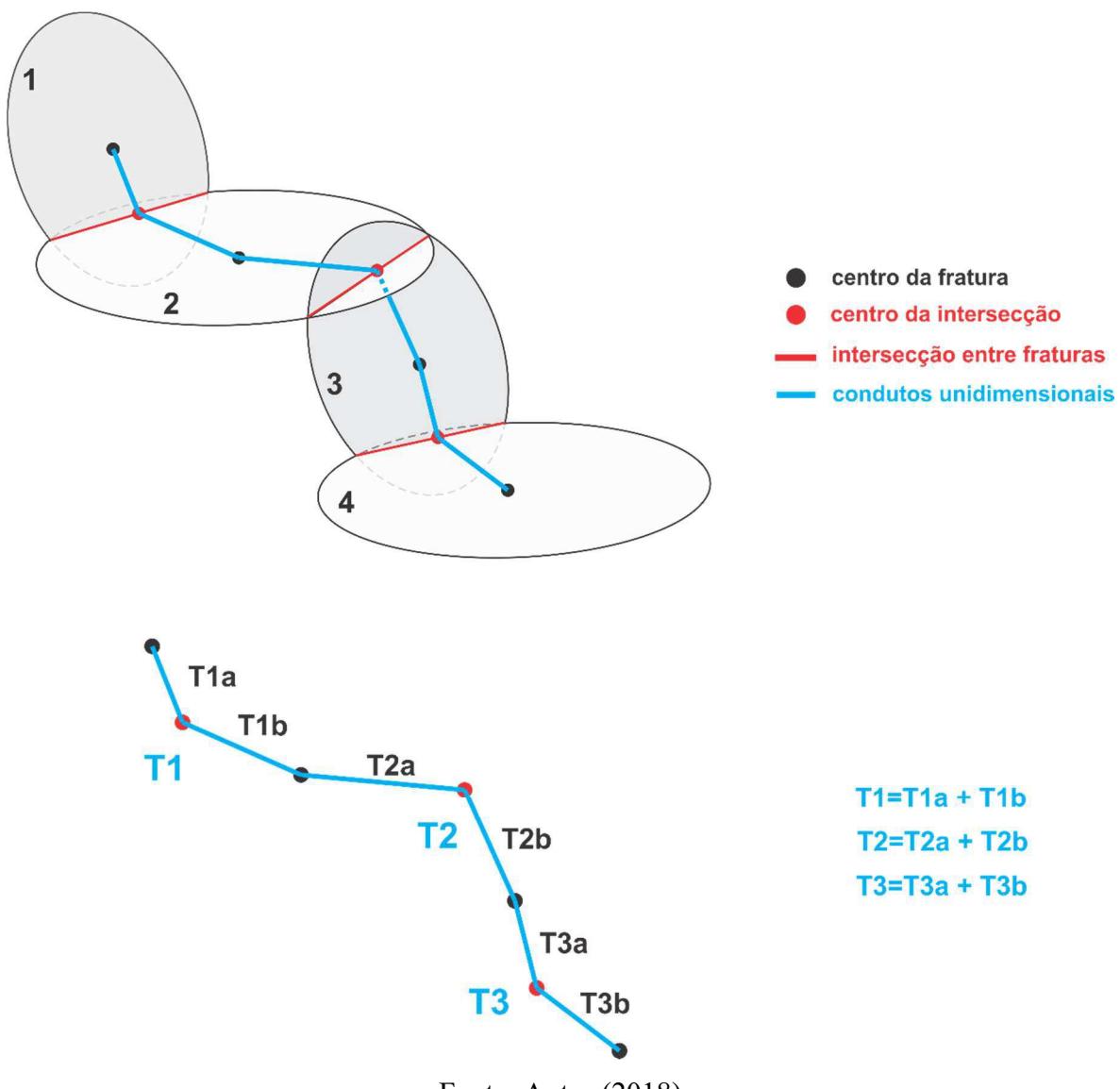
Após a geração da rede de fraturas discretas, a segunda ação executada pelo módulo 1 da ferramenta FratCond é a geração dos trechos de condutos unidimensionais equivalentes, que serão utilizados na simulação hidráulica. Tais condutos mantém as características das fraturas, em termos de orientação, sendo criados sobre o plano de cada um dos discos representativos das fraturas, gerados na etapa anterior.

A criação dos trechos de condutos unidimensionais é feita a partir da ligação entre os centros das fraturas, cujas coordenadas foram geradas na etapa anterior, a partir de uma distribuição uniforme e armazenadas na forma matricial; e o centro da intersecção da referida fratura com a fratura vizinha, que são determinadas nesta etapa. Em seguida, o ponto localizado na intersecção deve ser interligado ao centro da segunda fratura, formando assim o trecho completo.

Lembra-se que os nós de referência dos trechos unidimensionais são sempre os centros das fraturas, uma vez que nestes pontos serão determinados os valores de carga hidráulica representativos para cada fratura; além de que, nestes pontos, podem ocorrer encontros entre diferentes trechos, demandando a realização de um balanço de vazões. O centro das intersecções são apenas base para o traçado do conduto, mas não configuram um nó propriamente dito, já que não terão sua carga hidráulica calculada e nem são pontos de encontro de diferentes trechos, não provocando variação entre vazão de entrada e saída do ponto.

A Figura 38 apresenta esquematicamente tal procedimento de traçado dos condutos unidimensionais, apesar de figuras anteriores, produzidas por outros autores, já terem elucidado tal processo. Nota-se que os trechos foram divididos em duas partes, considerando a interligação primeiro centro-interseção e interseção-segundo centro. Observa-se ainda que nos pontos de interseção, os condutos unidimensionais têm sua direção alterada, de forma a acompanhar a orientação do plano da fratura, conforme obtido na primeira etapa do módulo 1 da ferramenta FratCond. A repetição desta técnica, ao longo de todas as fraturas conectadas entre si, permite a obtenção da rede de condutos unidimensionais representativas do sistema fraturado em estudo, gerado de forma estocástica.

Figura 38 - Traçado dos condutos unidimensionais equivalentes



Fonte: Autor (2018)

Toda fratura que se apresente conectada a uma segunda fratura tem seus trechos de condutos unidimensionais equivalentes traçados. Fraturas que não se interceptam com outras fraturas não terão condutos representativos traçados, uma vez que existe a dependência da interseção para estabelecimento de um conduto unidimensional.

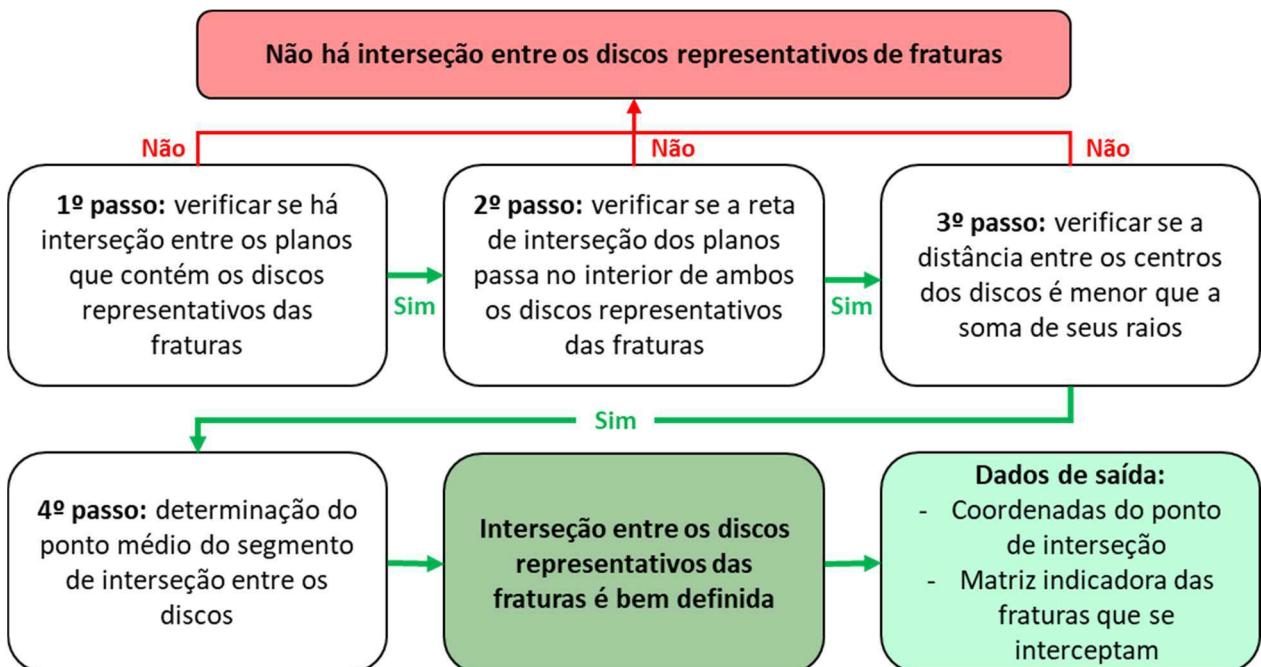
É importante salientar que, para a simulação hidráulica, será considerado apenas as maiores conexões entre fraturas existentes obtidas, configurando assim a maior extensão de condutos unidimensionais equivalentes, que possivelmente percorram todo o volume simulado. Trechos secundários, com menor número de interseções entre fraturas, mas que não estejam conectados ao trecho mais longo, não serão simulados hidráulicamente, passando a

representar fraturas que não contribuem efetivamente para a permeabilidade do meio rochoso simulado.

Como já comentado, os segmentos dos trechos de condutos unidimensionais serão definidos a partir da ligação de pontos notáveis. As coordenadas do centro das fraturas já são conhecidas da etapa anterior, restando a definição dos pontos na intersecção das fraturas. Neste sentido, foi desenvolvida uma rotina para determinação do cruzamento entre os discos representativos das fraturas e a posterior obtenção de seus pontos médios.

A Figura 39 resume os quatro passos da rotina implementada para a determinação da intersecção das fraturas na ferramenta FratCond. Tais passos serão detalhados a seguir e são executados sempre de duas em duas fraturas. Além da determinação das coordenadas do ponto de intersecção, que servirá para o traçado dos condutos unidimensionais, tal rotina também fornece como dado de saída uma matriz de duas colunas, que identifica quais fraturas tiveram intersecção detectada. Esta matriz será importante, tanto para a plotagem de resultados, quanto para a determinação de condutos mais extenso, a ser utilizado na simulação hidráulica.

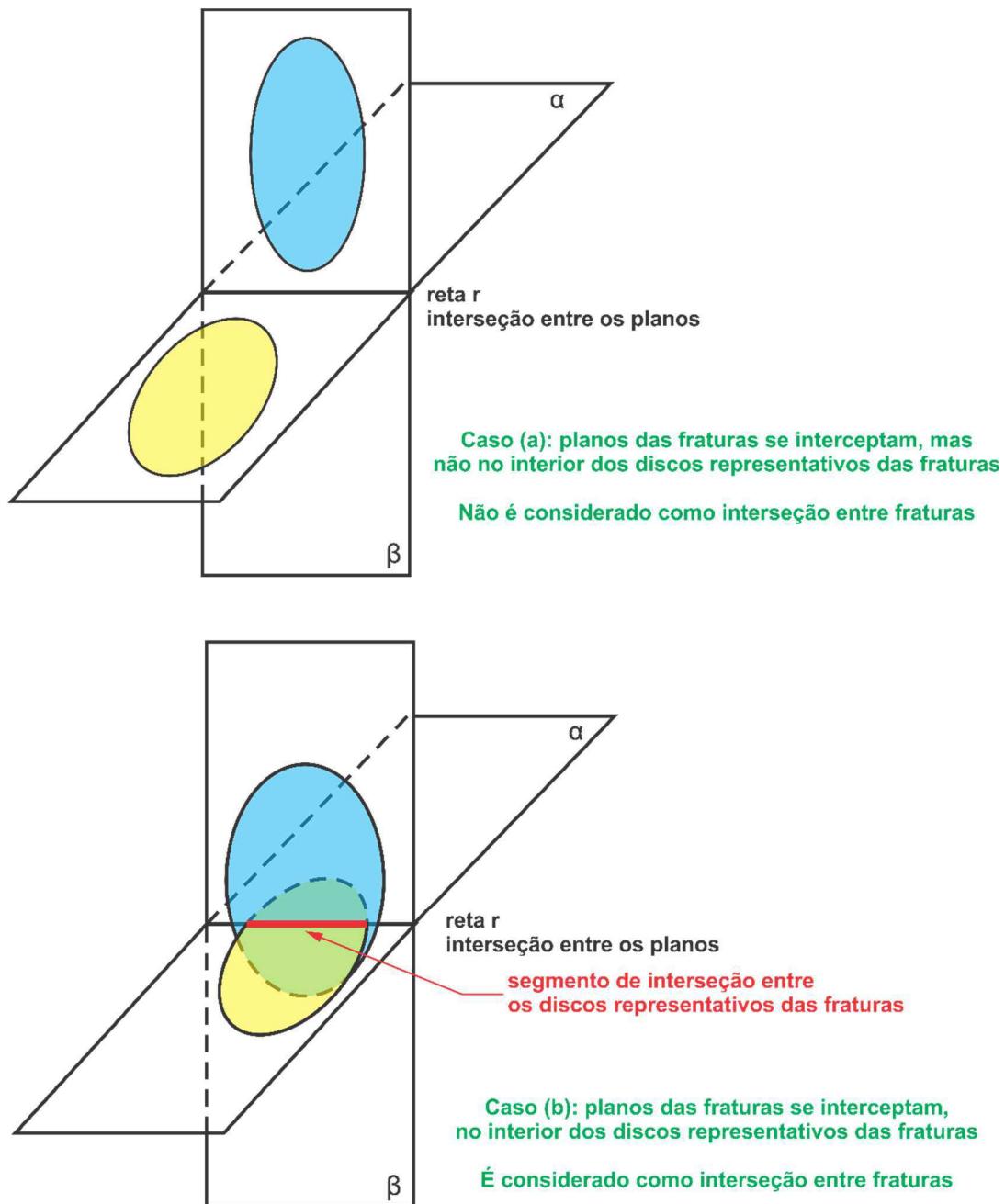
Figura 39 – Procedimento para determinação das intersecções entre as fraturas



Fonte: Autor (2018)

O cruzamento entre dois discos planares resulta em um segmento de reta, limitado ao interior destes discos. A determinação deste segmento pode ser feita inicialmente a partir da análise dos planos sobre os quais tais discos representativos estão dispostos, que correspondem ao plano de mergulho das fraturas em análise. A Figura 40 ilustra esta verificação.

Figura 40 – Representação sintética da ocorrência de interseção entre os discos representativos de fraturas



Fonte: Autor (2018)

Se os planos sobre os quais os discos estão dispostos se interceptam, três casos são possíveis:

- Que a interseção entre os planos não ocorra no interior dos discos representativos, uma vez que as fraturas têm comprimento limitado ao diâmetro dos discos, enquanto os planos são infinitos (caso (a) da Figura 40). Desta forma, as fraturas não se interceptam.
- Que a interseção entre os planos ocorra no interior de apenas um dos discos representativos, enquanto o outro não cruza a reta de interseção. Desta forma, também não há interseção definida entre as fraturas.
- Que esta interseção ocorra no interior de ambos os discos representativos, permitindo a obtenção do segmento de reta de interesse sobre a reta de interseção entre os dois planos que contém os referidos discos (caso (b) da Figura 40). Assim, tem-se uma interseção entre fraturas configurada.

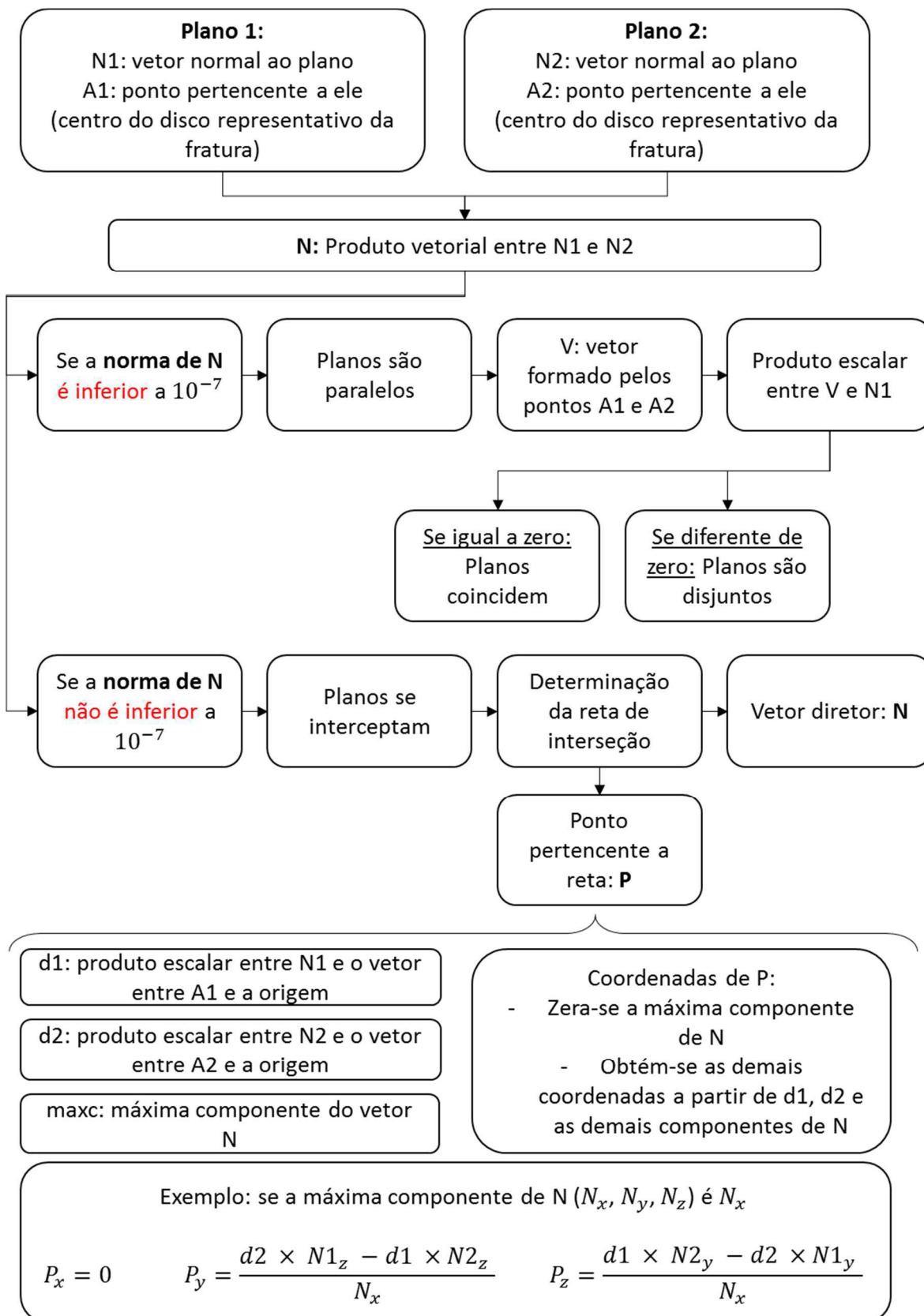
A verificação da interseção entre os planos que contém os discos representativos das fraturas foi o primeiro passo da rotina desenvolvida. Este passo aproveitou parte do código desenvolvido por Nassim Khaled, disponível para download gratuitamente no portal Mathworks (2018a), que reúne, em uma comunidade online, pessoas que utilizam o ambiente MATLAB para diferentes fins.

Este código utiliza conceitos de geometria analítica, tais como o produto vetorial e o produto escalar, para a determinação da interseção entre dois planos. É pedido como dado de entrada, para ambos os planos em análise, o vetor normal ao plano e um ponto pertencente a ele. Como dado de saída, a rotina retorna à situação dos planos: se são paralelos, se são coincidentes ou se possuem uma interseção. Caso haja interseção, é fornecido ainda o vetor diretor da reta de interseção e um ponto pertencente a ela, permitindo a sua definição e traçado. A Figura 41 apresenta esquematicamente o funcionamento desta rotina.

Considerando o uso na ferramenta FratCond, a determinação da interseção entre os planos que contém as fraturas utilizou, como dado de entrada na referida rotina:

- Vetor normal ao plano: os vetores normais unitários, gerados na primeira etapa, a partir da distribuição de Fisher;
- Ponto pertencente ao plano: os centros dos discos representativos, também obtido na caracterização estocástica das fraturas.

Figura 41 – Esquema de passos para determinação da interseção entre dois planos



Fonte: Autor (2018)

Considerando o interesse apenas nos planos que se interceptam, a ferramenta FratCond salva, dos dados de saída da rotina, apenas os dados relativos ao vetor diretor da reta de interseção e o ponto que pertence a esta reta, uma vez que estes dados são necessários para os passos seguintes.

O segundo passo da avaliação de interseção entre os discos representativos de fraturas é a verificação da passagem da reta de interseção entre os planos no interior de ambos os discos avaliados. Tal verificação pode ser realizada a partir do cálculo da distância entre o centro do disco e a reta obtida na etapa anterior, por meio da equação da distância entre ponto e reta (Equação 31).

$$d(P_0, r) = \frac{\|\overrightarrow{P_1 P_0} \times \vec{v}\|}{\|\vec{v}\|} \quad (31)$$

Em que:

P_1 : ponto pertencente a reta de interseção. Corresponde ao ponto P obtido no passo anterior.

P_0 : ponto do qual se deseja conhecer a distância. Corresponde ao centro do disco avaliado (A1 e A2 do passo anterior).

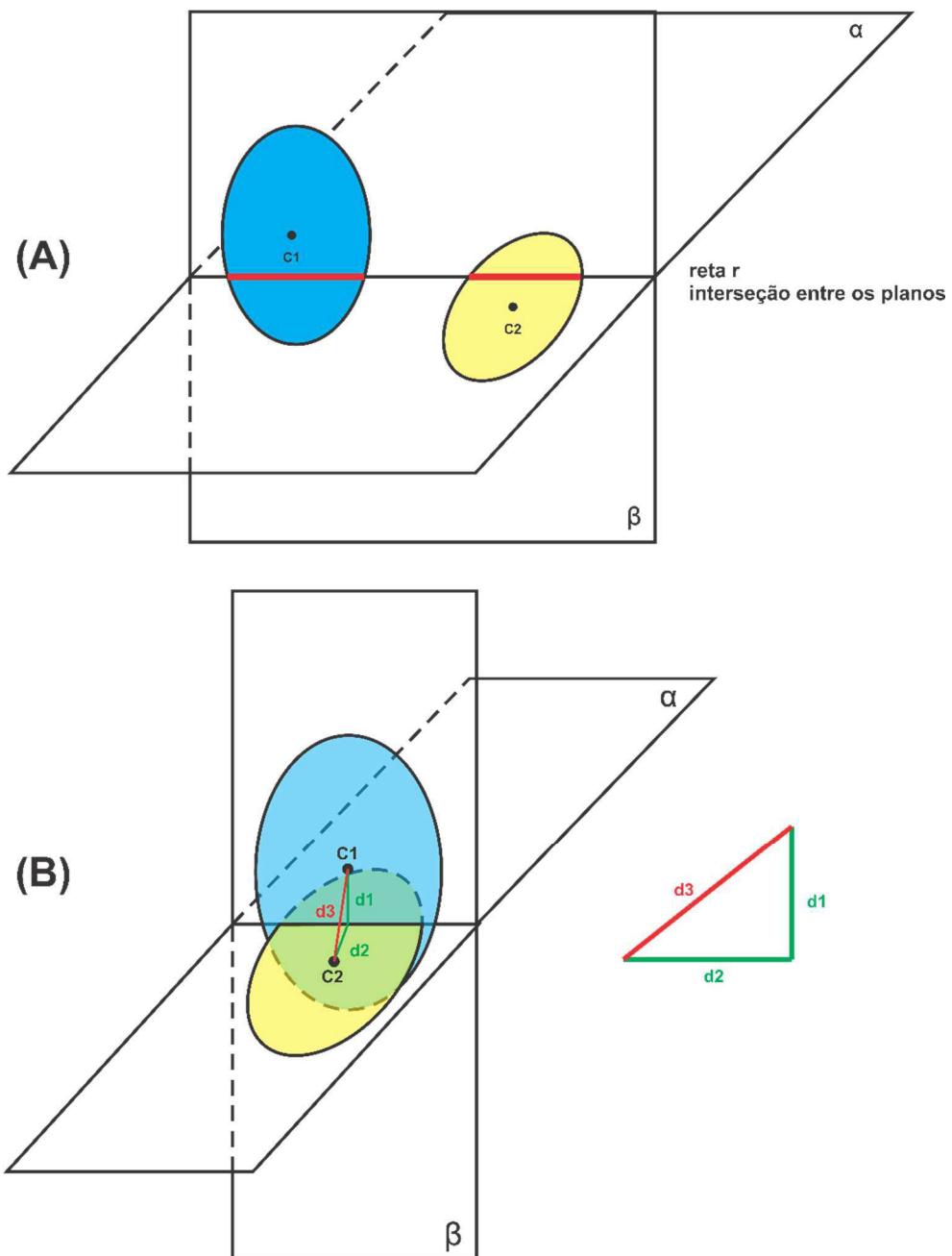
\vec{v} : vetor diretor da reta de interseção. Corresponde ao vetor N obtido no passo anterior.

Se a distância calculada pela Equação 29 for inferior ao raio do disco avaliado, observa-se que a reta de interseção passa no interior do disco representativo. É importante salientar que tal verificação deve ser verdadeira para ambos os discos avaliados a cada execução da rotina, de forma a garantir que estes se cruzem, como já foi ilustrado pela Figura 40.

Uma verificação adicional foi necessária para garantir que a interseção entre os discos representativos das fraturas. A Figura 42a mostra uma situação que poderia ocorrer caso apenas o segundo passo fosse implementado. Dois discos inseridos em planos que se interceptam e que cruzam a respectiva reta de interseção dos planos. Porém, tais discos não se interceptam efetivamente.

A fim de corrigir tal problema, o terceiro passo da avaliação das interseções entre os discos das fraturas compara os valores das distâncias entre os centros dos discos e os valores de seus raios, conforme ilustrado na Figura 42b e indicado nas Equações 32 e 33. Calcula-se a

Figura 42 – Ilustração do passo 3 da detecção das interseções entre as fraturas



Fonte: Autor (2018)

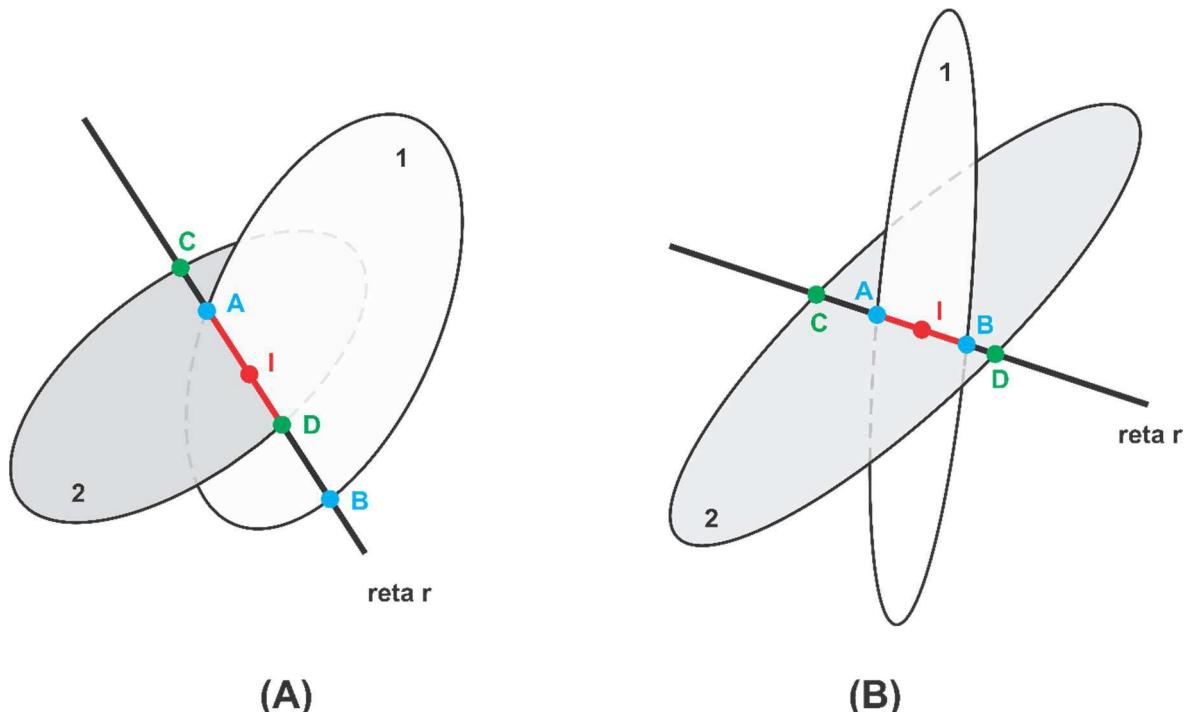
distância entre os centros e este resultado é comparado com os valores dos raios dos discos, com base no Teorema de Pitágoras, considerando o triângulo retângulo exibido na figura. Desta forma, garante-se que os discos realmente se interceptam.

$$d_3 = d(C_1, C_2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (32)$$

$$d_1 \leq R_1 \text{ e } d_2 \leq R_2 \rightarrow d_3 \leq \sqrt{R_1^2 + R_2^2} \quad (33)$$

Como último passo da rotina de detecção das interseções, deve-se obter o ponto médio do segmento de interseção. Para isso, a ferramenta FratCond determina primeiramente os pontos de cruzamento da reta de interseção com os discos representativos das fraturas. Tais pontos são indicados pelas letras A, B, C e D na Figura 43, que exibe duas configurações possíveis da interseção entre os discos: a primeira (Figura 43a) ocorre de forma parcial, com um disco possuindo uma parte interna e outra externa, em relação ao disco vizinho; e a segunda (Figura 43b), de forma integral, com o disco estando internamente em relação ao seu vizinho.

Figura 43 – Representação dos pontos que limitam a interseção entre discos representativos



Fonte: Autor (2018)

A determinação dos pontos limites da interseção foi baseada nas equações paramétricas dos discos tridimensionais (Equações 34, 35 e 36) e das retas (Equações 37, 38 e 39).

$$\begin{cases} x = x_c + R \times \cos \varphi \times u_x + R \times \sin \varphi \times v_x \\ y = y_c + R \times \cos \varphi \times u_y + R \times \sin \varphi \times v_y \\ z = z_c + R \times \cos \varphi \times u_z + R \times \sin \varphi \times v_z \end{cases} \quad (34)$$

$$(35)$$

$$(36)$$

Em que:

x, y, z : coordenadas dos pontos que compõem o disco tridimensional;

$C(x_c, y_c, z_c)$: coordenadas do centro do disco tridimensional;

R : raio do disco tridimensional;

$u(u_x, u_y, u_z)$ e $v(v_x, v_y, v_z)$: componentes dos vetores unitários que definem um novo sistema de coordenadas em um plano perpendicular ao vetor normal ao plano da fratura avaliada.

φ : ângulo central de referência, para o qual o ponto será obtido.

$$\begin{cases} x = P_x + t \times N_x \\ y = P_y + t \times N_y \end{cases} \quad (37)$$

$$\begin{cases} z = P_z + t \times N_z \\ \end{cases} \quad (38)$$

$$\begin{cases} \end{cases} \quad (39)$$

Em que:

x, y, z : coordenadas dos pontos que compõem a reta;

$P(P_x, P_y, P_z)$: ponto pertencente a reta considerada;

$N(N_x, N_y, N_z)$: componentes do vetor diretor da reta considerada.

As equações dos discos tridimensionais fornecem cada um dos pontos que constituem a forma geométrica, tendo como parâmetro base um ângulo central fornecido, que pode variar de 0° a 360° . O vetor normal do plano em que o disco está contido serve de referência para a obtenção dos vetores unitários que compõem a fórmula, para uso de um sistema de coordenadas local, sobre o plano da fratura. Outros dados como a posição do centro e o raio do disco também são utilizados. Todos estes dados são conhecidos de etapas anteriores.

Como a equação fornece cada um dos pontos do disco, foi estabelecida uma estrutura de repetição, que para obter todo o círculo tridimensional. Foi considerada uma variação do ângulo central de $0,0083^\circ$, a fim de facilitar a comparação com os pontos obtidos na reta de interseção e a boa obtenção dos pontos limites do segmento de interseção.

