

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DO FLUXO DE ÁGUA E DA DRENAGEM DE
MACIÇOS ROCHOSOS FRATURADOS**

PEDRO BAENA DE MESQUITA

ORIENTADOR: LEANDRO LIMA RASMUSSEN, DSc

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-376/22

BRASÍLIA / DF: JULHO/2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DO FLUXO DE ÁGUA E DA DRENAGEM DE
MACIÇOS ROCHOSOS FRATURADOS**

PEDRO BAENA DE MESQUITA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

LEANDRO LIMA RASMUSSEN, DSc (UnB)
(ORIENTADOR)

RAFAEL CERQUEIRA SILVA, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

ALOMIR HÉLIO FÁVERO NETO, PhD (Universidade de Bucknell)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 22 DE JULHO DE 2022.

FICHA CATALOGRÁFICA

MESQUITA, PEDRO BAENA DE

Análise Estatística do Fluxo de Água e da Drenagem de Maciços Rochosos Fraturados. [Distrito Federal] 2022.

xix, 151 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2022).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Palavras chaves:

- | | |
|-----------------------------|-------------------------------|
| 1. Maciço rochoso fraturado | 2. Rede de fraturas discretas |
| 3. Fluxo de água | 4. Drenagem |
| I. ENC/FT/UnB | II. Mestre |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MESQUITA, P.B. (2022). Análise Estatística do Fluxo de Água e da Drenagem de Maciços Rochosos Fraturados. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-376/2022, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 151 p.

CESSÃO DE CRÉDITOS

NOME DO AUTOR: Pedro Baena de Mesquita

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Análise Estatística do Fluxo de Água e da Drenagem de Maciços Rochosos Fraturados.

GRAU/ANO: Mestre/2022

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Pedro Baena de Mesquita

Universidade de Brasília, Secretaria da Coordenação de Pós-Graduação em Geotecnia Campus Darcy Ribeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Prédio SG-12, Universidade de Brasília. CEP 70910-900 - Brasília, DF – Brasil

Pedro.bm95@hotmail.com

DEDICATÓRIA

A minha família, especialmente a minha avó (in memoriam), por todo o apoio que me deram.

AGRADECIMENTOS

A Deus, Nosso Senhor, e a intercessão de Nossa Senhora pela saúde, pela capacidade de ter realizado este trabalho, por todas as pessoas que conheci ao longo desses anos na UnB e por tudo que me deram durante esses anos de vida.

À minha família pelo amor dado, pela paciência, por sempre terem me apoiado, por todas as oportunidades que me deram e por nunca terem me deixado faltar nada.

Ao professor Leandro pela contribuição, pela orientação e tempo dedicado ao longo deste trabalho. Aos professores Rafael e Alomir pelas contribuições para a melhora deste trabalho.

Ao professor Márcio por ter colocado o INFRALAB à disposição sempre que precisei e ao Marcone e à Letícia pela ajuda prestada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro que possibilitou a condução deste trabalho.

Aos amigos que eu fiz durante o mestrado, que tornaram esse mestrado muito mais agradável, por toda a ajuda que me deram, todos os bons momentos vividos e desafios superados, apesar da distância causada pela pandemia. Eu agradeço muito à Alexia, à Alessandra, à Clara, ao Dan, ao Daniel, à Débora, ao Erick, ao Gabriel, à Johanna, à Lara, ao Joaquim, ao Matheus Praciano, ao Paulo, à Raísla, ao Vinicius e especialmente à Bárbara, ao Emerson, ao Fernando e à Thamara.

Aos amigos da graduação, embora o contato tenha sido difícil por causa da pandemia, ainda tivemos bons momentos e também pelo apoio dado. Agradeço à Ana Paula, à Bruna, à Camilla, à Dani, à Déborah, à Luísa, ao Kaio, ao Lima, ao MMs, ao Matheus Almeida, à Natália, ao Rafael, ao Flávio, à Samara, ao Spencer, ao Victor e ao Will.

Aos amigos de longa data e do futebol, também pelo apoio e pelos bons momentos de descontração. Agradeço ao Campelo, à Dani, ao Elias, ao Gabriel, ao Gustavo, ao Henrique, ao Ian, ao João Pedro, ao Lúcio, ao Marco, ao Marcos, ao Morais, ao Rafael, ao Rodrigo, ao Victão e ao Vitor Sá.

ANÁLISE ESTATÍSTICA DO FLUXO DE ÁGUA E DA DRENAGEM DE MACIÇOS ROCHOSOS FRATURADOS

RESUMO

Drenos horizontais profundos são comumente utilizados para a redução das poropressões e evitar a instabilidade de blocos em maciços rochosos fraturados. Em função das dificuldades na coleta de dados, as redes de fraturas discretas (DFN) são uma ferramenta útil para o estudo do fluxo, pois permitem a representação estocástica das descontinuidades e a geração de múltiplos modelos. O objetivo do trabalho foi calcular o fluxo de água por redes de fraturas discretas e assim fornecer orientações para sistemas de drenagens mais eficientes. Para isso, foi elaborado um código computacional baseado no equilíbrio de fluxo nos nós para malhas em condições saturadas, geradas com o programa UnBlocksGen. Foram testados diferentes valores de média e desvio padrão da abertura hidráulica para o maciço rochoso de Monte Seco. Em seguida, o fluxo de água foi simulado com três hipóteses de abertura hidráulica: constante, variável e correlacionada com o comprimento. Depois disso, foi simulado o fluxo pelos maciços rochosos de Yangfanggou, El Teniente e Monte Seco com utilização do método de Reeves *et al.* (2013) para abertura hidráulica constante e variável para determinar o melhor comprimento e orientação de drenos. Para o maciço de Monte Seco, testou-se a eficiência da drenagem para comprimentos, orientações e quantidades de drenos distintos. Os resultados mostraram que o fluxo de água aumentou significativamente com a média da abertura e sofreu redução com maiores desvios padrões de abertura. O maior fluxo foi obtido para abertura hidráulica correlacionada com o comprimento, seguido pela abertura hidráulica constante e, por último, pela abertura hidráulica variável. O uso da abertura hidráulica no lugar da transmissividade com o método de Reeves *et al.* (2013) apresentou resultados dependentes das condições da fronteira. Isso dificultou a determinação do comprimento dos drenos. O estudo de eficiência de drenagem apresentou resultados melhores para drenos ortogonais à face do maciço e para maiores comprimentos de drenos. Além disso, drenos mais longos em menor quantidade foram mais eficientes do que drenos menores em maior quantidade. Os resultados obtidos podem contribuir para o melhor dimensionamento de sistemas de drenagem.

STATISTICAL ANALYSIS OF WATER FLOW AND DRAINAGE IN FRACTURED ROCK MASSES

ABSTRACT

Horizontal drains are frequently used as a mean to reduce porepressure and improve block stability in fractured rock masses. Given the difficulties in data collection, discrete fracture networks (DFNs) are a useful tool for water flow studies, as they enable the stochastic representation of discontinuities and the generation of many models. The objective of this work was to calculate water flow in DFNs and to provide guidance for the design of more efficient drainage systems. A computational code was developed for this purpose, based on equilibrium at the nodes, through saturated meshes created with the UnBlocksGen program. Different values for mean and standard deviations of hydraulic aperture were tested for the Monte Seco rock mass, and water flow was simulated with three different hydraulic aperture hypotheses: constant, variable and correlated with the discontinuities' length. Water flow was then calculated for the Yangfanggou, El Teniente and Monte Seco rock masses using the method of Reeves *et al.* (2013) with constant and variable hydraulic apertures, to determine drain length and orientation. The efficiency of drainage was tested for the Monte Seco rock mass on the basis of drain length, orientation, and quantity. The results showed that water flow increased significantly with mean hydraulic aperture, but decreased for higher values of the standard deviation of hydraulic aperture. Water flow through the meshes was greater for hydraulic aperture correlated with discontinuity length, followed by constant hydraulic aperture and, lastly, variable hydraulic aperture. When hydraulic aperture was used instead of transmissivity with the method of Reeves *et al.* (2013) results were strongly influenced by boundary conditions, making the determination of drain length more difficult. Drainage efficiency was greater for drains orthogonal to the rock face and for longer drains. Furthermore, fewer but longer drains were more efficient than a larger number of shorter drains. The results obtained may help to better design water drainage systems.

SUMÁRIO

CAPÍTULO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	CARACTERIZAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO FRATURADO.....	4
2.1.1	DEFINIÇÃO	4
2.1.2	PROBLEMAS ASSOCIADOS AO FLUXO DE ÁGUA PELO MACIÇO ROCHOSO FRATURADO.....	8
2.1.3	PROPRIEDADES DAS DESCONTINUIDADES DO MACIÇO ROCHOSO FRATURADO.....	12
2.2	REPRESENTAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO FRATURADO	19
2.2.1	MODELAGEM DO MACIÇO ROCHOSO FRATURADO	19
2.2.2	REDE DE FRATURAS DISCRETAS (DFN).....	21
2.2.3	MODELOS DE DESCONTINUIDADES.....	25
2.3	FLUXO DE ÁGUA EM MACIÇO ROCHOSO FRATURADO.....	29
2.3.1	MEIO DESCONTÍNUO	29
2.3.2	MEIO CONTÍNUO.....	34
2.3.3	INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DA REDE DE FRATURAS DISCRETAS NO FLUXO DE ÁGUA.....	39
2.3.4	USO DE PROGRAMAÇÃO ORIENTADA A OBJETOS PARA O FLUXO DE ÁGUA EM MACIÇOS ROCHOSOS FRATURADOS.....	42
2.4	DRENAGEM DE ÁGUA EM MACIÇO ROCHOSO FRATURADO	45
2.4.1	SISTEMAS DE DRENAGENS E RECOMENDAÇÕES.....	45
2.4.2	MÉTODO COM MEIO CONTÍNUO	47
2.4.3	MÉTODO COM MEIO DESCONTÍNUO.....	50
3	METODOLOGIA	55
3.1	VALIDAÇÃO DO CÓDIGO	56
3.2	ANÁLISE PARAMÉTRICA.....	58
3.3	ESTUDO DOS MACIÇOS ROCHOSOS	62
3.4	DRENAGEM.....	65

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1	CÓDIGO COMPUTACIONAL	67
4.1.1	ESTRUTURA DO CÓDIGO	67
4.1.2	VALIDAÇÃO	69
4.2	ANÁLISE PARAMÉTRICA	72
4.3	ESTUDO DOS MACIÇOS ROCHOSOS	82
4.3.1	YANGFANGGOU	82
4.3.2	EL TENIENTE	89
4.3.3	MONTE SECO	94
4.4	DRENAGEM	100
5	CONCLUSÕES	108
5.1	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	111
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
	A – CLASSES E FUNÇÕES	118
A.1	CLASSE NÓS	118
A.2	CLASSE DESCONTINUIDADES	119
A.3	CLASSE DRENO	121
A.4	CLASSE DADOS	122
A.5	CLASSE CENÁRIO	125
A.6	CLASSE DOS CENÁRIOS	136
A.7	FUNÇÃO LEITURA DE ARQUIVOS VTK	143
A.8	CLASSE LINHA DE VARREDURA	145
	B – EXEMPLOS DE ROTINAS	149
B.1	EXEMPLO DE ROTINA PARA O MÉTODO DE REEVES <i>ET AL.</i> (2013)	149
B.2	EXEMPLO DE ROTINA PARA O ESTUDO DA DRENAGEM	150

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Duas famílias de juntas sistemáticas (Fossen, 2017).	6
Figura 2.2 – Orientação dos tipos de fratura com as tensões principais (Fossen, 2017).....	7
Figura 2.3 – Tipos de fraturas (Fossen, 2017).....	7
Figura 2.4 – Tipos de ruptura: a) plana, b) em cunha, e c) tombamento, adaptado de Wyllie & Mah (2004).....	9
Figura 2.5 – Pressão da água nas discontinuidades: a) em um bloco, adaptado de Wyllie & Mah (2004) e em um conjunto de blocos: b) com junta permeável e c) com junta impermeável, adaptadas de Patton & Deere (1971).....	10
Figura 2.6 – Ruptura da barragem, vista de jusante (Kanji, 2004)	11
Figura 2.7 – Propriedades do maciço rochoso fraturado, adaptado de Wyllie & Mah (2004). 15	
Figura 2.8 – Variação da direção de uma família de discontinuidades com valor médio para o rumo de 45° para uma constante de Fisher: a) k igual a 5 e b) k igual a 50.....	16
Figura 2.9 – Abertura das discontinuidades, adaptado de Philipps <i>et al.</i> (2020).	17
Figura 2.10 – Melhor alternativa para representar o maciço rochoso fraturado: a) meio contínuo, b) meio contínuo com elementos de junta ou meio descontínuo, c) meio descontínuo e d) meio contínuo com propriedades equivalentes, adaptado de Jing (2003).....	21
Figura 2.11 – Exemplo de DFN em duas e em três dimensões (Alghalandis, 2017).....	22
Figura 2.12 – Exemplo de rede de fratura discreta para o túnel de Monte Seco (Rasmussen, 2020).....	23
Figura 2.13 – Representação das discontinuidades do maciço e formação de blocos (Fu <i>et al.</i> , 2016).....	24
Figura 2.14 – Carga hidráulica em uma rede tridimensional (Alghalandis, 2017).....	25
Figura 2.15 – Modelo de juntas ortogonais (Dershowitz & Einstein, 1988).	25
Figura 2.16 – Modelo de discontinuidades deslocadas do RS2 (Rocscience, 2022).....	26
Figura 2.17 – Modelo de Baecher (Dershowitz & Einstein, 1988).....	27
Figura 2.18 – Exemplo de modelo de Veneziano em duas dimensões no RS2.	28
Figura 2.19 – Descontinuidades agrupadas em um modelo fractal (Zhu <i>et al.</i> , 2021).	28

Figura 2.20 – Perfil de velocidade do fluxo por placas paralelas a baixas velocidades, adaptado de Snow (1965).	30
Figura 2.21 – Maciço rochoso fraturado com descontinuidades paralelas, adaptado de Priest (1993).	31
Figura 2.22 – Elemento típico de uma rede formada por 5 nós interconectados, adaptado de Priest (1993).	32
Figura 2.23 – Volume elementar representativo, adaptado de Read & Beale (2013).	34
Figura 2.24 – Princípio de superposição, adaptado de Zhang <i>et al.</i> (1996).	36
Figura 2.25 – Permeabilidade direcional estimada por Min <i>et al.</i> (2004).	37
Figura 2.26 – Transformação da rede em células com as respectivas condutividades hidráulicas (Chen, 2020).	38
Figura 2.27 – Permeabilidade intrínseca direcional, adaptado de Min <i>et al.</i> (2004)	40
Figura 2.28 – Fluxo de água para dentro do túnel: a) frequência e b) relação entre o fluxo de água e o desvio padrão da abertura hidráulica, adaptado de Javadi <i>et al.</i> (2016).	41
Figura 2.29 – Estrutura de uma classe (Aguilar, 2008).	43
Figura 2.30 – Herança de classes (Aguilar, 2008).	44
Figura 2.31 – Sistemas de drenagem para um talude, adaptado de Wyllie & Mah (2004).	46
Figura 2.32 – Redução da poropressão em meio contínuo com drenos radiais (Pohll <i>et al.</i> , 2013).	48
Figura 2.33 – Rede de descontinuidades em 2D e as descontinuidades com elevado fluxo de água (Reeves <i>et al.</i> , 2013).	50
Figura 2.34 – Intersecção da linha de varredura com toda as descontinuidades e obtenção das distâncias médias de intersecção.	52
Figura 2.35 – Influência da orientação nas distâncias médias totais de intersecção com os três tipos de descontinuidades.	53
Figura 2.36 – Valores de poropressão na malha: a) sem drenos e b) com drenos, adaptado de Reeves <i>et al.</i> (2014).	54
Figura 3.1 – Malha 1 para validação do código	57

Figura 3.2 – Malhas para validação do código: a) condições de contorno inseridas, b) malha isotrópica e c) malha anisotrópica.	57
Figura 3.3 – Malha 3 para validação do código com dreno.	58
Figura 3.4 – Esquema do processo de criação de malha e obtenção de resultados.....	60
Figura 3.5 – Rede de descontinuidades para o maciço de Monte Seco com as condições de fronteira e o fluxo de saída para a análise paramétrica.	61
Figura 4.1 – Conjunto das classes e relações de pertencimento no código.....	69
Figura 4.2 – Exemplo da relação entre a classe cenários e a classe cenário	69
Figura 4.3 – Resultado das vazões para a primeira validação do código.....	70
Figura 4.4 – Queda de carga hidráulica na malha ortogonal: a) isotrópica, b) anisotrópica. ...	71
Figura 4.5 – Fluxo de água na malha ortogonal: a) isotrópica, b) anisotrópica.	71
Figura 4.6 – Comparação drenagem: a) com o código e b) com meio contínuo equivalente usando o SEEP/W.	72
Figura 4.7 – Carga hidráulica na malha 3 de Monte Seco para: a) abertura constante de 0,5 mm, b) abertura constante de 1 mm, c) abertura com 0,5 mm de média e de desvio padrão e d) abertura com 1 mm de média e de desvio padrão	73
Figura 4.8 – Relação entre a vazão média pela rede de descontinuidades e a abertura hidráulica para três desvios padrões.....	74
Figura 4.9 – Relação entre o desvio padrão da vazão pela rede de descontinuidades e o aumento do desvio padrão da abertura hidráulica das descontinuidades.....	75
Figura 4.10 – Frequência do fluxo de água médio pela malha para o maciço de Monte Seco com a abertura hidráulica constante e variável.	76
Figura 4.11 – Frequência do fluxo de água médio pela malha para o maciço de Monte Seco com a abertura hidráulica correlacionada à persistência.....	78
Figura 4.12 – Fluxo de água pelas descontinuidades da malha 1 do maciço rochoso Yangfangou com abertura constante: a) carga hidráulica nas descontinuidades, b) descontinuidades com fluxo.	83

Figura 4.13 – Comparação das descontinuidades dominantes: a) malha 1 com abertura hidráulica constante, b) malha 196, com abertura hidráulica constante e c) malha 196 com abertura hidráulica variável.....	84
Figura 4.14 – Distâncias médias totais de interseção de Yangfanggou para: a) abertura constante, b) abertura variável e c) em maior detalhe para as descontinuidades com fluxo e todas as descontinuidades.....	85
Figura 4.15 – Distâncias média total e percentil 95 para o maciço rochoso fraturado de Yangfanggou para abertura variável.	86
Figura 4.16 – Fluxo de água pelas descontinuidades da mina de El Teniente com abertura constante: a) carga hidráulica nos nós e b) descontinuidades com fluxo de água.	89
Figura 4.17 – Comparação das descontinuidades dominantes da malha 1: a) com abertura hidráulica constante e b) com abertura hidráulica variável.....	90
Figura 4.18 – Distâncias médias totais de interseção de El Teniente para: a) abertura constante, b) abertura variável e c) em maior detalhe para as descontinuidades com fluxo e todas as descontinuidades.	91
Figura 4.19 – Distâncias média total e percentil 95 de El Teniente para: a) abertura constante e b) abertura variável.....	92
Figura 4.20 – Fluxo de água pelas descontinuidades do maciço rochoso Monte Seco com abertura constante na malha 1: a) carga hidráulica nas descontinuidades, b) descontinuidades com fluxo.....	94
Figura 4.21 – Comparação das descontinuidades dominantes: a) malha 1 com abertura hidráulica constante, b) malha 21, com abertura hidráulica constante e c) malha 21 com abertura hidráulica variável.....	95
Figura 4.22 – Distâncias médias totais de interseção de Monte Seco para: a) abertura constante, b) abertura variável e c) em maior detalhe para as descontinuidades com fluxo e todas as descontinuidades.	96
Figura 4.23 – Distância média total e percentil 95 de Monte Seco para: a) abertura constante e b) abertura variável.....	97
Figura 4.24 – Redução da carga hidráulica nos nós da malha 1 para diferentes orientações de dreno.....	100

Figura 4.25 – Eficiência da drenagem em função da orientação do dreno	101
Figura 4.26 – Vazão no dreno em função da orientação	101
Figura 4.27 – Eficiência da drenagem em função do comprimento do dreno	102
Figura 4.28 – Vazão no dreno em função do comprimento	102
Figura 4.29 – Redução da carga hidráulica nos nós da malha 1 para diferentes quantidades de dreno de 12 metros: a) dois drenos, b) três drenos e c) quatro drenos	103
Figura 4.30 – Eficiência do sistema de drenagem em função comprimento e do número de drenos	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Sistema de Dershowitz & Herda (1992) de intensidade de fraturamento.	18
Tabela 3.1 – Parâmetros das descontinuidades de Monte Seco (Rasmussen <i>et al.</i> , 2019).	59
Tabela 3.2 – Parâmetros das descontinuidades de El Teniente (Hekmatnejad <i>et al.</i> , 2021)....	63
Tabela 3.3 – Parâmetros das descontinuidades de Yangfanggou (Cui <i>et al.</i> 2020).	64
Tabela 3.4 – Resumo dos sistemas de drenagens simulados.....	66
Tabela 4.1 – Resultados das vazões médias pela malha para variações da medida média e do desvio padrão da abertura hidráulica.....	74
Tabela 4.2 – Resultados do desvio padrão da vazão pela malha para variações da média e do desvio padrão da abertura hidráulica.....	75
Tabela 4.3 – Testes de aderência para o fluxo de saída.	77

LISTA DE NOMENCLATURA, SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

$2D$	Duas dimensões
$3D$	Três dimensões
A	Área de afloramento
A_m	Abertura máxima
a	Expoente da lei de potência para o comprimento
b	Largura da descontinuidade
C	Condutância
C_2	Constante do tipo litológico
$CD_{i,j,k}$	Condutância de uma célula (i,j,k) para outra
C_{ij}	Condutância do nó i para o nó j
D	Diâmetro da descontinuidade
D_f	Dimensão fractal
DFN	Rede de fraturas discretas
DHP	Dreno horizontal profundo
$d_{i,j,k}$	Elevação do dreno na célula (i,j,k)
D_m	Diâmetro médio das descontinuidades
$d_{média}$	Distância média de interseção com as descontinuidades
$d_{média\ total}$	Distância média total de interseção com as descontinuidades para o conjunto de redes
e_h	Abertura hidráulica
$E(n,D,e_h)$	Função que engloba as densidades de probabilidade de cada uma das variáveis: orientação, diâmetro e abertura
f	Frequência de descontinuidades
\vec{f}_c	Vetor força de corpo
F_D	Fluxo de água por uma descontinuidade dominante
FS	Fator de segurança

$f(\theta)$	Função densidade de probabilidade da orientação da descontinuidade
g	Aceleração da gravidade
$g(D)$	função densidade de probabilidade do diâmetro das descontinuidades
G_F	Fluxo de água global pela malha
h	Carga hidráulica
$h_A(l_t)$	função densidade de probabilidade do comprimento do traço das descontinuidades para um afloramento de área A
h_i	Carga hidráulica no nó i
H	Altura do bloco de maciço rochoso fraturado
Δh	Diferença de carga hidráulica
I	Matriz identidade
k	Permeabilidade intrínseca do meio
K	Condutividade hidráulica
k^d	Tensor de permeabilidade intrínseca equivalente
k_f	Constante de Fisher
K_f	Condutividade hidráulica da fratura
k_i	Permeabilidade intrínseca da célula
k_m	Permeabilidade intrínseca da matriz rochosa
\bar{k}'	Permeabilidade intrínseca média do modelo
L	Tamanho do sistema
l	Comprimento da descontinuidade
l_t	Comprimento do traço das descontinuidades
L_v	Comprimento da linha de varredura
n	Vetor normal ao plano
N	Número de descontinuidades que se conectam ao nó j

N_B	Número de descontinuidades pertencentes às descontinuidades com fluxo de água nas fronteiras do modelo
n_{int}	Número de interseções da linha de varredura com as descontinuidades
$n(l,L)$	Função número de descontinuidades
N_m	Número total de células no modelo
P	Pressão do fluido
P_{10}	Número de descontinuidades por linha de medida
P_{20}	Número de descontinuidades por área de medida
P_{30}	Número de descontinuidades por volume de medida
P_{21}	Comprimento total de descontinuidades por área de medida
P_{32}	Área total das descontinuidades por unidade de volume de medida
P_{33}	Volume total das descontinuidades por unidade de volume de medida
P_{ij}	Tensor de descontinuidade
PVC	Policloreto de vinila
Q	Fluxo pela descontinuidade
q	Vazão específica
$QD_{i,j,k}$	Vazão do dreno na célula (i,j,k)
Q_{dreno}	Vazão no dreno
Q_{ij}	Vazão do nó i para o nó j
$Q_{saída}$	Fluxo na saída da malha
Q_t	Fluxo total pelo maciço rochoso fraturado
q_{ux}	Vazão específica pela descontinuidade na direção do eixo x
q_{uy}	Vazão específica pela descontinuidade na direção do eixo y
q_{xx}	Componente x da vazão específica para gradiente no eixo x
q_{xy}	Componente x da vazão específica para gradiente no eixo y
q_{yx}	Componente y da vazão específica para gradiente no eixo x

q_{yy}	Componente y da vazão específica para gradiente no eixo y
T	Transmissividade da descontinuidade
U	Pressão de água na descontinuidade
V	Pressão de água na trinca
\vec{v}	Vetor de velocidade
W	Peso do bloco
α	Ângulo do rumo do mergulho
α_d	Coefficiente de densidade
α_v	Ângulo da linha de varredura com o eixo x
β_{ux}	Ângulo entre a descontinuidade na direção x e o eixo x
β_{uy}	Ângulo entre a descontinuidade na direção y e o eixo y
δ	Direção da descontinuidade
θ	Desvio angular da orientação média
λ	Constante entre 0 e 1/12
μ	Viscosidade dinâmica
ν	Viscosidade cinemática
ρ	Densidade de descontinuidade
ρ_f	Densidade do fluido
σ_1	Tensão principal maior
σ_2	Tensão principal intermediária
σ_3	Tensão principal menor
Φ	Ângulo de atrito da descontinuidade
ψ	Ângulo de mergulho
Ω	Ângulo de variação do vetor normal ao plano

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, são apresentadas as considerações iniciais que incluem as justificativas e a motivação para o trabalho. Na sequência são listados os objetivos e, por fim, é descrita a estrutura e a divisão em capítulos desta dissertação.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em função da sua história geológica, os maciços rochosos são submetidos a diversos estados de tensão que levam a ruptura e à formação de descontinuidades (Fossen, 2017). Essas desempenham um papel importante no comportamento hidromecânico do maciço rochoso (Mito *et al.* 2018). As descontinuidades podem inclusive determinar a forma que maciços rochosos se tornam instáveis (Wyllie & Mah, 2004). Isso pode levar à interrupção do funcionamento de importantes obras de engenharia (Kanji, 2004), além de outras consequências econômicas (Wyllie & Mah, 2004).

A água é um notório agente desestabilizador de encostas de solo e de rocha (Guidicini & Nieble, 1983). Por esse motivo, um dos métodos mais utilizados para estabilizar taludes rochosos é o uso de drenos horizontais profundos (DHP) para retirada de água (Read & Beale, 2013). No entanto, não há um método amplamente utilizado para o dimensionamento e disposição de drenos (Pohll *et al.*, 2013). Em função disso, o controle é frequentemente feito empiricamente no campo por meio de piezômetros (Read & Beale, 2013).

O fluxo de água pelo maciço rochoso pode ser calculado pela abordagem de meio contínuo e de meio descontínuo (Jing, 2003). A rede de fraturas discretas - *Discrete Fracture Network* (DFN), em inglês - é um método descontínuo bastante utilizado para representar maciços rochosos em problemas de fluxo de água (Min *et al.*, 2004). A vantagem desse método é capturar a variabilidade das propriedades geométricas das descontinuidades (Herbert, 1996), assim como a interação entre descontinuidades e a conectividade (Read & Beale, 2013). Nos últimos anos, diversos trabalhos utilizaram a abordagem de meio contínuo para drenagem de maciços como Pohll *et al.* (2013), Widodo *et al.*, (2018), Shaghghi *et al.* (2020), entre outros. No entanto, houve poucas aplicações de redes de fraturas discretas a problemas de fluxo de água com drenagem dos maciços rochosos fraturados (Reeves *et al.*, 2013; Reeves *et al.*, 2014).

A motivação para essa pesquisa é entender melhor a drenagem de maciços rochosos fraturados com redes de descontinuidades. Assim, espera-se fornecer melhores orientações e condições de drenagem para reduzir a ocorrência de acidentes em obras de engenharia.

1.2 OBJETIVOS

Os principais objetivos da pesquisa foram utilizar a rede de fraturas discretas para representar maciços rochosos fraturados em duas dimensões, calcular o fluxo de água pelas descontinuidades do maciço rochoso saturado com diferença de carga hidráulica em uma direção e propor orientações para dimensionar um sistema de drenagem de modo mais eficiente.

Os objetivos específicos são apresentados a seguir.

- Elaborar um código computacional para gerar DFN e calcular o fluxo de água.
- Identificar como a abertura hidráulica média e o desvio padrão impactam o fluxo de água pelo maciço rochoso fraturado na condição saturada e determinar qual desses parâmetros é o mais significativo.
- Testar o impacto das hipóteses de abertura hidráulica constante, variável ou relacionada com o comprimento no fluxo de água por uma malha para a rede de descontinuidade de um caso específico: o maciço rochoso de Monte Seco, no Espírito Santo;
- Determinar o comprimento e a melhor orientação dos drenos para um sistema de drenos em paralelo para três maciços rochosos reais: Yangfanggou (China), El Teniente (Chile) e de Monte Seco, com propriedades geométricas das famílias de descontinuidades distintas, com base no método proposto por Reeves *et al.* (2013) para dimensionar sistemas de drenos.
- Verificar com os resultados obtidos a eficiência do sistema de drenagem para drenos paralelos com diferentes orientações, comprimentos e quantidades. Dessa forma, confirmar ou não os resultados obtidos pelo método de Reeves *et al.* (2013), assim como fornecer diretrizes para o dimensionamento de drenos.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em cinco capítulos. O Capítulo 1, introdução do trabalho, trata da motivação para o desenvolvimento da pesquisa e dos principais objetivos do trabalho.

No Capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica para contextualização do tema. Essa revisão abrange (1) caracterização, (2) representação, (3) fluxo de água e (4) drenagem do maciço rochoso fraturado. A primeira aborda os tipos de descontinuidades, suas consequências para obras de engenharia e suas principais propriedades. A segunda trata dos modelos para representação do maciço rochoso fraturado, nos quais estão inseridas as redes de descontinuidades discretas, assim como os modelos para as próprias descontinuidades. A terceira aborda o fluxo de água em meio descontínuo e em meio contínuo, os impactos das propriedades geométricas das descontinuidades no fluxo de água e o uso da programação nesse contexto. A quarta traz os principais meios de drenagem em maciços rochosos, algumas das orientações existentes, assim como alguns trabalhos que utilizaram abordagens de meio contínuo ou descontínuo para estudar a drenagem.

No Capítulo 3, apresenta-se a metodologia utilizada neste trabalho. Esta é constituída pelo desenvolvimento e validação do código, geração das malhas para os estudos de fluxo de água, e a análise paramétrica, onde é discutido o impacto da média e do desvio padrão da abertura hidráulica no fluxo de água e das hipóteses comumente utilizadas. Além disso, mostra-se o procedimento para aplicação do método de Reeves *et al.* (2013) para três maciços rochosos com geometrias distintas com abertura hidráulica constante e variável. Por fim, explicam-se as condições em que são executados os estudos de drenagem acerca da orientação, comprimento e quantidade de drenos.

No Capítulo 4, são expostos e discutidos os resultados obtidos para a avaliação do código computacional. Na sequência, são exibidos e discutidos os resultados da análise paramétrica da abertura hidráulica no fluxo de água. Em seguida, são apresentados os resultados do método de Reeves *et al.* (2013) para os maciços de Yangfanggou, de El Teniente e de Monte Seco para o comprimento dos drenos para fluxos de água com abertura constante e variável. Finalmente, são descritas e discutidas as eficiências dos sistemas de drenagem para o maciço de Monte Seco, para diferentes valores de orientação, comprimento e quantidade.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões decorrentes dos resultados das análises feitas no capítulo 4. Além disso, são feitas sugestões para pesquisas futuras para estender os estudos paramétricos à geometria das descontinuidades, e para outros estudos que podem ser feitos para analisar a eficiência de sistemas de drenagem.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados os principais conceitos e métodos utilizados para a análise do fluxo de água de água em maciços rochosos fraturados. Inicialmente são descritas as características do maciço rochoso, os tipos de descontinuidades, os problemas decorrentes do fluxo de água pelo maciço rochoso fraturado, assim como as suas propriedades e as dificuldades na coleta de dados. Na sequência, são apresentados os tipos de modelos para representação do meio, inclusive a rede fraturas discretas, e os diferentes tipos de modelos para as descontinuidades. Em seguida, são apresentadas as abordagens de meio descontínuo e de meio contínuo para o cálculo do fluxo de água, assim como o efeito de alguns parâmetros na vazão de água e o uso da programação orientada a objetos. Por fim, são descritos os tipos de drenagens utilizados e os métodos empregados para o dimensionamento para drenos horizontais profundos.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO FRATURADO

Nesta seção, é abordada a origem das descontinuidades no maciço rochoso e os tipos de descontinuidade. Discute-se como a pressão de água afeta a estabilidade de maciços rochosos fraturados, mencionando alguns casos históricos. Finalmente, são descritas as propriedades para a caracterização das descontinuidades e é discutida a dificuldade na coleta de dados.

2.1.1 DEFINIÇÃO

No decorrer de sua história geológica, o maciço rochoso é submetido a diversos estados de tensão e condições de temperatura, os quais levam à ruptura do meio e à formação de descontinuidades (Fossen, 2017). Por causa disso, o maciço encontra-se frequentemente atravessado por descontinuidades com padrões e origens diversos (Guidicini & Nieble, 1983). Desse modo, o maciço rochoso fraturado corresponde ao conjunto da matriz rochosa, isto é a rocha intacta, e das descontinuidades (Mioto *et al.*, 2018). Ojima & Serra Junior (2018) utilizaram uma definição mais focada na articulação e justaposição de blocos de rocha, especialmente voltada para uma das práticas da engenharia. Entretanto, essa definição pode ser

limitadora, pois um maciço rochoso pode possuir descontinuidades, e até conjuntos de descontinuidades, e não formar blocos (Mioto *et al.*, 2018).

Duas características importantes do maciço rochoso são a heterogeneidade e a anisotropia. A heterogeneidade ocorre na microescala cristalina, nas fissuras e no contato entre os grãos (Mioto *et al.*, 2018). Conforme Ojima & Serra Junior (2018), a heterogeneidade e a anisotropia são características fundamentais dos maciços rochosos, que são também frequentemente descontínuos. No entanto, para escalas de estudo comuns essas pequenas heterogeneidades não são significativas, de modo que o maciço pode ser considerado homogêneo para efeitos práticos em função da escala de estudo (Mioto *et al.*, 2018). Alguns tipos de rocha possuem feições geológicas maiores como acamamentos, laminação, foliação, entre outros que alteram as propriedades da rocha ou do maciço em determinadas direções (Fossen, 2017). Esse comportamento diferenciado em função da orientação caracteriza a anisotropia de alguns maciços (Mioto *et al.*, 2018).

As descontinuidades são estruturas de maior porte com capacidade para determinar o comportamento hidromecânico do meio (Mioto *et al.*, 2018). De acordo com Ojima & Serra Junior (2018) a descontinuidade é uma feição geológica que impede a continuidade física do meio. Alguns exemplos de descontinuidades são as fraturas, juntas, falhas, planos de acamamento, clivagens, entre outros (Guidicini & Nieble, 1983). No entanto, segundo Mioto *et al.* (2018), estruturas geológicas distintas nem sempre se configuram como descontinuidades. Eles dão o exemplo de foliações metamórficas em que o arranjo preferencial dos minerais altera as propriedades do maciço em determinadas direções, mas configuram-se apenas como anisotropia estrutural (Mioto *et al.*, 2018).

Em função de suas características, as descontinuidades podem ser definidas de diversas formas. Guidicini & Nieble (1983) as classificam em função da geometria e distribuição espacial no meio como: 1) compartimentação principal, 2) individuais significativas e 3) aleatórias. A primeira é formada por grupos de descontinuidades com mesmas orientações, inclinações e intensidades, capazes também de formar redes. A segunda é uma estrutura de grande dimensão com grande influência no comportamento de um talude. A terceira é um conjunto de fraturas, ou plano de fraqueza estrutural, com ocorrência irregular (Guidicini & Nieble, 1983).