Em seguida, volta-se a atenção as equações paramétricas da reta. Os valores de $P(P_x, P_y, P_z)$ e $N(N_x, N_y, N_z)$ já são conhecidos. Para garantir a interseção entre reta e disco, os valores de x, y, z devem ser iguais ou bastante próximos. Considerando os resultados obtidos nos discos, obtém-se o parâmetro t , a partir de uma das linhas das equações paramétricas da reta. Nas duas relações restantes, calcula-se as coordenadas do ponto buscado, considerando o

parâmetro t obtido. Desta forma, tem-se os valores de um ponto x, y, z dado pela equação do disco e de outro ponto x, y, z dado pela equação da reta. Se a diferença entre estas coordenadas for inferior a 0,05, considera-se que eles estão próximos o suficiente e definem um ponto de interseção entre o disco e a reta. Como ilustrado na Figura 43, cada disco fornecerá 2 pontos em comum com a reta de interseção. Assim, a ferramenta FratCond dispõe de 4 variáveis independentes para receber as coordenadas dos pontos A, B, C e D.

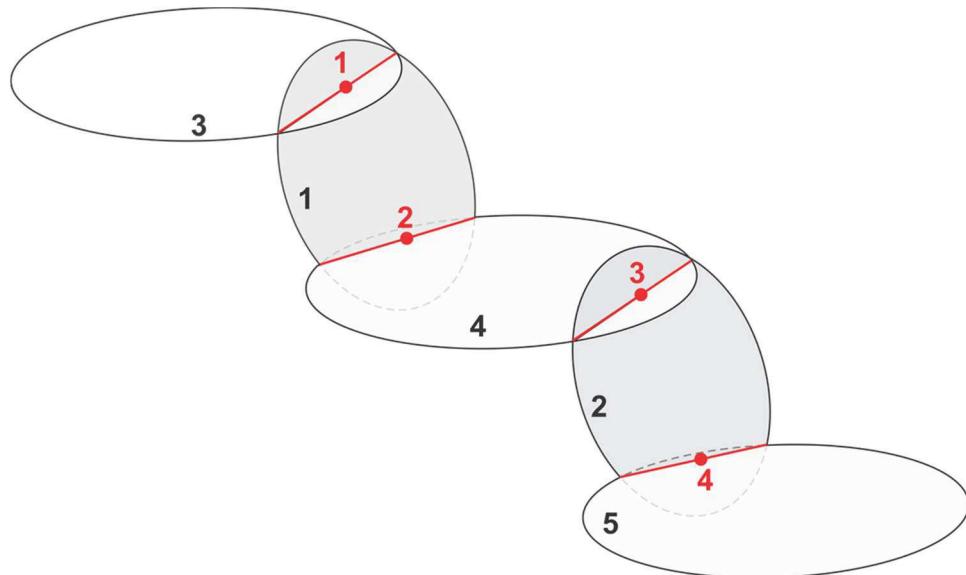
O interesse final deste procedimento é a determinação do ponto I, que representa o ponto médio do segmento de interseção entre os discos e que será utilizado para o traçado dos condutos unidimensionais. Esta determinação foi realizada a partir do cálculo da distância entre os pontos de cruzamento entre retas e discos (A, B, C e D), sendo aqui indicados por $d_{AB}, d_{AC}, d_{AD}, d_{BC}, d_{BD}$ e d_{CD} . O ponto I é o ponto médio entre os pontos com maior distância entre si, sendo as coordenadas definidas por meio de uma média aritmética simples. Este dado é armazenado em uma matriz coluna, com número de linhas igual ao número de interseções encontradas na simulação.

Assim, com a definição do ponto I realizada, o traçado dos condutos unidimensionais pode ser efetivamente realizado. É importante salientar que para esta interligação, não será necessária a determinação dos parâmetros de uma reta que ligue os pontos, dois a dois, ou seja, centro-interseção, interseção-centro, e assim sucessivamente. O ambiente MATLAB já possui uma função que realiza esta interligação, permitindo a plotagem e a visualização gráfica da rede de condutos. Tal função será melhor detalhada no item que discorre sobre a exibição de resultados da ferramenta FratCond.

Outro resultado importante obtido a partir da verificação da interseção dos discos representativos é a chamada matriz INT, que registra a identificação das fraturas que se interceptaram efetivamente. Esta matriz possui duas colunas e número de linhas igual ao número de interseções obtidas na simulação executada. Em cada linha, os elementos contêm os identificadores das fraturas se interceptaram, que correspondem ao número da linha das características listadas na Figura 36. Este registro é feito de forma crescente com relação ao identificador, sendo que as linhas iniciais da matriz INT listam todas as interseções das fraturas de menor identificador (1, 2, 3,...), até as últimas fraturas que apresentaram interseção. A Figura 44 apresenta um exemplo de discos representativos de fraturas com a

respectiva matriz INT, na forma como é obtida após a determinação das interseções, neste segundo módulo da ferramenta FratCond.

Figura 44 – Exemplo de obtenção da matriz de interseções de fraturas (matriz INT)



$$INT = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1 & 4 \\ 2 & 4 \\ 2 & 5 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{array}$$

Identificador da interseção =
nº da linha na matriz INT

Fonte: Autor (2018)

Ressalta-se que o registro da interseção na fratura INT ocorre de forma única, não havendo repetição nesta anotação. Por exemplo, se a fratura 1 se intercepta com a fratura 2, uma das linhas da matriz INT será [1, 2] indicando este contato. Porém, não haverá uma linha [2, 1], uma vez que este cruzamento já havia sido registrado na matriz. Desta forma, a referência para pesquisa na matriz INT é sempre a fratura com menor identificador.

A matriz INT é utilizada para informar o usuário rapidamente quais fraturas se interceptaram, no momento da exportação dos resultados obtidos pela ferramenta. Esta matriz pode ser trabalhada em conjunto com o ponto de interseção obtido e utilizado no traçado dos condutos unidimensionais, em termos de cruzamento de dados e conferência das interseções.

Ao final da execução das rotinas apresentadas, finaliza-se o módulo 1 da ferramenta

FratCond e obtém-se a geometria do modelo a ser simulado hidráulicamente. Como resultados principais, destaca-se a geração estocástica das fraturas, a partir dos dados estatísticos fornecidos pelo usuário; a obtenção das interseções entre as fraturas e o traçado dos condutos unidimensionais equivalentes. Todos os passos indicados nos itens 3.1 e 3.2 são executados a partir da ativação de um único botão na interface gráfica da ferramenta. Uma confirmação de execução bem-sucedida é dada ao usuário ao final da rotina. Neste momento, o usuário tem duas opções: analisar os resultados obtidos, em termos de geometria do modelo, cuja metodologia é apresentada no tópico 3.4 deste texto; ou prosseguir a simulação hidráulica, a partir da execução do segundo módulo da ferramenta, conforme procedimentos mostrados no tópico a seguir.

3.3 SIMULAÇÃO HIDRÁULICA

Com a geração estocástica das fraturas e com a rede de condutos unidimensionais equivalentes estabelecida, a realização da simulação hidráulica do aquífero modelado torna-se possível. Esta tarefa é realizada pelo módulo 2 da ferramenta FratCond, que busca determinar as cargas hidráulicas nas extremidades dos trechos de condutos unidimensionais equivalentes, que correspondem aos centros dos discos representativos de fraturas; além dos valores de vazão que transitam entre estes nós, permitindo assim a visualização dos caminhos por onde se escoa mais água na formação.

É importante relembrar que a simulação hidráulica é executada apenas para o conjunto de condutos com maior extensão, que corresponde a região com maior número de conexões entre as fraturas do modelo simulado. Fraturas conectadas, mas com menor número de conexões; e fraturas totalmente isoladas, não são simuladas hidráulicamente, sendo consideradas como fraturas “secas”, que não contribuem efetivamente para permeabilidade do meio simulado.

Para execução do módulo 2 da ferramenta FratCond, em termos de dados de entrada, duas informações adicionais devem ser fornecidas pelo usuário, que possibilitem a resolução das equações hidráulicas. Alguns campos estarão disponíveis para o usuário inserir as seguintes informações:

- Valores de cargas hidráulicas nos limites do volume de formação aquífera a ser

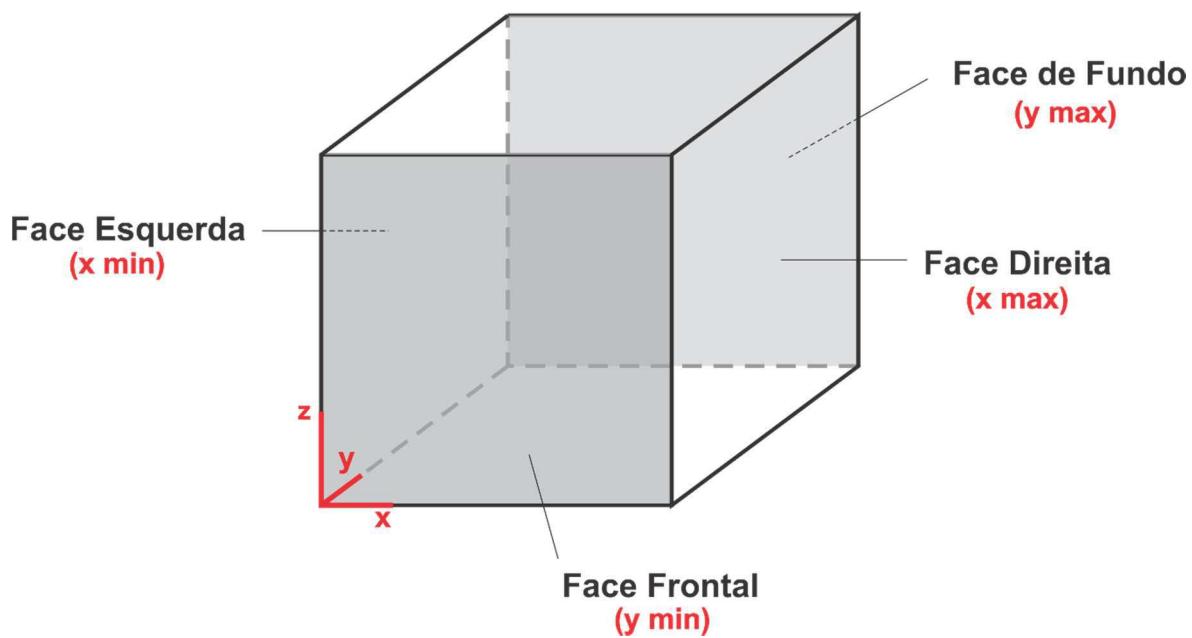
simulada, para que funcionem como condição de contorno da simulação hidráulica;

- A escolha da forma de determinação da condutância, coeficiente de proporcionalidade entre a vazão e o gradiente hidráulico, em cada trecho de conduto unidimensional equivalente.

Em termos de condições de contorno, o usuário deverá informar ao menos a carga hidráulica de uma das 4 faces perpendiculares ao plano xy, que formam o volume cúbico ou prismático considerado na simulação. A Figura 45 ilustra estas faces, enfatizando sua posição em relação a origem do sistema cartesiano considerado pela ferramenta FratCond. Destaca-se que:

- A face esquerda e a face direita são paralelas ao plano yz, fornecendo valores de condição de contorno que permitem a obtenção de um gradiente hidráulico ao longo do eixo x do volume de simulação;
- A face frontal e a face de fundo são paralelas ao plano xz, fornecendo valores de condição de contorno que permitem a obtenção de um gradiente hidráulico ao longo do eixo y do volume de simulação;

Figura 45 – Faces do volume de simulação, para indicação das condições de contorno



Fonte: Autor (2018)

A inserção destas condições de contorno permite a obtenção de um gradiente hidráulico regional, indicando qual a tendência no sentido do escoamento no interior da formação e no modelo de simulação construído. Caso o usuário deseje e/ou disponha de informação adequada, é possível a inserção desta condição nas quatro faces do volume citadas. Caso apenas uma das faces seja utilizada, as demais serão consideradas com carga hidráulica nula. É importante salientar que estas condições de contorno podem ser adquiridas em campo, por meio de poços de observação do nível de água, em limites próximos ao volume utilizado para a simulação; ou mesmo serem estimados pelo usuário, a partir de dados de poços que não necessariamente estejam nos perímetros do referido volume.

A segunda indicação a ser feita, em termos de dado de entrada do módulo 2, é a forma como será tratada a determinação da condutância. Conforme visto na revisão bibliográfica, este parâmetro serve como coeficiente de proporcionalidade entre vazão e gradiente hidráulico e pode ser definido, tanto por meio de relações com as características reais das fraturas, quanto por meio da atribuição de valores estatísticos e o uso de uma distribuição de probabilidade do tipo lognormal. Ambos os métodos estarão disponíveis para utilização por parte do usuário da ferramenta.

A primeira forma utiliza as relações definidas por Dershowitz (1996) e são apresentadas no passo a passo a seguir. Tais equações determinam os parâmetros geométricos do conduto unidimensional equivalente, tais como comprimento, largura e altura da seção retangular; assim como a transmissividade e a condutância de cada um dos trechos do canal representativo da fratura. É importante ter em mente a Figura 27, que permite visualizar bem os parâmetros geométricos aqui calculados.

- Comprimento do conduto (Equação 40): dado pela distância entre os centros de duas fraturas consecutivas, dado pela soma da distância do centro da primeira fratura até a intersecção (L_1) e a distância do centro da segunda fratura até a mesma intersecção (L_2).

$$L_m = L_1 + L_2 \quad (40)$$

- Largura do conduto (Equação 41): é por uma porcentagem da média dos comprimentos de intersecção entre duas fraturas consecutivas, conforme ilustrado na

Figura 46. O fator de porcentagem mais usado é de 0,75, conforme Shuttle et al. (1997) apud Outters et al. (2000).

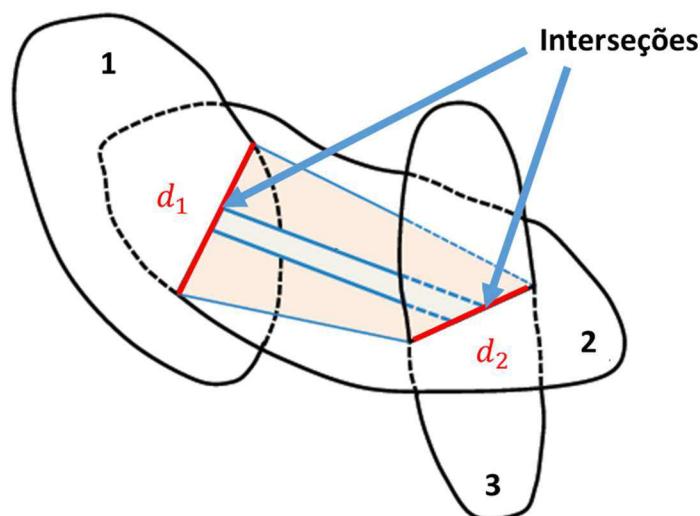
$$W_m = d_1 \times 0,75 + d_2 \times 0,75 \quad (41)$$

Em que:

d_1 ; d_2 : comprimento do segmento de interseções entre fraturas consecutivas, que formam o trecho do conduto (m).

Figura 46 – Determinação da largura do conduto unidimensional equivalente, segundo

Dershowitz (1996)



Fonte: Adaptado de Xu et al. (2014)

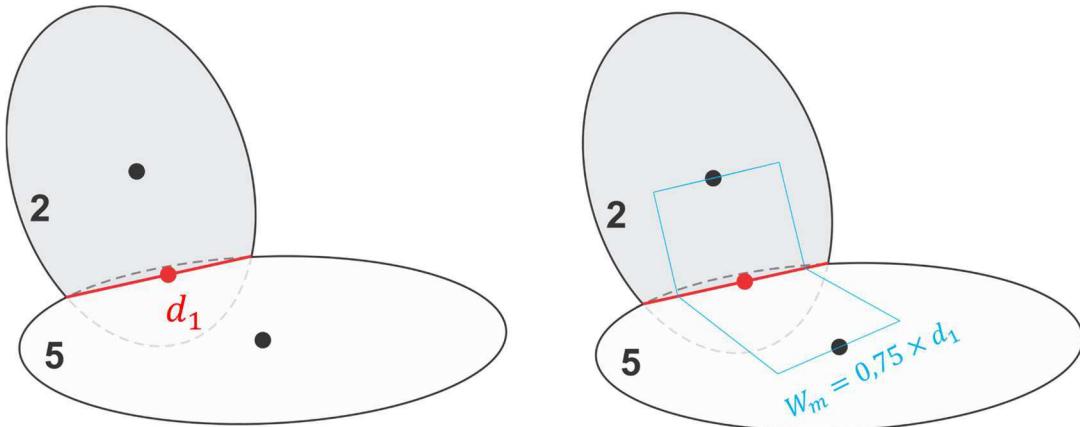
Foi feita uma adaptação neste cálculo da largura do conduto unidimensional. Ao se considerar a possibilidade de um disco de fratura interceptar outros 2 ou mais discos, tem-se uma complicação em se determinar quais segmentos de interseção devem ser utilizados para calcular a largura. Outro fato é que, no modelo utilizado, os trechos começam e terminam nos centros das fraturas. Se a forma mostrada acima fosse utilizada, haveria uma incompatibilidade no modelo. Desta forma, a adaptação feita não considera a média dos comprimentos de segmentos de interseção de fraturas consecutivas, mas apenas o comprimento do segmento da interseção avaliada. Este valor continua sendo multiplicado por um fator de porcentagem, mantido em 0,75. A Equação 42 explicita este cálculo e a Figura 47 ilustra esta adaptação.

$$W_m = d_1 \times 0,75 \quad (42)$$

Em que:

d_1 : comprimento do segmento de interseções entre fraturas analisadas (m). Esta dimensão já é conhecida e foi utilizada na determinação do ponto médio da interseção I.

Figura 47 – Adaptação na determinação da largura do conduto unidimensional



Fonte: Autor (2018)

- Abertura média de transporte (Equação 43): correspondente à altura do conduto retangular.

$$a_m = 0,5 \times T_m^{0,5} \quad (43)$$

Em que:

T_m : transmissividade média das fraturas (m^2/s), ponderada com uso dos comprimentos dos trechos de cada descontinuidade que compõem o conduto unidimensional (Equação 44).

$$T_m = \frac{L_1 \times T_1 + L_2 \times T_2}{L_m} \quad (44)$$

Individualmente, a transmissividade pode ser estimada em função da sua abertura real (a), conforme indicado na Equação 45. A abertura real foi obtida a partir da geração estocástica, considerando a distribuição lognormal.

$$T_n = \frac{\gamma \times a^3}{12 \times \mu} \quad (45)$$

- Área superficial do conduto retangular (Equação 46): correspondente a área superficial disponível para o escoamento, dada pelo produto entre o comprimento e a largura previamente definidos.

$$A_m = W_m \times L_m \quad (46)$$

- Condutância do conduto retangular (Equação 47): parâmetro de proporcionalidade entre vazão do trecho e a diferença de carga hidráulica entre os nós extremos do conduto.

$$C_m = W_m \times T_m \quad (47)$$

A segunda forma de determinação da condutância é feita por meio da utilização da distribuição lognormal. Desta forma, o usuário deve inserir os valores de média e desvio padrão da condutância a serem considerados na simulação. A partir disso, utiliza-se a função disponível no ambiente MATLAB, analogamente ao feito com outras características das fraturas, tais como os diâmetros dos discos representativos e a abertura das fraturas (reveja as Equações 20, 21 e 22).

A obtenção dos valores de média e desvio padrão da condutância, para aplicação da distribuição lognormal é feita por meio de estimativa ou calibração de modelos simulados com dados de campo, uma vez que a condutância não é um parâmetro físico, determinado diretamente nos meios fraturados. Neste sentido, este procedimento de utilização de aleatoriedade surge como uma forma de representação da heterogeneidade do meio simulado, possibilitando a calibração do referido parâmetro, para casos onde as vazões de saída do volume são previamente conhecidas.

Para ambos os métodos, os valores de condutância e de comprimento de cada um dos trechos de condutos unidimensionais são armazenados em um vetor coluna, com número de linhas igual ao número de interseções presentes na simulação. Estes valores são armazenados ainda sem considerar o isolamento do conjunto de condutos com maior extensão, permitindo que o usuário verifique este parâmetro para todos os trechos, mesmo que estes não participem efetivamente da simulação hidráulica. Para a primeira forma de determinação da condutância, todos os demais dados físicos calculados também são armazenados, ficando à disposição do usuário para exportação dos resultados.

Após a determinação e o armazenamento dos valores de condutância, pode se proceder a execução do cálculo das grandezas hidráulicas de interesse da simulação, sendo elas as cargas hidráulicas e as vazões. Lembra-se que tais variáveis serão calculadas utilizando o sistema linear composto pelas Equações 13 e 14 (item 2.3.3), composto pelo balanço de massa em cada um dos nós da rede de condutos unidimensionais equivalentes e pela relação entre vazão e gradiente hidráulico, tendo a condutância como coeficiente de proporcionalidade.

Previamente ao cálculo hidráulico propriamente dito, algumas ações, que serão detalhadas em seguida, ainda são necessárias para realização bem-sucedida da simulação hidráulica. São elas:

- Isolamento do conjunto de condutos unidimensionais equivalentes com maior extensão, em relação a trechos secundários, com menor extensão; e fraturas sem conexão.
- Transporte das condições de contorno, das faces do volume de simulação para os nós mais extremos das redes de condutos unidimensionais equivalentes;
- Montagem do sistema linear na forma matricial, para sua resolução com auxílio dos métodos disponíveis no ambiente MATLAB.

No que tange ao isolamento dos trechos de condutos conectados que totalizem a maior extensão, observa-se nos meios fraturados reais que algumas descontinuidades se encontram isolados ou mesmo conectados a algumas vizinhas, não contribuem ao escoamento de água no meio. O mesmo ocorre nas simulações executadas na ferramenta FratCond, onde se tem uma impossibilidade de considerar todas as fraturas geradas na simulação hidráulica, o que demandaria múltiplas condições de contorno, que poderiam afastar o modelo da realidade.

Assim, a opção escolhida foi manter para a simulação no módulo 2 somente os trechos que se encontrem conectados e totalizem maior extensão, de forma a percorrerem bem todo o volume simulado. Tais trechos foram isolados a partir da matriz INT, criada ainda no módulo 1 da ferramenta, e que informa todas as conexões existentes no sistema. A partir dela, criou-se outras duas matrizes: a matriz INT2 e a matriz INT3.

A matriz INT2 é igual a matriz INT, nas suas duas primeiras colunas. Uma coluna a mais é

adicionada, apresentando um identificador de conexão. Todas as interseções que se encontram conectadas, em virtude de fraturas em comum, possuem um mesmo identificador de conexão. Este número é obtido por meio da função *graph*, disponível em versões mais recentes do MATLAB (versões posteriores a R2015b). Esta função analisa uma matriz de duas colunas, ao estilo da matriz INT, considerando os elementos como nós e informando quais caminhos, formados por estes nós, estão conectados entre si, por meio de um identificador de conexão. Mais detalhes sobre esta função podem ser visualizados em MathWorks (2018b).

A matriz INT3 é construída a partir da matriz INT2, considerando apenas as linhas que possuem o identificador de conexão mais frequente. Neste sentido, as linhas da matriz que não possuírem este número, na terceira coluna, são removidas para formar a matriz INT3. Consequentemente, esta matriz possui menos ou a mesma quantidade de linhas que as matrizes INT e INT2, uma vez que ela remove aquelas interseções de caminhos secundários. A Figura 48 apresenta um exemplo numérico básico de obtenção das referidas matrizes, em um sistema fraturado simples, a partir da sua matriz INT já definida.

Figura 48 – Exemplo de obtenção das matrizes INT2 e INT3, visando o isolar os trechos de condutos com mais conexões

$$\begin{array}{c}
 \text{INT} = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1 & 4 \\ 1 & 5 \\ 3 & 4 \\ 3 & 5 \\ 5 & 7 \\ 5 & 9 \\ 6 & 10 \\ 6 & 11 \end{bmatrix} \quad \xrightarrow{\hspace{2cm}} \quad \text{INT2} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1 \\ 1 & 4 & 1 \\ 1 & 5 & 1 \\ 3 & 4 & 1 \\ 3 & 5 & 1 \\ 5 & 7 & 1 \\ 5 & 9 & 1 \\ 6 & 10 & 2 \\ 6 & 11 & 2 \end{bmatrix} \quad \xrightarrow{\hspace{2cm}} \quad \text{INT3} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1 \\ 1 & 4 & 1 \\ 1 & 5 & 1 \\ 3 & 4 & 1 \\ 3 & 5 & 1 \\ 5 & 7 & 1 \\ 5 & 9 & 1 \end{bmatrix}
 \end{array}$$

Matriz INT de um sistema fraturado, apresentando as interseções existentes. Cada fratura tem seu ID em cor diferente.

Matriz INT2: replica as duas primeiras colunas da matriz INT. A terceira coluna é o identificador de conexão, indicando quais os caminhos conectados entre si. Cada cor indica as fraturas pertencentes a cada caminho.

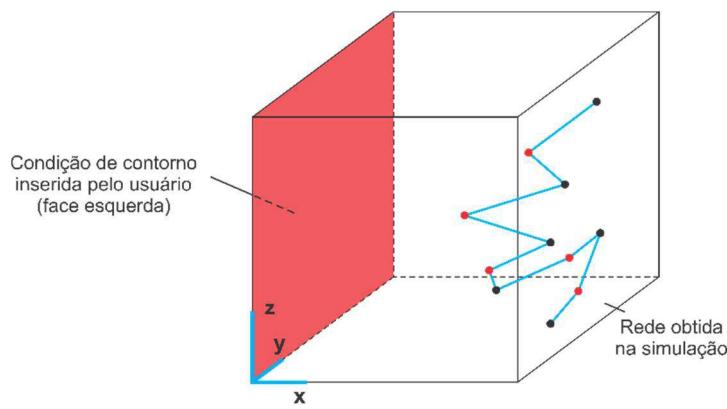
Matriz INT3: preserva de INT2 apenas as linhas que possuem o identificador de conexão mais frequente

Fonte: Autor (2018)

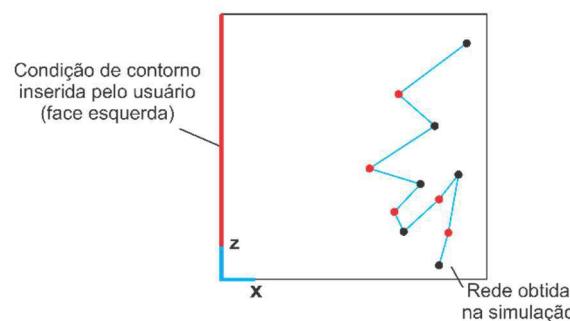
Com o estabelecimento da matriz INT3, tem-se uma nova base para consulta das interseções, agora considerando apenas os trechos com maior quantidade de conexões. Esta matriz é, para as próximas etapas, a referência usada no que tange as interseções de interesse.

A etapa seguinte consiste no transporte das condições de contorno, das faces do volume de simulação, para os pontos mais extremos da rede. Este transporte deve ser feito, uma vez que nem sempre as extremidades da rede estão ou próximas aos limites do volume considerado, fazendo com que as condições inseridas pelo usuário não sejam exatamente aquelas que ocorreriam na rede de condutos. A Figura 49 evidencia tal fato, considerando que o usuário inseriu apenas uma condição de contorno, na face esquerda, e a rede gerada foi construída na região mais à direita do volume de simulação. A vista do plano xz complementa esta visualização.

Figura 49 – Evidenciação da necessidade de transporte das condições de contorno aos pontos mais extremo das redes de condutos



Visão geral do volume de simulação

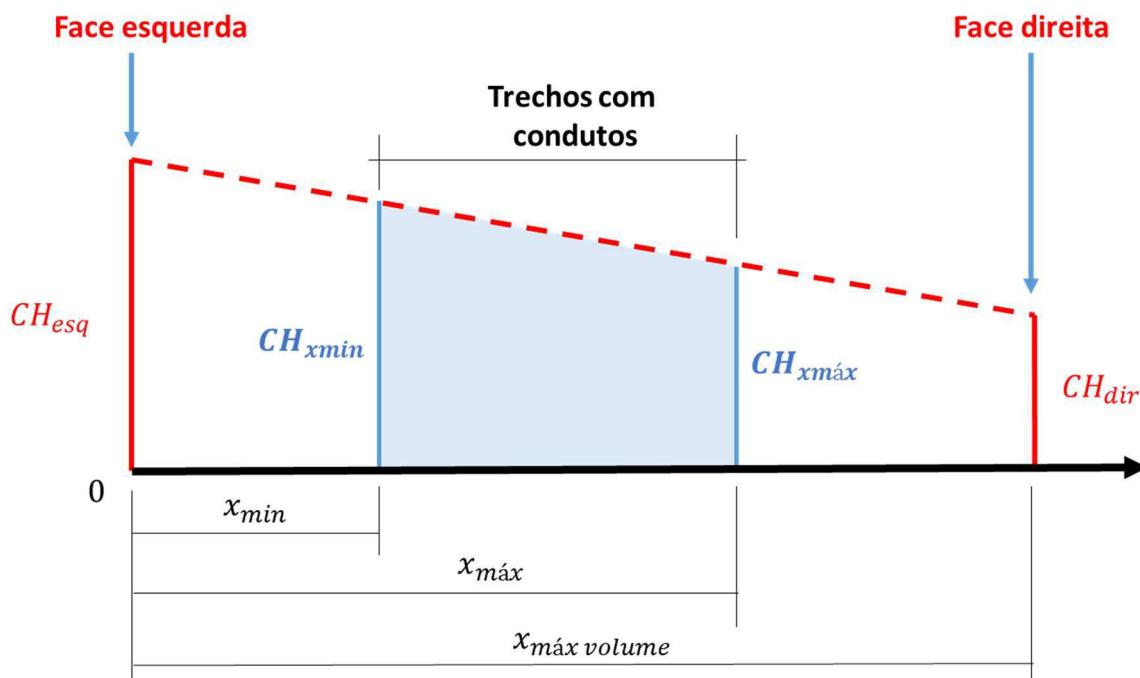


Vista do plano xz

Fonte: Autor (2018)

A transferência proposta foi realizada por meio de interpolação linear, considerando os gradientes formados ao longo dos eixos x e y, que são limitados pelas faces do volume que tem a possibilidade de inserção de cargas hidráulicas iniciais, por parte do usuário. A Figura 50 ilustra as variáveis envolvidas nesta transferência ao longo do eixo x. Ao longo do eixo y, o processo é análogo.

Figura 50 – Variáveis envolvidas na transferência das condições de contorno



Fonte: Autor (2018)

Considerando as variáveis indicadas, em termos de valores já conhecidos, CH_{esq} e CH_{dir} correspondem aos valores de carga hidráulica inseridos pelo usuário, nas faces esquerda e direita do volume, a serem considerados como condições de contorno iniciais. O valor de $x_{máx\ volume}$ corresponde ao tamanho da aresta do volume de simulação ao longo do eixo x, sendo também um valor inserido pelo usuário no início da simulação.

Os demais valores indicados na Figura 50 (x_{min} ; $x_{máx}$; CH_{xmin} ; CH_{xmax}) precisam ser determinados. x_{min} e $x_{máx}$ correspondem as coordenadas x mínimas e máximas dos centros dos discos representativos, que permitirão a obtenção dos nós mais extremos da rede de condutos analisada. Estes valores são obtidos por meio da consulta conjunta à matriz INT3, que lista o identificador das fraturas que estão presentes na rede de condutos mais extensa;

e a matriz X , que lista as coordenadas x de todos os centros das fraturas geradas no modelo. Utilizando uma função de máximo e mínimo, comumente presente nos ambientes de programação, obtém-se as coordenadas de maior e menor valor, e cruza-se estes valores com os identificadores correspondentes.

As cargas hidráulicas CH_{xmin} e CH_{xmax} são as cargas hidráulicas a serem impostas nos nós extremos da rede de condutos, com coordenada mínima e máxima, respectivamente. Elas são calculadas, a partir de relações lineares, estabelecidas a partir das demais variáveis e apresentadas nas Equações 48, 49 e 50. O parâmetro m é a inclinação da reta formada pelas cargas hidráulicas CH_{esq} e CH_{dir} (reta tracejada em vermelho na Figura 50). Inicialmente, verifica-se se o usuário inseriu algum valor na face analisada. Em caso afirmativo, realiza-se o transporte até o nó mais próximo a face, considerando que a face oposta pode ter valor de carga hidráulica inserida maior ou menor que a face analisada, o que altera os sinais nas equações, considerando uma reta crescente ou descrente ao longo do eixo x.

$$m = \frac{|CH_{dir} - CH_{esq}|}{x_{\max volume}} \quad (48)$$

$$\text{se } CH_{esq} \neq 0 \rightarrow \begin{cases} \text{se } CH_{esq} \geq CH_{dir} \rightarrow CH_{xmin} = CH_{esq} - m \times x_{min} \\ \text{se } CH_{esq} < CH_{dir} \rightarrow CH_{xmin} = CH_{esq} + m \times x_{min} \end{cases} \quad (49)$$

$$\text{se } CH_{dir} \neq 0 \rightarrow \begin{cases} \text{se } CH_{esq} \geq CH_{dir} \rightarrow CH_{xmax} = CH_{esq} - m \times x_{max} \\ \text{se } CH_{esq} < CH_{dir} \rightarrow CH_{xmax} = CH_{esq} + m \times x_{max} \end{cases} \quad (50)$$

Ao longo do eixo y, a transferência é realizada de forma análoga, considerando as seguintes correspondências de variáveis:

- $CH_{esq} \rightarrow CH_{frontal}$: carga hidráulica inserida na face frontal do volume de simulação;
- $CH_{dir} \rightarrow CH_{fundo}$: carga hidráulica inserida na face de fundo do volume de simulação;
- $x_{min} \rightarrow y_{min}$: coordenada de centro, em y, mínima;
- $x_{max} \rightarrow y_{max}$: coordenada de centro, em y, máxima;
- $x_{\max volume} \rightarrow y_{\max volume}$: tamanho da aresta do volume de simulação ao longo do

eixo x;

- $CH_{xmin} \rightarrow CH_{ymin}$: carga hidráulica a ser imposta nos nós extremos da rede de condutos, com coordenada mínima, ao longo do eixo y.
- $CH_{xmax} \rightarrow CH_{ymax}$: carga hidráulica a ser imposta nos nós extremos da rede de condutos, com coordenada máxima, ao longo do eixo y.