De modo semelhante, Mioto *et al.* (2018), assim como Fossen (2017) e Priest (1993), utilizaram um critério de classificação de juntas em sistemáticas e não sistemáticas. As primeiras possuem geometria plana, assim como orientação e espaçamentos aproximadamente constantes,

conforme se pode ver na Figura 2.1. (Fossen, 2017). Formam famílias e, eventualmente, blocos (Mioto, *et al.*, 2018). As segundas são caracterizada pela aleatoriedade, não necessariamente são planas, possuem alta variabilidade em relação à geometria, à atitude e ao espaçamento, e por isso não formam conjuntos (Fossen, 2017). Normalmente são mais jovens e limitadas espacialmente pelas juntas sistemáticas (Mioto *et al.*, 2018).



Figura 2.1 – Duas famílias de juntas sistemáticas (Fossen, 2017).

Mioto *et al.* (2018) fazem outra distinção em relação às propriedades hidromecânicas. As descontinuidades mecânicas possuem resistência e módulos de rigidez significativamente inferiores aos do meio circundante. As propriedades hidráulicas, pelo contrário, costumam ser mais elevadas nas descontinuidades. Assim, uma feição geológica pode ser classificada como descontinuidade hidráulica, quando suas propriedades hidráulicas forem mais elevadas que as da matriz rochosa. Uma mesma descontinuidade pode ser tanto hidráulica como mecânica; por exemplo, quando houver separação física da rocha, como é o caso de juntas e falhas (Mioto *et al.*, 2018).

As descontinuidades podem ser catalogadas quanto à origem e às tensões causadoras. Fossen (2017) define fraturas como descontinuidades planas ou subplanas, onde há perda de contato entre as paredes, o que causa alteração das propriedades mecânicas, como perda de coesão, e deslocamento físico, formadas por esforços internos, térmicos, ou externos, tectônicos, ao maciço rochoso. Conforme Hasui *et al.* (2019), as fraturas decorrem da deformação rúptil da rocha por cisalhamento ou por extensão. Ocorrem próximo da superfície quando a rocha se encontra no regime rúptil e são classificadas como fraturas de cisalhamento, abertas ou de extensão e de fechamento ou contração (Fossen, 2017). A orientação de cada tipo de fratura com as tensões principais está ilustrada na Figura 2.2 a seguir:

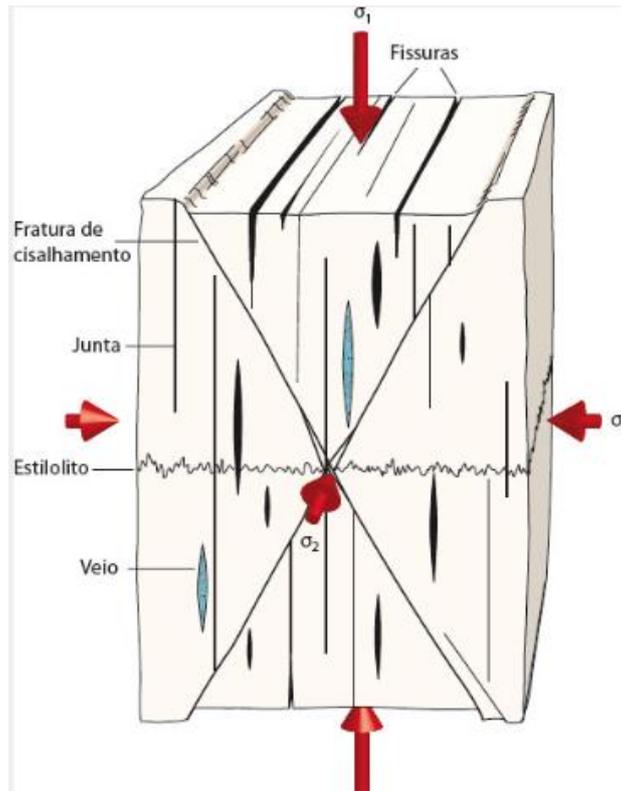


Figura 2.2 – Orientação dos tipos de fratura com as tensões principais (Fossen, 2017).

O termo junta é utilizado de modo diferente segundo os autores. Para Mioto *et al.* (2018), juntas e fraturas são sinônimos no contexto da geologia de engenharia e ambiental, por isso eles utilizam a mesma classificação: juntas de cisalhamento, juntas abertas e juntas de contração. Hasui *et al.* (2019) consideram que juntas são descontinuidades que não apresentam deslocamento e atrito do bloco. Esta definição é semelhante à de Mioto, *et al.* (2018) na medida em que eles consideram que fraturas de extensão e de cisalhamento podem formar juntas em função dos deslocamentos. Para Fossen (2017), juntas correspondem a um tipo específico de fratura; as fraturas extensionais. Os tipos de fraturas estão ilustrados na Figura 2.3.

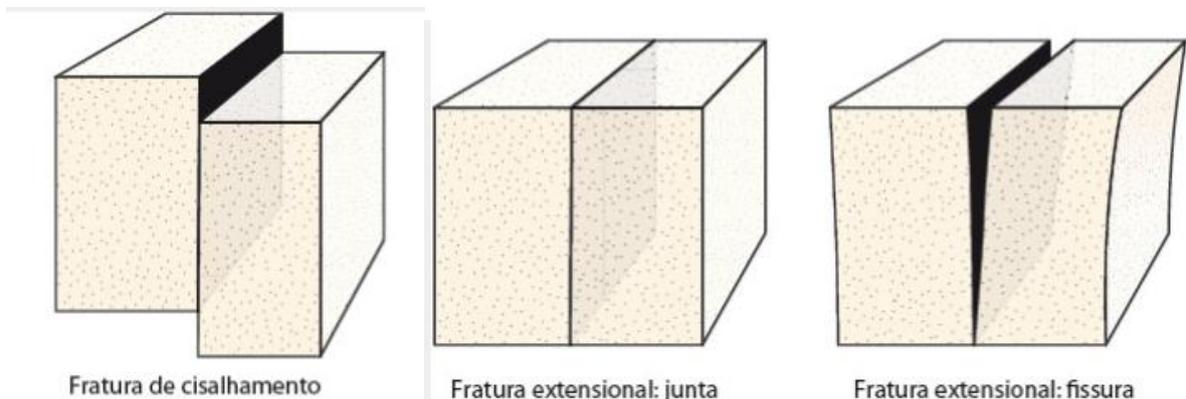


Figura 2.3 – Tipos de fraturas (Fossen, 2017).

As fraturas de cisalhamento ocorrem devido à atuação de tensões cisalhantes que geram um deslocamento físico paralelo à fratura, geralmente da ordem de milímetros a decímetros (Fossen, 2017). Correspondem às juntas de cisalhamento para Miotto *et al.* (2018), as quais passam a ser classificadas como uma falha para deslocamentos transversais elevados (Fossen, 2017).

As fraturas extensionais ou abertas são formadas quando a tensão atua na direção normal ao plano da descontinuidade, mesma direção do deslocamento resultante. Quando a abertura for muito pequena, a fratura é classificada como junta. Quando o deslocamento for elevado, a fratura extensional passa a ser denominada de fissura, embora não haja um limite claro. Elas podem ser preenchidas por água, gás, magma, formando diques - ou por minerais, formando veios (Fossen, 2017).

Feições planas que apresentem deslocamento no sentido de fechamento da fratura são categorizadas como fraturas de contração; um exemplo é o estilolito. Elas apresentam uma interrupção do caminho de fluxo (Fossen, 2017).

As falhas são semelhantes às fraturas de cisalhamento, distinguem-se uma da outra, no entanto, pela escala do deslocamento (Fossen, 2017). Em decorrência da movimentação cisalhante, pode ocorrer fraturamento e moção da rocha no contato, de forma que as falhas também podem estar preenchidas (Hasui *et al.*, 2019). Em função da movimentação, podem ser classificadas como falhas normal ou de gravidade, transcorrentes ou individuais e ainda de empurrão ou reversa (Miotto *et al.*, 2018).

2.1.2 PROBLEMAS ASSOCIADOS AO FLUXO DE ÁGUA PELO MACIÇO ROCHOSO FRATURADO

A presença de diversas famílias de descontinuidades no maciço torna-o suscetível à formação de blocos de rocha (Hasui *et al.*, 2019). Esses blocos podem tornar-se instáveis sob determinadas circunstâncias e apresentar riscos para obras de engenharia. Isso é um problema especialmente para taludes, fundações e túneis em pequenas profundidades. Nestes casos, as descontinuidades controlam a queda ou a movimentação de blocos e cunhas das faces liberadas pela escavação (Hoek, 2007).

Varnes (1978) classificou os movimentos de massas em taludes, dentre os quais estão os movimentos de blocos de rocha. Em algumas circunstâncias o tipo de movimentação está condicionado pela presença e pela disposição das descontinuidades. Quando o maciço estiver

muito fraturado, há a possibilidade de ocorrer ruptura circular. Em situações em que o maciço estiver pouco ou intermediariamente fraturado, o movimento do bloco dependerá da orientação das descontinuidades. Nesse caso, Varnes (1978) dividiu os tipos de movimento em ruptura plana, ruptura em cunha e tombamento, os quais estão ilustrados na Figura 2.4.

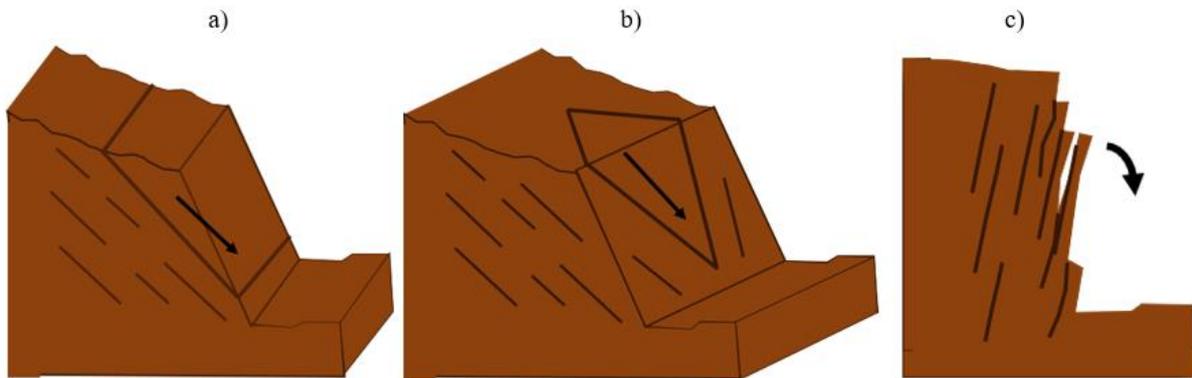


Figura 2.4 – Tipos de ruptura: a) plana, b) em cunha, e c) tombamento, adaptado de Wyllie & Mah (2004)

Análises de estabilidade de blocos foram feitas para diversas obras de engenharia. Uma análise foi feita no túnel de Monte Seco, para evitar a interrupção do transporte ferroviário de minério de ferro (Rasmussen *et al.*, 2019) ou para garantir a estabilidade do túnel (Merrien-Soukatchoff *et al.*, 2012). Análise de estabilidade também é importante para taludes de mineração (Read & Beale, 2013) e de barragens (Fu *et al.*, 2016; Cui *et al.*, 2020).

Além disso, a presença de água nas descontinuidades aumenta as poropressões no meio e favorece a instabilidade. Guidicini & Nieble (1983) dividem os elementos desestabilizadores do relevo como agentes disponentes e agentes necessários. Os primeiros são os que facilitam, enquanto os segundos são determinantes para que ocorra o evento. Dentre esses fatores, a ação antrópica, o relevo, feições geométricas, e a presença de água podem ser considerados como os mais importantes. A água torna o maciço rochoso fraturado menos estável, ao penetrar nas descontinuidades e exercer uma poropressão, a qual aumenta as forças atuantes e reduz as forças resistentes (Read & Beale, 2013). Segundo Pohll *et al.* (2013) a redução da pressão de água nas descontinuidades melhora as condições de estabilidade de encostas, mas a presença da água ainda é um fator crítico que deve ser controlado.

A água infiltra-se pelas descontinuidades e exerce uma pressão ortogonal. Em função da disposição e da conexão das descontinuidades, a poropressão não é uniforme (Guidicini & Nieble, 1983). A Figura 2.5a na sequência mostra como a pressão de água na trinca, V, e na descontinuidade, U, reduzem a estabilidade do bloco de rocha. A pressão de água diminui as

tensões resistivas cisalhantes no bloco pelo princípio de Terzaghi e ainda aumenta as tensões atuantes na trinca. A pressão de água também é muito afetada pela permeabilidade das discontinuidades, como ilustrado nas Figuras 2.5b e 2.5c (Patton & Deere, 1971) . Isso contribui para a redução do fator de segurança obtido com a equação a seguir (Wyllie & Mah, 2004).

$$FS = \frac{(W \cos \psi - U - V \sin \psi) \tan \Phi}{W \sin \psi + V \cos \psi} \quad (2.1)$$

Onde

FS= é o fator de segurança;

W= é o peso do bloco;

ψ = é o ângulo de inclinação da descontinuidade com a horizontal;

U= é a pressão de água na descontinuidade;

V= é a pressão de água na trinca; e

Φ = é o ângulo de atrito da descontinuidade.

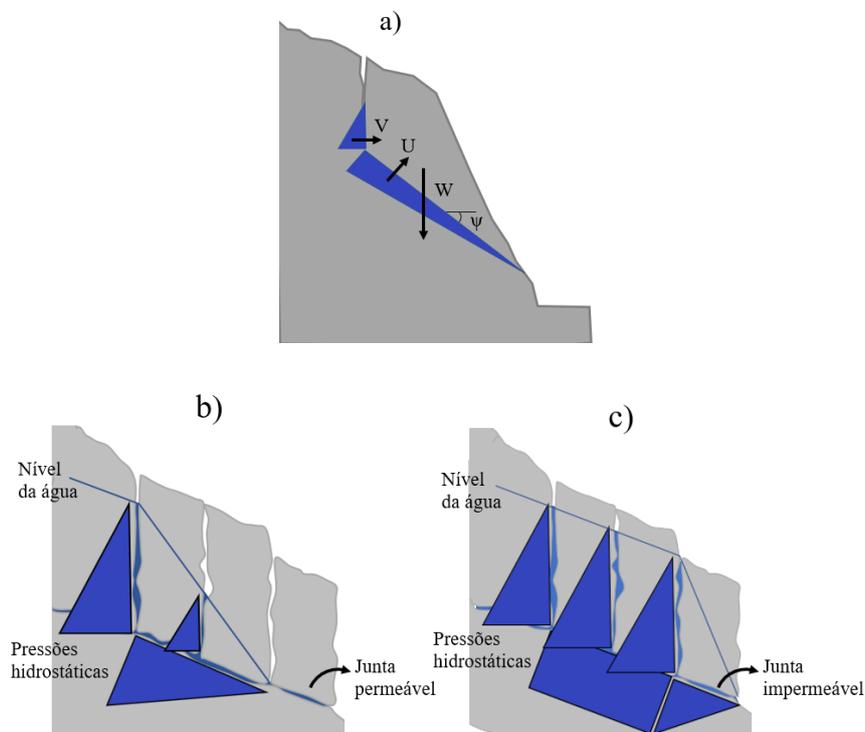


Figura 2.5 – Pressão da água nas descontinuidades: a) em um bloco, adaptado de Wyllie & Mah (2004) e em um conjunto de blocos: b) com junta permeável e c) com junta impermeável, adaptadas de Patton & Deere (1971).

As consequências das instabilidades de blocos podem ser divididas em custos diretos e indiretos. Os custos diretos correspondem aos investimentos feitos para recuperar a obra danificada e para estabilizar a encosta. Os custos indiretos envolvem as perdas com a interrupção do funcionamento da infraestrutura, como engarrafamentos e isolamento de populações em rodovias, perda de produção de minas, compensações de danos às pessoas atingidas, entre outros (Wyllie & Mah, 2004).

A presença de água em altas pressões e o rompimento de blocos de rocha do maciço rochoso podem ter sérias consequências econômicas para obras subterrâneas. Bråtveit *et al.* (2016) inspecionaram diversos túneis de usinas hidrelétricas na Noruega. Foi identificado um aumento dos custos relacionados à perda de carga hidráulica causada por queda de blocos em túneis submetidos a picos hidráulicos. As grandes amplitudes e variações de pressão de água durante o funcionamento das usinas foram as responsáveis pelo aumento da queda de blocos (Bråtveit *et al.*, 2016).

No Brasil, a barragem de Camará na Paraíba rompeu-se em função do fluxo de água pela descontinuidade na ombreira esquerda da barragem. A ruptura ocorreu logo após o primeiro enchimento da barragem. Segundo Kanji (2004), houve diversas causas para a ruptura da barragem e muitas decisões equivocadas, como a falta de monitoramento adequado da drenagem. O colapso foi causado pelo rompimento da laje de rocha a jusante na ombreira esquerda o que aumentou o gradiente hidráulico, as poropressões e, conseqüentemente, o fluxo de água pela descontinuidade. Isso gerou instabilidade do bloco na ombreira, e levou à ruptura da fundação da barragem e a sua inoperabilidade, conforme mostrado na Figura 2.6 (Kanji, 2004).



Figura 2.6 – Ruptura da barragem, vista de jusante (Kanji, 2004)

Além de causar instabilidade de blocos, o fluxo de água pode comprometer a segurança de estruturas, como barragens, de outros modos. A barragem de Teton nos Estados Unidos é um caso célebre de ruptura de barragem por *piping*. O processo também foi iniciado na ombreira da barragem e durante o primeiro enchimento. As investigações apontaram um maciço rochoso muito fraturado, cuja impermeabilização pela cortina de graute tinha sido incompleta. Isso ocasionou um fluxo de água pelo maciço, carreamento de partículas e o início do processo de *piping*. No final, a barragem foi ao colapso e resultou na morte de 14 pessoas, além de perdas econômicas estimadas em 400 milhões de dólares (Seed & Duncan, 1987).

Há outras situações em que é importante conhecer o fluxo de fluidos pelo maciço rochoso fraturado. A água pode servir como transportadora para contaminantes (Hyman *et al.*, 2016). Assim, a rede de fraturas deve ser levada em consideração, pois a geometria das descontinuidades pode facilitar o fluxo de água e o transporte de contaminantes (Herbert, 1996). Por isso, a avaliação do fluxo de água em maciços onde se deseja armazenar resíduos nucleares, por exemplo, é fundamental (Bonnet *et al.*, 2001). Pelo mesmo motivo, Anna (1998) relatou estudos extensivos para caracterizar o maciço rochoso e o fluxo de água no Monte Yucca, nos EUA, com essa finalidade. Em outros casos, o maciço rochoso pode servir como reservatório de hidrocarbonetos (Hyman, 2016).