Foi inserida uma rotina adicional, considerando a possibilidade de uma mesma fratura, possuir a coordenada mínima (ou máxima), tanto no eixo x quanto no eixo y. Nesse caso, haveria uma possível sobreposição das condições de contorno, no momento de seu transporte. Desta forma, mantém-se apenas a condição imposta ao longo do eixo x, ignorando a condição do eixo y, uma vez que não é possível trabalhar com os dois valores ocorrendo num mesmo nó da rede de condutos unidimensionais.

Quando a sobreposição de condições de contorno ocorre, o usuário é informado na planilha de resultados, exportada a partir da ferramenta, após a execução da simulação hidráulica. Além disso, nesta mesma planilha, o usuário pode visualizar os valores inseridos nas faces do volume e os respectivos valores transferidos para os nós extremos dos condutos, por meio da interpolação proposta, assim como o identificador do nó que recebe tal carga hidráulica imposta.

Feita a transferência das cargas hidráulicas às extremidades das fraturas, a próxima etapa necessária é a montagem do sistema linear, com as equações que contém as grandezas hidráulicas de interesse, na forma matricial $A \times X = B$. Este procedimento é necessário para facilitar a sua resolução destas equações, dentro do ambiente MATLAB, possibilitando o uso de rotinas já disponíveis no referido software.

As Equações 51 e 52 relembram o sistema linear a ser resolvido na simulação hidráulica, já apresentado anteriormente. Já a Equação 53 apresenta a substituição realizada na equação de cada um dos nós, considerando um nó 1 arbitrário e detalhando as variáveis, em sua forma mais aberta.

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{ij} = C_{ij} \times I_{ij} \quad (\text{para cada trecho}) \\ \sum Q = 0 \quad (\text{para cada nó}) \end{array} \right. \quad (51) \quad (52)$$

$$\begin{aligned} \sum Q = 0 &\rightarrow C_{12} \times I_{12} + C_{13} \times I_{13} + \dots + C_{1n} \times I_{1n} = 0 \\ \rightarrow \frac{C_{12}}{L_{12}} \times (h_1 - h_2) + \frac{C_{13}}{L_{13}} \times (h_1 - h_3) + \dots + \frac{C_{1n}}{L_{1n}} \times (h_1 - h_n) &= 0 \quad (53) \end{aligned}$$

Uma relação semelhante a Equação 53 deve ser definida para cada nó da rede de condutos unidimensionais equivalentes, considerando todos os trechos que dele partem. Para os nós que receberão cargas hidráulicas, impostas pelas condições de contorno transportadas, deve-se adicionar uma linha a mais, considerando a igualdade desta incógnita com o referido valor determinado.

Observando a Equação 53, observa-se que as incógnitas desconhecidas são exatamente as cargas hidráulicas, que deverão ser encontradas pela solução do sistema linear. Ao se escrever estas equações na forma matricial $A \times X = B$, pode-se considerar cada uma das linhas das matrizes destinada ao balanço do nó de mesmo identificador, ou seja, o nó 1 terá seu balanço feito na 1ª linha da forma matricial, e assim sucessivamente. Caso um determinado nó não pertença ao caminho mais extenso, sua linha permanece zerada, sendo excluída posteriormente. Nas últimas linhas insere-se as condições de contorno, que podem demandar de 1 até 4 linhas adicionais, em função da quantidade de valores de condição de contorno inseridas pelo usuário.

A inserção dos elementos em cada uma das matrizes é mostrada a seguir. Tal procedimento é ilustrado na Equação 54, a partir da Equação 53. Neste exemplo, considerou-se uma das cargas hidráulicas igual a um valor arbitrário, apenas para demonstração da inserção desta condição de contorno.

- Na matriz A :

- os valores de $\frac{c_{ij}}{l_{ij}}$ nas linhas em que são realizados balanços de massa nos nós.

Sua posição em linha e coluna deve considerar o identificador das fraturas que são conectadas pelo trecho, devendo ser inserido tanto na linha i quanto na linha j , de forma que o termo $\frac{c_{ij}}{l_{ij}}$ é positivo para o elemento ii e jj ; e negativo para o elemento ij e ji . Deve-se somar o termo inserido a valores que previamente estejam naquele elemento da matriz, garantindo o balanço com outros trechos.

- valores iguais a 1 em linhas adicionais, para inserção das condições de contorno transportadas aos nós extremos da rede.
- Na matriz X : os valores de carga hidráulica h_i a serem calculados. Esta matriz não precisa ser montada, sendo apenas o resultado final do sistema linear.
- Na matriz B :
 - valores iguais a zero para linhas em que são realizados balanços de massa nos nós
 - valores das condições de contorno transportadas, para as linhas adicionais.

$$\begin{aligned} \left\{ \begin{array}{l} \frac{C_{12}}{L_{12}} \times (h_1 - h_2) + \frac{C_{13}}{L_{13}} \times (h_1 - h_3) + \cdots + \frac{C_{1n}}{L_{1n}} \times (h_1 - h_n) = 0 \\ h_1 = 100 \end{array} \right. \\ \left[\begin{array}{cccccc} \frac{C_{12}}{L_{12}} + \frac{C_{13}}{L_{13}} + \frac{C_{1n}}{L_{1n}} & -\frac{C_{12}}{L_{12}} & -\frac{C_{13}}{L_{13}} & \cdots & -\frac{C_{1n}}{L_{1n}} \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{array} \right] \times \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ \vdots \\ h_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 100 \end{bmatrix} \quad (54) \end{aligned}$$

A montagem do sistema na forma matricial é dependente apenas da consulta a valores já conhecidos e determinados em etapas anteriores. A matriz INT3, que possui os identificadores das fraturas que se interceptam, permite a determinação correta da posição dos termos da matriz A . As condutâncias C_{ij} e os comprimentos L_{ij} já foram calculados anteriormente e podem ser relacionados para obtenção das frações $\frac{C_{ij}}{L_{ij}}$. Além destes valores, as cargas hidráulicas a serem impostas aos nós extremos da rede também já foram determinadas, podendo também ser posicionadas na matriz B.

Conforme dito anteriormente, cada linha das matrizes no sistema linear é destinada a realização do balanço dos nós, considerados em ordem crescente ao seu número identificador. Fraturas que não participam do trecho com maior extensão de condutos tem sua linha permanentemente zerada. Colunas que estejam totalmente zeradas são excluídas em uma última etapa, a fim de se retirar do cálculo cargas hidráulicas que não são buscadas, de fraturas que não pertençam ao caminho mais longo. Desta forma, na matriz X , que apresentará os resultados das cargas hidráulicas, os valores estarão ordenados em ordem crescente dos identificadores das fraturas, considerando apenas aquelas que participam do caminho mais extenso, que foi simulado hidraulicamente.

A partir da montagem do sistema linear na forma matricial, pode-se proceder então a sua resolução. Este procedimento foi realizado com o auxílio de funções já presentes no MATLAB, sem o desenvolvimento de rotinas complementares para solução de sistemas lineares. Considerando que os elementos das matrizes que não forem preenchidos estarão todos zerados e que as referidas matrizes do sistema linear podem assumir tamanhos extensos, em função da quantidade de fraturas simuladas no modelo, foi necessário a busca por métodos de solução de sistemas lineares esparsos e largos.

Neste sentido, utilizou-se o método LSQR (sigla em inglês para *Least Squares with QR Factorization*), desenvolvido por Paige e Sounders (1982) e disponível na biblioteca do ambiente MATLAB. Este método é usado), para a resolução de sistemas lineares esparsos, com elevada quantidade de elementos nulos; e não simétricos, com matrizes transpostas diferentes das matrizes originais. Tal método é baseado no conhecido método dos gradientes conjugados, comumente usado na solução de sistemas lineares complexos, porém, tendo características numéricas mais favoráveis. Mais detalhes sobre o desenvolvimento matemático do LSQR podem ser encontrados no trabalho de Paige e Sounders (1982).

No MATLAB, a implementação é feita na forma indicada na Equação 55. Os elementos do lado esquerdo da igualdade consistem em resultados a serem fornecidos ao final da solução, enquanto os elementos do lado direito são dados fornecidos para realização dos cálculos do LSQR.

$$[h, flag, relres, iter] = lsqr(A, B, tol, maxit) \quad (55)$$

Em que:

h: corresponde a matriz X do sistema linear $A \times X = B$, contendo os resultados de carga hidráulica nos nós buscados.

flag: corresponde ao indicador de convergência do método LSQR, sendo importante para a confiabilidade dos resultados. Caso não seja obtida a convergência do método, o usuário é informado e sugere-se a remodelagem da geometria, por meio de uma nova geração de fraturas.

relres: corresponde ao erro residual obtido na execução do método LSQR.

iter: número de iterações executadas pelo método para obtenção do resultado exibido.

A, B: matrizes A e B do sistema linear $A \times X = B$, montadas conforme procedimento

mostrado anteriormente.

tol: erro residual máximo tolerado na execução do método. Estabeleceu-se uma tolerância igual a 10^{-4} .

maxit: número máximo de iterações a serem executadas pelo método LSQR. Indicou-se uma quantidade igual a 10^6 iterações, como número máximo.

Com as cargas hidráulicas calculadas, é possível determinar os gradientes hidráulicos e as vazões em cada um dos trechos. Para os gradientes, deve-se buscar as diferenças entre as cargas hidráulicas obtidas e dividi-las pelo respectivo comprimento do trecho. Foi necessário a criação de uma matriz auxiliar, chamada INT3b, que listasse todas as fraturas presentes no caminho mais extenso, de forma única e em ordem crescente. Esta matriz auxiliar é relacionada com a matriz h , permitindo a obtenção rápida das posições, em termos de linha da matriz, das respectivas cargas hidráulicas calculadas, facilitando o cálculo do gradiente hidráulico buscado. Outra matriz auxiliar criada foi a matriz L2, que lista apenas os comprimentos dos trechos presentes no caminho mais longo, excluindo trechos que não se tem interesse neste momento.

Já para o cálculo das vazões, utilizou-se diretamente a relação apresentada na Equação 51, para cada um dos trechos simulados. Para fazer este cálculo de forma mais direta, mas uma matriz auxiliar foi criada, listando apenas os valores de condutância dos trechos presentes na simulação. Desta forma, um produto elemento por elemento entre esta matriz auxiliar e os gradientes hidráulicos calculados anteriormente fornecem as vazões buscadas, de forma ordenada.

Com estes cálculos realizados, a simulação hidráulica é finalizada. A partir deste momento, o usuário pode explorar os resultados obtidos, por meio de gráficos e planilhas, também disponíveis no módulo 2. Desta forma, é possível visualizar todos os parâmetros de interesse desta simulação, tais como as condutâncias, os gradientes hidráulicos e as vazões em cada um dos trechos dos condutos unidimensionais equivalentes; assim como as cargas hidráulicas obtidas em cada um dos centros dos discos representativos das fraturas. Tais funcionalidades são apresentadas no tópico a seguir, que lista as possibilidades de apresentação dos resultados da ferramenta FratCond, tanto com relação aos obtidos na execução do módulo 1 quanto do módulo 2.

3.4 EXIBIÇÃO DOS RESULTADOS FORNECIDOS

Após a realização das simulações, em ambos os módulos disponíveis na ferramenta FratCond, o usuário pode então explorar os resultados obtidos por meio de gráficos e planilhas exportáveis. Este tópico do trabalho visa apresentar estes elementos, em termos de aspectos metodológicos importantes utilizados na sua elaboração e disponibilização na ferramenta produzida. A visualização de como tais gráficos e planilhas são apresentadas ao usuário é mostrada no capítulo de Resultados, levando em conta o exemplo hipotético utilizado neste trabalho.

As Tabelas 3 e 4 apresentam os gráficos e planilhas disponíveis ao usuário, em cada um dos módulos da ferramenta FratCond. Ao todo, estão disponíveis 13 gráficos e 2 planilhas para exploração dos resultados obtidos nas simulações. As referidas tabelas também apresentam um resumo do conteúdo abordado por cada uma destas representações.

Tabela 3 – Lista dos gráficos e planilhas disponíveis no módulo 1 da ferramenta FratCond

Nome do gráfico	Conteúdo apresentado
Gráfico 1 – Locação dos centros das fraturas	Apresenta a posição dos pontos centrais dos discos representativos das fraturas, no interior do volume de simulação.
Gráfico 2 – Valores de abertura	Apresenta os valores de abertura de fratura, em milímetros, obtidos por meio de uma distribuição lognormal.
Gráfico 3 – Valores de comprimento (diâmetros dos discos representativos)	Apresenta os valores de comprimento de fraturas, em metros, obtidos por meio de uma distribuição lognormal. Tais valores correspondem aos diâmetros dos discos representativos das fraturas
Gráfico 4 – Discos representativos das fraturas – visão geral	Apresenta uma visão geral dos discos representativos das fraturas, no interior do volume de simulação
Gráfico 5 – Discos representativos das fraturas – plano yz	Apresenta uma visão do plano yz do volume de simulação, com discos representativos, permitindo a visualização dos ângulos de mergulho das fraturas.

(Continuação Tabela 3)

Gráfico 6 – Locação dos pontos de interseção	Apresenta a posição de interseção obtidos a partir das fraturas geradas, no interior do volume de simulação.
Gráfico 7 – Condutos e pontos de interseção	Apresenta o traçado dos condutos unidimensionais equivalentes definidos, em conjunto com os pontos de interseção e os centros das fraturas
Planilha 1 – Dados da simulação	Apresenta, em termos numéricos, todos os resultados obtidos na execução do módulo 1.

Fonte: Autor (2018)

Tabela 4 – Lista dos gráficos e planilhas disponíveis no módulo 2 da ferramenta FratCond

Nome do gráfico	Conteúdo apresentado
Gráfico 8 – Condutâncias (todos os trechos)	Apresenta todos os trechos dos condutos unidimensionais, em escala de cores, considerando os valores de condutância obtidos, em m^3/s
Gráfico 9 – Condutâncias (apenas trechos conectados ao caminho mais longo)	Apresenta apenas os trechos dos condutos unidimensionais pertencentes ao caminho mais extenso, em escala de cores, considerando os valores de condutância obtidos, em m^3/s
Gráfico 10 – Gradientes hidráulicos	Apresenta apenas os trechos dos condutos unidimensionais pertencentes ao caminho mais extenso, em escala de cores, considerando os valores de gradientes hidráulicos obtidos, em m/m .
Gráfico 11 – Vazões	Apresenta apenas os trechos dos condutos unidimensionais pertencentes ao caminho mais extenso, em escala de cores, considerando os valores de vazões obtidos, em m^3/s .
Gráfico 12 – Cargas hidráulicas – nós e trechos	Apresenta os nós da rede de condutos unidimensionais, em escala de cores, considerando os valores de carga hidráulica obtidos, em m , em conjunto com o traçado dos trechos.

(Continuação Tabela 4)

Gráfico 13 – Cargas hidráulicas – somente nós	Apresenta somente os nós da rede de condutos unidimensionais, em escala de cores, considerando os valores de carga hidráulica obtidos, em m.
Planilha 2 – Dados da simulação hidráulica	Apresenta, em termos numéricos, todos os resultados obtidos na execução do módulo 1 e do módulo 2.

Fonte: Autor (2018)

A plotagem dos gráficos e planilhas na ferramenta FratCond é indicada pelo usuário, a partir de um menu pop-up disponível na interface gráfica. Cada módulo dispõe de um menu deste tipo para a escolha dos gráficos acima apresentados. A partir desta indicação, rotinas produzidas consultam as matrizes e vetores que contém os dados da simulação para gerar as imagens propostas, utilizando funções disponíveis no ambiente MATLAB.

Cada representação é plotada de forma independente, em uma janela individual, não se sobrepondo a outro que possivelmente já esteja plotada. Ressalta-se que a plotagem dos gráficos é realizada dentro do ambiente MATLAB, que disponibiliza, além de funções pré-definidas para este trabalho, ferramentas adicionais para a visualização das imagens apresentadas, tais como ajuste de zoom e modificação na posição de visualização do gráfico, considerando as três dimensões. O referido ambiente também possibilita a exportação das imagens, permitindo o salvamento destas nos formatos mais utilizados, tais como o .JPG e o .PNG. No caso das planilhas, é criado um arquivo externo ao ambiente MATLAB, aberto diretamente no Microsoft Office Excel, permitindo o uso de todas as funcionalidades disponíveis neste último software, além da exploração direta de todos os dados gerados, em termos de análise numérica.

Ao escolher o gráfico 1, o usuário visualiza a localização dos centros dos discos representativos das fraturas geradas estocasticamente. Tais centros são plotados utilizando a função *scatter3*, disponível no MATLAB, para a plotagem de pontos em um espaço tridimensional. Utiliza-se para esta plotagem as coordenadas (x,y,z) dos centros das fraturas, geradas a partir de uma distribuição uniforme, na execução do módulo 1. Os pontos plotados tem seu contorno em diferentes cores, considerando a família a que a fratura representada faz parte, identificada a partir de uma legenda complementar. Junto aos pontos, é colocado

o número identificador da fratura, possibilitando a correlação rápida deste ponto com a fratura que representa. O contorno do volume de simulação também é apresentado, em linha tracejada, permitindo uma visualização geral da posição dos centros em relação a todo o meio simulado.

Já o gráfico 2 apresenta os valores de abertura de fratura, obtidos após o uso da distribuição lognormal, na execução do módulo 1. Este gráfico também utiliza a função *scatter3*, disponível no MATLAB. Plota-se novamente pontos com as coordenadas (x, y, z) dos centros das fraturas. Porém, tais pontos têm preenchimento diferenciado, em função do valor de abertura obtido estocasticamente. Estes valores são agrupados em até 6 classes, sendo que cada classe possui uma cor específica, indicada em legenda complementar. Assim, é possível a determinação de qual intervalo está contido o valor de abertura da fraturada analisada. Analogamente ao gráfico 1, todas os pontos são identificados pelo respectivo número identificador da fratura que representam. O contorno do volume de simulação também é colocado neste gráfico, em linhas tracejadas.

O gráfico 3 é construído de forma igual ao gráfico 2, para apresentar os valores de comprimento de fratura obtidos na distribuição lognormal, aplicada no módulo 1 da ferramenta. É importante relembrar que tais valores correspondem ao diâmetro dos discos representativos das fraturas e é um importante parâmetro para estimar a área ocupada pela fratura e a tendência de ocorrência de cruzamento entre diferentes fraturas. Novamente, os valores obtidos na distribuição são agrupados em até 6 classes, com cada classe sendo identificada por uma cor, indicada em legenda complementar. Números identificadores de fratura e o contorno do volume de simulação também estão presentes nesta representação.

O gráfico 4 apresenta uma visão geral do volume de simulação com todos os discos representativos das fraturas. Estes discos foram plotados a partir da equação paramétrica de discos tridimensionais, já apresentada anteriormente. Tal equação fornece cada ponto formador do disco, a partir de um ângulo central estabelecido. Neste sentido, para apresentar a forma mais próxima dada por estes pontos, utilizou-se a função de plotagem *plot3*, que interliga um conjunto de pontos, com coordenadas (x,y,z). Considerando que o intervalo angular entre os pontos dados pela equação paramétrica foi pequeno, a plotagem apresenta bem a forma circular buscada. Os discos são plotados sem preenchimento, mas com contorno

diferenciado, em termos de cores, considerando a família a que fratura pertence. Tais cores são identificadas em uma legenda complementar. O contorno do volume de simulação também é indicado, com linhas tracejadas.

A depender da quantidade de fraturas e do comprimento que estas assumem, o gráfico 4 pode se tornar de difícil interpretação, especialmente para visualização de suas orientações. Neste sentido, foi proposto a construção do gráfico 5, que apresenta a vista do plano xz do volume de simulação, com os respectivos discos representativos das fraturas. A visualização neste plano permite uma melhor identificação do ângulo de mergulho das fraturas geradas, além das possíveis interseções que ocorrem entre estas descontinuidades. Diferentemente do gráfico anterior, o gráfico 5 apresenta o número identificador das fraturas, o número identificador das interseções, além dos pontos de cruzamento entre as fraturas. O contorno do volume de simulação também está presente, com linhas tracejadas.

O gráfico 6 apresenta a localização dos pontos de interseção definidos entre as fraturas e considerados para o traçado dos condutos unidimensionais equivalentes. Novamente, utiliza-se a função *scatter3*, disponível no MATLAB, para a plotagem de tais pontos, com suas respectivas coordenadas (x, y, z). Todos os pontos possuem preenchimento na cor preta, sem contornos aparentes. Junto aos pontos, também é inserido os números identificadores das interseções que representam, permitindo sua correlação rápida com as fraturas que apresentam. O contorno do volume de simulação também continua presente, com linhas tracejadas, permitindo uma visualização geral da posição das interseções em relação a todo o meio simulado.

Já o gráfico 7 apresenta o traçado dos condutos unidimensionais equivalentes, em conjunto com os pontos centrais dos discos representativos e dos pontos de interseção determinados. Neste gráfico, utiliza-se duas funções do MATLAB, em conjunto: os pontos são plotados novamente pela função *scatter3*, seguindo a mesma lógica dos gráficos anteriores, considerando as coordenadas (x, y, z) dos centros e dos pontos de interseção; enquanto os trechos de condutos são traçados pela função *line*, que interliga um conjunto de pontos fornecidos, em sequência, por linhas retas. Tais linhas foram plotadas sempre de 3 em 3 pontos, considerando a sequência centro-interseção-centro, que forma os trechos de condutos. Os pontos de centro de fraturas são inseridos sem preenchimento, com contorno

na cor rosa, enquanto os pontos de interseção são vistos com preenchimento em preto, sem contorno aparente. Junto aos pontos, visualiza-se também os números identificadores das fraturas e das interseções, facilitando o cruzamento com outras informações do modelo simulado. O contorno do volume de simulação também é plotado, em linhas tracejadas, permitindo a visão geral da posição dos condutos em relação a todo o volume de simulação.

Como último elemento de exploração dos resultados obtidos no módulo 1 da ferramenta, dispõe-se da planilha 1, que resume todos os dados de geometria envolvidos no modelo simulado. A geração da planilha 1 utiliza-se linhas de código disponíveis no ambiente MATLAB, que são ligeiramente semelhantes a aqueles presentes na linguagem Visual Basic, e que permitem a exportação dos dados gerados para planilhas. Comando básicos, neste sentido, a serem utilizados neste sentido, podem ser visualizados em MathWorks (2018c).

Esta planilha possui 3 abas, concebidas para melhor visualização dos resultados na forma numérica. A aba 1 lista todos os dados de entrada inseridos pelo usuário para geração da geometria analisada. Assim, as dimensões do volume de simulação, as densidades, valores estatísticos de comprimento, abertura e orientação de fratura de cada uma das famílias simuladas são apresentados ao usuário. A aba 2 informa todos os dados gerados de forma estocástica, para cada uma das fraturas. Assim, as coordenadas dos centros dos discos representativos, os raios, as aberturas, o vetor unitário de orientação e os respectivos ângulos de direção e de mergulho, tem seus valores numéricos apresentados. Por fim, a aba 3 apresenta os dados das interseções obtidas. Lista-se, por meio dos identificadores de interseção, quais as fraturas se interceptam e quais as coordenadas do ponto de interseção entre estas fraturas.

Ao ser exportada, as planilhas são comumente salvas na pasta Meus Documentos, considerando a execução da rotina no ambiente Windows, recebendo o nome *FratCond_dados_simulação data-hora*, sendo a data e a hora correspondente dia e ao horário de exportação do referido resultado. É importante ressaltar que o usuário pode exportar a mesma planilha várias vezes, sem haver a sobreposição de arquivos, com mesmo nome. Porém, para verificar a qual modelo se refere a planilha exportada, os cabeçalhos das abas contam com uma célula, que apresenta a data e o horário de geração da geometria, fixada no momento da execução do módulo 1. A comparação deste cabeçalho entre

diferentes arquivos permite a identificação rápida da possível repetição de modelos simulados.

Considerando agora os gráficos disponíveis após a execução do módulo 2 da ferramenta FratCond, relativo à simulação hidráulica, o gráfico 8 apresenta os valores de condutância obtidos para todos os trechos de condutos unidimensionais equivalentes. Este gráfico replica o gráfico 6, construído utilizando as funções *scatter3* e *line*. Porém, os trechos são exibidos em escala de cores, considerando os valores de condutância obtidos. Tais valores podem ser agrupados em até 6 classes, para exibição no gráfico. Uma legenda complementar informa ao usuário os intervalos de classe e as cores correspondentes. Junto a cada um dos trechos, um número identificador é inserido, que corresponde ao mesmo identificador de interseção, já utilizado anteriormente. Novamente, o contorno do volume de simulação é exibido, permitindo a visualização da posição geral dos trechos em relação ao todo.

Os gráficos 9, 10 e 11 são construídos de forma semelhante, considerando apenas a diferença de variável analisada, sendo exibidos as condutâncias, os gradientes hidráulicos e as vazões, respectivamente. Estes gráficos mostram apenas os trechos conectados ao caminho mais extenso, que foi efetivamente simulado hidraulicamente. Tais trechos são traçados, considerando o uso das funções *scatter3* e *line*, porém consultando os dados obtidos na matriz INT3. Novamente, os trechos são exibidos em escala de cores, levando em conta os valores das variáveis analisadas. Até 6 classes podem ser criadas nestes gráficos, sendo que uma legenda complementar informa os seus intervalos e os valores considerados. Os trechos são identificados pelos respectivos números identificadores das interseções.

Os gráficos 12 e 13 são complementares entre si, uma vez que ambos exibem os resultados obtidos para as cargas hidráulicas. Ambos os gráficos utilizam as funções *scatter3* e *line* para sua plotagem, sendo que o destaque maior é dado agora aos nós da rede de condutos. O gráfico 12 os coloca em escala de cores, considerando os valores calculados, reunidos em até 6 classes, informadas em uma legenda complementar. Junto a estes nós, os trechos também são esquematizados, permitindo a visualização do caminhamento da água no interior das fraturas. Tanto os nós quanto os trechos são identificados neste gráfico, pelos seus respectivos IDs. Os nós que receberam uma das condições de contorno impostas no modelo têm seu número identificador destacado por um quadrado em seu entorno.

O gráfico 13 apresenta apenas os nós das redes de condutos, sem a presença dos trechos de condutos. Desta forma, a quantidade de informações é reduzida, permitindo uma melhor leitura das cargas hidráulicas. A mesma escala de cores e os mesmos intervalos de classe são utilizados, em relação ao gráfico 12. Uma informação adicional inserida neste gráfico, junto aos nós, é o valor numérico propriamente dito da carga hidráulica obtida, permitindo assim uma rápida visualização deste resultado, sem a necessidade consultar a planilha 2. A identificação das fraturas e o destaque aos nós que receberam cargas hidráulicas impostas pela condição de contorno também continuam presentes.

Por fim, a planilha 2 reúne os resultados obtidos, tanto na execução do módulo 1 quanto do módulo 2 da ferramenta FratCond, considerando o modelo analisado. Tal planilha é concebida de forma análoga a planilha 1, utilizando linhas de código de exportação de dados do MATLAB para o Microsoft Excel. Ao ser exportada, a planilha 2 é salva na pasta Meus Documentos (considerando o uso em ambiente Windows), com o nome *FratCond_dados_simulação_hidraulica data-hora*, sendo a data e a hora correspondente ao momento de exportação deste arquivo.

A planilha 2 contém 5 abas, distribuídas de forma a facilitar a consulta aos resultados. As 3 primeiras abas são semelhantes as abas presentes na planilha 1, considerando os dados de entrada e os resultados relativos à geometria do modelo simulado. Adiciona-se à aba 1 os dados de entrada da simulação hidráulica, inseridos pelo usuário para a realização da simulação. Assim, as condições de contorno nas faces do volume de simulação e a forma de determinação da condutância são exibidas em conjunto com os demais dados inseridos. Já as abas 2 e 3 não apresentam diferenças em relação a planilha anterior.

As abas adicionais da planilha 2 apresentam resultados numéricos de interesse obtidos na simulação hidráulica. A aba 4 lista os dados dos trechos de condutos unidimensionais gerados. Dispõe-se aqui o identificador da interseção, os nós que iniciam e terminam o trecho, seu comprimento total, além de valores utilizados no cálculo da condutância, tais como a largura do conduto equivalente, a abertura média de transporte, a transmissividade média do conduto e a respectiva condutância obtida. Tais dados são fornecidos para todos os trechos obtidos, independente da sua presença ou não no caminho mais longo. Já a aba 5 lista dos dados do caminho mais extenso, simulado hidráulicamente. Nesta aba, é possível

obter, para cada um dos trechos simulados, os valores de comprimento, de condutância, as cargas hidráulicas nos nós de extremidade do trecho, assim como o gradiente hidráulico e as vazões calculadas. Outras informações adicionais fornecidas nesta aba se relacionam as cargas hidráulicas transportadas, listando-se os nós que receberam tal condição e o respectivo valor imposto; além das condições obtidas na execução do método numérico, no que tange a quantidade de iterações realizadas, o erro residual obtido e a situação de convergência do método.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos neste trabalho, a partir da aplicação da metodologia apresentada no capítulo anterior, no desenvolvimento da ferramenta FratCond. É dado um maior enfoque aos produtos obtidos para um usuário comum, que não tem um contato direto com a programação das rotinas desenvolvida. Desta forma, inicialmente, apresenta-se a interface gráfica montada para a recepção dos dados de entrada para a simulação a serem informados. Destaca-se quais os pontos importantes a serem levados em conta e como o usuário deve agir para a correta execução das rotinas propostas. Em seguida, destaca-se, de forma comentada, os gráficos e planilhas propostos pela ferramenta e que podem ser explorados pelo usuário, na análise de suas simulações. Tais elementos serão visualizados a partir de um exemplo hipotético, simulado na ferramenta, cujos dados também serão apresentados em seguida.

Ao final deste capítulo, espera-se que o leitor esteja a par de todo o funcionamento da ferramenta, relacionando-o com toda a metodologia apresentada anteriormente. Além disso, é possível verificar todas as possibilidades de análise trazidas pela ferramenta, tanto no que tange a geração estocástica de fraturas, quanto na simulação hidráulica de aquíferos fraturados, considerando o uso de condutos unidimensionais equivalentes.

4.1 INTERFACE GRÁFICA DA FERRAMENTA FRATCOND

De forma a isolar o código implementado do usuário final da ferramenta, uma das primeiras etapas realizadas no desenvolvimento da ferramenta FratCond, foi a elaboração de uma

interface gráfica amigável ao usuário. Esta interface, apresentada na Figura 51, tem também o objetivo de receber todos os dados de entrada, a serem informados no início das simulações, além de contar com botões, que controlam as ações durante o uso da ferramenta proposta.

Ao visualizar a interface, o usuário já percebe a divisão das áreas destinadas a recepção dos dados de entrada de ambos os módulos da ferramenta. A parte superior fica destinada a receber os dados para a geração estocástica das fraturas e obtenção dos condutos unidimensionais, enquanto a parte inferior destina-se aos valores necessários para a execução da simulação hidráulica. É importante relembrar que o módulo 2 não é executado sem que o módulo 1 tenha sido previamente rodado, gerando a geometria a ser utilizada.

A sequência de inserção dos dados deve seguir aquela apresentada ao longo da metodologia, executando primeiramente o módulo 1, preenchendo os itens de forma sequencial, ao longo da interface da ferramenta. Assim, deve-se:

- Escolher qual o tipo de volume a ser simulado: cúbico ou prismático;
- Inserir as dimensões do volume de simulação;
- Indicar a quantidade famílias a serem simuladas;
- Inserir os valores estatísticos de cada um dos parâmetros de caracterização das famílias:
 - Densidade das fraturas, em termos volumétricos;
 - Média e desvio padrão do comprimento das fraturas;
 - Média e desvio padrão da abertura das fraturas;
 - Valores de média dos ângulos de orientação das fraturas, em termos de ângulo de mergulho (dip) e ângulo de direção (strike), além do parâmetro k de Fisher.
- Escolher a opção “Gerar fraturas” para execução das rotinas propostas no módulo 1 da ferramenta.