2.1.3 PROPRIEDADES DAS DESCONTINUIDADES DO MACIÇO ROCHOSO FRATURADO

Conhecer as principais propriedades das descontinuidades é necessário para a melhor compreensão do comportamento do maciço rochoso e evitar acidentes. As propriedades podem ser divididas em geométricas, hidráulicas e mecânicas. No contexto do estudo de fluxo de água pelo maciço rochoso fraturado, as duas primeiras são as que mais interessam.

Projetos de engenharia em maciços rochosos necessitam o melhor conhecimento possível do meio. O levantamento é iniciado com a coleta preliminar de dados e avança em etapas em detalhamento até o projeto executivo. Wyllie & Mah (2004) dividem a coleta em três etapas; reconhecimento do local, seleção do local/ projeto preliminar e investigações detalhadas para o projeto. Na primeira fase, são coletadas as informações já disponíveis sobre o local, como mapas geológicos e fotografias aéreas, são realizadas visitas no campo e alguns ensaios geofísicos. Na segunda etapa, são feitas as primeiras avaliações geotécnicas dos locais, com furos de sondagem, classificação da qualidade dos maciços, mais ensaios geofísicos, entre

outros. Na terceira etapa, são buscadas informações detalhadas sobre a geologia estrutural do local, obtidas de afloramentos e perfurações, são instalados piezômetros, assim como são realizados ensaios para determinar a resistência e a permeabilidade do maciço (Wyllie & Mah, 2004).

A determinação das propriedades hidromecânicas do maciço rochoso apresenta, no entanto, desafios. O maciço rochoso é uma estrutura tridimensional, mas os dados são limitados a afloramentos bidimensionais e a perfurações unidimensionais (Lei *et al.*, 2017). Além disso, somente uma parte relativamente pequena do maciço está visível na superfície ou em paredes de túneis escavados (Bonnet *et al.*, 2001). Isso pode gerar vieses na caracterização do maciço. Esses podem ser por tamanho, truncamento e censura (Kulatilake & Wu, 1984). Conforme Kulatilake & Wu (1984), o primeiro trata da maior probabilidade de interseção de descontinuidades maiores com a superfície exposta. O segundo resulta das descontinuidades não registradas por possuírem comprimento menor do que o mínimo traço medido. O terceiro decorre de descontinuidades apenas parcialmente expostas que fornecem valores de tamanho de traço menores do que o real (Kulatilake & Wu, 1984). Outro problema é a degradação da face de taludes em decorrência do intemperismo físico e químico que pode comprometer a amostragem (Bonnet *et al.*, 2001).

A descrição das descontinuidades depende de extrapolações de furos de sondagem, em uma dimensão, ou de trechos expostos do maciço, em duas dimensões, nem sempre em quantidades suficientes para construção de modelos em três dimensões. Além disso, alguns detalhes necessitam de interpretação e precisam ser ignorados (Fox *et al.*, 2007). Assim, para Lei *et al.* (2017), ainda permanecem muitos desafios para a criação de redes de fraturas realistas.

Por causa dessas incertezas, os dados coletados do maciço rochoso devem ser descritos estatisticamente (Herbert, 1996). Fox *et al.* (2007) conduziram um extenso estudo para levantar as descontinuidades do maciço rochoso em diversas localidades do túnel de Forsmark, na Suécia. A partir dos dados coletados, verificaram qual distribuição estatística melhor representava os dados observados em campo. Para isso, utilizaram tanto os traços das descontinuidades nas paredes dos túneis quanto os furos de sondagens. Anna (1998) também levantou os dados de orientação, de tamanho e abertura das descontinuidades estatisticamente para um túnel no Monte Yucca. Há técnicas mais recentes que permitem realizar o levantamento aéreo das descontinuidades, por meio da tecnologia *Lidar*, e efetuar em seguida a análise estatística por programa computacional (Vazaios *et al.*, 2015).

Segundo Priest (1993), as principais propriedades do maciço rochoso fraturado são o número de famílias de descontinuidades, a orientação, a persistência, a intensidade de fraturamento e a abertura hidráulica para o estudo de fluxo de água. Miotto *et al.* (2018) igualmente destacam a orientação, a persistência, o grau de fraturamento, e citam também a rugosidade, o preenchimento e a conectividade. Além disso, mencionam a coesão e a ondulação, como propriedades importantes no caso de estudos mecânicos (Miotto *et al.*, 2018). Karimzade *et al.* (2017) ressaltam a importância da conectividade para a intensidade de fluxo em decorrência da formação de caminhos de fluxo de água.

As propriedades importantes do maciço rochoso fraturado segundo Herbert (1996) são.

- Distribuição das orientações das fraturas e identificação dos conjuntos independentes de descontinuidades;
- Distribuição da posição das descontinuidades no espaço, geralmente uniforme;
- Densidade de fraturamento;
- Distribuição da transmissividade das descontinuidades,

A orientação das descontinuidades, como juntas e falhas, está associada às tensões no campo no momento da sua formação (Miotto *et al.*, 2018). Por isso, elas formam conjuntos que podem ser determinados estatisticamente. Embora, as descontinuidades possuam algum grau de curvatura, são consideradas como normalmente planas (Priest, 1993); neste caso, a orientação é dada por um plano médio. A orientação das descontinuidades é importante no estudo de estabilidade de maciços rochosos, pois formam planos preferenciais de movimentação, que podem ser desfavoráveis ao equilíbrio (Wyllie & Mah, 2004). As orientações também podem controlar o sentido do fluxo de água pelo maciço (Zhang *et al.*, 1996). A caracterização das descontinuidades é feita por meio do ângulo de mergulho, ψ , e pelo rumo do mergulho, α , ou pela direção, δ . O primeiro é o ângulo medido na vertical entre o plano do mergulho e o plano horizontal. O segundo corresponde ao ângulo na horizontal entre a normal ao plano da descontinuidade e o rumo norte. A terceira é ângulo medido a partir do rumo norte com a reta formada pela interseção do plano da descontinuidade com um plano horizontal (Miotto *et al.*, 2018). Os três ângulos estão ilustrados na Figura 2.7.

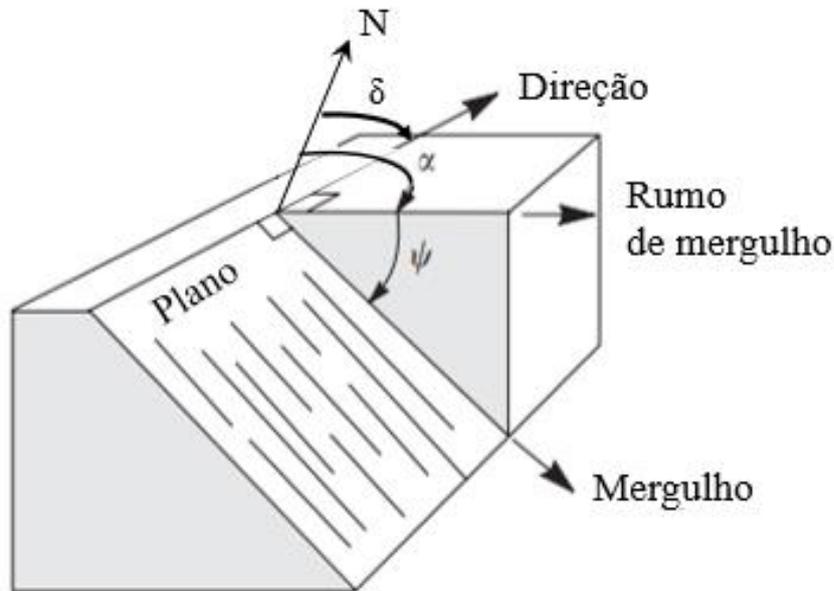


Figura 2.7 – Propriedades do maciço rochoso fraturado, adaptado de Wyllie & Mah (2004).

Após o levantamento de campo da orientação das descontinuidades, é possível agrupar as descontinuidades em conjuntos com distribuições semelhantes de parâmetros (Herbert, 1996). A orientação das descontinuidades pode seguir uma distribuição uniforme, normal ou de Fisher (Einstein & Baecher, 1983). Outras distribuições utilizadas são as de Bingham e a bivariada de Fisher (Fox *et al.*, 2007). A distribuição de Fisher é muito utilizada e é dada pela equação 2.2 (Priest, 1993).

$$f(\theta) = \frac{k_f \operatorname{sen}(\theta) e^{k_f \cos(\theta)}}{e^{k_f} - e^{-k_f}} \quad (2.2)$$

Onde,

θ = é o desvio angular da orientação média;

k_f = representa a constante de Fisher, um parâmetro de dispersão da orientação; e

$f(\theta)$ = é a função densidade de probabilidade da orientação da descontinuidade.

A constante de Fisher é o parâmetro responsável pela dispersão dos valores: para valores baixos da constante de Fisher há uma maior variabilidade das orientações das descontinuidades, como ilustrado na Figura 2.8 (Cui *et al.*, 2020).

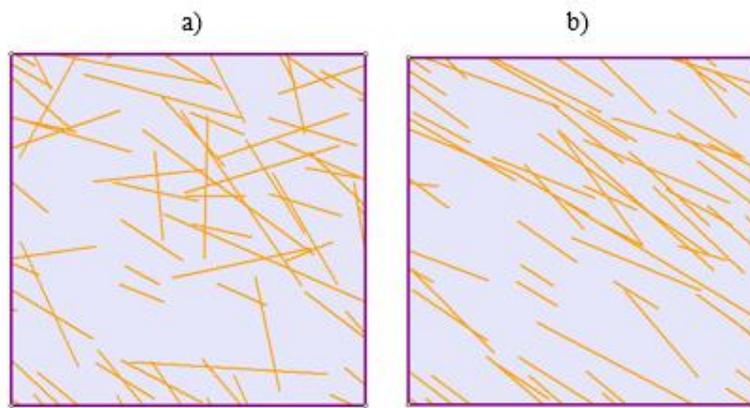


Figura 2.8 – Variação da direção de uma família de descontinuidades com valor médio para o rumo de 45° para uma constante de Fisher: a) k igual a 5 e b) k igual a 50.

A persistência corresponde ao tamanho da descontinuidade, ou seja, o quanto a descontinuidade se expande no interior do maciço (Wyllie & Mah, 2004). É uma propriedade difícil de determinar com exatidão em função da exposição limitada (Lei *et al.*, 2017). Ao assumir algumas hipóteses sobre o formato e a posição das descontinuidades, é possível encontrar uma relação estatística entre a persistência e o traço da descontinuidade em um afloramento plano. Warburton (1980) considerou as descontinuidades como planas, circulares, paralelas entre si e seguindo uma distribuição de Poisson. Esta última localiza o centro das descontinuidades de forma uniforme no espaço (Dershowitz & Einstein, 1988). A distribuição de Poisson encontra fundamento nos estudos experimentais de Baecher *et al.* (1977), pois prevê uma distribuição exponencial do espaçamento entre as descontinuidades, o que foi confirmado por estudos de campo. Com base nisso, Warburton (1980) encontrou uma relação entre as funções de distribuição acumulada do traço e da persistência, definida pela equação 2.3:

$$h_A(l_t) = \frac{l_t}{D_m} \int_{l_t}^{\infty} \frac{g(D)}{\sqrt{D^2 + (l_t)^2}} dD \quad (2.3)$$

Onde

$h_A(l)$ = função densidade de probabilidade do comprimento do traço das descontinuidades para um afloramento de área A;

l_t = comprimento do traço da descontinuidade no afloramento plano;

D_m = diâmetro médio das descontinuidades;

D = diâmetro da descontinuidade; e

$g(d_i)$ = função densidade de probabilidade do diâmetro das descontinuidades.

A geologia exerce um controle na persistência das descontinuidades. Estas desenvolvem-se diferentemente: em rochas estratificadas, formas retangulares, controladas pelas camadas; em rochas ígneas maciças, formas elípticas (Miotto *et al.*, 2018). Persistências elevadas das descontinuidades facilitam o encontro de duas ou mais famílias e a formação de blocos, o que leva a potenciais superfícies de ruptura e deslocamento (Wyllie & Mah, 2004). Descontinuidades com grandes persistências são mais suscetíveis a intersectarem outras e a promover, conseqüentemente o fluxo de água (Reeves *et al.*, 2013). As persistências seguem geralmente distribuições exponenciais (Cui *et al.*, 2020), lognormais (Rasmussen *et al.*, 2019) ou de potência (Reeves *et al.*, 2013).

A abertura da descontinuidade corresponde à distância entre as duas paredes de rocha preenchidas por ar, água ou solo (Wyllie & Mah, 2004). No entanto, em função da rugosidade da descontinuidade, o valor da distância é muito variável (Phillips *et al.*, 2020). Por isso, foram definidos dois tipos de abertura: a abertura mecânica e hidráulica. A abertura mecânica da descontinuidade corresponde à primeira definição. A abertura hidráulica corresponde a uma abertura equivalente a uma descontinuidade com abertura constante, que gera as mesmas perdas de carga nas mesmas condições de fluxo (Priest, 1993). Ela é geralmente menor que a abertura mecânica, pois a rugosidade aumenta a perda de carga e reduz o fluxo. A diferença é ilustrada na Figura 2.9 de Phillips *et al.* (2020). Há algumas fórmulas empíricas que tentam correlacionar os dois tipos de abertura (Phillips *et al.*, 2020).

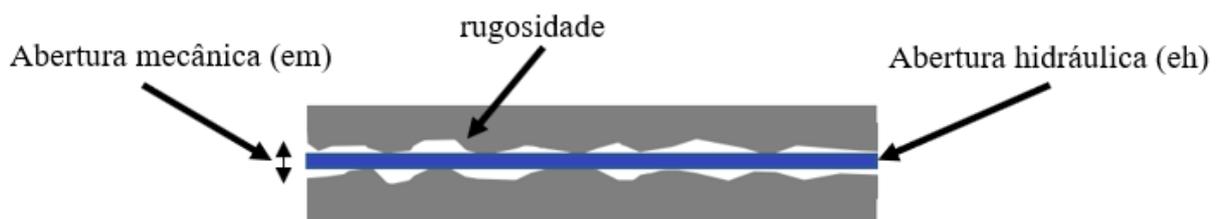


Figura 2.9 – Abertura das descontinuidades, adaptado de Phillips *et al.* (2020).

Em problemas de fluxo de água, a abertura hidráulica é a mais comumente utilizada, em função da dificuldade de simulação da rugosidade das paredes das descontinuidades. A abertura hidráulica segue normalmente uma distribuição lognormal (Javadi *et al.*, 2016), algumas vezes é utilizada uma lei de potência (Lei *et al.*, 2017), mas também pode ser considerada constante (Min *et al.*, 2004). Ela é obtida geralmente a partir de ensaios *packer* (Priest, 1993). Embora o entorno possa afetar os resultados, para Herbert (1996) estes são confiáveis para distâncias pequenas entre os furos. Alguns autores correlacionam a abertura das descontinuidades com a

persistência. Reeves *et al.* (2013) consideram isso mais adequado para descontinuidades isoladas.

Intensidade de fraturamento corresponde a uma medida de avaliação da quantidade de fraturas em um determinado maciço rochoso. Ela está associada à ideia de frequência de descontinuidades, por comprimento, por área ou por volume. No primeiro caso, a frequência é inversamente relacionada ao espaçamento das descontinuidades que corresponde a distância média entre as descontinuidades (Mioto *et al.*, 2018). Um maciço intensamente fraturado possui maior capacidade de formar caminhos de fluxo de água (Lei *et al.*, 2017).

Um sistema muito utilizado é o de Dershowitz e Herda (1992), mostrado na Tabela 2.1. Eles apresentaram um formato para a classificação do grau de fraturamento do maciço em função das dimensões da região de medida e da fratura. Assim, o sistema P, possibilita avaliar inicialmente o número de descontinuidades por linha (P_{10}), por área (P_{20}) ou por volume (P_{30}) da região de medida. Em seguida, ao acrescentar uma dimensão da fratura, é possível obter o comprimento de descontinuidades por área (P_{21}). Ao acrescentar mais uma dimensão da fratura, o critério avalia a área total das descontinuidades por unidade de volume (P_{32}). Por fim, tem a soma dos volumes das descontinuidades pelo volume total (P_{33}) (Dershowitz & Herda, 1992).

Tabela 2.1 – Sistema de Dershowitz & Herda (1992) de intensidade de fraturamento.

Intensidade de fraturamento	Dimensão medida da fratura			
	0: Número de fraturas	1: Comprimento das fraturas	2: Área das fraturas	3: Volume das fraturas
1: Medida de linha (Furo de sondagem ou linha de varredura)	P10: número de descontinuidades por comprimento (inverso do espaçamento)			
2: Medida de área (plano do traço)	P20: Número de descontinuidades por unidade de área	P21: Soma do comprimento das descontinuidades por unidade de área		
3: Volume (maciço rochoso)	P30: Número de fraturas por unidade de volume		P32: Soma das áreas das descontinuidades por unidade de volume	P33: Soma dos volumes das descontinuidades por unidade de área

2.2 REPRESENTAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO FRATURADO

Esta seção discute os modelos para a representação do maciço rochoso fraturado. Trata inicialmente da finalidade dos modelos, dos diversos modelos existentes e da divisão entre meio contínuo e descontínuo. Em seguida, são apresentados os principais conceitos e aplicações de redes de fraturas discretas. Por fim, são mostrados os modelos mais utilizados para a representação das descontinuidades.

2.2.1 MODELAGEM DO MACIÇO ROCHOSO FRATURADO

Um modelo é uma representação simplificada de um fenômeno real (Herbert, 1996). Um modelo é criado com a finalidade de estudar e compreender determinado evento. A coleta de dados para o modelo é especialmente complexa no contexto do maciço rochoso fraturado, devido à dificuldade de medição das propriedades das descontinuidades (Bonnet *et al.*, 2001). Segundo Jing (2003), a falta de dados é intrínseca ao estudo do maciço rochoso fraturado. Em função das condições de campo, do estado de fraturamento do maciço e do grau de simplificação, diversos modelos existem para representar o maciço rochoso fraturado.

O maciço rochoso está sujeito a diversos fenômenos físicos, químicos e térmicos que alteram suas condições (Guidicini & Nieble, 1983). Um modelo que englobe todos esses processos pode, no entanto, tornar-se excessivamente complexo. Conforme Wyllie & Mah, (2004), um modelo deve ser uma simplificação da realidade e não é desejável incluir todos os aspectos do meio físico. Por isso, um modelo não precisa acoplar todos os processos, mas deve ser adaptado e simples o suficiente para o seu uso (Jing, 2003).

Lei *et al.* (2017) classificam os modelos para representar o maciço rochoso fraturado em geológicos, estocásticos e geomecânicos. Os modelos geológicos têm por finalidade capturar os principais processos geológicos que ocorrem no maciço. Esbarram, no entanto, na dificuldade de coleta de dados a grandes profundidades. Os modelos estocásticos possuem a vantagem de ser simples e mais adaptáveis à falta de dados, porém não levam em consideração *a priori* as restrições decorrentes da formação geológica ou mecânica das descontinuidades. Os modelos geomecânicos aplicam as leis da mecânica ao maciço rochoso para buscar reconstituir o padrão de descontinuidades encontrado *in situ*. Estes modelos possuem a vantagem de correlacionar os atributos das descontinuidades entre si e com as propriedades mecânicas; no

entanto, enfrentam a dificuldade de obter dados de qualidade, principalmente no estado de tensão inicial, as paleotensões (Lei *et al.*, 2017).

O desafio dos modelos computacionais mais realistas é capturar todas as propriedades do maciço rochoso e os processos físicos relevantes envolvidos. Necessitam considerar a anisotropia do meio, a não homogeneidade, e a presença de descontinuidades, entre outros (Jing, 2003). Há modelos complexos, que possibilitam representar esses fenômenos (Lei *et al.*, 2017). Segundo Jing (2003), o uso do computador foi essencial para o desenvolvimento de modelos com maior capacidade de integração de dados físicos, químicos e térmicos, além de lidar com eventos acoplados (Jing, 2003). No entanto, a coleta de dados de qualidade ainda pode ser uma limitação (Lei *et al.*, 2017).

Os modelos representativos do maciço rochoso podem capturar ainda determinadas reações do maciço rochoso em circunstâncias específicas. Para alguns casos, é preciso conhecer o comportamento hidromecânico, pois ocorre o fechamento ou abertura das descontinuidades com a alteração das tensões no maciço (Lei *et al.*, 2020). A consideração de fluxo multifásico é também necessária para análises de rochas porosas e fraturadas que armazenam hidrocarbonetos (Phillips *et al.*, 2020). Em algumas situações, deve ser avaliada a capacidade do fluido de conduzir contaminantes (Hyman *et al.*, 2016).

Uma outra divisão de tipos de modelos pode ser feita com base nas hipóteses quanto à continuidade ou descontinuidade do meio (Jing, 2003). O meio pode ser considerado contínuo quando suas propriedades puderem ser consideradas homogêneas para a escala de estudo (Read & Beale, 2013). De modo um pouco distinto, o meio pode ser representado por um meio equivalente com propriedades constantes (Min *et al.*, 2004). Um conceito fundamental é o de volume elementar representativo, entendido como um volume, a partir do qual as propriedades de um meio heterogêneo tornam-se constantes (Read & Beale, 2013). Essa premissa possibilita usar a mecânica de meios contínuos e modelos numéricos, como o método dos elementos finitos que facilitam a obtenção de soluções para as equações diferenciais parciais (Jing & Hudson, 2002). No entanto, nem sempre o meio possuirá um volume elementar representativo; neste caso, não será possível utilizar esses métodos.

O maciço rochoso fraturado é essencialmente descontínuo; por isso, uma forma de modelá-lo é por meio da discretização das descontinuidades. Esse método possui a vantagem de ser mais fidedigno à realidade, embora gere uma maior dificuldade de aplicação das equações de meio contínuo, quando há muitas descontinuidades (Jing, 2003). É também bastante útil para analisar

a interação entre as descontinuidades em problemas de fluxo (Read & Beale, 2013). Para equilibrar praticidade e realidade, é possível também combinar as duas abordagens, por exemplo discretizá-las, quando houver poucas descontinuidades sem volume elementar representativo, ou dividindo o maciço o maciço em regiões com diferentes abordagens (Jing & Hudson, 2002). Geralmente, a abordagem de meio contínuo é utilizada em maciços com um grau elevado de fraturamento, que apresentam volume elementar representativo (Jing, 2003). A Figura 2.10 a seguir mostra qual método é o mais utilizado em função das circunstâncias.

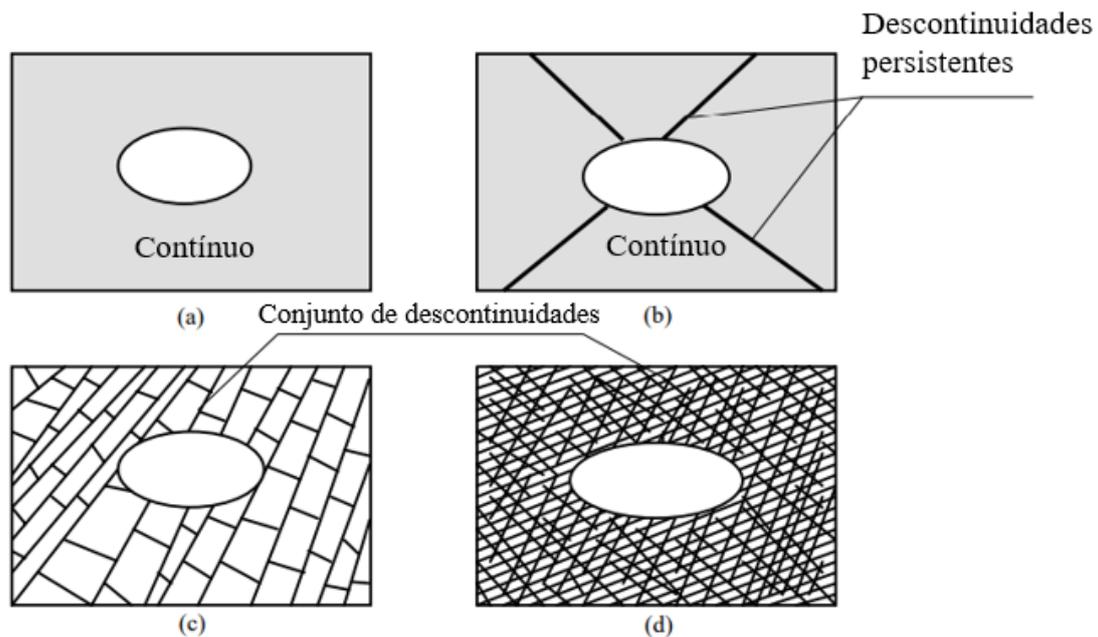


Figura 2.10 – Melhor alternativa para representar o maciço rochoso fraturado: a) meio contínuo, b) meio contínuo com elementos de junta ou meio descontínuo, c) meio descontínuo e d) meio contínuo com propriedades equivalentes, adaptado de Jing (2003).

2.2.2 REDE DE FRATURAS DISCRETAS (DFN)

A rede de fraturas discretas é um modelo computacional que reproduz as propriedades geométricas e hidromecânicas das descontinuidades individualmente ou em conjuntos. Elas são geradas a partir de modelos geológicos, estatísticos e geomecânicos e podem representar diversos elementos geológicos como juntas, veios, falhas, entre outros (Lei *et al.*, 2017). É um modelo simples muito utilizado para problemas de fluxo e de transporte (Herbert, 1996). Em rochas ígneas, que possuem baixa permeabilidade da matriz rochosa, é muito empregada a discretização das descontinuidades por redes de fraturas discretas para o cálculo de fluxo de água (Min *et al.*, 2004). A DFN possibilita inserir no modelo computacional diversas

propriedades das descontinuidades, como as orientações, as persistências e a abertura, entre outras (Karimzade *et al.*, 2017). A partir dessas propriedades, é possível obter modelos espaciais em duas e em três dimensões, como ilustrado na Figura 2.11, e a conectividade (Alghalandis, 2017).

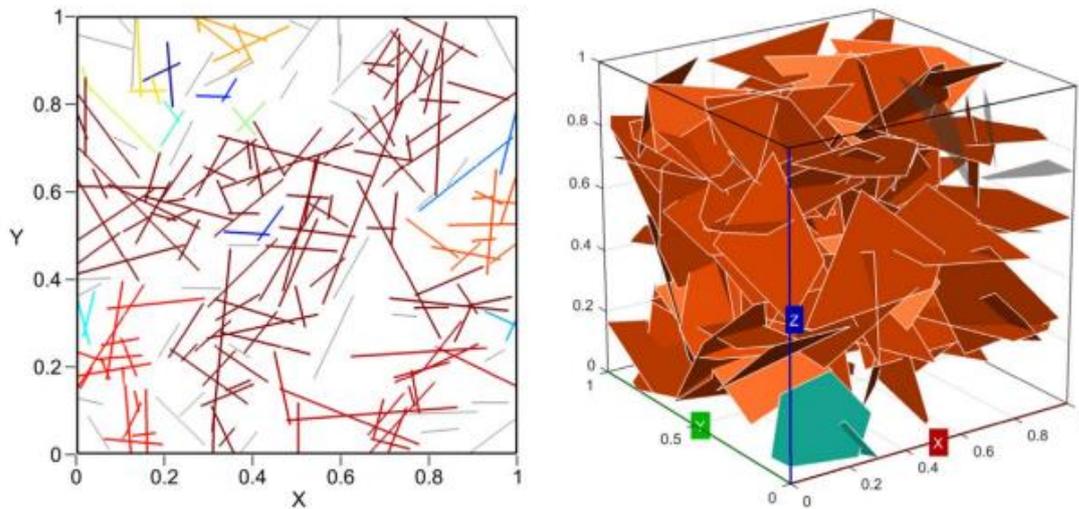


Figura 2.11 – Exemplo de DFN em duas e em três dimensões (Alghalandis, 2017).

Para Davy *et al.* (2018), a vantagem da rede de fraturas discretas é permitir a integração dos dados geológicos e maior facilidade de uso, pois não requer um volume elementar representativo. Outra vantagem é a facilidade de utilização para análises estatísticas. A rede de fraturas discretas permite gerar muitos cenários em que as propriedades do maciço rochoso seguem distribuições estatísticas. Cada cenário é uma possibilidade entre várias capazes de representar o mundo real (Lei *et al.*, 2017). O resultado, conseqüentemente, não é único, mas possui uma distribuição de valores plausíveis de ocorrer (Herbert, 1996). Tendo em vista a dificuldade de obter dados para a representação do maciço rochoso fraturado e a necessidade de tratar os dados estatisticamente, essa é uma vantagem significativa (Davy *et al.*, 2018).

Do mesmo modo, Herbert (1996) vê a possibilidade de geração de diversos modelos estatísticos como uma vantagem das DFN, pois as incertezas intrínsecas ao estudo dos maciços rochosos tornam análises determinísticas pouco seguras (Herbert, 1996). Assim, de acordo com Huang *et al.*, (2021) a rede de fraturas discretas é um método simples e eficiente para representar maciços rochosos fraturados. No entanto, a geração estocástica de descontinuidades não leva em consideração a interação entre as descontinuidades no momento de sua formação; assim, as redes de descontinuidades estocásticas podem não representar adequadamente feições geológicas e relações geomecânicas (Lei *et al.*, 2017).

Para criar um modelo de um maciço rochoso por rede de descontinuidades discretas, é necessário fazer inicialmente o levantamento da intensidade de fraturamento e das propriedades geométricas das descontinuidades em furos de sondagem e nas paredes do túnel. Na sequência, esses dados devem ser testados estatisticamente para identificar a melhor distribuição. Finalmente, é feita a verificação do modelo, por meio da comparação do modelo com os dados de campo (Fox *et al.*, 2007).

Um modelo DFN computacional é criado por um programa que cria as descontinuidades em duas ou três dimensões em uma determinada área ou determinado volume (Alghalandis, 2017). A geração do modelo é feita com base nas distribuições estatísticas especificadas inicialmente. A partir disso, o programa necessita de um critério para parar de produzir novas descontinuidades (Rasmussen, 2020). Os critérios mais utilizados geralmente são os definidos por Dershowitz & Herda (1992), como o número de descontinuidades por área (Javadi *et al.*, 2016), o número de descontinuidade por volume (Cui *et al.*, 2020), a intensidade de descontinuidades por metro de sondagem (Rasmussen *et al.*, 2019), do comprimento total de descontinuidades por área (Reeves *et al.*, 2013) ou da área total de descontinuidades por volume analisado (Hekmatnejad *et al.*, 2021). A partir disso, é possível gerar a rede de fraturas discretas, exibida na Figura 2.12 (Rasmussen, 2020). Mais recentemente, Xiao & He (2022) desenvolveram um algoritmo para obter a rede de descontinuidades em duas e em três dimensões diretamente de imagens dos maciços rochosos. Conforme esses autores, isso geraria malhas realistas e evitaria simular um número elevado de redes pelo método de Monte Carlo (Xiao & He, 2022).

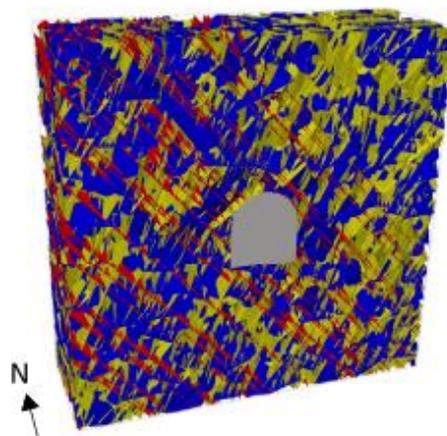


Figura 2.12 – Exemplo de rede de fratura discreta para o túnel de Monte Seco (Rasmussen, 2020).

A rede de fraturas discretas possui a capacidade de representar descontinuidades determinística e probabilisticamente (Davy *et al.*, 2018). Vazaios *et al.* (2014) utilizaram essa abordagem híbrida para a representação de dois maciços rochosos. Após o levantamento das descontinuidades com o *Lidar*, e a geração da rede de descontinuidades com o programa MoFrac, os autores constataram a formação de blocos e cunhas potencialmente instáveis (Vazaios *et al.*, 2014). Fu *et al.* (2016) utilizaram igualmente a rede de fraturas discretas para representação das descontinuidades e análise de estabilidade de blocos, conforme exposta na Figura 2.13.

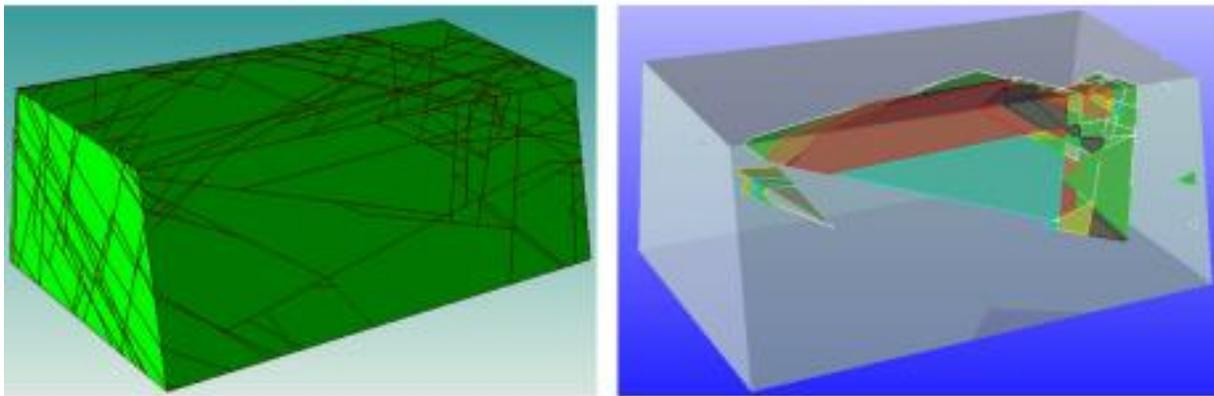


Figura 2.13 – Representação das descontinuidades do maciço e formação de blocos (Fu *et al.*, 2016).

Além de estabilidade de blocos, a rede de fraturas discreta é muito utilizada em problemas de fluxo de água. Diferentemente da abordagem de meio contínuo, o uso de DFN permite modelar as descontinuidades com base na distribuição estatística das propriedades geométricas. A partir das descontinuidades geradas, ocorre a intersecção e a formação de caminhos de fluxo, as quais caracterizam a conectividade (Herbert, 1996). Esta é importante, principalmente em escalas pequena a intermediária e por isso as redes de fraturas discretas são muito utilizadas em problemas de fluxo em maciços rochosos fraturados (Min *et al.*, 2004).

Assim, as redes de fraturas discretas foram utilizadas para o cálculo de fluxos para túneis tanto em duas dimensões (Javadi *et al.*, 2016) quanto em três dimensões (Zhu *et al.*, 2021). Reeves *et al.* (2013) e Reeves *et al.* (2014) utilizaram-nas para estudos de drenagem de maciço rochoso. Alghalandis (2017) desenvolveu um código em Matlab para gerar redes de descontinuidades discretas, calcular o fluxo em duas e em três dimensões, como ilustrado na Figura 2.14, e avaliar a conectividade de malhas.

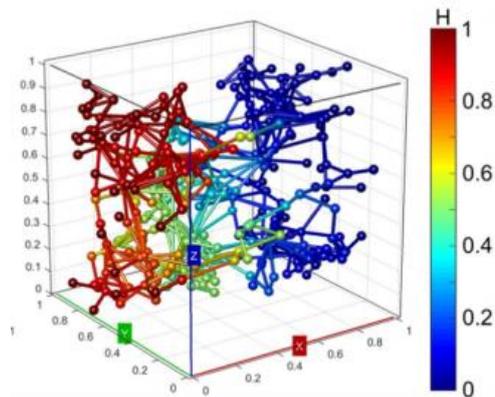


Figura 2.14 – Carga hidráulica em uma rede tridimensional (Alghalandis, 2017).