É importante salientar que na Figura 51 todos os campos passíveis de preenchimento disponíveis ao usuário são mostrados. Porém, nem sempre todos estes campos estarão visíveis, destacando-se as seguintes situações:

Figura 51 – Interface gráfica da ferramenta FratCond

FratCond - Gerador estocástico de fraturas e modelagem hidráulica de aquíferos fraturados, usando condutos equivalentes

Módulo 1 - Gerador Estocástico de Fraturas

Dados iniciais do modelo

Volume da simulação: Cúbico Comprimento (m): Número de famílias de fraturas na formação: 5

Família 1	Família 2	Família 3	Família 4	Família 5
Densidade de fraturas (1/m ³):				
Comprimento das fraturas (m):				
Média:	Média:	Média:	Média:	Média:
Desvio padrão:				
Abertura das fraturas (mm):				
Média:	Média:	Média:	Média:	Média:
Desvio padrão:				
Orientação das fraturas (°):				
Média do ângulo de mergulho (dip):				
Média do ângulo de direção (strike):				
Parâmetro k de Fisher:				

Limpar dados Gerar fraturas Explorar resultados: <escolha uma opção a ser exibida e clique em ok> Ok

Módulo 2 - Simulação Hidráulica

Condições de contorno

Insira valores de carga hidráulica ao menos em uma das faces do volume simulado:

Face esquerda (m): 0	Face direita (m): 0
Face de fundo (m): 0	Face frontal (m): 0

Limpar dados Simulação Hidráulica Explorar resultados: <escolha a opção a ser exibida e clique em ok> Ok

Determinação da condutância

Calculada a partir das propriedades das fraturas
 Segundo uma distribuição lognormal

Fonte: Autor (2018)

- A escolha do tipo de volume alterna a exibição dos campos de inserção das dimensões. Se o volume é cúbico, apenas uma dimensão é necessária, ficando apenas um campo à disposição do usuário. Caso o volume seja prismático, três campos ficam à disposição para inclusão de comprimento, largura e profundidade do volume simulado.
- Os campos para inserção dos dados estatísticos das famílias também variam, em função do número de famílias designado pelo usuário, que pode variar de 1 a 5. Por exemplo, se o usuário opta por simular uma formação com apenas 2 famílias, apenas as áreas das famílias 1 e 2 ficarão disponíveis para preenchimento, enquanto as áreas destinadas às famílias 3, 4 e 5 permanecem ocultas, evitando preenchimentos desnecessários.
- O botão “Ok” destinado a exploração dos resultados do modulo 1, ao lado do menu pop-up destinado a escolha do gráfico a ser exibido, só fica ativo a partir do momento em que a geração das fraturas foi executada. O mesmo ocorre para o módulo 2.

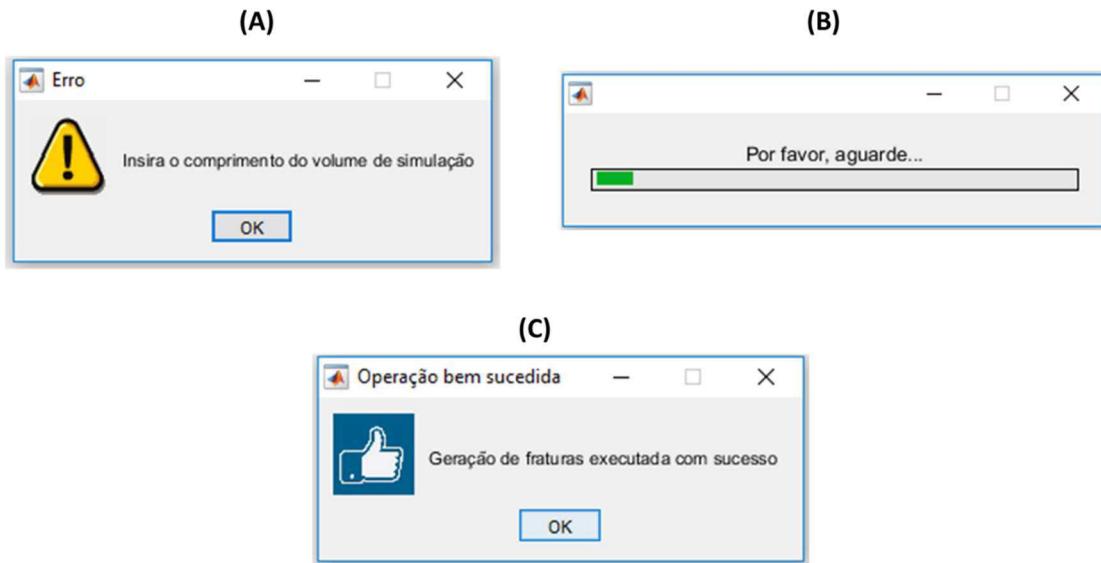
Para executar o módulo 2, após a execução bem-sucedida da geração de fraturas, o usuário deve preencher os dados de entrada na região inferior da interface, a saber:

- Inserir, ao menos, uma condição de contorno, na forma de carga hidráulica nas faces do volume de simulação.
- Escolher a forma de determinação da condutância. Caso o usuário opte pelo uso da distribuição lognormal, os campos para inserção da média e desvio padrão ficam disponíveis para preenchimento.
- Clicar sobre o botão “Simulação hidráulica” para execução das rotinas propostas ao módulo 2 da ferramenta.

É importante ressaltar que se o usuário inserir valores incoerentes para qualquer um dos parâmetros envolvidos na simulação, seja no módulo 1 ou no módulo 2, avisos de advertência são emitidos, ao se tentar a executar os módulos. Exemplos disso seriam valores negativos para as médias de comprimento e abertura das fraturas, uma vez que estes valores são dimensionais e não assumem resultados menores que zero; ou a ausência do preenchimento das condições de contorno.

Analogamente, durante a execução da geração das fraturas, é exibido uma janela indicativa do progresso da rotina. Tal janela foi inserida especialmente para o módulo 1, pois, em função da quantidade de fraturas a ser gerada, a determinação das interseções pode ter longa duração. Desta forma, o usuário deve aguardar o fim da execução do módulo, acompanhando o progresso nesta janela indicativa. Caso as rotinas sejam corretamente executadas, uma janela indica o usuário o sucesso na execução do módulo. A Figura 52 ilustra estas janelas de advertência, na forma com aparecem ao usuário da ferramenta FratCond.

Figura 52 – Janelas de advertência da ferramenta Fratcond: (a) janela indicando valores incoerentes ou falta de valores, (b) janela indicativa de progresso da rotina e (c) janela indicativa de sucesso na execução da rotina

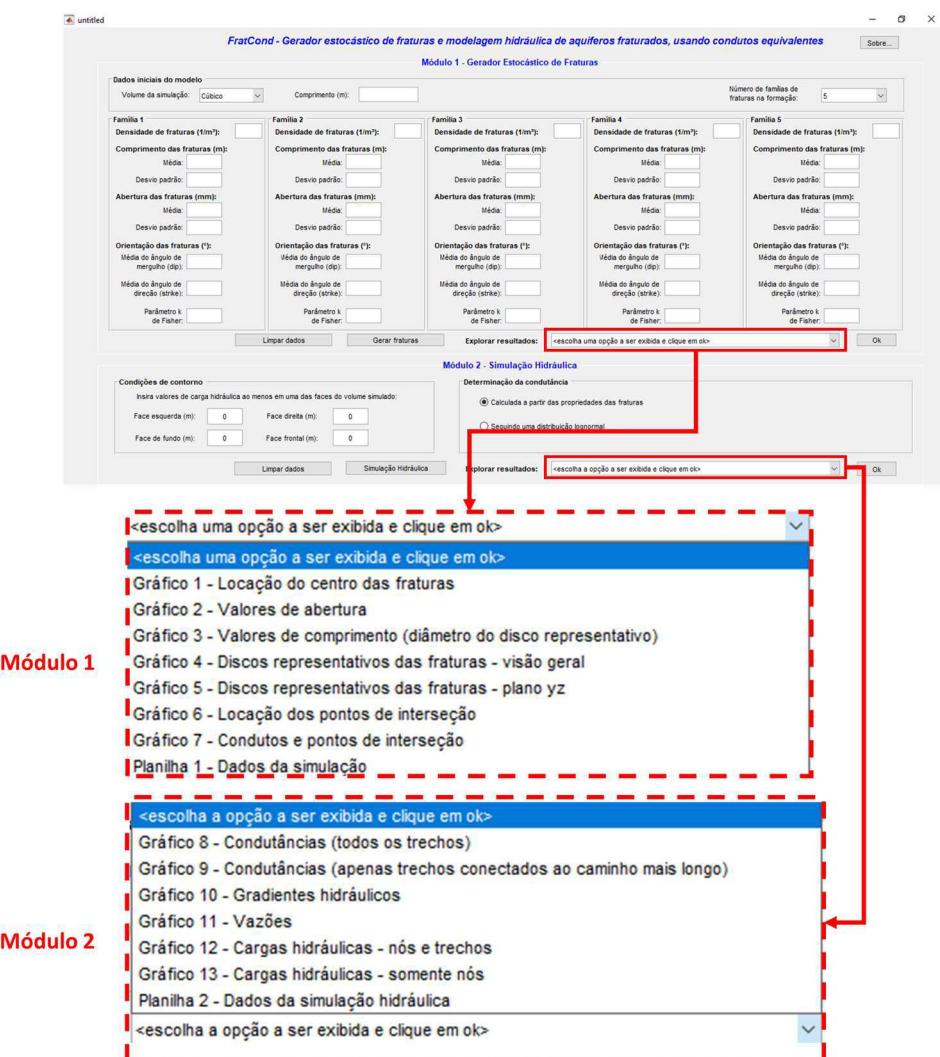


Fonte: Autor (2018)

Para agilizar a mudança de dados, de uma simulação para a próxima, foram inseridos dois botões, sendo um para cada módulo da ferramenta, nomeados de “Limpar dados”. Este botão deleta os valores que estejam preenchendo todos os campos do módulo em questão. Caso o usuário realize muitas simulações, com intensa mudança de dados, recomenda-se que a aplicação seja reinicializada, a fim de evitar possíveis problemas de mistura e sobreposição de dados nas variáveis que fazem parte das rotinas, que possivelmente não sejam corretamente limpas com o uso dos botões disponíveis na interface gráfica.

Após a execução bem-sucedida de cada um dos módulos, o usuário pode explorar os gráficos e planilhas disponíveis na ferramenta FratCond. Para isso, basta utilizar os menus pop-up extensíveis disponíveis na parte inferior de cada um dos módulos. Nestes menus, é necessário escolher qual dos gráficos será plotado. Posteriormente, basta clicar sobre o botão “ok”, disponível logo ao lado da lista. O gráfico escolhido é, em seguida, apresentado em uma janela adicional. Caso uma planilha tenha sido escolhida, o referido arquivo é aberto diretamente no Microsoft Excel. Uma janela de advertência indica que a plotagem foi bem-sucedida. A Figura 53 apresenta a forma como a lista de gráficos é mostrada na interface da ferramenta, em cada um dos módulos. Esta lista segue a mesma nomenclatura e sequência apresentada na metodologia deste trabalho.

Figura 53 – Menus para exploração dos resultados obtidos, em cada um dos módulos da ferramenta FratCond



Fonte: Autor (2018)

A interface ainda dispõe de um botão na região superior direita, nomeado de “Sobre”. Neste botão, o usuário pode obter o contato dos desenvolvedores da ferramenta FratCond, em caso de dúvidas ou problemas encontrados na sua utilização.

Ressalta-se que para a utilização da ferramenta FratCond, é necessário dispor do ambiente MATLAB instalado no computador, uma vez que o seu desenvolvimento foi todo realizado neste programa computacional. A ferramenta conta com dois arquivos base: um arquivo com a extensão *.m*, que contém todas as rotinas programadas no referido ambiente; e um arquivo com a extensão *.fig*, que contém o design da interface gráfica implementada. Ambos os arquivos se relacionam diretamente para o correto funcionamento da ferramenta. No momento da abertura do MATLAB, para utilizar o FratCond, o usuário deve primeiramente abrir o arquivo *.m*, sem a necessidade de alterá-lo. Ao chamar a execução do código, a interface gráfica é diretamente aberta, permitindo a inserção dos dados de entrada e a realização das simulações, conforme os passos aqui descritos.

4.2 EXPLORAÇÃO DOS RESULTADOS FORNECIDOS PELA FERRAMENTA FRATCOND A PARTIR DE EXEMPLO HIPOTÉTICO

Após a apresentação da interface gráfica e da explanação sobre seu uso, este tópico visa expor as possibilidades de exploração dos resultados fornecidos pela ferramenta FratCond, considerando os gráficos e planilhas disponíveis ao usuário. Tal exposição será feita a partir de um exemplo de formações fraturadas hipotéticas, utilizado apenas de forma didática, para ilustração do uso da ferramenta proposta neste trabalho. Esta formação tem seus dados apresentados na Tabela 5 e na Figura 54, considerando os dados de entrada necessários para a realização das simulações, já tratados estatisticamente.

É importante ressaltar que a replicação deste exemplo na ferramenta não garante a obtenção de resultados exatamente iguais aos aqui mostrados. Como as fraturas são geradas de forma estocástica, considerando as diferentes distribuições estatísticas, condicionando assim a geometria do modelo hidráulico simulado, cada execução das rotinas tende a apresentar resultados numericamente diferentes. Desta forma, recomenda-se apenas a comparação de resultados em termos de ordem de grandeza, que não devem apresentar extrema variação quando comparada aos exemplos simulados.

Tabela 5 – Dados do exemplo hipotético simulado na ferramenta FratCond

Volume de simulação		Cúbico - 5x5x5 m ³
Nº de famílias		3
Família 1	Densidade (1/m ³)	0.2
	Comprimento das fraturas (m)	Média: 1 Desvio padrão: 0
	Abertura das fraturas (mm)	Média: 0.5 Desvio padrão: 0.2
	Orientação das fraturas	Mergulho: 0° Direção: 0° k: 1000
Família 2	Densidade (1/m ³)	0.15
	Comprimento das fraturas (m)	Média: 0.5 Desvio padrão: 0.1
	Abertura das fraturas (mm)	Média: 0.2 Desvio padrão: 0.05
	Orientação das fraturas (°)	Mergulho: 45° Direção: 0° k: 1000
Família 3	Densidade (1/m ³)	0.1
	Comprimento das fraturas (m)	Média: 0.3 Desvio padrão: 0
	Abertura das fraturas (mm)	Média: 0.1 Desvio padrão: 0.05
	Orientação das fraturas (°)	Mergulho: 90° Direção: 0° k: 1000
Condições de contorno: Cargas hidráulicas nas faces do volume		Face esquerda: 100 m Face direita: 90 m Face de fundo: 90 m Face frontal: 85 m
Determinação da condutância		Com as propriedades das fraturas

Fonte: Autor (2018)

Figura 54 – Interface gráfica preenchida com os dados de entrada do exemplo proposto

FratCond - Gerador estocástico de fraturas e modelagem hidráulica de aquíferos fraturados, usando condutos equivalentes

Módulo 1 - Gerador Estocástico de Fraturas

Dados iniciais do modelo		Número de famílias de fraturas na formação:
Volume da simulação: Cúbico	Comprimento (m): 5	3
Família 1		
Densidade de fraturas (1/m ³): 0.2		
Comprimento das fraturas (m):		
Média: 1		
Desvio padrão: 0		
Abertura das fraturas (mm):		
Média: 0.5		
Desvio padrão: 0.2		
Orientação das fraturas (°):		
Média do ângulo de mergulho (dip): 0		
Média do ângulo de direção (strike): 0		
Parâmetro k de Fisher: 1000		
Família 2		
Densidade de fraturas (1/m ³): 0.15		
Comprimento das fraturas (m):		
Média: 0.5		
Desvio padrão: 0.1		
Abertura das fraturas (mm):		
Média: 0.2		
Desvio padrão: 0.05		
Orientação das fraturas (°):		
Média do ângulo de mergulho (dip): 45		
Média do ângulo de direção (strike): 0		
Parâmetro k de Fisher: 1000		
Família 3		
Densidade de fraturas (1/m ³): 0.1		
Comprimento das fraturas (m):		
Média: 0.3		
Desvio padrão: 0		
Abertura das fraturas (mm):		
Média: 0.1		
Desvio padrão: 0.05		
Orientação das fraturas (°):		
Média do ângulo de mergulho (dip): 90		
Média do ângulo de direção (strike): 0		
Parâmetro k de Fisher: 1000		

Limpar dados Gerar fraturas Explorar resultados: <escolha uma opção a ser exibida e clique em ok> Ok

Módulo 2 - Simulação Hidráulica

Condições de contorno		Determinação da condutância
Insira valores de carga hidráulica ao menos em uma das faces do volume simulado:		
Face esquerda (m): 100	Face direita (m): 90	<input checked="" type="radio"/> Calculada a partir das propriedades das fraturas
Face de fundo (m): 90	Face frontal (m): 85	<input type="radio"/> Segundo uma distribuição lognormal
Limpar dados Simulação Hidráulica		Explorar resultados: <escolha a opção a ser exibida e clique em ok> Ok

Fonte: Autor (2018)

Como ilustrado acima, o exemplo hipotético proposto para a avaliação da ferramenta FratCond, simula uma formação fraturada com um volume cúbico, com arestas de 5 metros de comprimento, totalizando $125\ m^3$. Tal formação é composta por 3 famílias de fraturas, com valores diferentes em todas as suas características físicas. Destaca-se que o parâmetro k de Fisher destas formações hipotéticas foi propositalmente elevado, para se obter fraturas com pequenas variações, em termos de orientação, considerando os fins didáticos deste exemplo. Para a simulação hidráulica, foram consideradas condições de contorno em todas as faces do volume de simulação, além do cálculo da condutância utilizando as propriedades das fraturas.

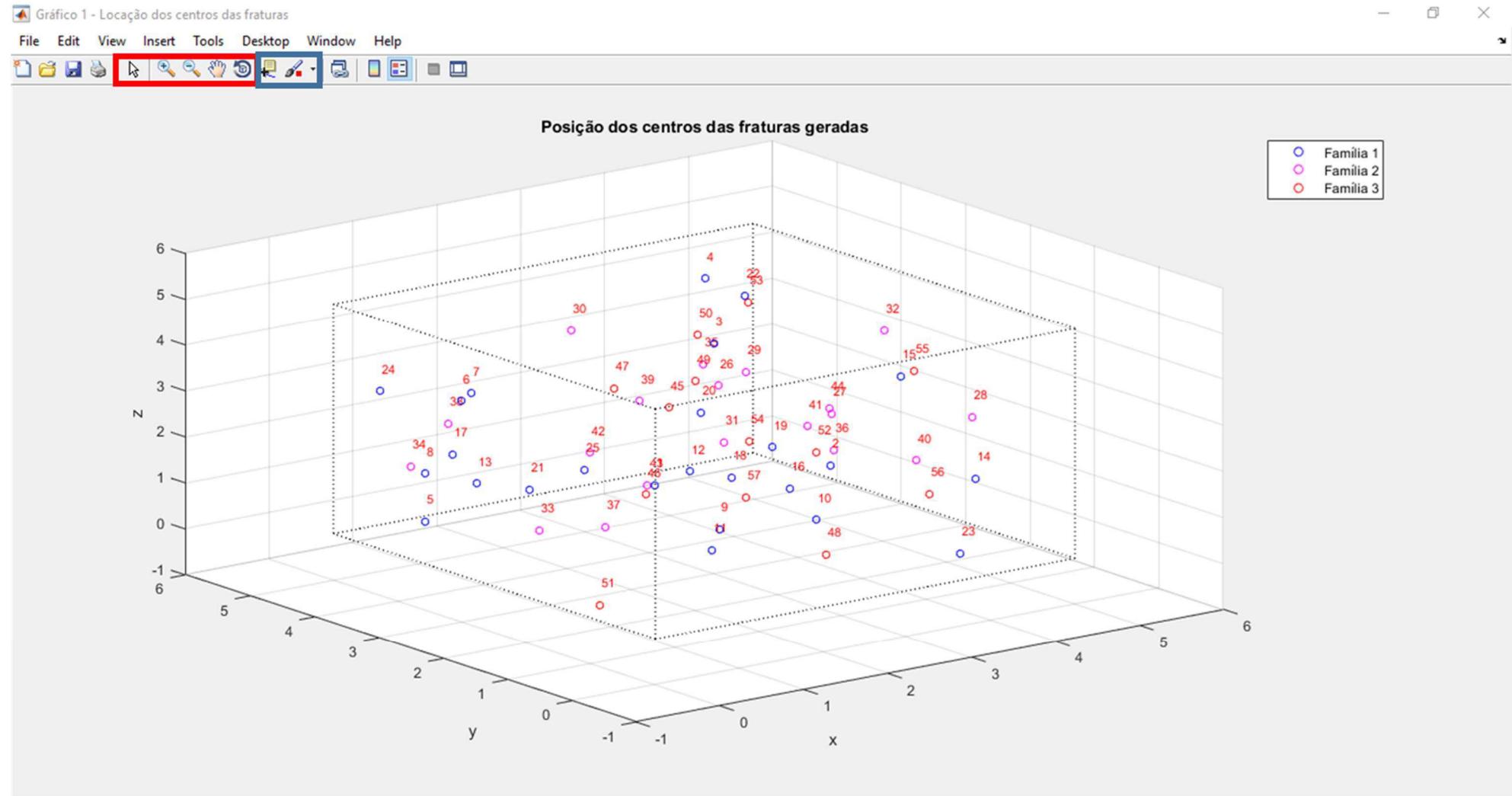
Ao executar o módulo 1, o usuário obtém a geração estocástica das fraturas e a determinação das interseções entre elas, permitindo o traçado dos condutos unidimensionais equivalentes. Após esta execução, o utilizador pode explorar os gráficos de 1 a 7, além da planilha 1, que contém os resultados da simulação neste módulo.

Para o exemplo hipotético avaliado, a Figura 54 apresenta o gráfico 1, onde se visualiza a posição dos centros das fraturas geradas. Relembra-se que tais centros são posicionados a partir da aplicação de uma distribuição uniforme. Nesta figura, nota-se que os centros são plotados sem preenchimentos, com contornos diferenciados, em função da família da fratura a que se refere, da seguinte forma:

- Família 1 – pontos azuis
- Família 2 – pontos rosas
- Família 3 – pontos vermelhos
- Família 4 – pontos verdes
- Família 5 – pontos pretos

Logo acima dos círculos, é colocado, em vermelho, o número identificador das fraturas. Este identificador é colocado em ordem crescente, sendo que a família 1 apresenta as fraturas com identificadores mais baixos e a última família apresenta identificadores mais elevados. O maior identificador corresponde a quantidade de fraturas geradas no modelo, dado pela relação direta entre o volume de simulação e a densidade de fraturas. No exemplo avaliado, para a família 1, tem-se $0,2 \frac{\text{fraturas}}{m^3} \times 125\ m^3 = 25\ fraturas$. Caso este cálculo não for-

Figura 54 – Posição dos centros das fraturas geradas para o exemplo hipotético proposto



Fonte: Autor (2018)

neça resultados inteiros, a quantidade de fraturas geradas é arredondada para cima. Ao se observar a Figura 54, observa-se que o exemplo proposto gerou 57 fraturas, sendo 25 pertencentes à família 1, 19 pertencentes à família 2 e 17 pertencentes à família 3.

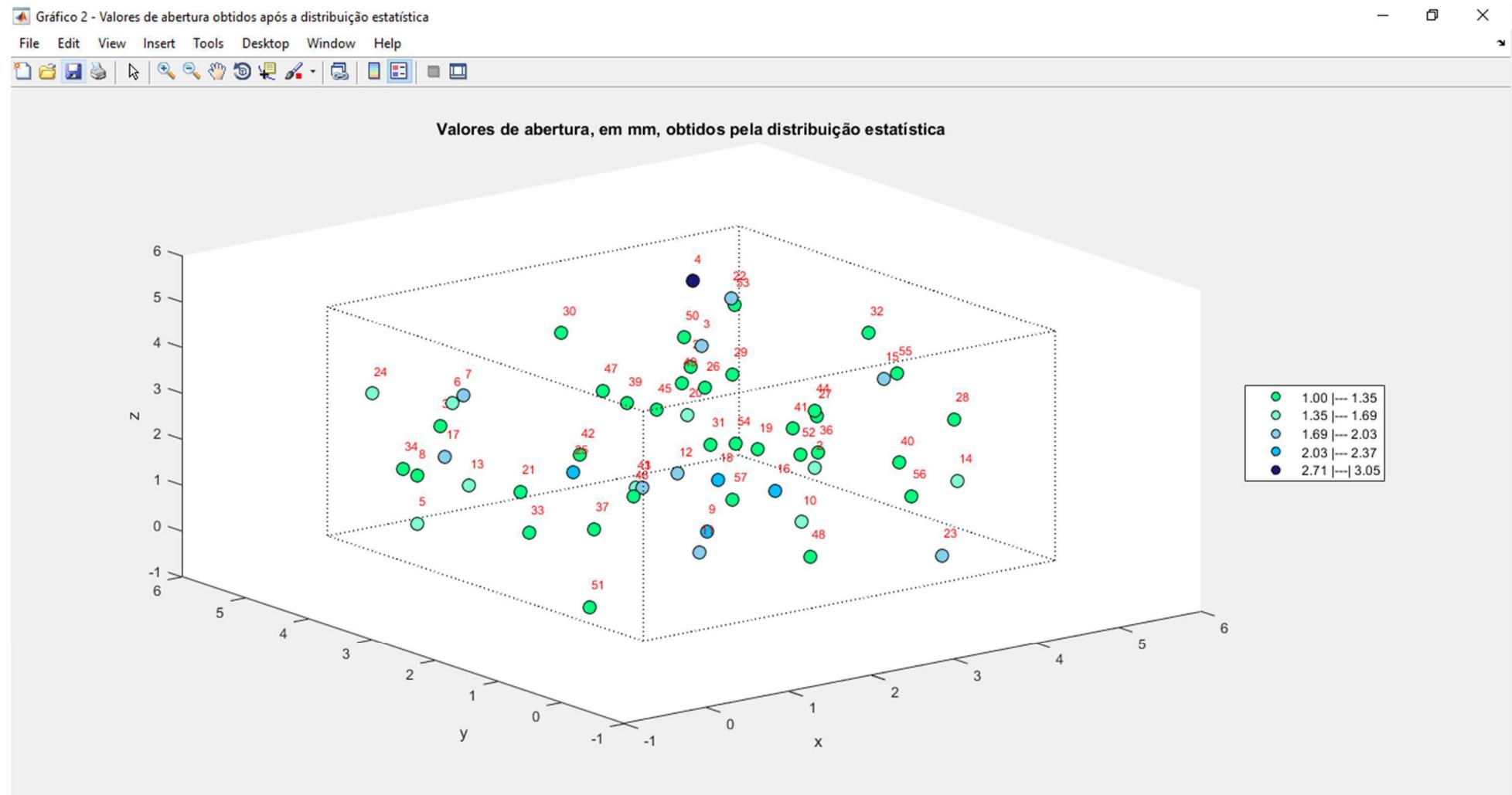
A análise da posição dos centros das fraturas possibilita ao usuário uma determinação prévia da localização dos pontos de maior interesse das descontinuidades, uma vez que a partir deles, os discos representativos das fraturas serão traçados. A posição dos centros permite se ter uma ideia do quanto fraturado o meio simulado é, em virtude da concentração ou não dos pontos representados no interior do volume. É possível ainda identificar fraturas que estejam possivelmente isoladas e que podem não estar conectadas a outras descontinuidades. Porém, esta análise deve ser feita de forma conjunta aos valores de comprimento assumidos pelas fraturas.

A Figura 54 permite ainda visualizar os contornos do volume de simulação, apresentados em linha tracejada. Tal representação, que será repetida nos demais gráficos plotados a partir da ferramenta, é feita considerando as dimensões e o formato indicados pelo usuário. A origem do sistema de coordenadas utilizado coincide com um dos vértices do referido volume. A partir dele, as demais dimensões são prolongadas ao longo dos eixos coordenados.

É importante ressaltar que os gráficos, ao serem plotados, no MATLAB, tem sua visualização na forma de projeção isométrica, como pode ser percebido na Figura 54. Porém, é possível manipular a posição de visualização do gráfico, a partir da área destacada pelo retângulo vermelho, na barra de ferramentas da referida figura. Ali, dispõe-se de ferramentas de zoom e de giro do referido volume, adequando a posição, conforme a necessidade do usuário. Outra ferramenta importante nesta barra é destacada pelo retângulo azul e permite ao usuário verificar, de forma rápida, qual o valor das coordenadas representadas pelos pontos do gráfico, além de possibilitar marcações e anotações no interior da plotagem. Ainda nesta barra de ferramentas, no lado esquerdo, dispõe-se de opções de salvamento e impressão da imagem plotada.

Já a Figura 55 apresenta o gráfico 2, que aborda os valores de abertura assumidos pelas fraturas geradas, após a aplicação da distribuição lognormal. Tais valores são obtidos consi-

Figura 55 – Valores de abertura de fratura, em mm, obtidos para o exemplo hipotético proposto



Fonte: Autor (2018)

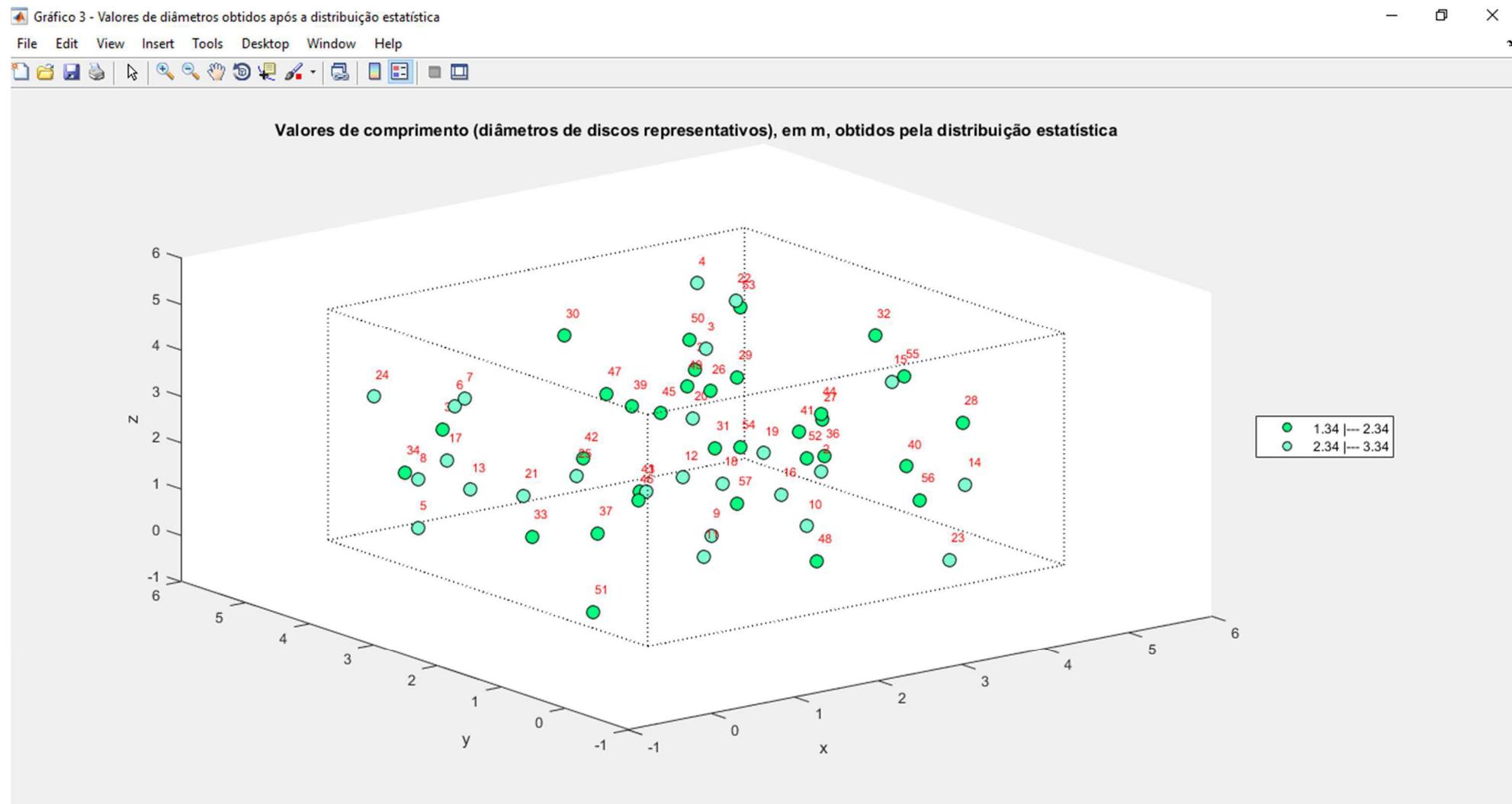
derando os valores estatísticos inseridos pelo usuário. O referido gráfico é formado por pontos, posicionados nas mesmas coordenadas dos centros das fraturas. Ao se comparar a posição dos pontos nos gráficos 1 e 2, a partir dos identificadores das fraturas, percebe-se que os pontos se encontram na mesma posição, em ambas as figuras. Porém, diferentemente do visto no primeiro gráfico, os pontos do gráfico 2 estão agrupados em uma escala de cores, em função do valor de abertura, em milímetros, assumido pela fratura que representam. A escala de cores varia de tons esverdeados, indicando valores mais baixos, a tons de azul, de mais claros a mais escuros, indicando valores mais altos da característica física avaliada. A legenda da figura informa ao usuário os intervalos de classe representados por cada cor.