2.2.3 MODELOS DE DESCONTINUIDADES

As descontinuidades de um maciço rochoso podem ser modeladas de diversas formas, a partir de pressupostos e técnicas matemáticas distintas. Alguns deles são citados e descritos por Dershowitz & Einstein (1988). O primeiro é o modelo ortogonal, apresentado na Figura 2.15. Este é constituído por duas ou três famílias de descontinuidades (Staub *et al.*, 2002). O sistema de juntas mais básico possível é constituído por dois conjuntos de descontinuidades iguais e ortogonais (Snow, 1965). O modelo ortogonal é totalmente definido pelo espaçamento das famílias de descontinuidades, que pode ser constante ou variável (Dershowitz & Einstein, 1988). Modelos ortogonais são isotrópicos quando possuírem três famílias idênticas ou transversalmente isotrópicos, quando forem apenas duas famílias idênticas (Snow, 1965). Os modelos ortogonais também possibilitam o uso de juntas persistentes ou restritas nos contatos (Dershowitz & Einstein, 1988).

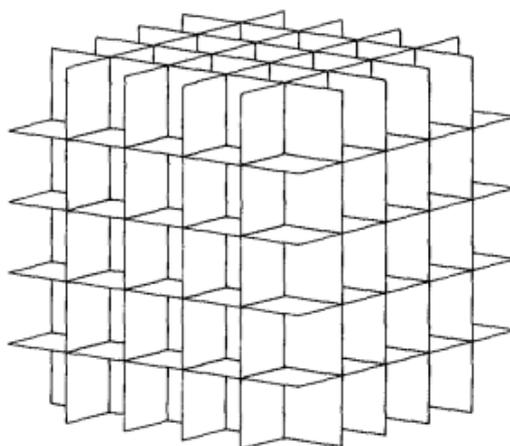


Figura 2.15 – Modelo de juntas ortogonais (Dershowitz & Einstein, 1988).

Assim, o programa RS2 da Rocscience (2022) possibilita a geração de conjunto de descontinuidades paralelas em duas dimensões determinísticas, com propriedades constantes ou variáveis, com distribuição estatística para o comprimento do traço, espaçamento e persistência. O programa também permite gerar descontinuidades intercaladas, o que forma blocos imbricados uns nos outros, como na Figura 2.16 (Rocscience, 2022).

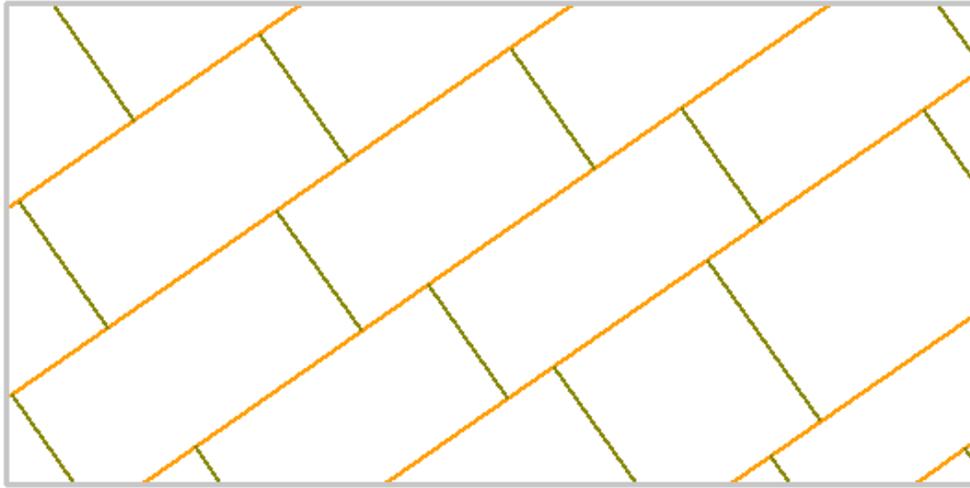


Figura 2.16 – Modelo de descontinuidades deslocadas do RS2 (Rocscience, 2022).

O segundo modelo é o de Baecher. Este fornece uma maior variedade de disposição das juntas, pois permite a combinação de diferentes tamanhos, posições e orientações e caracteriza-se por utilizar descontinuidades circulares ou elípticas, exibidas na Figura 2.17 (Staub *et al.*, 2002). Como no modelo ortogonal, as descontinuidades podem possuir um tamanho constante ou seguir uma distribuição probabilística; para esse modelo, as distribuições mais comuns são a lognormal e a exponencial (Dershowitz & Einstein, 1988). Esse é o modelo de juntas utilizado no programa UnblocksGen de Rasmussen (2020) para criação de descontinuidades em duas ou três dimensões.

A localização das descontinuidades no espaço é feita por um processo de Poisson (Dershowitz & Einstein, 1988). O programa RS2 também possibilita gerar o modelo de Baecher para redes de duas dimensões. Para isso, o programa necessita da distribuição do comprimento do traço, do valor médio e da constante de Fisher para a orientação, pois o modelo segue a distribuição de Fisher e um parâmetro de intensidade de fraturamento (Rocscience, 2022). O modelo de Baecher aprimorado foi desenvolvido para interromper as descontinuidades nas interseções em função de uma probabilidade (Staub *et al.*, 2002).

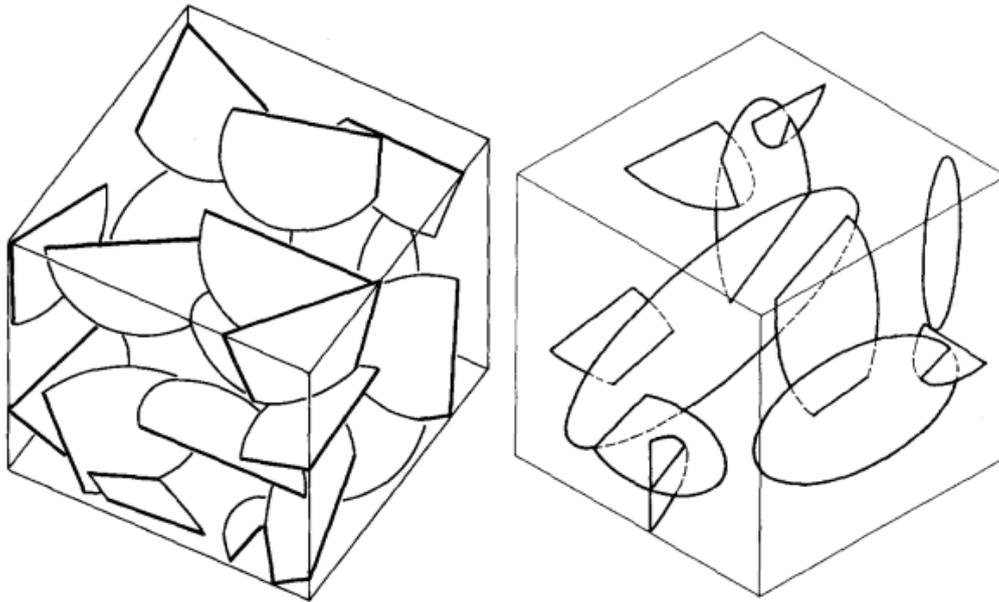


Figura 2.17 – Modelo de Baecher (Dershowitz & Einstein, 1988).

Por fim, o modelo de Veneziano é gerado por um processo de linhas e plano de Poisson (Staub *et al.*, 2002). Em duas dimensões o processo é de linhas de Poisson, no qual um programa utiliza o método de ponto de Poisson para localizar as descontinuidades uniformemente no espaço; na sequência, as descontinuidades são orientadas de acordo com uma distribuição ou definidas como constantes (Rocscience, 2022). Para três dimensões, o procedimento é semelhante, mas para planos. O plano é localizado por um método de ponto de Poisson e orientado, por uma distribuição estatística previamente escolhida (Dershowitz & Einstein, 1988).

No entanto, as descontinuidades geradas por esse método possuíam a princípio persistências infinitas. Para resolver esse problema em duas dimensões, o programa pode dividir as linhas em trechos de acordo com uma distribuição, geralmente exponencial, e classificar alguns como juntas outros como rocha intacta; o resultado é mostrado na Figura 2.18 (Rocscience, 2022). Em três dimensões, é feito um processo de linhas de Poisson no interior dos planos previamente gerados (Staub *et al.*, 2002). Os polígonos formados por essas linhas são categorizados como descontinuidade ou rocha intacta (Dershowitz & Einstein, 1988). Como resultado desse método, as descontinuidades costumam ser coplanares ao contrário das geradas pelo método de Baecher (Rocscience, 2022).

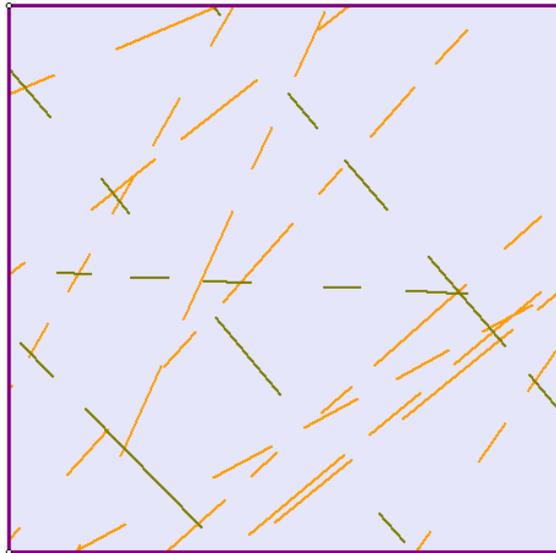


Figura 2.18 – Exemplo de modelo de Veneziano em duas dimensões no RS2.

Um modelo bastante utilizado, mas que não foi citado por Dershowitz & Einstein (1988) e não está disponível no RS2, é o modelo fractal (Bonnet *et al.*, 2001). Sua vantagem é ser independente da escala (Staub *et al.*, 2002). O modelo pressupõe que a disposição espacial das descontinuidades segue uma dimensão fractal (Lei *et al.*, 2017). O modelo permite também que ocorra o agrupamento do centro descontinuidades, em oposição a um processo de distribuição uniforme no espaço como nos modelos anteriores, conforme exibido na Figura 2.19 (Zhu *et al.*, 2021).

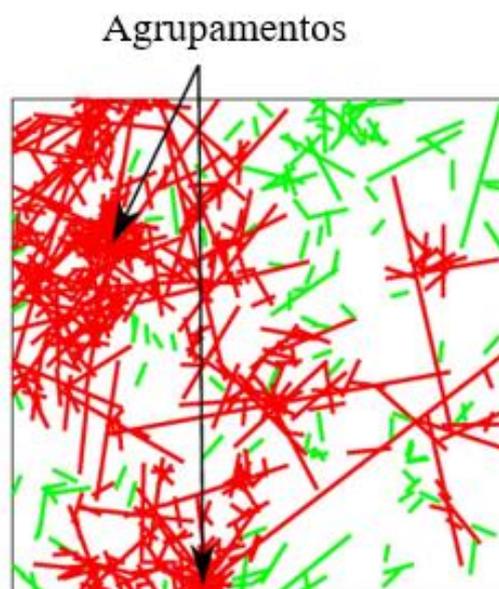


Figura 2.19 – Descontinuidades agrupadas em um modelo fractal (Zhu *et al.*, 2021).

O modelo fractal fornece uma relação entre a distribuição intensidade de fraturamento e o comprimento das descontinuidades dada pela equação a seguir (Davy *et al.*, 2010). Decorre do modelo uma distribuição em lei de potência do tamanho das descontinuidades (Lei *et al.*, 2017).

$$n(l, L) = \alpha_d L^{D_f} l^{-a} \quad (2.4)$$

Onde,

L = é o tamanho do sistema;

l = é o comprimento das descontinuidades;

D_f = é a dimensão fractal;

α_d = é um coeficiente de densidade;

a = é o expoente da lei de potência para o comprimento; e

$n(l, L)$ é o número de descontinuidades com tamanho l , de modo que $n(l, L)dl$ é o número de descontinuidades com tamanho entre l e $l + dl$ em um volume ou em uma área de dimensão L .

2.3 FLUXO DE ÁGUA EM MACIÇO ROCHOSO FRATURADO

Nesta seção, são apresentadas as principais formas de cálculo de fluxo de água pelo maciço rochoso fraturado. A primeira forma considera o meio como descontínuo; a segunda, como contínuo. Na sequência, são vistas a relação de algumas propriedades das descontinuidades como o fluxo de água pelo maciço e como a programação pode auxiliar nos cálculos.

2.3.1 MEIO DESCONTÍNUO

O fluxo de água pelas descontinuidades pode ser descrito pela equação de Navier-Stokes (Xie *et al.*, 2015):

$$\vec{f}_c - \frac{1}{\rho_f} \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \quad (2.5)$$

Onde

ρ_f = é a densidade do fluido;

\vec{v} = é o vetor de velocidade;

μ = é a viscosidade dinâmica;

p = é a pressão do fluido; e

\vec{f}_c = é o vetor força de corpo igual à gravidade.

As discontinuidades do maciço rochoso apresentam paredes rugosas e abertura variável, o que torna difícil a resolução da equação de Navier-Stokes (Huang *et al.*, 2021). Para simplificar a resolução da equação, foi adotada a teoria das placas paralelas segundo a qual o fluxo de água pelas discontinuidades pode ser representado por placas paralelas equivalentes (Priest, 1993).

A partir da equação 2.5, Snow (1965) chegou à fórmula de fluxo para discontinuidades com base na teoria de placas paralelas. As hipóteses necessárias para a aplicação da fórmula são fluido newtoniano, incompressível, não turbulento e a baixas velocidades. Snow (1965) considerou que o perfil de velocidade, ilustrado na figura 2.20, podia ser corretamente descrito por uma parábola.

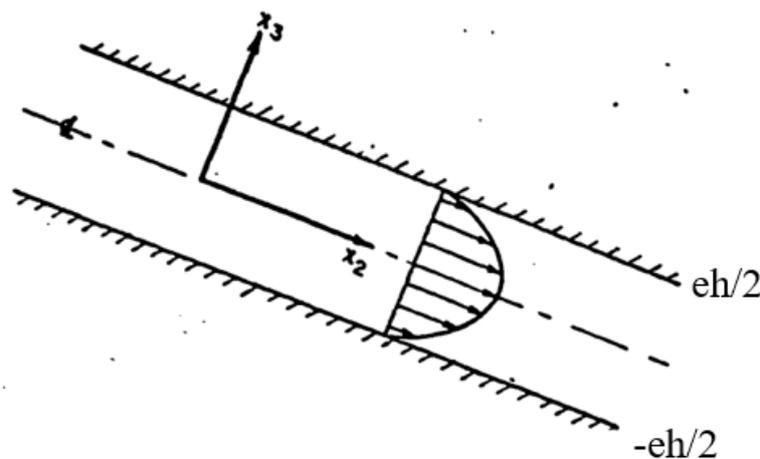


Figura 2.20 – Perfil de velocidade do fluxo por placas paralelas a baixas velocidades, adaptado de Snow (1965).

Considerando as condições de contorno da Figura 2.20, Snow (1965) encontrou a fórmula de fluxo de água para placas paralelas, mostrada a seguir:

$$Q = \frac{ge_h^3 b \Delta h}{12\nu l} \quad (2.6)$$

Onde,

Q = é o fluxo pela discontinuidade,

g = é a aceleração da gravidade;

e_h = representa a abertura hidráulica;

b = é a largura da descontinuidade;

Δh = é a diferença de carga hidráulica; e

ν = representa a viscosidade cinemática.

Quando o maciço possui fraturas paralelas, como na Figura 2.21, o fluxo de água é facilmente calculado pela equação 2.7 (Priest, 1993):

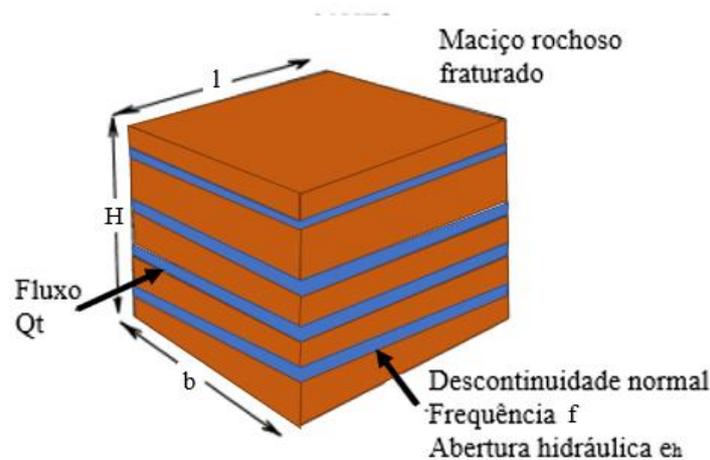


Figura 2.21 – Maciço rochoso fraturado com descontinuidades paralelas, adaptado de Priest (1993).

$$Q_t = \frac{g e_h^3 b \Delta h f H}{12\nu l} \quad (2.7)$$

Onde,

Q_t = consiste no fluxo total pelo maciço rochoso fraturado;

H = representa a altura do bloco de maciço rochoso fraturado; e

f = é a frequência de descontinuidades.

Uma rede de descontinuidades pode ser transformada em uma malha de nós e conexões, como ilustrado na Figura 2.22. Os nós são, em seguida, categorizados em nós internos, com carga hidráulica desconhecida, e em nós externos, com carga hidráulica conhecida (Javadi *et al.*, 2016). Com base nas equações a seguir é possível, dadas as condições de contorno, montar uma matriz com todas as cargas hidráulicas e conectividade entre os nós para resolver o problema de fluxo pelas descontinuidades (Priest, 1993).

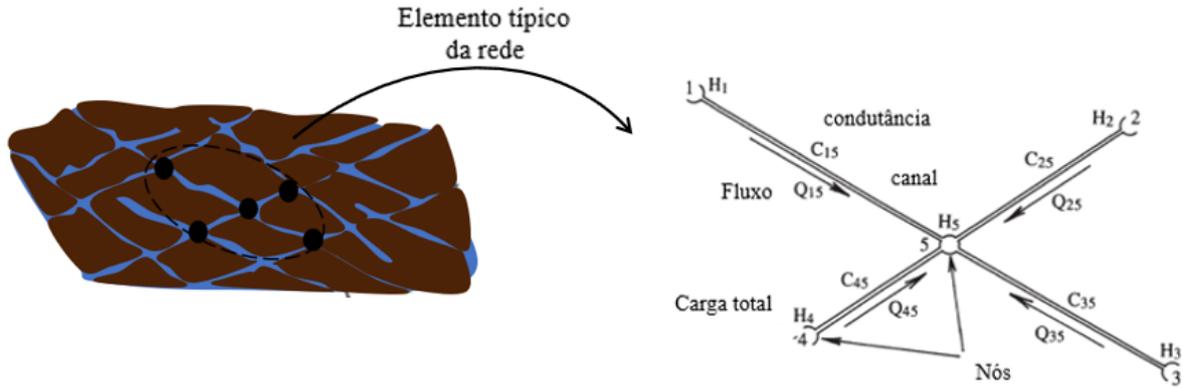


Figura 2.22 – Elemento típico de uma rede formada por 5 nós interconectados, adaptado de Priest (1993).

$$\sum_{i=1}^N Q_{ij} = 0 \quad (2.8)$$

$$Q_{ij} = C_{ij} \Delta h_{ij} = C_{ij}(h_i - h_j) \quad (2.9)$$

$$C_{ij} = \frac{g e_h^3 b_{ij}}{12 \nu l_{ij}} \quad (2.10)$$

$$h_j = \frac{\sum_{i=1}^n C_{ij} h_i}{\sum_{i=1}^n C_{ij}} \quad (2.11)$$

Onde,

Q_{ij} = é a vazão do nó i para o nó j ;

N = é o número de descontinuidades que se conectam ao nó j ;

C_{ij} = consiste na condutância do nó i para o nó j ; e

h_i = representa a carga hidráulica no nó i .