Ao se avaliar os resultados mostrados na Figura 55, considerando os dados de entrada inseridos no exemplo hipotético estudado e cruzando com a informação de qual família pertence cada fratura, conforme o gráfico 1; nota-se que as aberturas com maiores valores, indicadas pelos círculos em tons de azul, são pertencentes a fraturas da família 1. Tal fato é claramente justificado pelos valores de média e desvio padrão inseridos para esta família, que são superiores aos valores das famílias 2 e 3. Por sua vez, estas duas últimas famílias tiveram, como dado de entrada, valores médios próximos, originando, então, fraturas com valores de aberturas também próximos, menores que a primeira família, conforme indicado pelos círculos em tons esverdeados, que dominam o gráfico.

A abertura das fraturas é um parâmetro extremamente importante para o escoamento em meios fraturados. No modelo de simulação utilizando condutos unidimensionais equivalentes, tal influência é vista nos valores de transmissividade e condutância, que dependem diretamente dos valores das aberturas geradas. Ao se avaliar os resultados mostrados pelo gráfico 2, nota-se que as fraturas geradas possuem aberturas com valores que as classificam como fraturas abertas a moderadamente largas, conforme escala visualizada na Tabela 1 deste trabalho. Desta forma, as fraturas tendem a facilitar o escoamento no interior do meio simulado.

A Figura 56 apresenta o gráfico 3 para o exemplo hipotético estudado. Este gráfico apresenta os valores de comprimento de fraturas, em metros, obtidos após a aplicação da distribuição lognormal, considerando os valores estatísticos fornecidos como dado de entrada. A referida imagem é construída de forma análoga ao feito para as aberturas de fraturas, com círculos

Figura 56 – Valores de comprimento de fratura, em m, obtidos para o exemplo hipotético proposto



Fonte: Autor (2018)

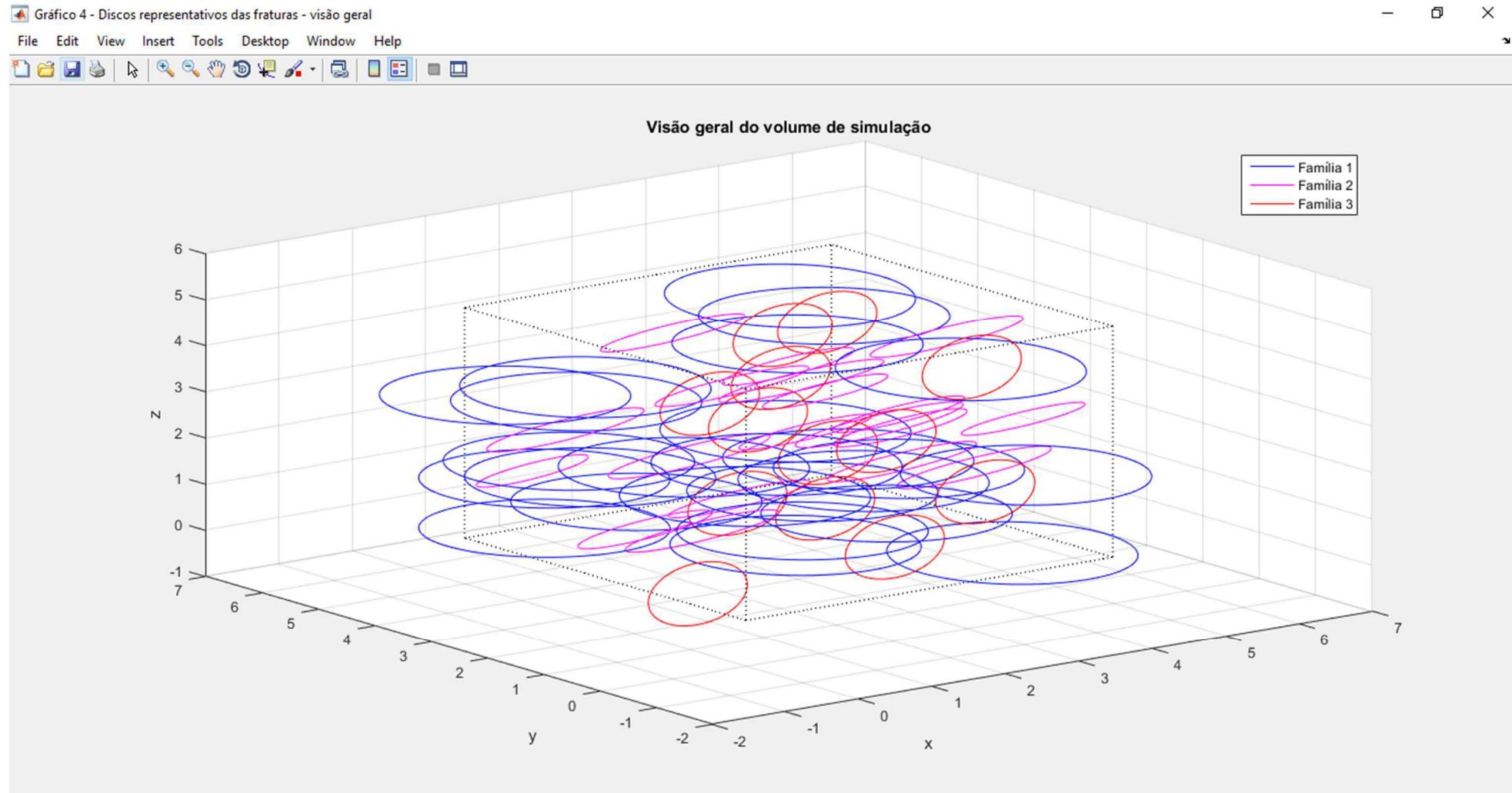
locados nas mesmas coordenadas dos centros das fraturas. Estes círculos se apresentam em escalas de cores, em função do valor de comprimento assumido pela fratura que representam. A mesma escala de cores utilizada para aberturas é repetida neste gráfico, variando então de tons esverdeados, para os valores mais baixos, a tons em azul, para os valores mais elevados da referida característica. Uma legenda, do lado direito da figura, especifica os intervalos de classe utilizados.

Ao se avaliar os resultados obtidos para o exemplo hipotético analisado, nota-se que houve pequena variação nos valores gerados estocasticamente, bastando apenas 2 classes para sua representação. Isto em ocorre pois 2 das famílias de fraturas simuladas apresentaram desvio padrão nulos, concentrando os valores em cima de suas respectivas médias. A única família que apresenta desvio padrão tem valor médio intermediário com relação as demais, não provocando extrema variação no conjunto dos valores. Novamente, observa-se que os maiores comprimentos são obtidos para as fraturas da família 1, como consequência do seu maior valor médio, dominando as fraturas indicadas pelos tons azuis. As fraturas das famílias 2 e 3 apresentam valores inferiores, dominando a classe mais baixa, representada pelo tom esverdeado.

É importante relembrar que os comprimentos de fraturas obtidos pela distribuição correspondem ao diâmetro dos discos representativos, utilizados no modelo proposto. Como já dito na revisão bibliográfica, o aumento dos valores de comprimento de fratura aumenta as possibilidades de interseção entre as descontinuidades, com consequente aumento na facilidade de transporte de água nos meios fraturados. Além disso, os comprimentos de fratura denotam uma noção de espaço ocupado pela descontinuidade, no interior do volume de simulação.

A Figura 57 apresenta o gráfico 4 para o exemplo em análise. Esta figura mostra uma visão geral do volume de simulação, com as fraturas representadas na forma de discos circulares, seguindo a ideia do modelo de Baecher. As fraturas são representadas de forma agrupada as suas respectivas famílias, a fim de permitir a visualização básica da proximidade de características físicas entre as descontinuidades. A escala de cor utilizada é a mesma do gráfico 1 (família 1 – azul / família 2 – rosa / família 3 – rosa / família 4 – verde / família 5 - preto). Uma legenda auxiliar permite a identificação das famílias e suas respectivas cores.

Figura 57 – Visão geral do volume de simulação, com os discos representativos de fraturas, para o exemplo hipotético proposto



Fonte: Autor (2018)

Como indicado na metodologia, os discos são construídos ponto-a-ponto, a partir de suas equações paramétricas, considerando uma variação angular. Posteriormente, tais pontos são interligados, a partir de uma função de plotagem disponível no ambiente MATLAB. Esta forma de plotagem não causa maiores problemas a exibição dos discos circulares no referido gráfico, uma vez que eles ficam bem definidos, como pode ser visto na Figura 57.

Ao se traçar os discos representativos das fraturas, nota-se que partes de alguns deles são desenhados além dos limites do volume de simulação. Tal fato não causa problemas relacionados a contagem das fraturas, que é baseada na quantidade de seus centros; nem mesmo no modelo hidráulico, que interliga centros e interseções que se encontram no interior do volume de simulação. Optou-se pela representação nesta forma para garantir a visualização de toda a extensão do disco representativo, sem que haja qualquer truncamento ou interrupção.

A plotagem da visão geral do volume de simulação, em conjunto com todos os discos representativos das fraturas, permite ao usuário visualizar como as fraturas se distribuem, na sua totalidade, ao se relacionar o comprimento da fratura, aqui assumindo o diâmetro do disco representativo, e a sua respectiva localização, dada pelo seu centro. Esta análise de distribuição pode ser feita considerando todas as fraturas ou mesmo por família, levando em conta as cores utilizadas na plotagem. Fraturas com maiores comprimentos possuem discos com maiores diâmetros e apresentam um maior domínio no interior do volume de simulação, tal qual pode ser visualizado para as fraturas da família 1, na Figura 57.

Com esta percepção, o usuário pode verificar, de forma indireta e qualitativa, o nível de fraturamento do meio simulado, ao relacionar todas as fraturas geradas, o espaço por elas ocupado e o tamanho do volume de simulação. Ao se avaliar o resultado obtido para o exemplo hipotético analisado, nota-se que a quantidade de fraturas e o espaço por elas ocupado é elevado, considerando o volume de simulação em que elas estão inseridas. Pode-se considerar tal meio como bem fraturado.

A visualização da orientação das fraturas nem sempre é perceptível no gráfico 4, por se tratar de uma figura espacial bastante complexa. A fim de auxiliar o usuário a melhor perceber a orientação das fraturas, especialmente o ângulo de mergulho e do avanço das fraturas em

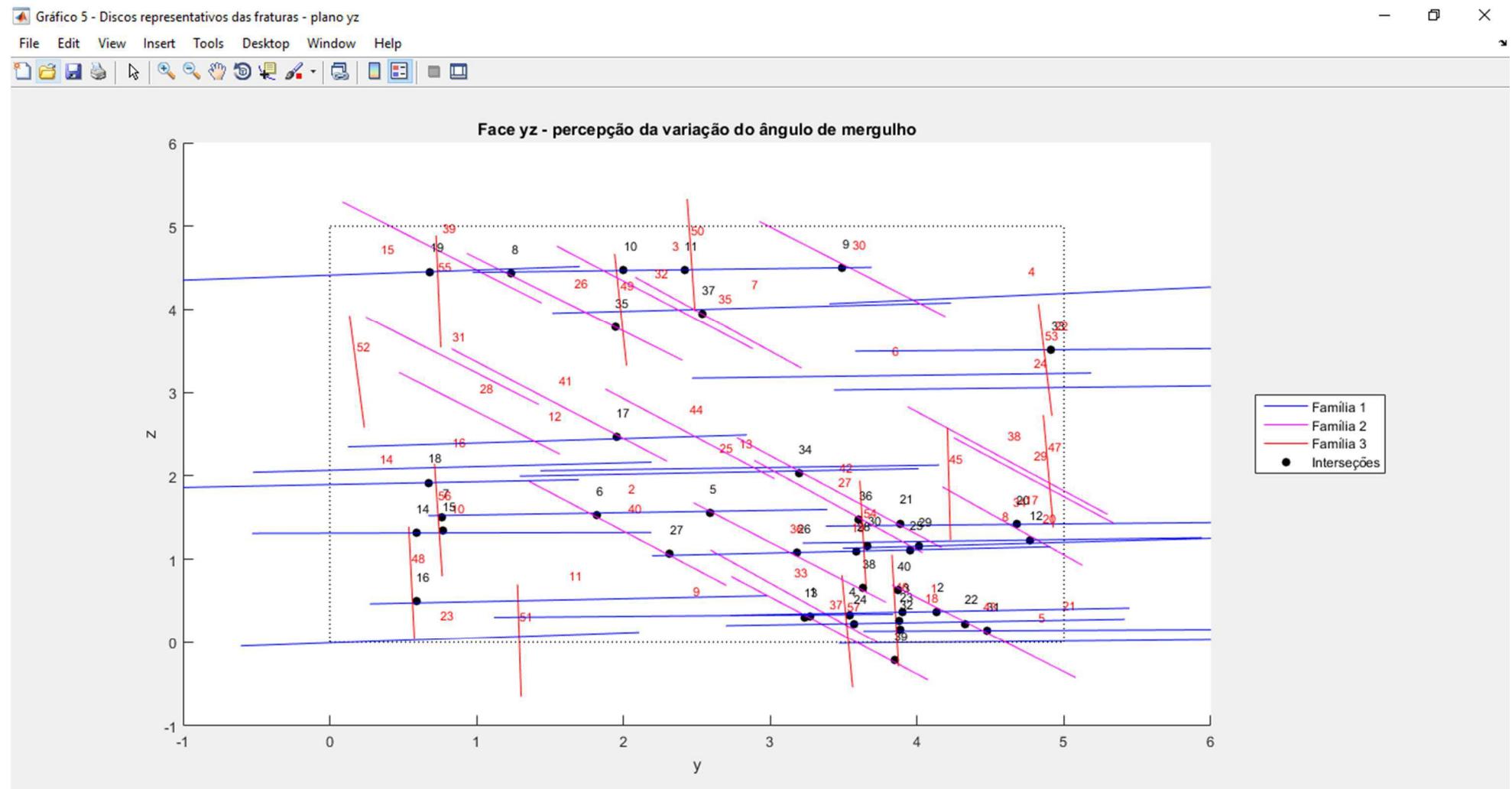
termos de profundidade, a ferramenta Fratcond dispõe do gráfico 5 (Figura 58), que apresenta exclusivamente a vista do plano yz do volume simulado. Nesta figura, novamente as fraturas apresentam contornos diferenciados, em função da família a que pertencem, seguindo a mesma escala indicada para o gráfico 4. Adicionalmente, o gráfico 5 dispõe o número identificador das fraturas (números em vermelho, acima das fraturas), além dos pontos de interseção obtidos entre as fraturas (pontos pretos) e do respectivo identificador de interseção (números em preto, acima dos pontos pretos).

Ao se avaliar o resultado obtido, exibido na Figura 58, considerando os dados de entrada utilizados para o exemplo hipotético estudado, nota-se que como o parâmetro k de Fisher de todas as famílias foi elevado, as fraturas geradas possuem pouco desvio em relação a orientação média inserida. Assim, as fraturas da família 1 são praticamente horizontais, seguindo o mergulho médio nulo, que a elas foi inserido. Analogamente, as fraturas das famílias 2 e 3 seguem os valores médios de mergulho a elas designado, de 45° e 90° , respectivamente.

Na exibição deste gráfico, algumas situações podem ocorrer, considerando uma possível variação nos dados de entrada. Em alguns testes realizados na ferramenta, para parâmetros k de Fisher baixos, percebe-se que as fraturas geradas tendem a uma distribuição aleatória, não se percebendo uma uniformidade entre a orientação das fraturas, como a visualizada no exemplo realizado. Tal fato é considerado usual, no uso da referida distribuição. Além disso, caso o usuário utilize ângulos de direção variados, também se percebe uma variabilidade maior dos ângulos de orientação das fraturas geradas. Tal fato também é comum, considerando que ambos os ângulos influenciam na geração, conforme mostrado na metodologia. Nestes casos, as fraturas comumente não são vistas na forma de traços, como no exemplo aqui realizado, mas na forma de elipses bastante achatadas, em virtude do caráter espacial da visualização.

A Figura 58 também mostra os pontos médios dos segmentos de interseção dos discos representativos das fraturas, obtidos conforme metodologia já apresentada. É importante notar que nem sempre o cruzamento dos traços exibidos na referida figura corresponde a uma interseção verdadeira. Tal fato pode ser notado nas fraturas 23, 51, 9 e 11, na região inferior esquerda do volume de simulação, onde mesmo havendo cruzamento entre os traços

Figura 58 – Visão do plano yz do volume de simulação, para o exemplo hipotético proposto



Fonte: Autor (2018)

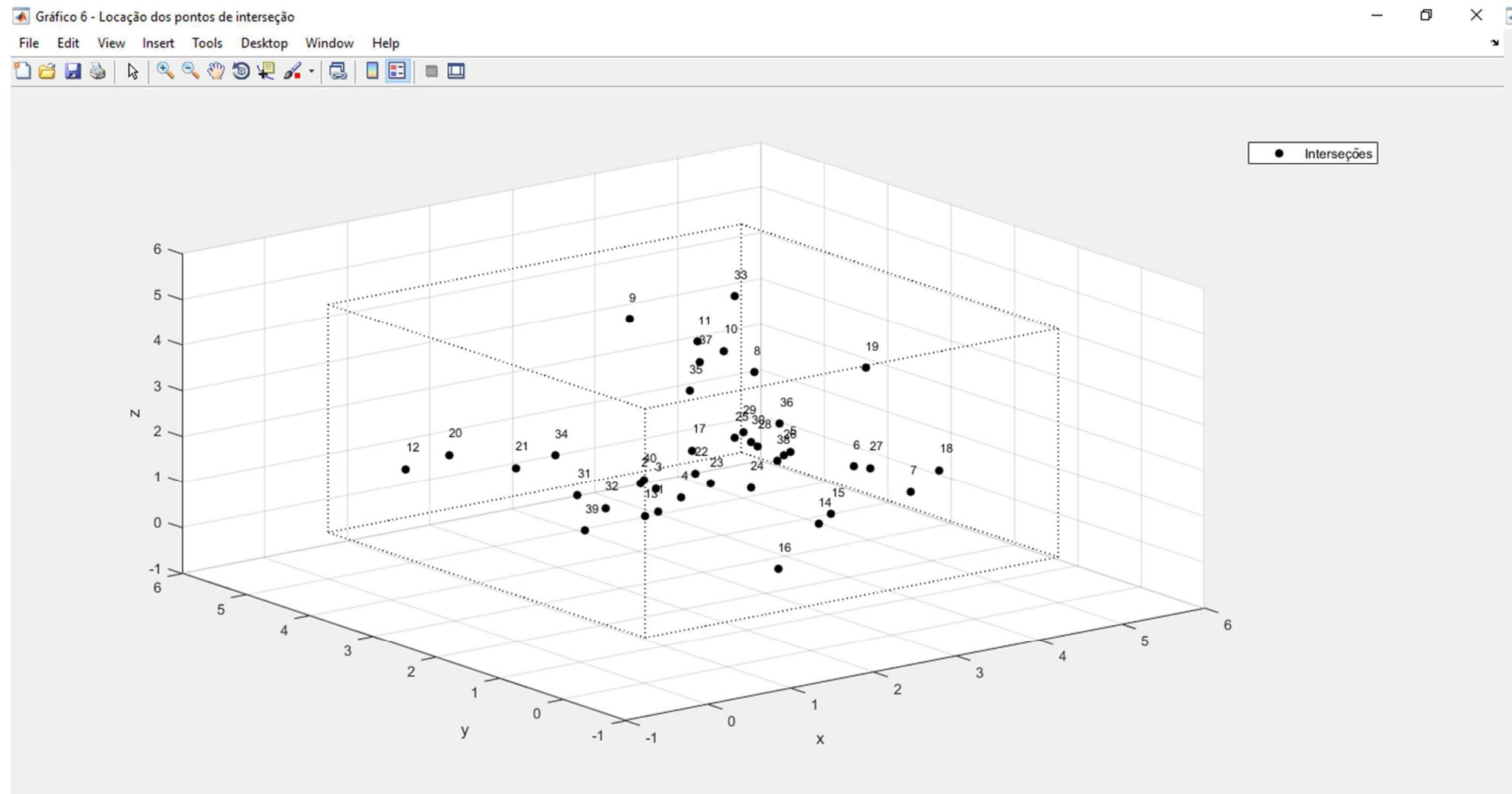
que representam as fraturas, não há pontos de interseção ali definidos. Ao se mudar o ângulo de visualização do volume de simulação, percebe-se que mesmo estando alinhadas, as fraturas não se tocam, por estarem em diferentes posições do volume.

Ainda no que tange a definição das interseções, ao se avaliar os cruzamentos entre os traços e a ocorrência verdadeira de pontos de interseção, em alguns casos, pode-se notar que os pontos negros não se encontram exatamente sobre o cruzamento das fraturas. Tal fato é explicado pela baixa precisão considerada para obtenção da igualdade entre as equações paramétricas dos discos e das retas de interseção, conforme explanado na metodologia. O aumento da precisão não se mostrou efetivo, causando instabilidade nas rotinas e dificuldade na definição dos pontos de interseção. Desta forma, optou-se em manter uma baixa precisão, que não prejudica efetivamente os demais resultados das simulações.

Considerando o exemplo hipotético estudado, fica ainda mais clara que as fraturas de maior comprimento pertencem a família 1, enquanto as famílias 2 apresenta comprimentos intermediários e a família 3 com comprimentos menores. Além disso, mesmo com a elevada quantidade de fraturas no modelo, percebe-se que a quantidade de interseções não é tão intensa. Foram obtidas um total de 40 interseções de fraturas, sendo que estas predominaram na parte inferior direita do volume de simulação, região onde tende-se a ocorrer o caminho mais extenso, a ser simulado hidraulicamente. Algumas partes do referido volume, como a parte superior direita e a parte central esquerda não apresentaram interseções, apesar da presença de fraturas. Neste sentido, tais descontinuidades não devem ser condutivas, por não estarem conectadas aos outros caminhos preferenciais.

A fim de permitir uma visualização espacial dos pontos de interseção definidos no modelo de simulação, a ferramenta FratCond dispõe do gráfico 6 (Figura 59), que apresenta a localização dos pontos de interseção, em conjunto com a visão geral do volume de simulação. Desta forma, tem-se uma visão complementar destes pontos de interesse, em termos espaciais, em relação ao gráfico anterior, que apresenta apenas a visão de um dos planos do volume. Tem-se aqui um gráfico mais limpo, uma vez que esta imagem não apresenta os discos representativos das fraturas. Cada um dos pontos de interseção é representado por um ponto com preenchimento preto, em conjunto com seu número identificador, locado acima destes pontos.

Figura 59 – Localização dos pontos de interseção definidos para o exemplo hipotético proposto



Fonte: Autor (2018)

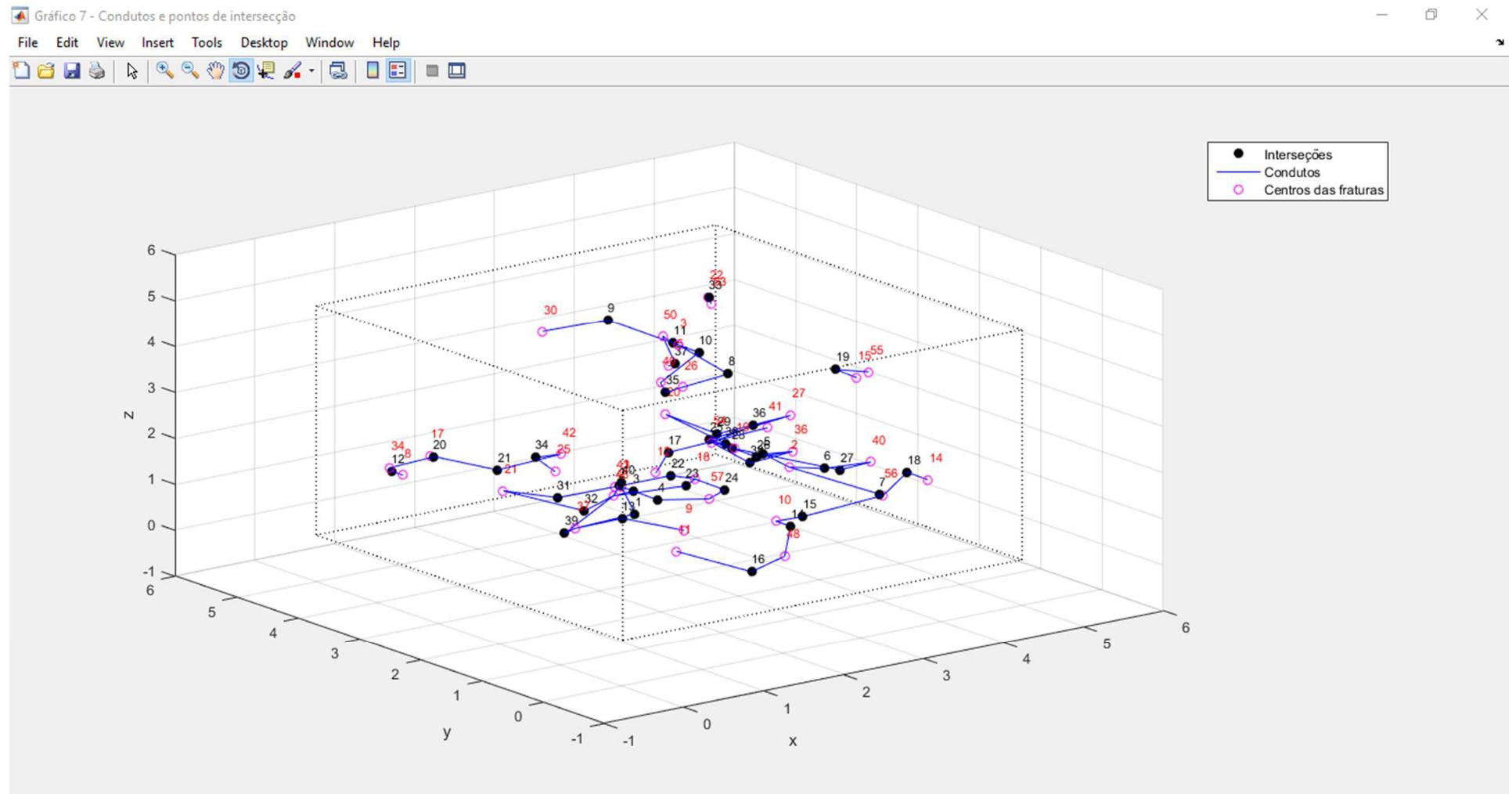
Ao se avaliar os resultados obtidos na referida figura, confirma-se que a maioria dos pontos de interseção ocorrem na região inferior do volume de simulação. Por este gráfico, percebe-se que tais pontos estão mais concentrados nas proximidades das faces direita e de fundo do referido volume, regiões nas quais também deve haver maior concentração de condutos unidimensionais equivalentes. Nas proximidades da face esquerda, tanto na parte superior quanto na parte inferior do volume, observa-se que a não ocorrência de interseções.

Como última imagem disponível para exploração dos resultados do módulo 1, o usuário dispõe do gráfico 7 (Figura 60), que apresenta o traçado dos condutos unidimensionais equivalentes obtidos na simulação. Nesta figura, é possível observar o seguimento da metodologia já comentada para o traçado destes condutos, interligando os centros das fraturas aos respectivos pontos de interseção. Todos os pontos de centro de fraturas são representados por círculos com contornos em rosa, enquanto os pontos de interseção continuam a ser representados por pontos em preto. Os trechos em condutos correspondem aos traços azuis. Os identificadores de centros e interseções também são exibidos em vermelho e preto, respectivamente.

Analizando o resultado obtido para o exemplo hipotético proposto, como já visualizado nos gráficos anteriores, nem todas as fraturas geradas estão conectadas entre si. Desta forma, também se percebe a obtenção de trechos de condutos isolados ou pouco conectados, dentro do volume de simulação. Pode se notar que os caminhos secundários ocorrem prioritariamente nas regiões superior e central do volume. Exemplos disso são os trechos encabeçados pelos nós 8 e 25, nas proximidades da face esquerda; pelos nós 22 e 53 e pelos nós 15 e 55, nas proximidades da face direita, que correspondem aos trechos de menor extensão.

Conforme dito previamente, devido a maior quantidade de conexões, os trechos mais longos e conectados de condutos equivalentes ocorrem na região inferior do meio simulado. Pode ser observado que o trecho de maior extensão, encabeçado pelos nós 11 e 27, não se restringiu as proximidades da face direita do modelo, com uma ramificação também ao longo do eixo x, de forma paralela à face frontal. Tal trecho será o simulado hidráulicamente, na execução do módulo 2.

Figura 60 – Condutos unidimensionais equivalentes obtidos para o exemplo hipotético proposto



Fonte: Autor (2018)

É importante salientar que as interseções encontradas são em sua maioria decorrentes de encontros de fraturas de diferentes famílias. Apesar do gráfico dos condutos unidimensionais não dar ênfase a este acontecimento, ele pode ser observado a partir dos números identificadores das fraturas (em vermelho). Identificadores muito próximos indicam fraturas pertencentes à mesma família, enquanto identificadores mais distantes indicam fraturas de diferentes famílias. Desta forma, ao se observar tais números, a diferença das famílias é perceptível, podendo também ser confirmada pelo gráfico 5.

Ainda com os resultados do módulo 1, o usuário dispõe da planilha 1, que contém todos os dados gerados estocasticamente e que compõe a geometria do modelo. Com estes dados, exportados na forma numérica, o utilizador tem a possibilidade de obtenção dos resultados obtidos, na sua forma mais pura, podendo utilizar até mesmo outros softwares, tanto para análise quanto para a geração de outros gráficos complementares, que não estejam contemplados pela ferramenta FratCond; além da possibilidade de compartilhamento e comparação de simulações entre usuários.

A planilha 1 apresenta 3 abas, ilustradas nas Figuras 61, 62 e 63, considerando os dados obtidos para o exemplo hipotético proposto. Estas abas são nomeadas em “Dados de entrada”, “Dados das fraturas” e “Dados das interseções”, respectivamente. Todas elas apresentam um cabeçalho comum, que reúne um título com o nome da ferramenta e a informação de que se trata da planilha com dados resultantes da geração estocástica de fraturas. Abaixo deste título são apresentados dois campos com datas e horários. O primeiro corresponde ao momento em que o módulo 1 foi executado, a partir do clique no botão “Gerar fraturas”, presente na interface gráfica. Este valor de data e horário é único para cada geometria gerada e deve ser utilizado como referência para detectar se as geometrias são iguais ou não, ou mesmo para comparação de resultados entre diferentes geometrias. Já o segundo campo corresponde ao momento em que a planilha foi exportada, a partir do menu de escolha dos resultados, disponível na parte inferior do módulo 1. Esta mesma data e horário serve para nomear o arquivo de Excel, evitando a sobreposição acidental de arquivos exportados em diferentes momentos. Ao mesmo tempo, o utilizador deve se atentar, pois é possível que sejam exportadas planilhas nomeadas de forma diferente, mas que contenham os mesmos resultados. Assim, deve-se conferir o primeiro campo de data e hora, evitando este tipo de repetição.

Figura 61 – Aba 1 da planilha 1, com os dados obtidos para o exemplo hipotético proposto

FratCond_dados_simulacao 18-01-18-15-26-14 - Excel

The screenshot shows the Microsoft Excel interface with the following details:

- Toolbar:** Standard Excel tools including File, Home, Insert, Page Layout, Formulas, Data, Review, View, and Developer.
- Cell A1:** Contains the text "FratCond - Dados de entrada inseridos pelo usuário".
- Sheet Header:** Row 1 contains the title "FratCond - Dados de entrada inseridos pelo usuário".
- Data Rows:**
 - Row 3: "Data e hora de geração da geometria:" (18-01-18-15-04-16)
 - Row 4: "Data e hora de exportação dos resultados:" (18-01-18-15-26-13)
 - Row 6: "Tipo de volume escolhido:" (Cúbico)
 - Row 7: "Número de famílias indicado:" (3)
 - Row 9: Headers for fracture properties: "Comprimento das fraturas (m)", "Abertura das fraturas (mm)", and "Orientação de fraturas (°)".
 - Row 10: Headers for family data: "Densidade (1/m³)", "média", "desvio padrão", "média", "desvio padrão", "ângulo de mergulho (dip)", "ângulo de direção (strike)", "K Fisher", and "número de fraturas da família".
 - Rows 11-13: Data for three families (Fam. 1, Fam. 2, Fam. 3) with their respective values for each parameter.
- Bottom Navigation:** Shows tabs for "Dados de entrada" (selected), "Dados das fraturas", "Dados das interseções", and a plus sign icon. It also shows zoom levels (100%) and other standard Excel navigation controls.