Outra propriedade importante muito utilizada é a transmissividade, T , semelhante à condutância. Ela é dada pela equação 2.12 (Read & Beale, 2013):

$$T = \frac{g e_h^3}{12 \nu} \quad (2.12)$$

Também é possível obter a condutividade hidráulica da fratura com a equação 2.13, dividindo a condutância pela área da seção por onde passa o fluxo (Azevedo *et al.*, 2018).

$$K_f = \frac{ge_h^2}{12\nu} \quad (2.13)$$

Onde,

K_f = é a condutividade hidráulica da fratura.

Reeves *et al.* (2013) utilizou esse método para calcular o fluxo de água por uma malha com gradiente constante. Com base em cinquenta simulações, ele obteve valores de fluxo de água para abertura hidráulica constante e variável e diferentes condições geométricas das descontinuidades.

A lei cúbica fornece um método simples de resolução de problemas de fluxo e possibilita a condução de muitas simulações para análises estatísticas. Por isso, ela é utilizada por diversos autores em problemas de fluxo em duas ou em três dimensões. Javadi *et al.* (2016) utilizou-a em conjunto com um parâmetro que incorpora a rugosidade para calcular estocasticamente o fluxo de água em duas dimensões para dentro de um túnel. Além disso, com as informações coletadas no campo para realizar a calibragem do modelo, eles conseguiram ainda testar diferentes hipóteses acerca da abertura hidráulica (Javadi *et al.*, 2016)

Karimzade *et al.* (2017) utilizaram igualmente uma abordagem estatística para prever o fluxo de água em um túnel e desenvolveram um código computacional. Diferentemente de Javadi *et al.* (2016), os estudos foram conduzidos em três dimensões e com uma correlação entre a abertura hidráulica e o tamanho das descontinuidades. Os autores consideraram que os resultados obtidos do modelo eram condizentes com os resultados de campo e enfatizaram a importância da conectividade das descontinuidades (Karimzade *et al.*, 2017).

Alghalandis (2017) também desenvolveu um código computacional para a resolução de fluxo de água pelo maciço rochoso fraturado tanto para duas quanto para três dimensões. Para isso, ele utilizou a mesma abordagem de Priest (1993), por meio da lei cúbica e da resolução de matrizes.

Em determinadas circunstâncias, como reservatórios de hidrocarbonetos, também é necessário avaliar a capacidade de transporte de contaminantes pelos fluidos. Hyman *et al.* (2015) propôs um código para avaliar o transporte de solutos. Um exemplo dado é a captura de CO₂ pela água, de modo a preservá-lo em reservatórios geológicos (Hyman *et al.*, 2015). Na sequência, Hyman

et al. (2016) estudaram os tempos de retenção de partículas em maciços rochosos com fluxo de água.

2.3.2 MEIO CONTÍNUO

Para utilizar a teoria de meio contínuo e as equações de Darcy no problema de fluxo de água em maciço rochoso fraturado, duas condições devem ser atendidas. O meio deve possuir um volume elementar representativo e as propriedades hidráulicas equivalentes devem ser determinadas. Essas devem também possuir as características de um tensor. Essas restrições exigem que a aplicabilidade e o uso da teoria de meio contínuo sejam analisados caso a caso (Min *et al.*, 2004).

Um volume de maciço rochoso é representativo quando ele for grande o suficiente para representar as propriedades do maciço e pequeno o suficiente para que a variação de carga hidráulica seja mínima (Pohll *et al.*, 2013). A amplitude dessa variação possui caráter subjetivo que depende do problema a ser analisado. Uma forma de obtenção do volume elementar representativo consiste em gerar uma rede de fraturas discretas, selecionar volumes de diferentes tamanhos e simular o fluxo. A partir dos valores de permeabilidade obtidos, verifica-se o tamanho da variação máxima desejada, como ilustrado na Figura 2.23 (Min *et al.*, 2004). Esse método também foi utilizado por Wu *et al.* (2021). No entanto, os valores nem sempre convergem; nesses casos não é possível obter um volume elementar representativo para o maciço rochoso (Bonnet, 2001).

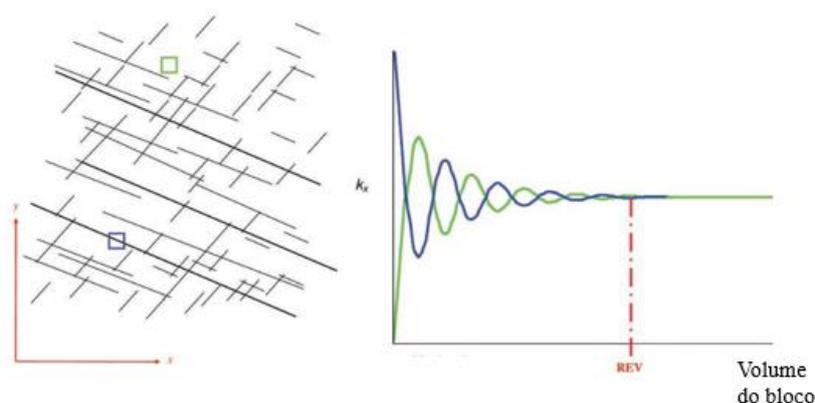


Figura 2.23 – Volume elementar representativo, adaptado de Read & Beale (2013).

Quando o maciço possui um volume elementar representativo, este poderá ser considerado um meio homogêneo. Assim o fluxo de água pelo meio pode ser simulado pela lei de Darcy, equação 2.14 (Zhang *et al.*, 1996).

$$\{Q_t\} = \{A_s\}[K] \{\Delta h\} \quad (2.14)$$

Onde

A_s = corresponde à área da seção de saída; e

K = representa o tensor de condutividade hidráulica.

Oda (1985) propôs um método para determinar o tensor de permeabilidade intrínseca para um maciço rochoso fraturado. O método pressupõe que as fraturas podem ser representadas por superfícies planas circulares, a matriz rochosa era impermeável e o volume é completamente atravessado por descontinuidades, ou seja, há vários caminhos de fluxo possíveis. Além disso, o fluxo de água pela descontinuidade segue a lei cúbica. Oda (1985) conclui que o tensor de permeabilidade intrínseca equivalente pode ser obtido a partir de um tensor, denominado tensor de descontinuidades, P_{ij} , dependente somente das propriedades geométricas das descontinuidades: da forma, da persistência, da orientação e da abertura. Esse tensor é obtido pela equação a seguir:

$$[P] = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^\infty \int_0^\infty \int_\Omega d^2 e_h^3 \{n_i\} \{n_j\} E(n, D, e_h) d\Omega dr dt \quad (2.15)$$

Onde,

P = consiste no tensor de descontinuidades;

ρ é a densidade volumétrica de descontinuidades;

n_i e n_j = representam as componentes do vetor normal, n , ao plano;

Ω = é ângulo de variação de n ; e

$E(n, d, e_h)$ = é em uma função que engloba as densidades de probabilidade de cada uma das variáveis: orientação, diâmetro e abertura.

A relação do tensor de descontinuidades com o tensor de permeabilidade intrínseca equivalente é dada pela equação a seguir:

$$[k^d] = \lambda([P_{kk}][I] - [P]) \quad (2.16)$$

Onde,

k^d = consiste no tensor de permeabilidade intrínseca equivalente;

$\lambda =$ é uma constante entre 0 e 1/12; e

$I =$ é a matriz identidade.

Zhang *et al.* (1996) propuseram também um método para obter o tensor de condutividade hidráulica equivalente para um meio contínuo a partir do fluxo pelas descontinuidades, conforme as equações 2.17 a 2.20. O método é baseado no princípio da superposição, ilustrado na Figura 2.24, é de uso bastante restrito, porém simples.

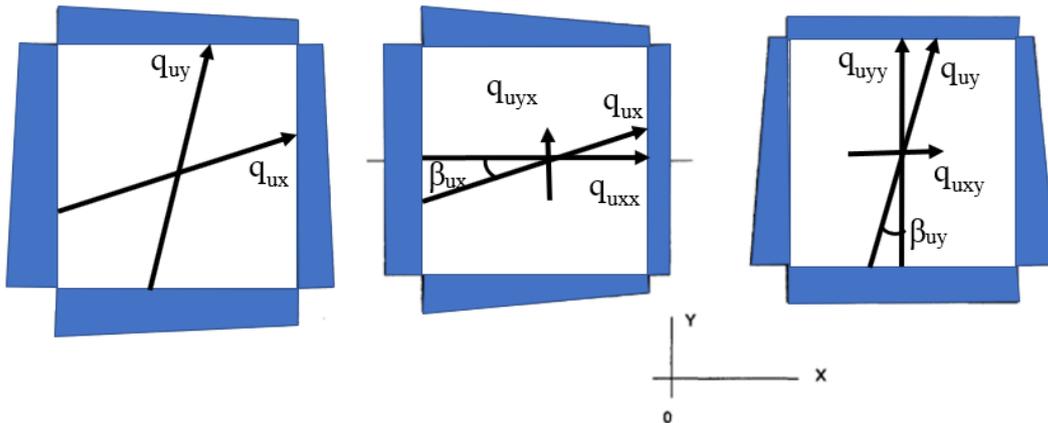


Figura 2.24 – Princípio de superposição, adaptado de Zhang *et al.* (1996).

$$q_{xx} = q_{ux} \cos^2 \beta_{ux} + q_{uy} \sin^2 \beta_{uy} \quad (2.17)$$

$$q_{yy} = q_{uy} \cos^2 \beta_{uy} + q_{ux} \sin^2 \beta_{ux} \quad (2.18)$$

$$q_{xy} = -q_{yx} = q_{uy} \sin \beta_{uy} - q_{ux} \sin \beta_{ux} \cos \beta_{ux} \quad (2.19)$$

$$\{q\} = [K]\{\Delta h\} \quad (2.20)$$

Onde,

q = representa a vazão específica;

q_{xx} = é a componente x da vazão específica para gradiente no eixo x;

q_{ux} = consiste na vazão específica pela descontinuidade na direção do eixo x;

q_{uy} = representa a vazão específica pela descontinuidade na direção do eixo y;

q_{yy} = é a componente y da vazão específica para gradiente no eixo y;

q_{xy} = consiste na componente x da vazão específica para gradiente no eixo y;

q_{yx} = representa a componente y da vazão específica para gradiente no eixo x;

β_{ux} = é o ângulo entre a descontinuidade na direção x e o eixo x; e

β_{uy} = consiste no ângulo entre a descontinuidade na direção y e o eixo y;

A relação entre a permeabilidade intrínseca e a condutividade hidráulica é dada pela equação 2.21 (Azevedo *et al.*, 2018).

$$K = \frac{g}{v} k \quad (2.21)$$

Onde,

K= é a condutividade hidráulica; e

k= representa a permeabilidade intrínseca do meio.

Min *et al.* (2004) obtiveram o volume elementar representativo estocástico para um determinado maciço rochoso com orientação das descontinuidades altamente variável e avaliaram o tensor de permeabilidade intrínseca. Para tanto, simularam as propriedades geométricas das descontinuidades com a rede de fraturas discretas. Os autores geraram 10 modelos aleatórios em grande escala, 300 m por 300 m, dos quais foram extraídos 12 modelos em escala menor com tamanho variando de 0,25 a 10 m. Min *et al.* (2004) obtiveram os tensores de permeabilidade intrínseca por meio da simulação do fluxo de água em meio descontínuo, pela lei cúbica. Foram aplicadas as condições de contorno de gradiente constante nos eixos x e y. Com base nas equações 2.14 e 2.21, conhecidas as vazões e o gradiente hidráulico, foram obtidas as permeabilidades intrínsecas. Os modelos foram rotacionados na sequência em intervalos de 30 graus, para a obtenção da permeabilidade intrínseca direcional. Os resultados obtidos foram plotados em um diagrama polar, para observar se o tensor tinha a característica de uma elipse, como mostrado na Figura 2.25.

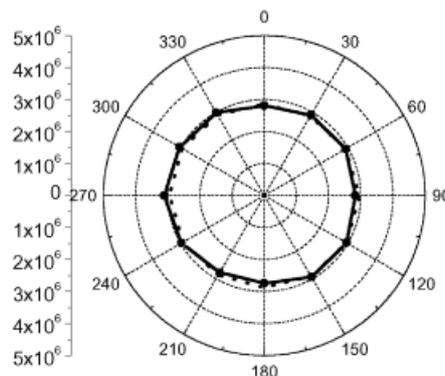


Figura 2.25 – Permeabilidade direcional estimada por Min *et al.* (2004).

Para He *et al.* (2012), o método de Oda permite obter uma solução analítica para o tensor de permeabilidades intrínsecas quando as descontinuidades puderem ser agrupadas em conjuntos com aberturas constantes, espaçamento uniforme e direção dominante. No entanto, os autores consideram que essa situação é muito restrita, e é necessária uma maior atenção à conectividade das descontinuidades. Para tanto, propuseram um coeficiente de correção. Este é determinado pela combinação de análise de fluxo com método dos elementos finitos, ensaios *packer* e um algoritmo de rede neural artificial para retroanálise (He *et al.*, 2012).

Chen (2020) calculou a permeabilidade intrínseca equivalente para um maciço rochoso fraturado com matriz porosa. Chen (2020) gerou diversas redes de fraturas discretas e as dividiu em células. De modo semelhante a Zhang *et al.* (1996), ele obteve as permeabilidades intrínsecas para cada célula, ilustrado na Figura 2.26.

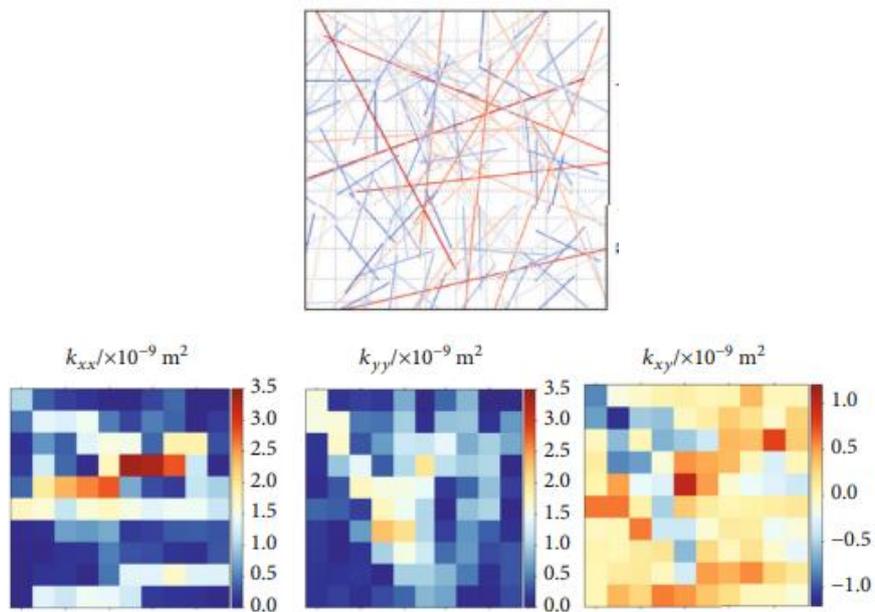


Figura 2.26 – Transformação da rede em células com as respectivas condutividades hidráulicas (Chen, 2020).

A permeabilidade intrínseca do modelo foi obtida com a permeabilidade intrínseca média de cada célula com a equação 2.21 (Chen, 2020):

$$\bar{k}' = \frac{\sum_{n=1}^{N_m} \left(\frac{k_i}{k_m} \right)}{N_m} \quad (2.22)$$

Onde,

\bar{k}' = é a permeabilidade intrínseca média do modelo;

k_i =representa a permeabilidade intrínseca da célula;

k_m = consiste na permeabilidade intrínseca da matriz; e

N_m = é o número total de células no modelo.

Silva *et al.* (2021) determinaram a condutividade hidráulica com base na análise topológica da malha para maciço rochoso poroso fraturado. Eles desenvolveram uma ferramenta computacional para processamento de imagens que varre a malha e registra as propriedades das descontinuidades: famílias de descontinuidades, tamanho, coordenadas, abertura das descontinuidades, a intensidade e padrão topológico das descontinuidades (quantas se encontram em cada nó). A partir disso, é gerada uma matriz binária representativa das interseções das descontinuidades.

Como hipótese simplificadora, os autores consideraram que o fluxo de água pela matriz e pelas descontinuidades são independentes. O fluxo pela matriz é simulado com o método dos elementos finitos e, pelas descontinuidades, com o método das placas paralelas. Assim, como nos trabalhos precedentes, a condutividade hidráulica equivalente foi encontrada ao simular o fluxo com gradiente constante, com medição de vazão e com a equação 2.14 (Silva *et al.*, 2021). Xiao & He (2022) também utilizaram um algoritmo para criar a malha, mas em três dimensões. O fluxo de água pela DFN foi calculado pelo método de Lattice Boltzmann (Xiao & He, 2022).

Wu *et al.* (2021) combinaram a rede de fraturas discretas com o tensor de descontinuidades de Oda com eletrorresistividade. Seu objetivo era encontrar a condutividade hidráulica efetiva do maciço rochoso fraturado, sem a necessidade de realização de testes hidráulicos.

O método consiste em gerar uma rede de fraturas discretas baseadas em imagens obtidas de furos de sondagem. Em seguida, é calculada a resistividade efetiva do modelo e comparada com a de campo. Se os valores forem suficientemente próximos, é obtida a permeabilidade intrínseca equivalente do maciço por meio do tensor de descontinuidades de Oda (Wu *et al.*, 2021).