Fonte: Autor (2018)

Figura 62 – Aba 2 da planilha 1, com os dados obtidos para o exemplo hipotético proposto

FratCond_dados_simulacao 18-01-18-15-26-14 - Excel

A1 FratCond - Resultados do gerador estocástico de fraturas - Dados das fraturas

FratCond - Resultados do gerador estocástico de fraturas - Dados das fraturas											
3	Data e hora de geração da geometria:			18-01-18-15-04-16							
4	Data e hora de exportação dos resultados:			18-01-18-15-26-13							
6	Volume de simulação (m³):			125			Número de fraturas geradas:			57	
8	Centros de fraturas				Orientação - vetor unitário				Orientação - Ângulos		
9	ID	X	Y	Z	Raio (m)	Abertura (mm)	x	y	z	Mergulho (dip) (°)	Direção (strike) (°)
10	1	3.1229	4.0879	0.3704	1.3591	1.6871	0.0000	-0.0319	0.9995	1.8119	0.0000
11	2	3.6412	2.0291	1.5591	1.3591	1.4541	0.0000	-0.0271	0.9996	1.6206	0.0000
12	3	2.4909	2.3316	4.4759	1.3591	1.7816	0.0000	-0.0223	0.9998	1.1459	0.0000
13	4	4.2491	4.7577	4.1738	1.3591	3.0491	0.0000	-0.0774	0.9970	4.4392	0.0000
14	5	0.9546	4.8250	0.0117	1.3591	1.6812	0.0000	-0.0156	0.9999	0.8103	0.0000
15	6	0.6207	3.8264	3.2010	1.3591	1.6338	0.0000	-0.0221	0.9998	1.1459	0.0000
16	7	0.0140	2.8727	4.0159	1.3591	1.9575	0.0000	-0.0453	0.9990	2.5626	0.0000
17	8	0.7648	4.5796	1.2257	1.3591	1.2060	0.0000	-0.0237	0.9997	1.4035	0.0000
18	9	2.6708	2.4772	0.3206	1.3591	2.0661	0.0000	-0.0138	0.9999	0.8103	0.0000
19	10	2.5532	0.8301	1.3157	1.3591	1.3916	0.0000	-0.0040	1.0000	0.0000	0.0000
20	11	1.9261	1.6300	0.5136	1.3591	1.8469	0.0000	-0.0361	0.9993	2.1439	0.0000
21	12	1.5530	1.4822	2.4186	1.3591	1.7425	0.0000	-0.0522	0.9986	3.0322	0.0000
22	13	0.0178	2.7915	2.0944	1.3591	1.6268	0.0000	-0.0247	0.9997	1.4035	0.0000
23	14	4.0762	0.3374	1.9064	1.3591	1.4284	0.0000	-0.0344	0.9994	1.9849	0.0000

Fonte: Autor (2018)

Figura 63 – Aba 3 da planilha 1, com os dados obtidos para o exemplo hipotético proposto

FratCond_dados_simulacao 18-01-18-15-26-14 - Excel

The screenshot shows the Microsoft Excel ribbon at the top with tabs like ARQUIVO, PÁGINA INICIAL, and various tools. The main area displays the following data:

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				
Dados das interseções												
Coordenadas da interseção												
ID	fratura i	fratura j	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							

At the bottom, there is a legend with three tabs: Dados de entrada, Dados das fraturas, and the currently selected Dados das interseções.

Fonte: Autor (2018)

Na aba 1, observa-se todos os dados de entrada inseridos pelo usuário para a geração estocástica das fraturas no modelo em questão. Assim, lista-se a forma e as dimensões indicadas para o volume de simulação, o número de famílias designadas e os dados fornecidos para cada uma das famílias, desde a densidade de fraturas aos valores estatísticos de cada uma das características físicas. Nesta aba, é possível ainda obter o número total de fraturas geradas no modelo, assim como a quantidade de descontinuidades por família. Tais valores são obtidos, como já comentado anteriormente, a partir da relação direta entre as densidades das famílias e o volume considerado.

A aba 1 se mostra importante para registrar os dados usados pelo usuário na geração daquele modelo. Desta forma, evita-se que o utilizador execute uma simulação, sem ter registrado adequadamente os dados de entrada considerados. Facilita-se assim a comparação com outros modelos rodados na ferramenta FratCond, especialmente em casos onde se utiliza a ferramenta para múltiplas simulações.

Já a aba 2 apresenta os dados das fraturas, obtidos a partir da aplicação das distribuições estatísticas consideradas pela ferramenta, para cada uma das características das fraturas. Tais dados são ordenados em função do número identificador da fratura, em ordem crescente, facilitando a consulta do usuário a qualquer dado necessário. Em cada uma das linhas, encontra-se os dados da referida fratura. A quantidade de linhas preenchidas, a partir da linha 10 da planilha, corresponde a quantidade de fraturas geradas no modelo. Apesar da Figura 62 não apresentar todas estas linhas, a referida aba lista os dados das 57 fraturas geradas no exemplo hipotético considerado.

Como indicados nos cabeçalhos da aba, as colunas apresentam os seguintes dados obtidos na geração estocástica, na seguinte ordem:

- As coordenadas (x, y, z) dos centros das fraturas;
- O valor dos raios dos discos representativos, em metros, que correspondem, obviamente, a metade dos valores de diâmetros destes discos;
- O valor das aberturas de fraturas, em milímetros;
- O vetor unitário, normal ao plano da fratura gerada, em termos de componentes unitárias;
- Os valores dos ângulos de direção e mergulho das fraturas geradas no modelo.

A observação da aba 2 é interessante sob o ponto de vista de se confirmar os valores numéricos, já visualizados, por meio de intervalos de classes, nos gráficos disponíveis para o módulo 1. Além disso, é possível perceber a aplicação direta das diferentes distribuições estatísticas utilizadas na geração das características das fraturas, assim como a influência dos dados de entrada nos dados gerados, tanto na comparação entre as fraturas da mesma família, quanto aquelas pertencentes a diferentes grupos.

Ao se observar os dados obtidos para o exemplo hipotético proposto, observa-se nos dados exibidos na Figura 62, correspondentes as fraturas da família 1, identificadas de 1 a 25, que a ausência de desvio padrão para o valor do comprimento destas descontinuidades fez com que os diâmetros dos discos representativos correspondessem ao valor sempre igual a média, considerando o uso da distribuição lognormal. Assim, os valores de raio também permaneceram constantes para todas as fraturas exibidas na referida figura. Já para a abertura, que também utiliza a mesma distribuição, nota-se uma maior variação nos valores gerados, em virtude de um valor de desvio padrão. Para os valores de coordenadas de centro de fraturas, nota-se uma aleatoriedade, comum da aplicação da distribuição uniforme. Para os ângulos e os vetores de orientação, percebe-se pequenas variações nos valores de ângulos de mergulho e uma constância nos ângulos de direção, também condizentes com os dados de entrada fornecidos para estes parâmetros.

Já aba 3 da planilha 1 apresenta dos dados relativos as interseções obtidas no modelo a que se refere. Na região superior da aba, é informado ao usuário, junto com a quantidade total de fraturas, a quantidade total de interseções obtidas na simulação. Como já comentado anteriormente, o exemplo hipotético obteve ao todo 40 interseções entre as fraturas. Nas linhas abaixo, são listados os dados de interesse de cada um destes cruzamentos entre as descontinuidades, ordenados em ordem crescente de número de identificador de interseção. Os dados listados ao longo das colunas são:

- Os identificadores das 2 fraturas que formam a referida interseção;
- As coordenadas (x, y, z) dos pontos médios dos segmentos de interseção;

Desta forma, por exemplo, ao se ler a linha 12 da planilha exibida na Figura 63, entende-se que a interseção identificada pelo número 1, é formada pelo cruzamento entre as fraturas 1 e 37, sendo o ponto de interseção obtido correspondente as coordenadas (2.6625, 3.2683, 0.3203).

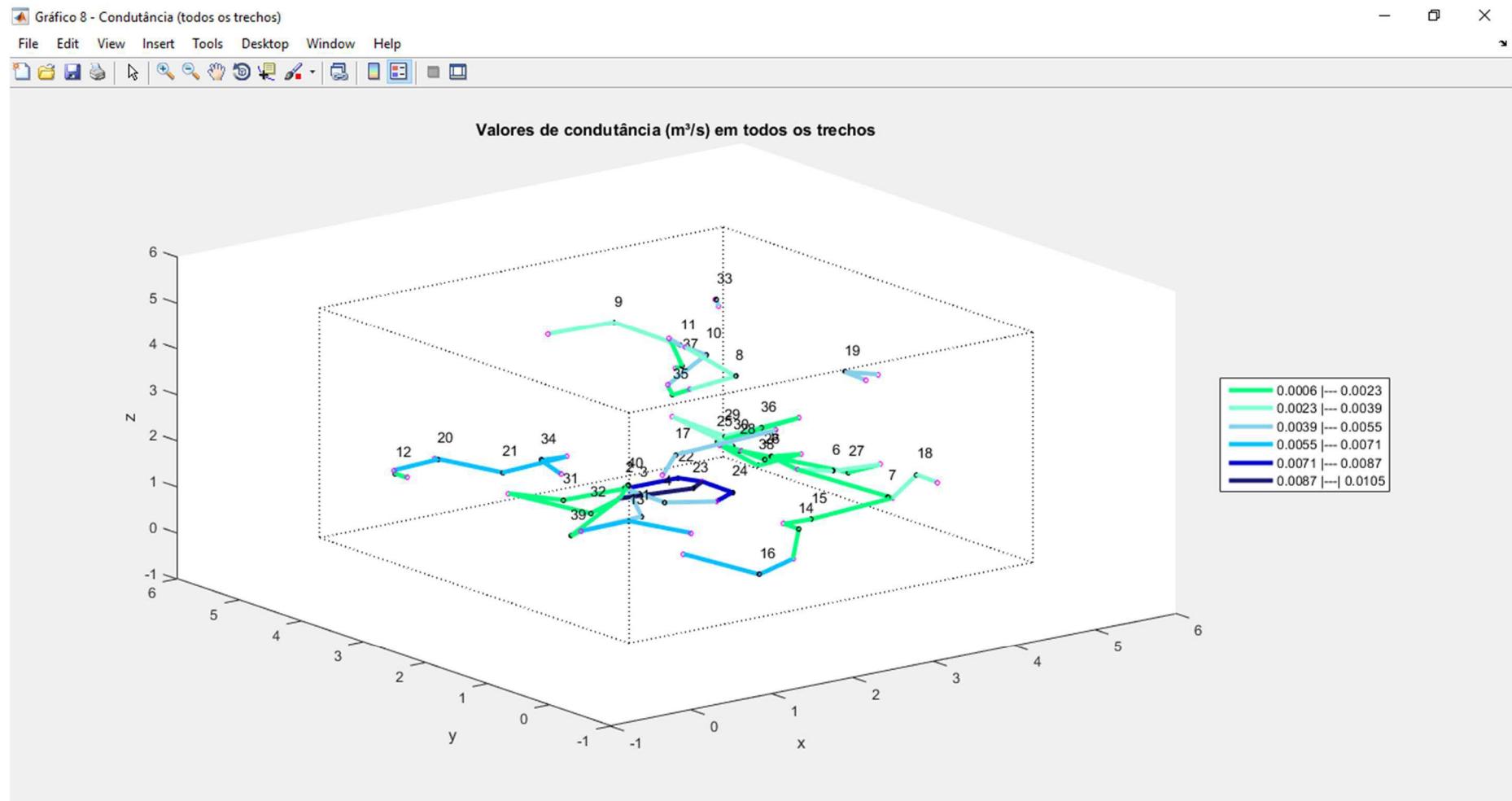
É importante relembrar que a ordenação das interseções corresponde a mesma apresentada para a matriz INT, criada para o armazenamento dos dados de interseção entre as fraturas. Ao se observar na planilha exibida na Figura 63, especificamente as colunas B e C, que listam as fraturas que se cruzaram para formar a interseção, pode se observar que o número identificador listado na segunda coluna é sempre menor do que aqueles presentes na terceira coluna. Além disso, linhas subsequentes listam em geral as interseções referidas a uma mesma fratura, como pode ser notado, nas linhas iniciais, para a fratura 1. Tal fato é consequência da forma de implementação da rotina de detecção das interseções, que fixa uma das fraturas e a compara com as fraturas com identificadores posteriores. Assim, não ocorre repetição, tanto na análise realizada pela rotina, quanto na plotagem dos resultados na referida planilha.

Apresentados os principais aspectos relativos à exploração dos resultados relativos ao módulo 1 da ferramenta, expõe-se, em seguida, os produtos disponíveis para análise dos resultados do módulo 2, no qual o usuário executa a simulação hidráulica do meio fraturado obtido no primeiro módulo. Esta análise pode ser realizada por meio dos gráficos, numerados de 8 a 13, além da planilha 2, que contém os resultados numéricos da execução desta simulação.

A Figura 64 apresenta um exemplo do gráfico 8, resultante da execução do módulo 2 para o exemplo hipotético proposto. Tal gráfico apresenta para análise os valores de condutância calculados para todos os trechos de condutos unidimensionais do modelo, considerando tanto aqueles que fazem parte do caminho mais extenso quanto os trechos isolados. Relembra-se que a condutância é o parâmetro de proporcionalidade entre a vazão e o gradiente hidráulico, presente nas equações da simulação hidráulica. Tal constante é definida, para os trechos de condutos, a partir das propriedades das fraturas, como no exemplo proposto e conforme cálculo descrito na metodologia deste trabalho, ou por meio do uso de uma distribuição do tipo lognormal.

O gráfico 8 exibe os trechos de conduto, em escala de cores, considerando os valores obtidos para a condutância. A escala de cores utilizada é semelhante à vista nos gráficos apresentados anteriormente, em que os tons esverdeados indicam valores mais baixos, enquanto os tons azulados apresentam os maiores valores do parâmetro em questão. Relembra-se que os tre-

Figura 64 – Valores de condutância, em m^3/s , obtidos para o exemplo hipotético proposto



Fonte: Autor (2018)

chos de condutos unidimensionais são limitados pelos centros das fraturas, indicados pelos pequenos pontos rosas na referida imagem. Os pontos negros continuam a identificar os pontos de interseção entre as fraturas, onde ocorre uma mudança de direção no conduto, considerando a variação de orientação das fraturas que se encontram, sem alteração no valor do parâmetro de proporcionalidade. A identificação dos trechos, dada pelo mesmo número identificador das interseções, também está presente no gráfico, nas proximidades desta mudança de direção.

Os valores de condutância, considerando a forma de cálculo dependente das propriedades das fraturas, podem variar bastante, em função, principalmente, dos valores de abertura das descontinuidades e dos comprimentos dos segmentos de interseção. A primeira característica influencia diretamente na transmissividade da fratura, e por consequência, na transmissividade média das fraturas que se interceptam, valor este que participa da determinação da condutância. Já a segunda característica influencia na largura do conduto unidimensional obtido, que depende diretamente deste valor e também é fator direto para obtenção da condutância.

Considerando os resultados obtidos para o exemplo hipotético proposto, os valores de condutância apresentaram valores da ordem de 10^{-2} e $10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. Os maiores valores são visualizados na parte central do volume de simulação, que se apresentam em destaque pelo azul mais forte na referida figura. Tais trechos são oriundos de interseções com a fratura de número 18, que apresenta um valor de abertura de 2,1798 mm, conforme análise dos resultados da planilha 1. Este valor de abertura é o maior entre as fraturas que apresentaram algum cruzamento com fraturas vizinhas, indicando a influência deste parâmetro físico na obtenção da condutância. Nota-se ainda que, para o trecho com maior condutância, a largura do conduto obtido foi a segunda maior entre todas as fraturas, também indicando uma participação do comprimento de segmento de interseção na determinação deste parâmetro.

Valores mais baixos de condutância são vistos em abundância no volume de simulação do exemplo proposto, como pode ser visualizado pelos tons verdes claros mais fortes, presentes em diferentes regiões do meio simulado. Novamente, percebe-se uma influência da abertura das fraturas neste parâmetro, pois estes trechos correspondem a interseções formadas por ao

menos uma fratura da família 3, que apresenta os menores valores estatísticos de abertura, dentre as famílias simuladas neste modelo.

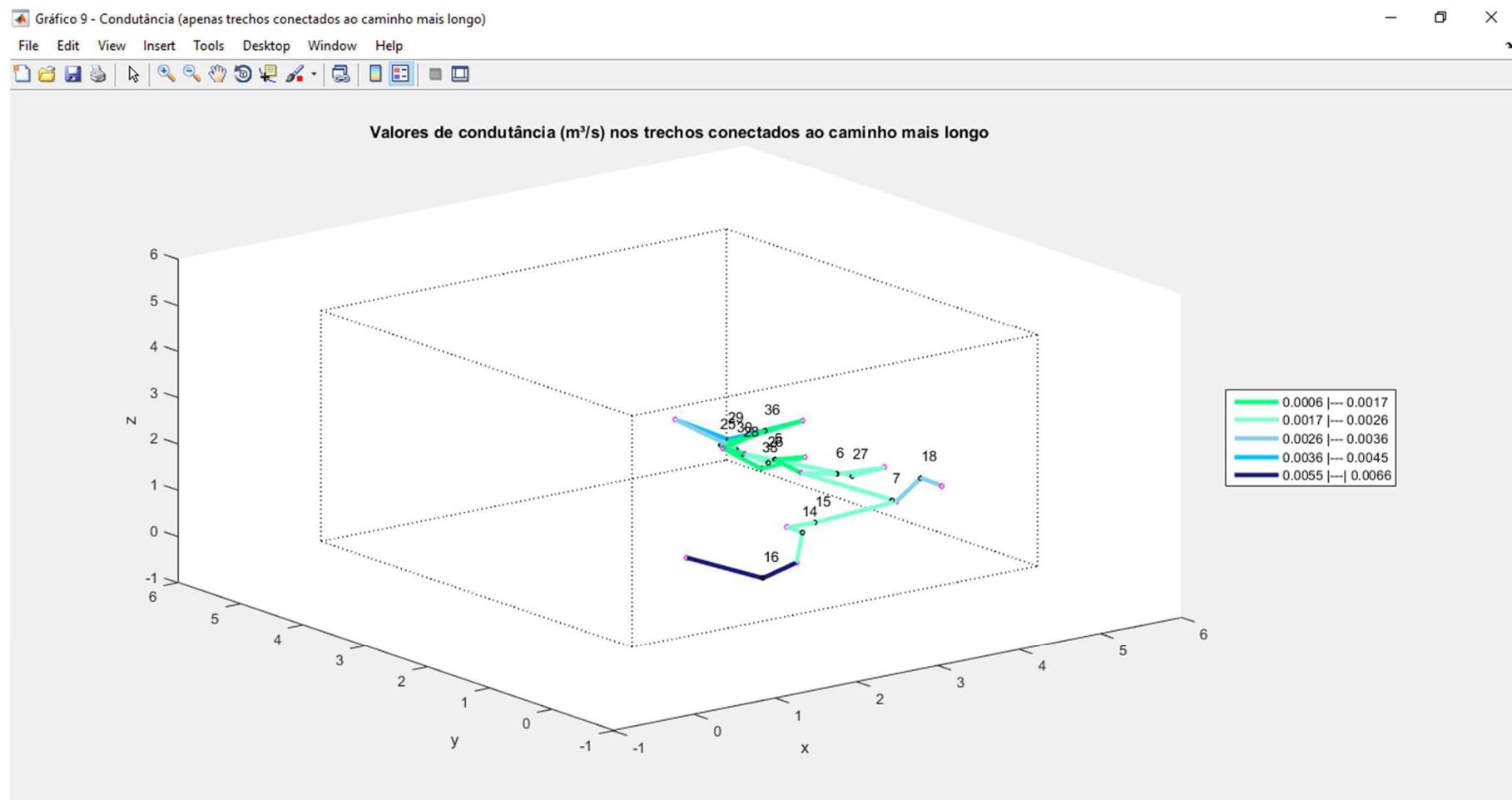
O gráfico 8 permite uma análise ampla da condutância de todos os trechos de condutos unidimensionais gerados na simulação realizada, especialmente, considerando a relação deste parâmetro com os demais componentes do modelo. Porém, ao se considerar que nem todos estes caminhos participam efetivamente da simulação hidráulica, por estarem isolados ou conectados a trechos secundários, é necessário isolar somente aqueles que compõe a simulação proposta no módulo 2 da ferramenta. Desta forma, o gráfico 9 (Figura 65) exibe os valores de condutância dos trechos pertencentes ao caminho mais extenso do modelo simulado.

A formatação deste gráfico é semelhante à vista na figura anterior, considerando a mesma escala de cores já utilizada na indicação dos valores de condutância dos trechos. É importante salientar que os intervalos de classes entre os gráficos 8 e 9 nem sempre permanecem iguais, uma vez que existe a possibilidade de redução da amplitude dos dados exibidos, de um gráfico para outro, alterando assim os limites de cada classe e a respectiva coloração do trecho, mesmo sem alteração do parâmetro analisado.

Um exemplo desta situação pode ser visto no trecho 16, estabelecido nas proximidades da face frontal do volume de simulação, considerando os resultados do exemplo hipotético. Na Figura 64, sua coloração é um tom de azul mais claro, indicativo de um valor intermediário de condutância, considerando todos os trechos exibidos. Já na Figura 65, este mesmo trecho se apresenta em um tom de azul mais forte, indicando que seu valor está entre os maiores dentre os exibidos na referida figura. Porém, apesar da modificação de cor, causada pela redução da amplitude dos valores exibidos, os intervalos em que o valor do trecho 16 são semelhantes, uma vez que não houve modificação do parâmetro avaliado.

Conforme já estimado anteriormente, é visível na Figura 65 a ocorrência do caminho mais longo na região inferior do volume de simulação, nas proximidades da face direita, com uma ramificação na direção da face esquerda, nas proximidades do eixo x. Das 40 interseções obtidas no modelo, 15 pertencem ao caminho mais longo exibido neste gráfico. As demais formam caminhos secundários ou isolados, não contribuindo efetivamente para o escoamen-

Figura 65 – Valores de condutância, em m^3/s , considerando o caminho mais longo, obtidos para o exemplo hipotético proposto



Fonte: Autor (2018)

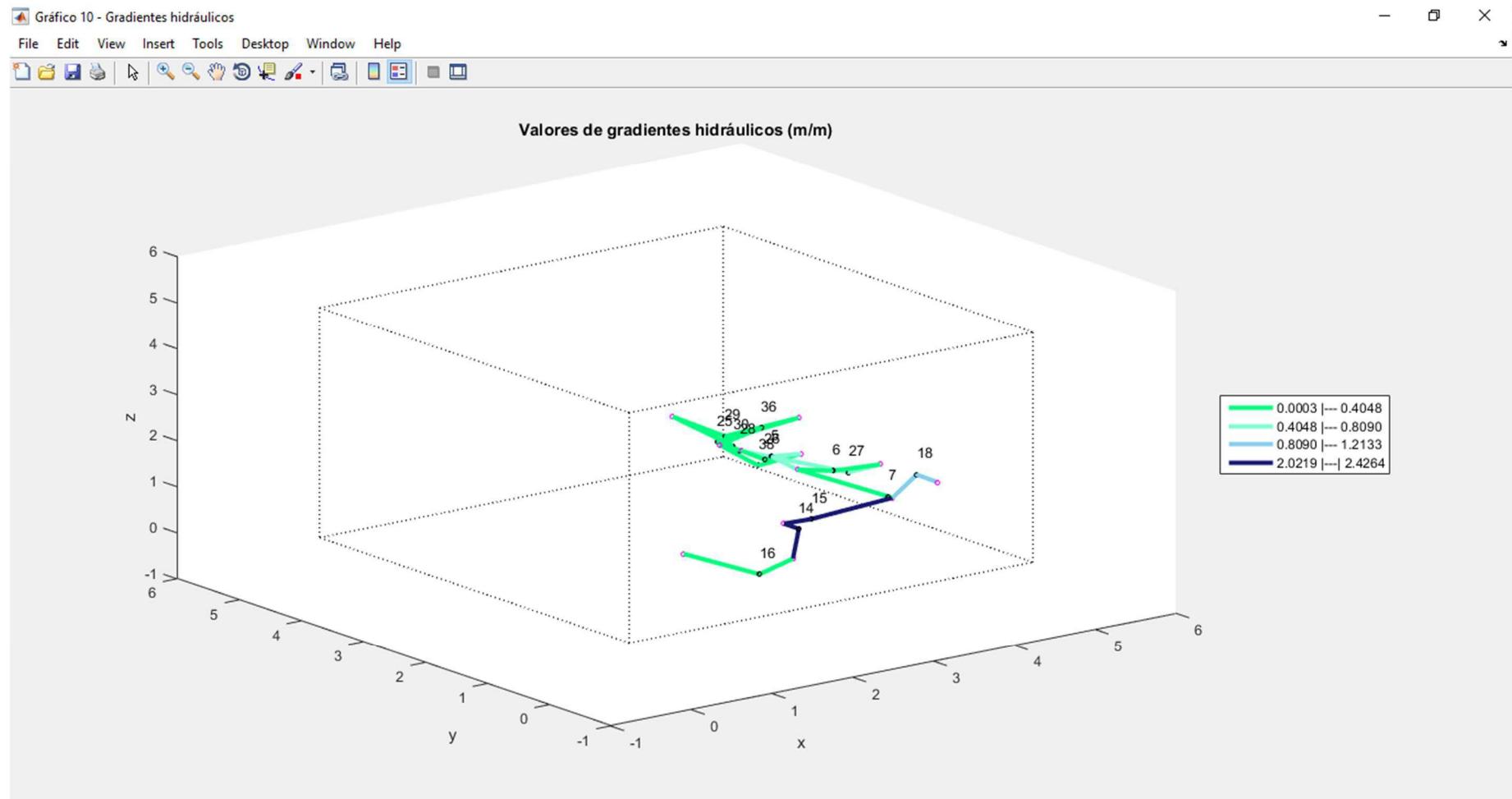
to verificado nesta simulação. Nota-se que a maioria dos trechos pertencentes ao caminho mais extenso apresentam valores baixos de condutância, pertencentes às duas classes de menores valores, indicadas pelos tons esverdeados, no intervalo de 0,0006 a 0,0023 m³/s. Apenas quatro outros trechos apresentam valores que correspondem as classes restantes, indicadas pelos tons azulados.

Ao se cruzar estes resultados com os demais parâmetros físicos das fraturas geradas, nota-se que na formação do caminho mais extenso de condutos deste exemplo hipotético, houve participação semelhante das fraturas das três famílias nas interseções. Novamente, a abertura de fratura se mostrou como parâmetro preponderante nos maiores valores de condutância. O trecho 16, que apresenta o maior valor do parâmetro em análise, dentre os 15 trechos que restaram no caminho mais extenso, é formado pela interseção da fratura 11 com a fratura 48. A primeira fratura indicada é a que possui maior valor de abertura dentre as que compõe as interseções presentes na referida figura, indicando a influência deste parâmetro físico no coeficiente de proporcionalidade analisado.

A Figura 66 apresenta o gráfico 10 para o exemplo hipotético proposto. Este gráfico mostra os resultados obtidos para os gradientes hidráulicos para cada um dos trechos de condutos unidimensionais equivalentes que compõem o caminho mais extenso do modelo. Tal gráfico é construído de forma análoga aos apresentados anteriormente, com os trechos exibidos em escalas de cores, considerando os valores obtidos para este resultado. A identificação dos trechos também é visível neste gráfico, a partir dos identificadores exibidos acima dos pontos de interseção.

Os valores dos gradientes hidráulicos são resultados diretos da solução do sistema linear resolvido nesta simulação hidráulica, uma vez que consistem na diferença dos valores de cargas hidráulicas entre os nós extremos dos trechos, divididos pelo seu respectivo comprimento linear. De uma forma geral, maiores valores de gradiente hidráulico são indicativos de maiores valores de vazão, no trecho analisado, uma vez que ambos os parâmetros são diretamente proporcionais nas equações utilizadas para os condutos unidimensionais. Além disso, o gradiente hidráulico pode servir de indicador de perda de carga no referido trecho, ao relacionar as energias existentes no começo e no final do segmento de conduto.

Figura 66 – Valores de gradiente hidráulico, em m/m, obtidos para o exemplo hipotético proposto



Fonte: Autor (2018)

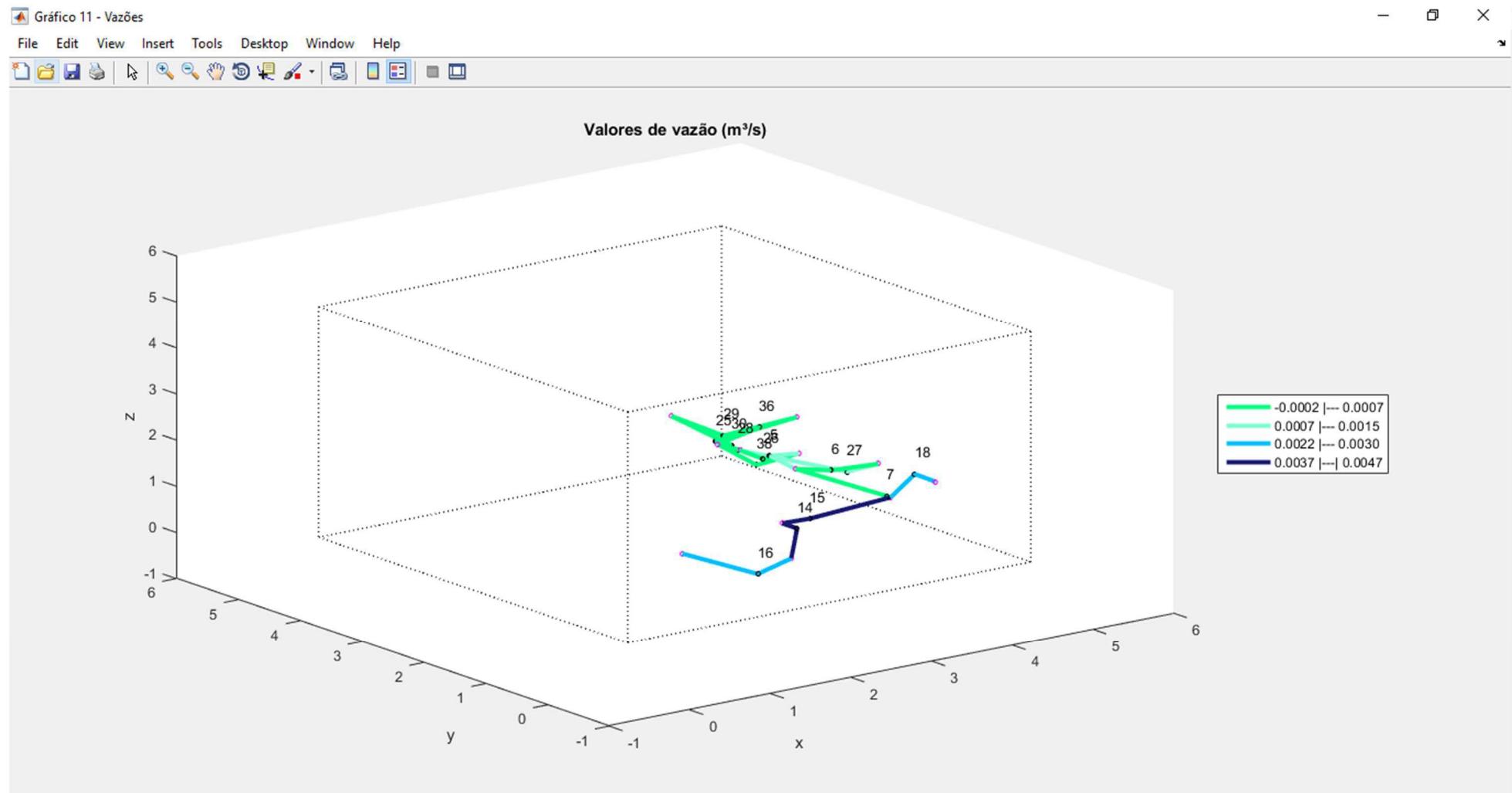
Ao se avaliar os resultados numéricos obtidos para o exemplo hipotético proposto, observa-se que apenas quatro intervalos de classe foram utilizados na representação dos resultados, dos seis disponíveis na rotina implementada para a plotagem do gráfico, havendo um salto nos valores entre a terceira e a quarta classes exibidas. Tal fato pode ocorrer, devido à ausência de valores nas classes não exibidas, reduzindo a quantidade de intervalos e cores no gráfico e facilitando a interpretação do usuário.

Gradientes bastante elevados foram obtidos nos trechos 14 e 15 da referida simulação, conforme destaque fornecido pela coloração azul escura nestes segmentos de condutos. Como será visto no gráfico 11, tais trechos também possuem as maiores vazões, o que pode explicar a brusca diferença de energia entre o início e o final destes trechos, fazendo com que ganhassem valores elevados de gradientes. Os demais trechos apresentam valores inferiores de gradientes, em virtude da presença de nós com várias ramificações, que fizeram o particionamento do escoamento e a redução da vazão nestes trechos. Desta forma, a perda de energia entre os nós iniciais e finais também diminuiu, resultando em menores gradientes hidráulicos.

Já a Figura 67 apresenta o gráfico 11, com os resultados para o exemplo hipotético proposto. Este gráfico apresenta os valores de vazão, em m^3/s , obtidos em cada um dos trechos de condutos unidimensionais simulados. O gráfico segue a mesma ideia, colocando os trechos em diferentes cores, considerando os resultados obtidos, que consistem no produto direto entre a condutância e o gradiente hidráulico definidos para cada segmento de conduto unidimensional.

Utilizando este gráfico, o usuário tem a possibilidade de visualizar qual o volume de água transita, por intervalo de tempo, em cada uma das fraturas simuladas, considerando o seu respectivo conduto unidimensional. É importante que o usuário leve sempre em conta as condições de contorno inseridas, uma vez que estas apresentam elevada influência no sentido de caminhamento da água, assim como na quantidade de fluido que transita nos trechos. Além disso, este gráfico deve ser avaliado em conjunto com os gráficos que exibem as cargas hidráulicas nos nós de extremidades dos trechos, a fim de identificar o sentido de caminhamento da água, das maiores para as menores cargas hidráulicas, sentido este que não é fornecido de forma direta no gráfico de vazões.

Figura 67 – Valores de vazão, em m^3/s , obtidos para o exemplo hipotético proposto



Fonte: Autor (2018)

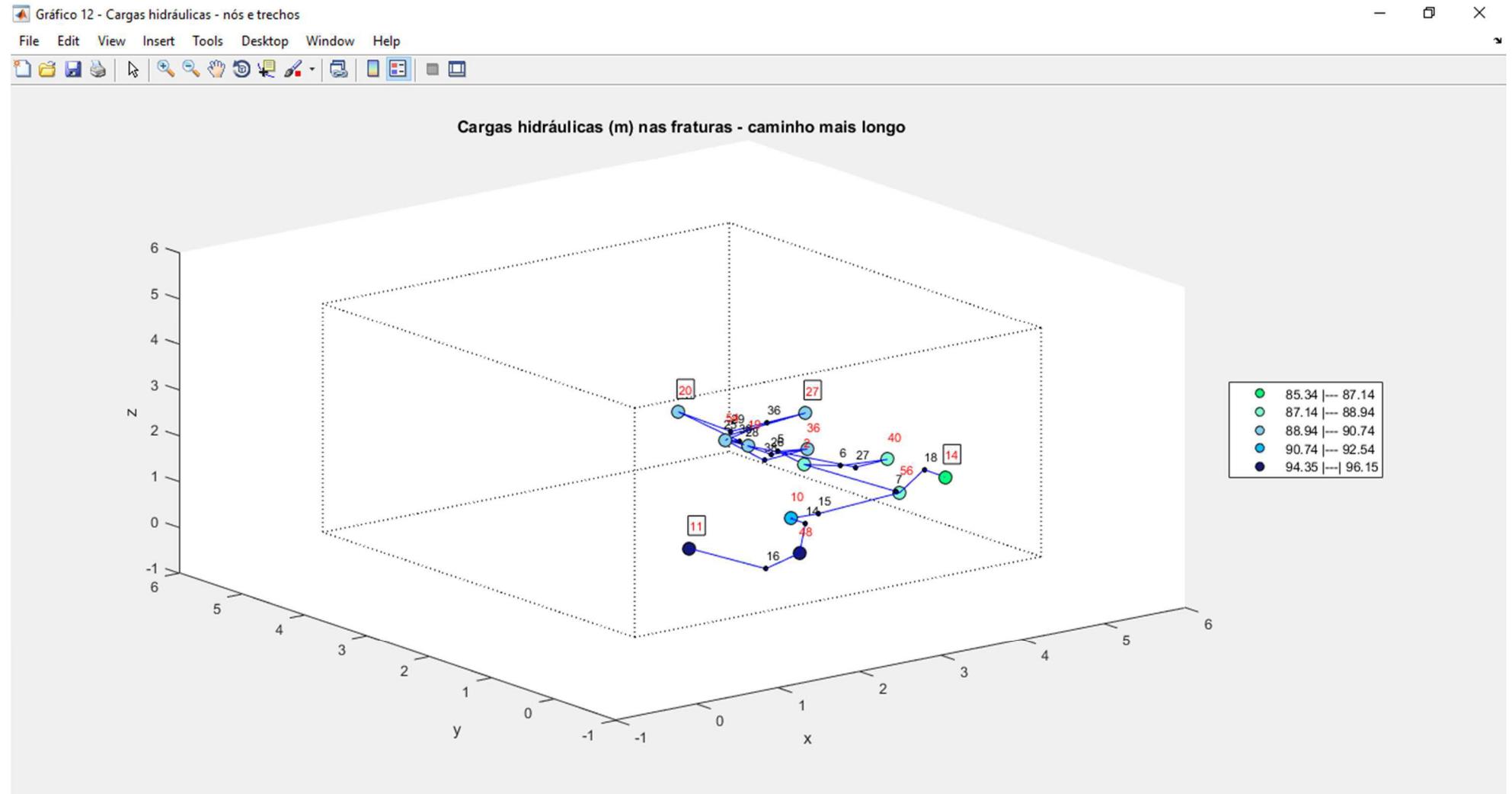
Ao se avaliar os resultados do exemplo hipotético proposto, como comentado anteriormente, os trechos 14 e 15 também se destacam neste gráfico, por possuírem os maiores valores de vazão entre todos os trechos. Destaca-se a possível influência das condições de contorno neste resultado, uma vez que, dentre os valores de cargas hidráulicas inseridas nas faces do volume de simulação, uma maior diferença é visualizada ao longo do eixo x. Estes trechos se encontram praticamente paralelos ao referido eixo, fazendo com que sofram influência direta deste gradiente resultante das condições de contorno, e, por consequência, se observe uma maior vazão transitando nestes segmentos de condutos. Já para os demais trechos, os valores encontrados são coerentes, considerando os parâmetros físicos das fraturas inseridos pelo usuário, especialmente a abertura e o comprimento, além das condições de contorno consideradas.

Podem haver situações em que, em virtude desta precisão e de arredondamentos realizados na obtenção dos resultados, haja pequenas incoerências nos gráficos exibidos, especialmente no que tange ao balanço de vazão nos nós, mas que podem ser corretamente visualizadas nos resultados exibidos nas planilhas. Um exemplo disso é o trecho 16, que apesar ser continuação dos trechos 14 e 15, apresentou um valor de vazão ligeiramente distinto, mudando de classe na exibição do gráfico. Outra situação de possível incoerência nestes resultados é a suposta obtenção de vazões negativas. Apesar da legenda da Figura 67, em sua primeira classe, apresentar um valor negativo, o menor valor calculado será sempre positivo, uma vez que as vazões são obtidas a partir do produto de dois valores positivos. Assim, algum problema na geração da legenda pode ter ocorrido, no momento da plotagem do gráfico.

Os gráficos 12 e 13 são últimos disponíveis para a exploração dos resultados das simulações realizadas na ferramenta FratCond. Tais gráficos são exibidos nas Figuras 68 e 69, considerando os resultados do exemplo hipotético proposto. Estas figuras apresentam os valores de carga hidráulica obtidos em cada um dos nós da rede de condutos unidimensionais, os quais também correspondem aos centros das fraturas simuladas no modelo proposto.

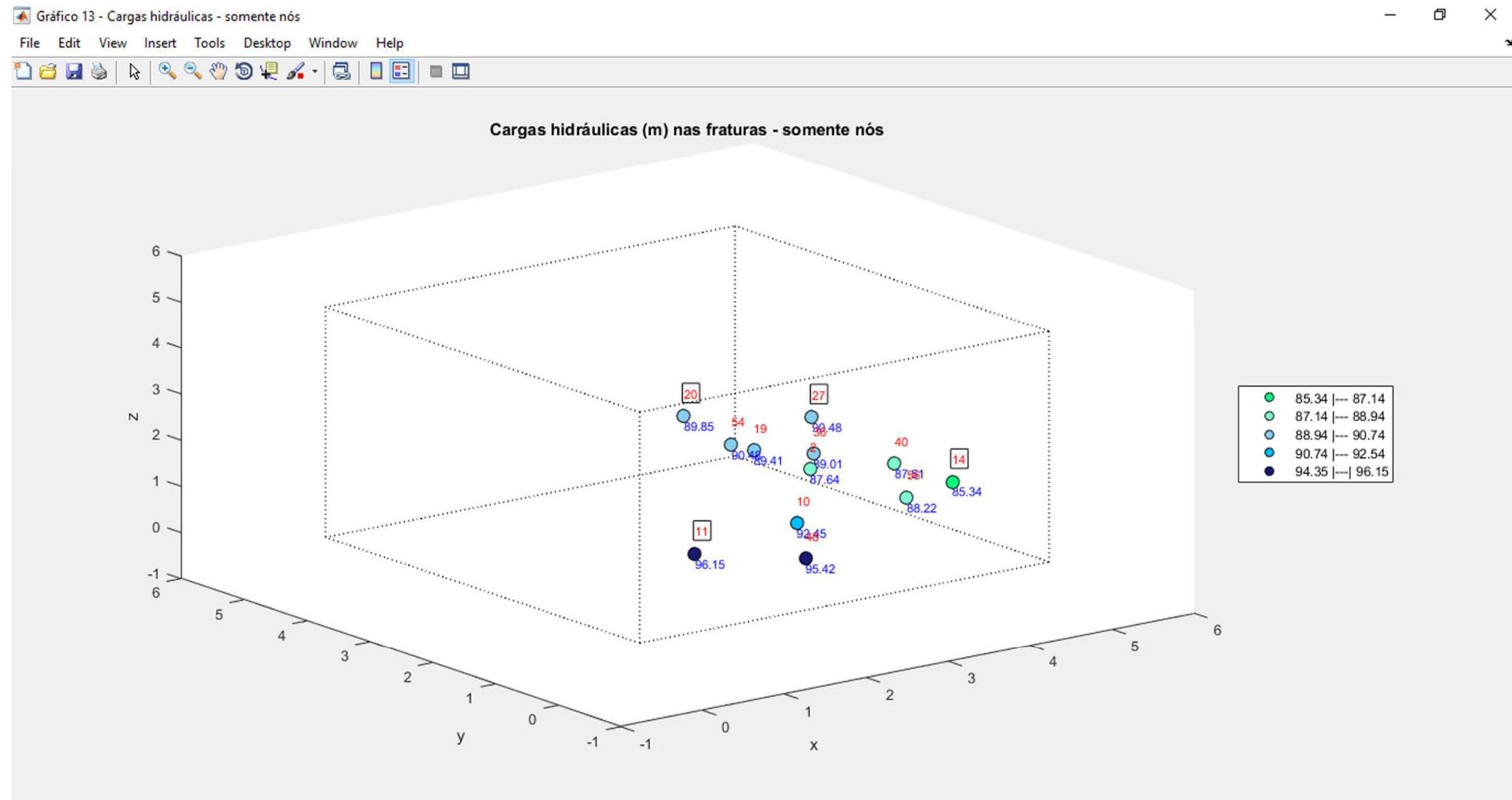
Estes nós são preenchidos utilizando uma escala de cores, correspondente ao valor do parâmetro analisado, conforme já feito para a apresentação dos valores de abertura e compri-

Figura 68 – Valores de carga hidráulica nos nós, em m, com os trechos de condutos, obtidos no exemplo hipotético proposto



Fonte: Autor (2018)

Figura 69 – Valores de carga hidráulica nos nós, em m, sem os trechos de condutos, obtidos no exemplo hipotético proposto



Fonte: Autor (2018)

comprimento de fraturas geradas. Os nós com preenchimento em tons azulados possuem as maiores cargas hidráulicas, enquanto os pontos com tons esverdeados possuem os menores valores. Ambos os gráficos apresentam a identificação dos nós, em termos de seus números identificadores (números em vermelho, acima dos nós). Os pontos extremos da rede, que tenham recebido as condições de contorno transportadas a partir das faces do volume, tem seus identificadores, envoltos por uma forma retangular.

Apesar de exibirem os mesmos resultados oriundos, os gráficos 12 e 13 apresentam pequenas diferenças. O gráfico 12, além de apresentar os nós em escala de cores, também esquematiza o traçado dos trechos, em menor espessura, de forma que o usuário não perca de vista o caminho tomado pela água ao passar por determinado nó. A identificação dos trechos também é visualizada, pela numeração em preto, exibida no gráfico. Já o gráfico 13 deixa de exibir os traçados dos segmentos de condutos, privilegiando a exibição dos valores numéricos de carga hidráulica obtidos em cada um dos nós, complementando a escala de cores exibida na legenda. Desta forma, considerando a importância deste resultado, o usuário tem a possibilidade de consultar tais valores de forma rápida, sem a necessidade de consultar a planilha disponível no módulo 2.

Ao se observar os resultados obtidos para o exemplo hipotético proposto, nota-se que os nós marcados como receptores das condições de contorno correspondem exatamente a pontos extremos da rede, ao longo dos eixos x e y, indicando que a metodologia apresentada para esta imposição é realmente respeitada. Como foram impostas condições nas 4 faces do volume possíveis de se inserir esta informação, quatro nós da rede de condutos deveriam receber tal imposição. Assim, os nós 11 e 27 recebem as cargas hidráulicas das faces esquerda e direita, enquanto os nós 14 e 20 recebem as condições impostas as faces frontal e de fundo, respectivamente.

Ao se considerar as condições de contorno impostas, nota-se que as cargas hidráulicas calculadas respeitam a tendência geral do escoamento, de ir em direção à face direita, ao longo do eixo x, e em direção à face frontal, ao longo do eixo y. Desta forma, observa-se que as maiores cargas hidráulicas se encontram em nos nós mais próximos a face esquerda, que representam as fraturas 11 e 48, decrescendo em direção a extremidade direita, onde o menor valor é visto no nó representativo da fratura 14.

Quando se observa o gráfico de vazões calculadas, levando em conta os valores de carga hidráulica, também se nota a mesma tendência geral, com o caminhamento da água partindo das extremidades definidas pelos nós 11, 20 e 27 e tendendo ao nó 14. Nota-se que a maior contribuição vem da ramificação paralela ao eixo x, formada pelos trechos 16, 14, 15 e 7, enquanto os demais trechos apresentam uma contribuição secundária à vazão total. Deve-se reforçar que tal observação deve levar em conta os erros numéricos nos valores exibidos no gráfico de vazões, em virtude de arredondamento e da precisão estabelecida para o cálculo do sistema linear.

Como último elemento de análise de resultados da ferramenta FratCond, o usuário dispõe da exportação da planilha 2, que contém os valores numéricos dos dados obtidos na execução do módulo 1 e do módulo 2 da ferramenta, em conjunto. Esta planilha possui 5 abas no total, sendo que as 3 primeiras são semelhantes as abas presentes na planilha 1, já apresentadas anteriormente e que não serão repetidas neste trecho do texto. Destaca-se que, na planilha 2, a aba 1, que contém os dados de entrada utilizados no modelo, também registra os dados informados para a execução do módulo 2. Assim, as cargas hidráulicas das faces dos volumes de simulação e a forma de determinação de condutância, indicados pelo usuário, são também listados nesta aba. As abas 2 e 3 não sofrem modificações.

As abas adicionais da planilha 2, em relação a planilha 1, são ilustradas na Figura 70 e 71, considerando os resultados obtidos para o exemplo hipotético proposto. Tais abas são nomeadas de “Dados dos trechos” e “Caminho mais longo”, respectivamente. Destaca-se que o cabeçalho da planilha 2 dispõe de mais um campo de data e hora, relativo ao momento em que o usuário executou a simulação hidráulica. O arquivo recebe, em seu nome, o dia e o horário em que o usuário realizou a exportação dos resultados, a partir do menu pop-up, disponível na parte inferior da interface gráfica.

A aba 4 apresenta os dados de todos os trechos de condutos unidimensionais gerados pelo modelo simulado, mesmo que estes não componham o caminho mais longo, que tenha efetivamente sido simulado hidráulicamente. A quantidade total de trechos corresponde a quantidade de interseções definidas pelas fraturas. No caso hipotético simulado, por exemplo, tem-se 40 trechos de condutos unidimensionais estabelecidos. Para cada um destes trechos, lista-se os parâmetros utilizados no cálculo da condutância, considerando a escolha

Figura 70 – Aba 4 da planilha 2, com os dados obtidos para o exemplo hipotético proposto

FratCond_dados_simulacao_hidraulica 18-01-18-16-11-12 - Excel

FratCond - Resultados da simulação hidráulica - Dados dos trechos

	ID	fratura i	fratura j	L (m)	W (m)	a (m)	T (m ² /s)	C (m ³ /s)
1	1	1	37	7.0375	2.3167	0.0233	0.0022	0.0050
2	2	1	43	7.8150	2.0374	0.0216	0.0019	0.0038
3	3	1	46	7.2263	2.0194	0.0225	0.0020	0.0041
4	4	1	57	7.0578	1.9259	0.0230	0.0021	0.0041
5	5	2	36	2.5898	2.0478	0.0134	0.0007	0.0015
6	6	2	40	1.5318	2.4292	0.0158	0.0010	0.0024
7	7	2	56	2.1422	1.0613	0.0201	0.0016	0.0017
8	8	3	26	5.1807	1.5425	0.0230	0.0021	0.0033
9	9	3	30	3.6726	1.0690	0.0278	0.0031	0.0033
10	10	3	49	4.6999	1.9778	0.0231	0.0021	0.0042
11	11	3	50	4.1685	2.0347	0.0244	0.0024	0.0048
12	12	8	34	6.7783	2.0192	0.0133	0.0007	0.0014
13	13	9	37	5.4409	2.0407	0.0276	0.0031	0.0062

Dados das fraturas | Dados das interseções | **Dados dos trechos** | Caminho mais longo | +

Fonte: Autor (2018)

Figura 71 – Aba 5 da planilha 2, com os dados obtidos para o exemplo hipotético proposto

FratCond - Resultados da simulação hidráulica - Caminho mais longo

Data e hora de geração da geometria:		18-01-18-15-04-16						
Data e hora da simulação hidráulica:		18-01-18-16-03-03						
Data e hora de exportação dos resultados:		18-01-18-16-11-12						
Volume de simulação (m ³):		125						
Número de fraturas geradas:		57						
Número de interseções obtidas:		40						
Número de interseções no caminho mais longo:		15						
Número de iterações do cálculo hidráulico:		13						
Erro relativo residual:		0.000027						
Situação de convergência:		Sem problemas						
Fraturas com condição de contorno: Cargas hidráulicas impostas								
Face do volume	r na face do volume	ID	Valor na fratura (m)					
Face Esquerda	100	11	96.1478					
Face Direita	90	27	90.4819					
Face Frontal	85	14	85.3374					
Face de fundo	90	20	89.8512					
ID	fratura i	fratura j	L (m)	C (m ³ /s)	h - fratura i (m)	h - fratura j (m)	I (m/m)	Q (m ³ /s)
5	2	36	2.5898	0.0015	87.6384	89.0143	0.5313	0.0008
6	2	40	1.5318	0.0024	87.6384	87.5099	0.0839	0.0002
7	2	56	2.1422	0.0017	87.6384	88.2235	0.2732	0.0005
14	10	48	1.3060	0.0018	92.4546	95.4202	2.2708	0.0042
15	10	56	1.7439	0.0018	92.4546	88.2235	2.4262	0.0045

Fonte: Autor (2018)

da sua determinação a partir das propriedades das fraturas. Desta forma, o usuário pode resgatar os valores utilizados no cálculo de parâmetro, que tem bastante influência no modelo de simulação hidráulico proposto pela ferramenta FratCond.

Assim, como apresentado na Figura 70, lista-se para cada um dos trechos, ordenados em ordem crescente de número identificador:

- Os identificadores das fraturas que formam o trecho em questão.
- O comprimento do trecho em questão (L), em metros, dado pela soma das parcelas formadas pela ligação centro-interseção e interseção-centro seguinte.
- A largura do conduto unidimensional equivalente (W), em metros, definida como 75% do comprimento do segmento de interseção entre as fraturas analisadas.
- A abertura média de transporte (a), em metros, correspondente à altura do conduto unidimensional equivalente.
- A transmissividade média dos condutos (T), em m^2/s , dada pela média das transmissividades das fraturas que compõem o referido trecho.
- A condutância resultante do trecho (C), em m^3/s , dada pelo produto entre a transmissividade média e a largura do conduto unidimensional.

Caso o usuário opte por utilizar a distribuição lognormal na determinação deste parâmetro de proporcionalidade, esta aba fica reduzida as colunas que listam o comprimento dos trechos e aos valores gerados de condutância. As demais características geométricas não são calculadas.

Ao se avaliar os resultados obtidos para o exemplo hipotético realizado, é possível verificar, pelos valores de comprimentos que, ao transitar por entre as fraturas, os fluidos podem percorrer grandes extensões lineares, mesmo em um pequeno volume de simulação. Por isso, valores de comprimento de trechos maiores que as arestas do volume analisado não são estranhos, em virtude da medição espacial destes condutos. Por outro lado, estes valores de comprimento não causam influência nos valores de condutância, uma vez que não entram no cálculo proposto por Desrshowitz (1996), sendo apenas ponderador das transmissividades médias. Já os valores de largura dos condutos, diretamente dependentes do comprimento dos segmentos de interseção, apresentam valores variados, de ocorrência extremamente aleatória, uma vez que depende da forma como os cruzamentos entre as fraturas ocorrem. Com relação as aberturas médias de transporte, nota-se sua relação direta com as

transmissividade média dos trechos. Quanto maior as transmissividades, maiores serão as alturas dos condutos retangulares representativos, indicando uma maior facilidade de passagem da água sobre as fraturas que representam. Por fim, como já comentado anteriormente, os valores de condutância resultam da influência da largura dos condutos unidimensionais e das transmissividades médias dos trechos considerados.

A aba 5 da planilha 2 apresenta os resultados obtidos a partir da simulação hidráulica, realizada ao longo do caminho mais extenso de condutos, dentre todos os trechos estabelecidos no modelo simulado. Desta forma, o número de trechos tende a ser sempre menor que o total gerado na geometria inicial. No caso hipotético analisado, por exemplo, das 40 interseções iniciais, apenas 15 delas pertencem ao caminho mais longo, dentro do meio fraturado simulado. As demais fraturas formam trechos secundários e/ou descontinuidades isoladas, não sendo simuladas hidraulicamente.

Como visto ao longo da metodologia deste trabalho, a simulação hidráulica é resultante da solução de um sistema linear por meio do método numérico LSQR. A fim de informar ao usuário se a aplicação do método foi bem-sucedida, para a geometria considerada na simulação, a aba 5 dispõe, logo abaixo do cabeçalho, do lado esquerdo da tela, de 3 linhas que indicam ao utilizador da ferramenta o número de iterações realizadas pelo método numérico, o erro residual máximo obtido para a solução apresentada, assim como o status de convergência do método.

De forma geral, o erro residual máximo atinge a precisão estabelecida para a ferramenta e visualiza-se poucos problemas de convergência do método proposto. Porém, caso isso ocorra, o utilizador é avisado, por meio de uma janela de advertência, ao final da execução do módulo 2, assim como pode verificar esta situação nas linhas da planilha aqui indicadas. Para exemplo hipotético estudado, nota-se que foram necessárias 13 iterações para obtenção de resultados com erro residual inferior à precisão estabelecida, de 0.0001. Não foram encontrados problemas na convergência do método utilizado.

Ainda abaixo do cabeçalho da planilha, do lado direito da tela, são indicados ao usuário a forma como as condições de contorno foram fixadas nos nós extremos da rede de condutos. As células da planilha listam os valores de cargas hidráulicas inseridas pelo usuário em cada

uma das faces do volume de simulação. Logo ao lado, são indicados quais foram os nós da rede que receberam a referida condição de contorno, assim como o valor de carga hidráulica, após a interpolação linear proposta para o transporte da referida condição de contorno, da face até o nó. Lembra-se que os valores são interpolados, considerando a direção do eixo x, limitada pelas faces esquerda e direita; e a direção do eixo y, limitada pelas faces frontal e de fundo.

Para o exemplo hipotético realizado, como já mostrado nos gráficos de carga hidráulica, os nós 11, 27, 14 e 20, receberam as condições de contorno impostas. Os nós 11 e 27 são os nós extremos na direção do eixo x, tendo seus valores de carga hidráulica limitados ao intervalo de 90 a 100 m, que foram os valores das faces limites deste eixo. Analogamente, os nós 14 e 20 são os nós extremos na direção do eixo y, tendo suas cargas hidráulicas limitadas ao intervalo de 85 a 90 m, valores estes inseridos nas faces limitantes desta direção.

Nas linhas subsequentes da planilha, são exibidos os resultados obtidos em cada um dos trechos que compõe o caminho mais longo. Os resultados são exibidos de forma ordenada, a partir do número identificador do trecho. As colunas exibem os seguintes resultados, conforme mostrado na Figura 71:

- Os identificadores das fraturas que compõem o trecho em questão;
- O comprimento do trecho em questão (L), em metros, dado pela soma das parcelas formadas pela ligação centro-interseção e interseção-centro seguinte.
- A condutância resultante do trecho (C), em m^3/s .
- Os valores de cargas hidráulicas (h_i e h_j), em metros, do nó inicial e do nó final do trecho em questão. Tais valores são indicados na mesma ordem as fraturas indicadas nas colunas 2 e 3. Por exemplo, na Figura 71, o trecho 5, formado pelas fraturas 2 e 36, a carga hidráulica em 2 é igual a 87,6384 m enquanto a carga hidráulica em 36 é igual a 89,0143 m.
- O gradiente hidráulico obtido para o trecho (I), em m/m , dado pela diferença das cargas hidráulicas inicial e final, dividido pelo comprimento linear do trecho.
- A vazão obtida para o trecho (Q), em m^3/s , dado pelo produto entre a condutância e o gradiente hidráulico.

É importante salientar que os resultados exibidos nas células estão arredondados, considerando 4 casas decimais após a vírgula, apenas para padronização da forma como estes

dados são exibidos. Caso o usuário deseje ou necessite, é possível visualizar os resultados na sua forma original, clicando sobre a célula correspondente e observando a barra de fórmulas do Excel, que onde o número se apresenta com a quantidade máxima de algarismos significativos disponíveis.

A partir dos dados da planilha 2, o usuário pode complementar a análise de resultados iniciada a partir dos gráficos disponíveis no módulo 2, obtendo os resultados de uma forma mais pura e completa. Destaca-se que as variáveis hidráulicas calculadas no modelo são todas exibidas com sinal positivo, sem considerar sentidos possivelmente representados com valores negativados.

Assim, termina-se a apresentação dos resultados obtidos no exemplo hipotético proposto neste trabalho, como forma de teste e de apresentação das formas de exploração de dados resultantes das simulações da ferramenta FratCond. Ressalta-se que, em virtude do caráter espacial de alguns gráficos, a sua exibição a partir de um único ponto de visualização, da forma como realizada ao longo deste texto, pode prejudicar a análise de resultados. Assim, recomenda-se ao utilizador da ferramenta que aproveite as ferramentas de zoom e de giro das imagens tridimensionais fornecidas nos resultados, para melhor visualização e análise dos gráficos disponíveis.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo apresenta as considerações finais deste trabalho, apresentando uma síntese dos assuntos comentados ao longo do texto, assim como as principais conclusões obtidas a partir da elaboração da ferramenta FratCond, além de recomendações indicadas para trabalhos futuros, que podem ser derivados desta dissertação.

A modelagem hidráulica de aquíferos fraturados é uma forma importante de compreensão dos escoamentos de água subterrânea e do transporte de compostos nestes meios. Em virtude da presença de duas regiões bem definidas: uma matriz rochosa consolidada intervalada por fraturas; e a respectiva variação de suas propriedades físicas e hidráulicas, a modelagem destas formações demanda um tratamento diferenciado, quando comparado a outros meios, que se apresentam com características mais uniformes.

Diversos são os modelos presentes na literatura usados para a representação das formações fraturadas, variando-se especificamente na forma como as descontinuidades são representadas nas simulações. Parte-se desde a consideração de um modelo contínuo com propriedades médias de ambas as regiões do meio fraturado a protótipos que buscam representar fielmente as fraturas na forma como estas ocorrem. Nesta última categoria, destaca-se as redes de fraturas discretas, que se baseiam em dados de campo para a determinação da posição e da orientação das fraturas para montagem de modelos, para posterior simulação hidráulica. Considerando a dificuldade de levantamento de todas as fraturas presentes em um meio, é comum a aplicação de modelos estatísticos e estocásticos para a geração de fraturas representativas de um meio modelado.

Para a modelagem hidráulica, considerando uma redução de esforço computacional, na solução de equações de escoamentos em meios tridimensionais, como os fraturados, alguns estudos mostraram a possibilidade de representar as fraturas como condutos e canais unidimensionais. Deste modo, forma-se uma rede, obtida a partir das interseções de fraturas existentes no modelo e levando em conta as respectivas propriedades das fraturas, permitindo assim o levantamento de cargas hidráulicas e das vazões que transitam no interior dos meios fraturados.

Considerando estes aspectos e buscando contribuir para os estudos de aquíferos fraturados, esta dissertação apresentou o desenvolvimento de uma ferramenta computacional em ambiente MATLAB, batizada de FratCond, destinada a modelagem de escoamentos permanentes nestes meios. Tal ferramenta utiliza redes de fraturas discretas obtidas a partir de uma geração estocástica, resultante da aplicação de distribuições estatísticas mais comuns para os parâmetros físicos das fraturas. Estas descontinuidades são representadas por meio de discos tridimensionais, seguindo o modelo de Baecher. Para a simulação hidráulica, as fraturas são analisadas na forma de condutos unidimensionais equivalentes, traçados a partir das interseções e dos centros destas descontinuidades. A partir da resolução de equações simplificadas, determina-se valores de carga hidráulica e de vazões que transitam nos caminhos mais extensos da formação fraturada simulada.

A ferramenta FratCond possui dois módulos distintos, destinados a montagem da geometria do modelo e a posterior simulação hidráulica. Buscou-se apresentar, ao longo deste texto, a forma de implementação utilizada para a construção da ferramenta, destacando-se o uso das distribuições estatísticas na obtenção das características das fraturas geradas, a determinação das interseções entre as fraturas, o traçado dos condutos unidimensionais equivalentes, a determinação das condutâncias a partir das propriedades das fraturas, a montagem do sistema linear para a simulação hidráulica e a respectiva aplicação de condições de contorno para esta simulação.

A seção de resultados apresentou a forma final assumida pela ferramenta, especificamente em termos de interface gráfica, disponível para a inserção dos dados de entrada, a serem utilizados na simulação proposta; e em termos de gráficos e planilhas que o utilizador dispõe para a exploração dos resultados obtidos, tanto em termos de geração estocástica de fraturas

quanto na execução de uma simulação hidráulica utilizando condutos unidimensionais equivalentes.

A apresentação dos produtos resultantes do uso da ferramenta FratCond, que consistem em 13 gráficos e 2 planilhas, foi realizada a partir de um exemplo de meio fraturado hipotético. Este exemplo possibilitou a visualização de toda a potencialidade de utilização e de exploração de resultados das simulações em ambos os módulos, tanto na montagem da geometria do modelo quanto na respectiva modelagem hidráulica. A partir desta amostra, em conjunto com outras simulações executadas, mas que não foram contempladas neste texto, é possível assegurar, em princípio, que a ferramenta proposta possui acurácia e boa qualidade na referida modelagem.

Com a utilização da ferramenta FratCond, destaca-se a possibilidade de percepção das variações na geração estocásticas das fraturas, considerando diferentes dados de entrada para os parâmetros físicos destas descontinuidades. A análise dos gráficos resultantes da execução do módulo 1 permitem ao usuário a visualização da posição das fraturas, dos valores de comprimentos e aberturas, da disposição dos discos representativos e das variações de orientação, além dos pontos representativos das interseções e do traçado dos condutos unidimensionais. A partir da execução do módulo 2, é possível verificar o comportamento da geometria na simulação hidráulica. A verificação dos valores de condutância, de cargas hidráulicas e de vazões obtidas são as principais análises possíveis ao usuário neste módulo.

É interessante destacar a possibilidade de cruzamento de dados obtidos em ambos os módulos e a verificação das influências entre eles, permitindo ao usuário uma análise completa da formação simulada. Como exemplos, a partir do caso hipotético explorado para apresentação da ferramenta, nota-se a proporcionalidade inversa entre condutância e gradiente hidráulico e a dependência direta da vazão destes dois parâmetros; a dependência entre a abertura das fraturas e a vazão que transita dentro das descontinuidades, em virtude da influência deste parâmetro físico na transmissividade do conduto e consequentemente na condutância; a variação do diâmetro dos condutos em função do tamanho do segmento de interseção entre as fraturas que o formam; dentre outros aspectos.

Outro aspecto interessante a ser destacado é a leveza da ferramenta, em termos computacionais, na execução das simulações. Nos testes realizados pelos autores, observou-se que o tempo de execução do módulo 1 é dependente da quantidade de fraturas existentes no meio simulado. Tal fato é explicado, principalmente, pela determinação das interseções entre as fraturas, que demanda uma análise por pares, aumentando assim o tempo de geração da geometria. Já para o módulo 2, observa-se que sua execução é rápida. Na plotagem dos gráficos, apenas os gráficos 4 e 5 apresentam certa lentidão na sua geração, em virtude da marcação ponto a ponto na montagem dos discos tridimensionais. Porém, é importante salientar que tais afirmações são dependentes da configuração do computador utilizado pelo usuário. A rapidez na execução aqui destacada foi visualizada no computador do autor, em um ambiente Windows, com processador Intel Core i7-6500u, 8Gb de memória RAM e com MATLAB na versão 2015b.

Em termos de limitação de uso da ferramenta FratCond, é necessário que o usuário disponha de versões mais recentes do ambiente MATLAB, mais especificamente aquelas superiores a versão 2015b. Assim, garante-se que todas as funções intrínsecas do ambiente e utilizadas nas rotinas propostas sejam executadas sem problemas, uma vez que a implementação foi realizada na versão mínima citada.

Em termos de recomendações, ainda é notório que a ferramenta demanda melhores testes, que possibilitem uma validação de suas simulações. Destaca-se a necessidade de comparação com dados reais representativos de escoamentos em meios fraturados, que considerem a metodologia utilizada neste trabalho ou mesmo outros métodos, passíveis de confrontação. Tais ações podem ser realizadas em momentos futuros, considerando a continuação deste trabalho, quanto a nível de doutorado ou na realização de outras dissertações, ou mesmo na elaboração de conteúdo para publicações científicas. Desta forma, aproveita-se de toda a implementação realizada ao longo desta dissertação e verifica-se a real potencialidade da ferramenta proposta.

Outras ações para teste e melhoria no uso da ferramenta também podem ser executadas, dentre as quais:

- Testes de análise da consequência da influência dos dados de caracterização das fraturas, na geração estocástica das descontinuidades, na obtenção de interseções

entre fraturas e no traçado dos condutos unidimensionais, especificamente nos trechos formadores do caminho mais extenso;

- Análises da influência das condições de contorno sobre o modelo hidráulico, tanto a nível de transporte e imposição destas condições sobre a rede de condutos, quanto no cálculo das cargas hidráulicas nas demais fraturas;
- Comparação entre as formas de determinação da condutância presentes na ferramenta;
- Implementação de um módulo adicional, que permita a importação de uma geometria previamente gerada na ferramenta, para uso direto do módulo 2.
- Estudos adicionais para implementação de um módulo adicional de simulação de transporte de contaminantes, que utilize os resultados obtidos nos módulos 1 e 2. Tal estudo pode se iniciar nos conteúdos trazidos por Cacas et al. (1990b).

REFERÊNCIAS

- ABAS. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas – Águas subterrâneas: o que são?. Disponível em: <<http://www.abas.org>>. Acesso em: 28 dez. 2016.
- ABREU, F. A. M.; CAVALCANTE, I. N.; MATTA, M. A. S. O Sistema Aquífero Grande Amazônia – SAGA: um Imenso Potencial de Água Subterrânea no Brasil. In: III CONGRESSO INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE SUBTERRÂNEO. **Anais**. 2013.
- ACKERER, P.; TROTTIER, N.; DELAY, F. Flow in double-porosity aquifers: parameter estimation using an adaptive multiscale method. **Advances in Water Resources**. v. 73. p. 108–122, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.07.001>
- ANA. Agência Nacional de Águas (Brasil) - Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil, 2013: Agência Nacional de Águas. Brasília: 2013. 432 p. Relatório.
- 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.
- ALTINÖRS, A; ÖNDER, H. A double-porosity model for a fractured aquifer with non-Darcian flow in fractures. **Hydrological Sciences Journal**. v. 53. n. 4 p. 868-882, 2008. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.4.868>

ANDERSSON, J.; DVERSTORP, B. Conditional simulations of fluid flow in three-dimensional networks of discrete fractures. **Water Resources Research.** v. 23. n. 10. p 1876-1886, 1987. <https://doi.org/10.1029/WR023i010p01876>

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.

BARENBLATT, G.E.; ZHELTOV, I.P.; KOCHINA, I.N. Basic concepts in the theory of homogeneous liquids in fissured rocks. **Journal of Applied Mathematics and Mechanics.** USSR v. 24. n. 5. p. 1286–1303, 1960. [https://doi.org/10.1016/0021-8928\(60\)90107-6](https://doi.org/10.1016/0021-8928(60)90107-6)

BASHA, H. A.; EL-ASMAR, W. The fracture flow equation and its perturbation solution. **Water Resources Research.** v. 39. n. 12. p. 1365, 2003. <https://doi.org/10.1029/2003WR002472>

BEAR, J. **Hydraulics of groundwater.** New York: McGraw-Hill, 1979. 567p.

BEAR, J.; TSANG, C.F.; DE MARSILY, G. **Flow and Contaminant transport in fractured rock.** Academic Press, 1993.

BIANCHI, L.; SNOW, D. T. Permeability of crystalline rock interpreted from measured orientations and apertures of fractures, **Annals of the Arid Zone.** v.8. n. 2., p. 231-245, 1968.

BEICIP. **Fractured Reservoirs FracFlow.** Disponível em: <<http://www.beicip.com/fractured-reservoirs>>. Acesso em: 21 fev. 2017.

BERKOWITZ, B.; BEAR, J.; BRAESTER, C. Continuum Models for Contaminant Transport in Fractured Porous Formations. **Water Resources Research.** v. 24. n. 8. p. 1225-1236, 1988. <https://doi.org/10.1029/WR024i008p01225>

BODIN, J.; DELAY, F.; DE MARSILY, G. Solute transport in a single fracture with negligible matrix permeability: 1. fundamental mechanisms. **Hydrogeology Journal**. v. 11. p. 418–433. 2003. <https://doi.org/10.1007/s10040-003-0268-2>

BODIN, J.; POREL, G.; DELAY, F.; UBERTOSI, F.; BERNARD, S.; DE DREUZY, J. Simulation and analysis of solute transport in 2D fracture/pipe networks: The SOLFRAC program. **Journal of Contaminant Hydrology**. v. 89. p.1–28, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2006.07.005>

BONFIM, L. F. C. Mapa de domínios/subdomínios hidrogeológicos do Brasil em ambiente SIG: concepção e metodologia. IN: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E XVII ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS. **Anais**. São Luís, 2010.

BORBIAUX, B. Fractured Reservoir Simulation – a Challenging and Rewarding Issue. **Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP**. v. 65. n. 2, p. 227–238, 2010.

BOSCARDIN BORGHETTI, N. R.; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. **Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos países do Mercosul**. Fundação Roberto Marinho, 2004.

BOURKE, P. J.; DUNANCE, E. M.; HEATH, M. J.; HODGKINSON, D. D. **Fracture hydrology relevant to radionuclide transport**. Atomic Energy Res. Estab: Harwell, United Kingdom, 1985.

BRIGGS, S.; KARNEY, B. W.; SLEEP, B. E. Numerical modelling of flow and transport in rough fractures. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**. v. 6. p. 535-545. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.10.004>

BRITO NEVES, B. B; MANOEL FILHO, J. Geologia e Províncias Hidrogeológicas da Bahia. In: XXVII Congresso Brasileiro de Geologia. **Anais**. Belém, 1972. p. 195-214.

BRUSH, D.J.; THOMSON, N.R. Fluid flow in synthetic rough-walled fractures: Navier-Stokes, Stokes, and local cubic law simulations. **Water Resources Research.** v.39 n. 4, 2003. <https://doi.org/10.1029/2002WR001346>

CACAS, M. C.; LEDOUX, E.; MARSILY, G.; TILLIE, B.; BARBREAU, A.; DURAND, E.; FEUGA, B.; PEAUDECERF, 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. <https://doi.org/10.1029/WR026i003p00479>

CACAS, M. C.; LEDOUX, E.; MARSILY, G.; BARBREAU, A.; CALMELS, P.; GAILLARD, B.; MARGRITTA, R. . Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: Calibration and validation. 2. The transport model. **Water Resources Research.** v. 26. n. 3. p. 491-500, 1990b. <https://doi.org/10.1029/WR026i003p00491>

CARRERA, J.; HEREDIA, J.; VOMVORIS, J.; HUFSCHEMID, P. Modeling of flow on a small fractured monzonitic gneiss block. **Hydrogeology of Low Permeability Environments.** p. 115–167. 1990.

CHILÈS, J. P. Stochastic modeling of natural fractured media: a review. In: LEUANGTHONG, O., DEUTSCH, C.V. (EDS.), GEOSTATISTICS BANFF 2004. VOL. 14 OF QUANTITATIVE GEOLOGY AND GEOSTATISTICS. **Proceedings.** Springer: Netherlands. p. 285–294, 2005. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3610-1_29

CLEARY, R. W. **Águas subterrâneas.** Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2007.

COOK, P. G. **A Guide to Regional Groundwater Flow in Fractured Rock Aquifers.** CSIRO, 2003.

CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais / Serviço Geológico Brasileiro – Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br>>. Acesso em: 09 jan. 2016.

DERSHOWITZ, W. S.; EINSTEIN, H. H. Characterizing rock joint geometry with joint system models. **Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering.** v. 21. p. 21-51, 1988. <https://doi.org/10.1007/BF01019674>

DERSHOWITZ, W.; WALLMANN, P.; KINDRED, S. **Discrete Fracture Modeling for the Stripa Site Characterization and Validation Drift Inflow Predictions - SKB Report 91-16.** Swedish Nuclear Power and Waste Management Co., Stockholm. 1991. Relatório.

DERSHOWITZ, W. S. Rock mechanics approaches for understanding flow and transport pathways. In: EUROCK '96 ISRM - INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PREDICTION AND PERFORMANCE IN ROCK MECHANICS AND ROCK ENGINEERING. **Proceedings.** International Society of Rock Mechanics. Torino, Italy, 1996.

DERSHOWITZ, W. S.; FIDELIBUS, C. Derivation of equivalent pipe network analogues for three-dimensional discrete fracture networks by the boundary element method. **Water Resources Research.** v. 35. n. 9. p. 2685-2691, 1999. <https://doi.org/10.1029/1999WR900118>

DERSHOWITZ, W., POINTE, P.L., DOE, T.W. Advances in discrete fracture network modeling. IN: US EPA/NGWA FRACTURED ROCK CONFERENCE. **Proceedings.** Portland, Maine, USA, 2004.

DINIZ, J. A. O.; MONTEIRO, A B.; FEITOSA, F. A. C.; FREITAS, M. A.; PEIXINHO, F. C. Metodologia para Elaboração de Mapas Hidrogeológicos. IN: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E XVIII ENCONTRO NACIONAL DE PERFORADORES DE POÇOS. **Anais.** Bonito, 2012.

DUTRA JR., T. V.; AZIZ, K. A new double-porosity reservoir model for oil/water flow problems. **Society of Petroleum Engineers.** v. 7. n. 04, 1992.

DVERSTROP, 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. <https://doi.org/10.1029/WR025i003p00540>

EINSTEIN, H.H., BAECHER, G.B., VENEZIANO, D. **Risk Analysis for Rock Slopes in Open Pit Mines - Final Technical Report.** Publication No. R80-17, Order No. 669, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1980. Relatório.

EUROSTAT. **Water Statistics in Europe.** Disponível em: <http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Water_statistics>. Acesso em: 03 jan. 2017.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações.** 2^a ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000. 391 p.

FRACMAN. **Fracman – Discrete Fracture Network Simulator.** Disponível em: <<http://www.fracman.com>>. Acesso em: 21 fev. 2017.

FREEZE, R. A; CHERRY, J. A. **Groundwater.** Prentice-Hall. 1979.

GERKE, H. H.; GENUCHTEN, M. T. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. **Water Resources Research.** v. 29. n. 2. p. 305-319, 1993. <https://doi.org/10.1029/92WR02339>

GHASEMIZADEH, R.; YU X.; BUTSCHER, C.; HELLWEGER, F.; PADILLA, I.; ALSHAWABKEH, A. Equivalent Porous Media (EPM) Simulation of Groundwater Hydraulics and Contaminant Transport in Karst Aquifers. **PLoS ONE.** v. 10. n. 9, 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138954>

GRINGARTEN, A. C. Flow-test evaluation of fractured reservoirs. **Recent Trends in Hydrogeology - Geol. Soc. Am. Special Paper.** n.189. p. 237–263, 1982. <https://doi.org/10.1130/SPE189-p237>

GYLLING, B. **Development and Applications of the Channel Network Model for Simulations of Flow and Solute Transport in Fractured Rock.** 1997. Tese (Doutorado

em Engenharia Química). Department of Chemical Engineering and Technology - Royal Institute of Technology. Stockholm, 1997.

GYLLING, B.; MORENO, L.; NERETNIEKS, I. The Channel Network Model – a tool for transport simulations in fractured media. **Groundwater**. v. 37. n.3, 1999. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1999.tb01113.x>

HARRINGTON, S; COOK, P. **Groundwater in Australia - National Centre for Groundwater Research and Training**. Australia, 2014.

HARTLEY, L. J.; HOLTON, D.; HOLCH, A. R. **NAPSAC Technical Summary Document**, 2002.

HAUSMAN, A. **Províncias Hidrogeológicas do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre. Secretaria de Estado dos Negócios das Obras Públicas. 1963. 27 p. 1 mapa anexo.

HAWS, N. W.; RAO, P. S. C.; SIMUNEK, J.; POYER, I. C. Single-porosity and dual-porosity modeling of water flow and solute transport in subsurface drained fields using effective field-scale parameters. **Journal of Hydrology**. n. 313. p. 257–273, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.03.035>

HERBERT, A., GALE, J.; LANYON, G.; MACLEOD, R. **Modeling for the Stripa site characterization and validation drift inflow: prediction of flow through fractured rock - SKB Report 91-35**. Swedish Nuclear Power and Waste Management Co., Stockholm. 1991. Relatório.

HESTIR, K.; LONG, J. C. S. Analytical expressions for the permeability of random two-dimensional 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.

HUDSON, J. A.; PRIEST, S. D. Discontinuities and rock mass geometry. **Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech**. v. 16. p. 339-362, 1979. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(79\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(79)90001-9)

INDRARATNA, B.; RANJITH, P. **Hydromechanical Aspects and Unsaturated flow in Jointed Rock.** AA Balkema Publ., Tokyo, 2001. 286 p.

JING, L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** v. 40. n. 3. p. 283–353, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00013-3](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00013-3)

KARAY, G; HAJNAL G. Modelling of groundwater flow in fractured rocks. IN: 7TH GROUNDWATER SYMPOSIUM OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRO-ENVIRONMENT ENGINEERING AND RESEARCH (IAHR). **Proceedings.** 2015.

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. <https://doi.org/10.1029/1998WR900041>

KOYAMA, T.; NERETNIEKS, I.; JING, L. A numerical study on differences in using Navier–Stokes and Reynolds equations for modeling the fluid flow and particle transport in single rock fractures with shear. **Int J. Rock Mech. Min. Sci..** v. 45, p. 1082-1101, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.11.006>

KULATILAKE, P. H. S. W.; WATHUGALA, D. N.; STEPHANSSON, O. Joint network modeling with a validation exercise in Stripa mine, Sweden. **Int J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.,** v. 30. n. 5., p. 503-526, 1993. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(93\)92217-E](https://doi.org/10.1016/0148-9062(93)92217-E)

KULATILAKE, P. H. S. W.; CHEN, J.; TENG, J.; SHUFANG, X.; PAN, G. Discontinuity geometry characterization in a tunnel close to the proposed permanent shiplock area of the Three Gorges Dam site in China. **Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr.,** v. 33. n. 3. p. 255-277, 1996. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(95\)00060-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(95)00060-7)

KULATILAKE, P. H. S. W. **Software manual for FRACNTWK – a computer package to model discontinuity geometry in rock masses**, Technical report submitted to Metropolitan Water District of Southem California. 1998. Relatório.

KUMAR, G. S. Mathematical Modeling of Groundwater Flow and Solute Transport in Saturated Fractured Rock Using a Dual-Porosity Approach. **Journal of Hydrologic Engineering**. v. 19. n. 12. 2014.

LEWIS, R. W.; GHAFOURI, H. R. A novel finite element double porosity model for multiphase flow through deformable fractured porous media. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**. v. 21. n. 11. p. 789-816, 1997. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9853\(199711\)21:11<789::AID-NAG901>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9853(199711)21:11<789::AID-NAG901>3.0.CO;2-C)

LIM, D.; AHN, J.; CHAMBRÉ, P. L. **Analysis of water flow through a fracture network in the near field**, Department of Nuclear Engineering. U.C. Berkeley, UCB-NE-4227, 2001.

LIM, D.H. **Mass Transport Analysis in the Near Field of Geologic Repository**. Ph.D. Dissertation. University of California, Berkeley, 2002.

LONG, J. C. S.; REMER, J. S.; WILSON, C. R.; WITHERSPOON, P. A. Porous Media Equivalents for Networks of Discontinuous Fractures. **Water Resources Research**. v. 18. n. 3. p. 645-658, 1982. <https://doi.org/10.1029/WR018i003p00645>

LONG, J. C. S. **Investigation of Equivalent Porous Medium Permeability in Networks of Discontinuous Fractures**. PhD Dissertation, Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley. 1983.

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. A Model for Steady Fluid Flow in Random Three-Dimensional Networks of Disk Shaped Fractures. **Water Resources Research.** v. 21. n. 8. p. 1105-1115, 1985b.
<https://doi.org/10.1029/WR021i008p01105>

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.
<https://doi.org/10.1029/WR023i007p01201>

LONG, J. C. S.; MAULDON, A.; NELSON, K.; MARTEL, S.; FULLER, P.; KARASAKI, K. **Prediction of flow and drawdown for the site characterization and validation site in the Stripa mine - SKB Report 92-05.** Swedish Nuclear Power and Waste Management Co. Stockholm, 1992. Relatório.

MANASSÉS, F. **Caracterização Hidroquímica da Água Subterrânea da Formação Serra Geral na Região Sudoeste do Estado do Paraná.** 2009. 136 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

MANOEL FILHO, J. **Modelo de dimensão fractal para avaliação de parâmetros hidráulicos em meio fissural.** 1996. 219 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

MANOEL FILHO, J. **Águas Subterrâneas no Meio Cristalino.** DEHA/UFC. 2006.

MARDIA, K . V. **Statistics of Directional Data.** 357 pp., Academic, San Diego, Calif., 1972.

MATHWORKS. **Plane Intersection – verificação da interseção entre planos.** Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/17618-plane-intersection>>. Acesso em: 04 jan. 2018a.

MATHWORKS. **Graph and Network Algorithms.** Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/matlab/graph-and-network-algorithms.html>>. Acesso em: 08 jan. 2018b.

MATHWORKS. **Write Data to Excel Spreadsheet Using ActiveX.** Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/matlab/matlab_external/using-a-matlab-application-as-an-automation-client.html>. Acesso em: 08 jan. 2018c.

MAUPIN, M.A.; KENNY, J.F.; HUTSON, S.S.; LOVELACE, J.K.; BARBER, N.L.; LINSEY, K.S. **Estimated use of water in the United States in 2010.** U.S. Geological Survey Circular 1405, 2014. 56 p.

MENTE, A. **Análise das informações sobre recursos hídricos subterrâneos no país.** Brasília, Ministério de Minas e Energia, 2009. Relatório.

MIRANDA, T. S.; BARBOSA, J. A.; GOMES, I. F.; NEUMANN, V. H. M. L.; SANTOS, R. F. V. C.; MATOS, G. C.; GUIMARÃES, L. J. N.; FLORÊNCIO, R. Q.; ALENCAR, M. L. Aplicação da técnica de scanline à modelagem geológica/geomecânica de sistemas de fraturamento nos depósitos carbonáticos e evaporíticos da Bacia do Araripe, NE do Brasil. **Boletim de Geociências – Petrobras.** Rio de Janeiro, v. 20. n. 1/2. p. 305-326, 2012.

MMA. **Ministério do Meio Ambiente – Ciclo Hidrológico.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 02 jan. 2017.

MMA. **Plano Nacional de Recursos Hídricos. Panorama e estado dos recursos hídricos do Brasil: Volume 1** / Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. – Brasília: MMA, 2006. 4 v.: il. Color; 28 cm.

MOENCH, A. F. Double porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin. **Water Resources Research.** v. 20, n. 7, p. 831–846, 1984.
<https://doi.org/10.1029/WR020i007p00831>

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.
<https://doi.org/10.1029/WR024i012p02033>

MORENO, L.; NERETNIEKS, I. Fluid flow and solute transport in a network of channels. **Journal of Contaminant Hydrology.** v. 14, p. 163-192, 1993.
[https://doi.org/10.1016/0169-7722\(93\)90023-L](https://doi.org/10.1016/0169-7722(93)90023-L)

MOHRLOK, U.; TEUTSCH, G. Double-continuum porous equivalent (DCPE) versus discrete modeling in karst terraces. **Karst waters & environmental impacts**, p. 319–326, 1997.

MOURZENKO, V.; THOVERT, J.-F.; ADLER, P. Permeability of a single fracture: Validity of the Reynolds equation, **J. Phys. II.** v.5, n. 3, p. 465–482, 1995.
<https://doi.org/10.1051/jp2:1995133>

MOUTSOPOULOS, K. N.; TSIHRINTZIS, V. A. Analytical Solutions and Simulation Approaches for Double Permeability Aquifers. **Water Resources Management.** v. 23, p. 395–415, 2009. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9280-6>

NRC. **Rock Fractures and Fluid Flow: Contemporary Understanding and Applications. Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow.** National Research Council: 1996.

NEVILLE, C. J. **Solute transport in fractured porous media: dual porosity simulations with MT3D.** S.S. Papadopoulos & Associates, Inc. 2006. Relatório.

NICHOLL, M. J.; RAJARAM, H.; GLASS, R. J.; DETWILER, R. Saturated flow in a single fracture: Evaluation of the Reynolds equation in measured aperture fields, **Water Resources Research.** v. 35, n. 11, p. 3361–3373, 1999. <https://doi.org/10.1029/1999WR900241>

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. <https://doi.org/10.1029/2000WR900205>

ODEN, M.; NIEMI, A.; TSANG, C. F.; OHMAN, J. Regional channelized transport in fractured media with matrix diffusion and linear sorption. **Water Resources Research.** v. 44, n. 2, 2008. <https://doi.org/10.1029/2006WR005632>

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. <https://doi.org/10.1029/91WR01382>

OLIVA, A.; KIANG, C. H.; CAETANO-CHANG, M. R. Determinação da condutividade hidráulica da formação Rio Claro: Análise Comparativa através de análise granulométrica e ensaios com permeâmetro Guelph e testes de Slug. **Águas Subterrâneas.** v. 19, n. 2, p. 1-17, 2005.

ORON, A. P.; BERKOWITZ, B. Flow in rock fractures: the cubic law assumption reexamined. **Water Resources Research.** v. 34, n. 11, p. 2811-2825, 1998. <https://doi.org/10.1029/98WR02285>

OUTTERS, N.; SHUTTLE, D. **Sensitivity analysis of a discrete fracture network model for performance assessment of Aberg.** Golder Associates, Sweden. 68 p. 2000. Relatório.

PAIGE, C; SAUNDERS, M. **LSQR: An Algorithm for Sparse Linear Equations and Sparse Least Squares.** ACM Transactions on Mathematical Software, v. 8, n. 1, p. 43-71. 1982. <https://doi.org/10.1145/355984.355989>

PAITAN, C. A. T. **Modelagem numérica de fluxo em meio fraturados e meios porosos fraturados.** 2013. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2013

PAIVA, H.P. **Simulação da Recuperação de Petróleo em Reservatórios Naturalmente Fraturados.** 2012. Dissertação. Universidade Estadual de Campinas. 2012.

PANAGOPOULOS, G. Application of MODFLOW for simulating groundwater flow in the Trifilia karst aquifer. **Greece. Environmental Earth Sciences.** v. 67, n. 7, p. 1877–1889. 2012. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1630-2>

PESSOA, M.D.; MENTE, A.; LEAL, O. Províncias Hidrogeológicas do Brasil. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. **Anais.** Recife, 1980. p. 461-474.

PITOMBEIRA, E.S. **Groundwater Flow Model for Fractured Media.** 1994. Ph.D. Dissertation, University of New Hampshire, 1994.

PITOMBEIRA, E. S.; GASPAR, L. A. B.; SANTOS, J. S. Influência da Geometria das Fraturas na Conectividade dos Aquíferos Fissurais. In: I CONGRESSO INTERNACIONAL DO MEIO AMBIENTE SUBTERRÂNEO. **Anais.** 2009.

PRIEST, S. D.; HUDSON, J. A. Discontinuity spacing in rock. **Int. J. of Rock Mech. And Mining Sci.** v. 13, p. 135-148, 1976. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(76\)90818-4](https://doi.org/10.1016/0148-9062(76)90818-4)

REBOUÇAS, A. C. Desenvolvimento das águas subterrâneas no Brasil. IN: X CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. **Anais.** 1998.

REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil:** capital ecológico, uso e conservação. São Paulo: Escrituras Editora e Livraria da Vila, 2^a edição, 703 p., 2002.

RENARD, P.; ALLARD, D. Connectivity metrics for subsurface flow and transport. **Advances in Water Resources.** v. 51, p. 168–196, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.12.001>

REEVES, M.; FREEZE, G. A.; KELLEL, V. A.; PICKENS, J. F.; UPTON, D. T.; DAVIES, P. B. **Regional double porosity solute transport in the Culebra dolomite under brine-reservoir-breach release conditions: an analysis of parameter sensitivity and**

importance. SAND89-7069, Sandia National Laboratories, Albuquerque, N.M. 1991. Relatório.

SAALFELD, R. Q.; FILHO, J. C. V. H.; SCHIOZER, D. J. Simulation Of Naturally Fractured Reservoirs Using Single-Porosity Equivalent Models. In: XXXVII IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING. **Proceedings.** Brasília - DF, Brazil. 2016.

SAHIMI, M. **Flow and Transport in Porous Media and Fractured Rock:** from classical methods to modern approaches. 2 ed. Wiley-VCH. 2011.
<https://doi.org/10.1002/9783527636693>

SAMANIEGO, J. A.; PRIEST, S. D. The prediction of water flows through discontinuity networks into underground excavations. In: SYMPOSIUM ON THE DESIGN AND PERFORMANCE OF UNDERGROUND EXCAVATIONS, **Proceedings.** Cambridge, International Society for Rock Mechanics. 1984. p. 157-164.

SARKAR, S.; TOKSOZ, M. N.; BURNS, D. R. **Fluid Flow Modeling in Fractures.** Massachusetts Institute of Technology. Earth Resources Laboratory. 2004.

SEGAN, S.; KARASAKI, K. **TRINET: a flow and transport code for fracture networks—user's manual and tutorial - LBL-34834.** Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, California. 1993.

SHIKLOMANOV, I. A. Appraisal and Assessment of World Water Resources. **Water International.** v.25, n. 1, p. 11-32, 2000. <https://doi.org/10.1080/02508060008686794>

SHOEMAKER, W.B.; KUNIANSKY, E.L.; BIRK, S.; BAUER, S.; SWAIN, E.D.; **Documentation of a Conduit Flow Process (CFP) for MODFLOW-2005:** U.S. Geological Survey Techniques and Methods. Book 6, Chapter A24, 2008, 50 p.

SINGHAL, B. B. S.; GUPTA, R. P. **Applied Hydrogeology of Fractured Rocks – Second Edition.** New York: Springer, 2010. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-8799-7>

SNOW, D.T. **A Parallel Plate Model of Fractured Permeable Media.** 1965. PhD Dissertation, University of California. 1965. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(70\)90025-2](https://doi.org/10.1016/0148-9062(70)90025-2)

SNOW, D. T. The frequency and apertures of fractures in rock. **Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.** v. 7, n. 23, 1970.

SOBIESKI, W.; TRYKOZKO, A. Darcy's And Forchheimer's Laws In Practice. Part 1. The Experiment. **Technical Sciences.** v. 17, n. 4, p. 321–335, 2014.

STAUB, I.; FREDRIKSSON, A.; OUTTERS, N. **Strategy for a Rocks Mechanics Site Descriptive Model.** Golder Associates, Sweden. 219 p. 2002. Relatório.

STRELTSOVA, T. D. Hydrodynamics of groundwater flow in a fractured formation. **Water Resources Research.** v. 12, n. 3, p. 405-414, 1976.
<https://doi.org/10.1029/WR012i003p00405>

STRELTSOVA-ADAMS, T.D. Well hydraulics in heterogeneous aquifer formations. **Advances in Hydroscience** (Chow VT ed.). v. 11, p. 357–423, 1978.

STRUCKMEIR, W.F.; MARGAT, J. **Hydrogeological maps: a guide and a standard legend.** v. 17. IAH International Contributions to Hydrogeology. International Association of Hydrogeologists. 1995.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra.** São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 558 p.

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. <https://doi.org/10.1029/WR024i012p02049>

UBERTOSI, F.; DELAY, F.; BODIN, J.; POREL, G. A new method for generating a pipe network to handle channelled flow in fractured rocks. **C. R. Geoscience.** n. 339, p. 682–691, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.07.013>

WANG, L.; CARDENAS, M. B.; SLOTKE, D. T.; KETCHAM, R. A.; SHARP JR., J. M. Modification of the Local Cubic Law of fracture flow for weak inertia, tortuosity, and roughness, **Water Resources Research**, v. 51, p. 2064–2080, 2015. <https://doi.org/10.1002/2014WR015815>

WARBURTON, P. M. A Stereological Interpretation of Joint Trace Data. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.** v. 17, p. 181-190, 1980. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(80\)91084-0](https://doi.org/10.1016/0148-9062(80)91084-0)

WARREN, J.E.; ROOT, P.J. The Behavior of Naturally Fractured Reservoirs. **SPE Journal.** v. 3, n. 3, p. 245–255, 1963. <https://doi.org/10.2118/426-PA>

WILCOCK, P. The NAPSAC fracture network code. **Developments in Geotechnical Engineering.** v. 79, p. 529–538, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0165-1250\(96\)80042-3](https://doi.org/10.1016/S0165-1250(96)80042-3)

WITHERSPOON, P.A.; WANG, J. S. Y.; IWAI K.; GALE, J. E. Validity of cubic law for fluid flow in deformable rock fracture. **Water Resources Research.** v. 16, n. 6, p. 1016–1024, 1980. <https://doi.org/10.1029/WR016i006p01016>

WITHERSPOON, P. A.; LONG, J. C. S. The Relationship of the Degree of Interconnection to Permeability in Fracture Networks. **Journal of Geophysical Research.** v. 90, n. B4, p. 3087-3098, 1985. <https://doi.org/10.1029/JB090iB04p03087>

WU, S. Y.; PRUESS, K. A Multiple-Porosity Method for Simulation of Naturally Fractured Petroleum Reservoirs. **SPE Reservoir Engineering.** v. 3, n. 1, 1988. <https://doi.org/10.2118/15129-PA>

XU, C.; FIDELIBUS C.; DOWD, P. A. Realistic pipe models for flow modelling in Discrete Fracture Networks. In: INTERNATIONAL DISCRETE FRACTURE NETWORK ENGINEERING CONFERENCE. **Proceedings**. 2014.

ZAVOUDAKIS, E. **Impactos da urbanização sobre a qualidade da água freática em áreas de Vitória, ES.** 2007. 221 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

ZIMMERMAN, R. W.; KUMAR, S.; BODVARSSON, G. S. Lubrication theory analysis of the permeability of rough-walled fractures. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.** v. 28, n. 4, p. 325–333, 1991. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(91\)90597-F](https://doi.org/10.1016/0148-9062(91)90597-F)

ZIMMERMAN, R. W.; YEO, I. W. Fluid flow in rock fractures: From the Navier-Stokes equations to the cubic law. **Dynamics of Fluids in Fractured Rock.** v. 122, p. 213 – 224, 2000. <https://doi.org/10.1029/GM122p0213>