2.3.3 INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DA REDE DE FRATURAS DISCRETAS NO FLUXO DE ÁGUA

Reeves *et al.* (2013) simularam redes de fraturas discretas com a persistência das descontinuidades seguindo uma lei de potência. Esta possui um parâmetro, “a”, que controla o tamanho das descontinuidades. Reeves *et al.* (2013) identificaram que o fluxo de água era

controlado principalmente por fraturas longas para $a=1,0$, por fraturas curtas, para $a=3,0$ e pela combinação de fraturas longas e curtas quando $a=2,0$.

Para maiores valores de “ a ”, Reeves *et al.* (2013) perceberam que era necessária uma densidade de fraturamento maior. Isso ocorre em função da redução da conectividade da malha. Para valores de “ a ” intermediários, aumentava a variabilidade da conectividade. Isso impactava o fluxo de água pela malha. As malhas com maiores discontinuidades apresentaram maior fluxo de água e maior variabilidade.

Um elemento muito importante da simulação do fluxo de água são as considerações sobre a abertura hidráulica. Sua importância decorre da lei cúbica, segundo a qual variações da abertura hidráulica alteram a vazão ao cubo (Priest, 1993). As aberturas hidráulicas das discontinuidades foram simuladas consideradas constantes ou variáveis e, ainda, correlacionadas aos tamanhos das discontinuidades ou independentes (Philipps *et al.*, 2020)

Min *et al.* (2004) utilizaram a rede de fraturas discretas para encontrar o volume elementar representativo. Para a simulação do fluxo de água, eles utilizaram uma abertura hidráulica constante. Os resultados obtidos, expostos na Figura 2.27, mostram que a permeabilidade intrínseca segue uma distribuição normal. Além disso, esses resultados evidenciam o efeito da geometria das discontinuidades e a importância do tamanho do modelo para a variabilidade dos valores de fluxo de água.

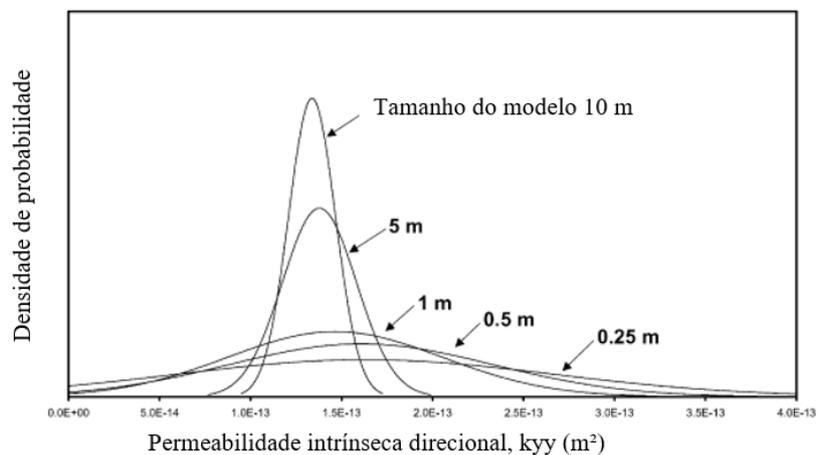


Figura 2.27 – Permeabilidade intrínseca direcional, adaptado de Min *et al.* (2004)

Reeves *et al.* (2013) calcularam o fluxo de água considerando a transmissividade das discontinuidades, propriedade decorrente da abertura hidráulica, inicialmente constante e por fim variável, seguindo uma distribuição lognormal. O fluxo de água encontrado foi maior no primeiro cenário do que no segundo.

Uma tendência parecida foi observada por Javadi *et al.* (2016). Estes encontraram um valor de fluxo de água médio maior para aberturas hidráulicas constantes do que para variáveis. Além disso, observaram, por um lado, que o fluxo de água diminuía com o aumento do desvio padrão da abertura hidráulica, conforme mostrado na Figura 2.28, e, por outro lado, que o desvio padrão do fluxo de água diminuía e a assimetria aumentava. A causa disso, de acordo com os autores, é o impacto das descontinuidades com baixa condutividade no fluxo, os quais geram caminhos de alta resistência. Como um desvio padrão elevado aumenta a ocorrência de descontinuidades com baixa condutividade, o fluxo é reduzido. Diferentemente do obtido por Min *et al.* (2004), a função de densidade de probabilidade do fluxo de água seguia uma lognormal (Javadi *et al.*, 2016).

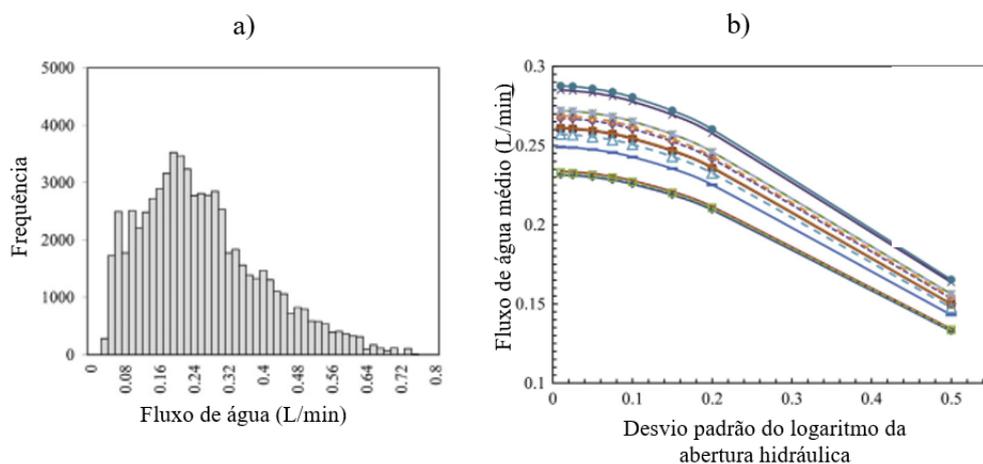


Figura 2.28 – Fluxo de água para dentro do túnel: a) frequência e b) relação entre o fluxo de água e o desvio padrão da abertura hidráulica, adaptado de Javadi *et al.* (2016).

Uma justificativa possível para a correlação entre a abertura e o tamanho das descontinuidades é a formação das fraturas e a mecânica da fratura (Lei *et al.* 2017). Com base em levantamentos de campo, Vermilye & Scholz (1995) propuseram uma relação linear para descontinuidades isoladas. Para descontinuidades muito segmentadas, encontraram que a abertura máxima era proporcional à raiz do comprimento, como mostrada pela equação 2.23.

$$A_m = C_2 l^{0,5} \quad (2.23)$$

Onde

A_m = representa a abertura máxima; e

C_2 = é uma constante que depende do tipo litológico.

Uma relação semelhante entre abertura e comprimento foi obtida por Schultz *et al.* (2013). Embora Reeves *et al.* (2013) concordem que há evidências para essa relação para descontinuidades isoladas, eles acreditam que essa relação não seja tão clara para redes de fraturas com interação entre elas. Outro elemento que pode alterar a relação entre o tamanho da descontinuidade e a abertura hidráulica, principalmente em redes de descontinuidades, são as tensões no maciço rochoso que atuam em cada descontinuidade (Lei *et al.*, 2017). Há também o intemperismo químico que altera as condições das descontinuidades (Bonnet, 2001).

Apesar das incertezas quanto à correlação entre a abertura e o tamanho das descontinuidades, a consideração de sua validade ou não gera impactos consideráveis no fluxo de água. Zhu *et al.* (2021) correlacionaram a abertura hidráulica com o tamanho das descontinuidades e obtiveram um fluxo de água médio maior do que no cenário com abertura constante.

Do mesmo modo, Hyman *et al.* (2016) observaram que a condutividade hidráulica era maior nos cenários em que a transmissividade era correlacionada com a persistência das descontinuidades. Isso ocorreria em função dos caminhos preferenciais e de alta condutividade formados pelas maiores descontinuidades.

2.3.4 USO DE PROGRAMAÇÃO ORIENTADA A OBJETOS PARA O FLUXO DE ÁGUA EM MACIÇOS ROCHOSOS FRATURADOS

O desenvolvimento e o uso do computador foram significativos para a criação de modelos de maciços rochosos fraturados (Jing, 2003). A elaboração de programas é especialmente importante para análise de fluxo de água. No entanto, programas comerciais costumam ser caros e ter funcionalidade limitada (Alghalandis, 2017). A programação permite a criação das redes de fraturas discretas (Rasmussen, 2020). Também é possível utilizá-la para a classificação dos tipos de nós em uma malha, montagem da matriz e resolução dos sistemas de equações de fluxo de água (Javadi *et al.*, 2016).

Desse modo, diversos autores utilizaram a programação para o cálculo de fluxo de água em maciços rochosos fraturados. Alghalandis (2017) criou um código livre, para representação das descontinuidades e para cálculo do fluxo de água em duas e três dimensões. Zhu *et al.* (2021) também criaram um código para calcular o fluxo de água em duas e em três dimensões e gerar as respectivas malhas mais eficientemente. Karimzade *et al.* (2017) desenvolveram um código para calcular o fluxo de água em três dimensões para dentro de um túnel. Isso foi feito igualmente por Javadi *et al.* (2016), mas em duas dimensões.

Kalbacher *et al.* (2007) utilizaram o paradigma da programação orientada a objetos para a modelagem do fluxo de água e transporte de contaminantes em maciço rochoso poroso e fraturado com método dos elementos finitos. A programação orientada a objetos baseia-se no princípio de organização do código pela informação (Robinson, 2004). Este opõe-se a uma concepção procedimental do código, na qual o código é formado por comandos dados em sequência ao computador (Lafore, 2001). A programação orientada a objetos organiza as informações em classes, as quais possuem atributos e funções próprios e formam a base para a criação de objetos (Robinson, 2004). A classe corresponde à definição de um tipo de variável a partir de determinadas funções e atributos, o objeto é a declaração para o programa de uma variável pertencente a essa classe (Aguilar, 2008). Os objetos são elementos abstratos que podem representar objetos físicos, pessoas, elementos matemáticos, entre outros (Lafore, 2002). Os princípios da programação orientada a objetos são a abstração, a encapsulação, a herança e o polimorfismo. A abstração consiste na definição das principais informações para a representação de uma entidade, por exemplo um carro pode ser definido pelo tipo, pela marca, pelas partes, pelo combustível (Aguilar, 2008). Depois de abstraídos os atributos e as operações, esses são agrupados em classes, em um procedimento conhecido como encapsulação (Robinson, 2004).

A estrutura da classe em um programa com seus atributos e funções está ilustrada na Figura 2.29. A encapsulação também requer o controle do acesso aos atributos de um objeto que só pode ser feito por meio de uma interface constituída por funções específicas. Esse controle é feito por meio dos termos *private* e *public* que restringem e liberam o acesso respectivamente (Aguilar, 2008). A vantagem disso é evitar a alteração acidental dos dados e facilitar a manutenção do programa (Lafore, 2002).

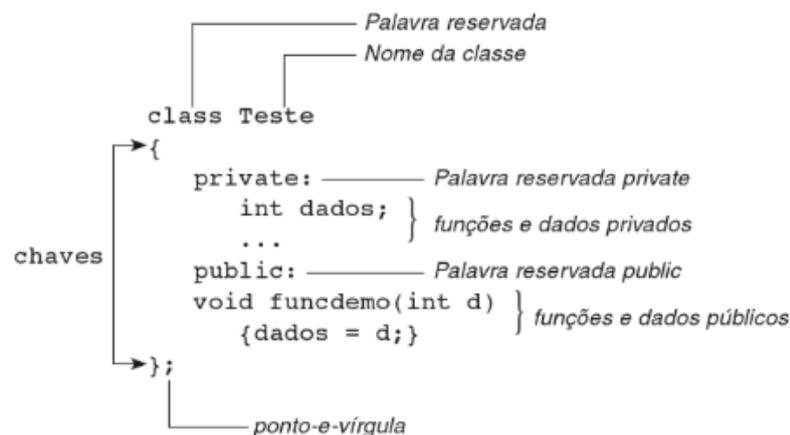


Figura 2.29 – Estrutura de uma classe (Aguilar, 2008).

A herança facilita a escrita de novos pedaços de código, por meio da criação de novas classes a partir de antigas (Robinson, 2004). Isso é feito por meio do compartilhamento de atributos e funções de uma superclasse com uma subclasse (Lafore, 2002). Os objetos de uma subclasse também são objetos de uma superclasse, porém o contrário não é necessariamente válido (Robinson, 2004). Por exemplo, uma classe cavalo pode fazer parte de uma superclasse mamífero, que por sua vez faz parte de uma outra superclasse animal, como ilustrado na Figura 2.30 (Aguilar, 2008). O poliformismo consiste em fazer uma função ter comportamentos distintos em função das circunstâncias (Lafore, 2002). Dentro do contexto da herança, o polimorfismo possibilita que uma superclasse tenha uma função genérica “abrir” e esta seja especificada para cada uma das subclasses como porta ou janela (Aguilar, 2008).

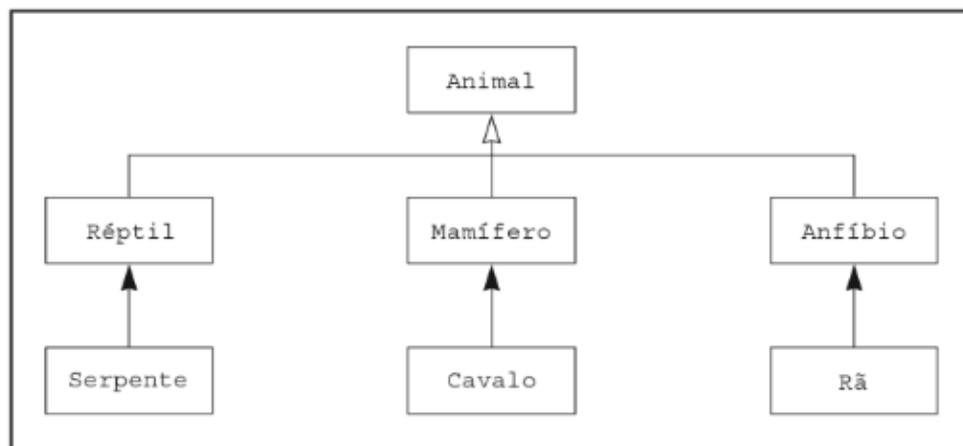


Figura 2.30 – Herança de classes (Aguilar, 2008).

Segundo Ferrari *et al.* (2016) e Wang *et al.* (1999), a programação orientada a objetos favorece a leitura, a manutenção e o reuso do código. A herança permite a organização, em um sistema de classes, e a reutilização do código. O polimorfismo facilita a utilização do código pelo usuário, pois lhe permite programar de modo mais abstrato, sendo responsabilidade do compilador a tarefa de escolher o uso adequado do método (Ferrari *et al.*, 2016). Assim, a programação orientada objetos requer um rigor maior do que a programação procedimental e um cuidado maior do programador com a gestão e organização da informação (Gil & Bugeda, 2001). A organização estruturada do código é importante para modelos de fraturas discretas que necessitam de uma grande quantidade de dados com características determinadas estatisticamente (Kalbacher *et al.*, 2007).

2.4 DRENAGEM DE ÁGUA EM MACIÇO ROCHOSO FRATURADO

Nesta seção, apresentam-se os sistemas de drenagens existentes e as recomendações para o dimensionamento dos drenos. Na sequência, discutem-se estudos que fazem uso de métodos numéricos para dimensionamento de drenos. A maioria dos trabalhos encontrados utilizaram uma representação de meio contínuo, porém também há alguns com representação de meio descontínuo.

2.4.1 SISTEMAS DE DRENAGENS E RECOMENDAÇÕES

A presença de água afeta a estabilidade do maciço rochoso de diversos modos. A pressão de água nas discontinuidades reduz as tensões resistentes e pode aumentar as solicitações em blocos rochosos, como em trincas de tração. Além disso, a ação da erosão pode degradar a matriz rochosa e reduzir sua resistência. Taludes ou escavações com nível de lençol freático elevado podem exigir o rebaixamento deste para garantir as condições de trabalho, o que aumenta os custos (Wyllie & Mah, 2004).

A escavação de taludes na presença de água também requer maiores cuidados. Esse é especialmente o caso da mineração, onde os custos de projeto podem ser significativos. Assim, um sistema de drenagem eficiente é necessário para evitar tanto taludes pouco inclinados e excessivamente seguros como taludes pouco seguros que gerem perdas financeiras com deslizamentos (Read & Beale, 2013).

Por esses motivos, a drenagem do maciço rochoso fraturado é uma das soluções mais empregadas para melhorar as condições de segurança. Existem diversos métodos de drenagem, como drenos horizontais profundos, poços verticais e galerias de drenagem (Wyllie & Mah, 2004). Guidicini & Nieble (1983) afirmam que a drenagem de taludes é um dos melhores métodos para melhorar a estabilidade.

Os poços verticais são furos que se realizam no maciço rochoso para bombear a água para fora e garantir o rebaixamento do nível de água no entorno (Read & Beale, 2013). Tem a vantagem de poderem ser executados e promoverem a redução do nível da água antes da escavação (Guidicine & Nieble, 1983).

Os drenos horizontais profundos, ou DHPs, são furos executados na face de um talude com uma inclinação de aproximadamente 5° acima da horizontal, onde são instalados tubos de PVC rígido perfurado (Bastos, 2006). Este é um dos métodos de drenagem mais utilizado em

encostas (Read & Beale, 2013). Os drenos funcionam por gravidade e não precisam ser bombeados (Bastos, 2006). Estes podem ser dispostos radialmente, em paralelo ou em uma combinação de ambos (Read & Beale, 2013).

As galerias de drenagem são túneis realizados no interior do maciço rochoso. Assim como os drenos horizontais profundos, as galerias funcionam por gravidade e não fazem uso de bombeamento (Read & Beale, 2013). Possibilitam a retirada de uma vazão muito maior do maciço rochoso e, caso necessário, a instalação de drenos no seu interior para aumentar a área de alcance (Wyllie & Mah, 2004). Embora essas estruturas permitam uma redução muito maior do nível da água no interior do maciço, os custos associados também são maiores e deve ser considerado o impacto da escavação do túnel na estabilidade dos taludes (Moraes, 2017). As galerias e os outros tipos de sistemas de drenagem estão ilustrados na Figura 2.31.

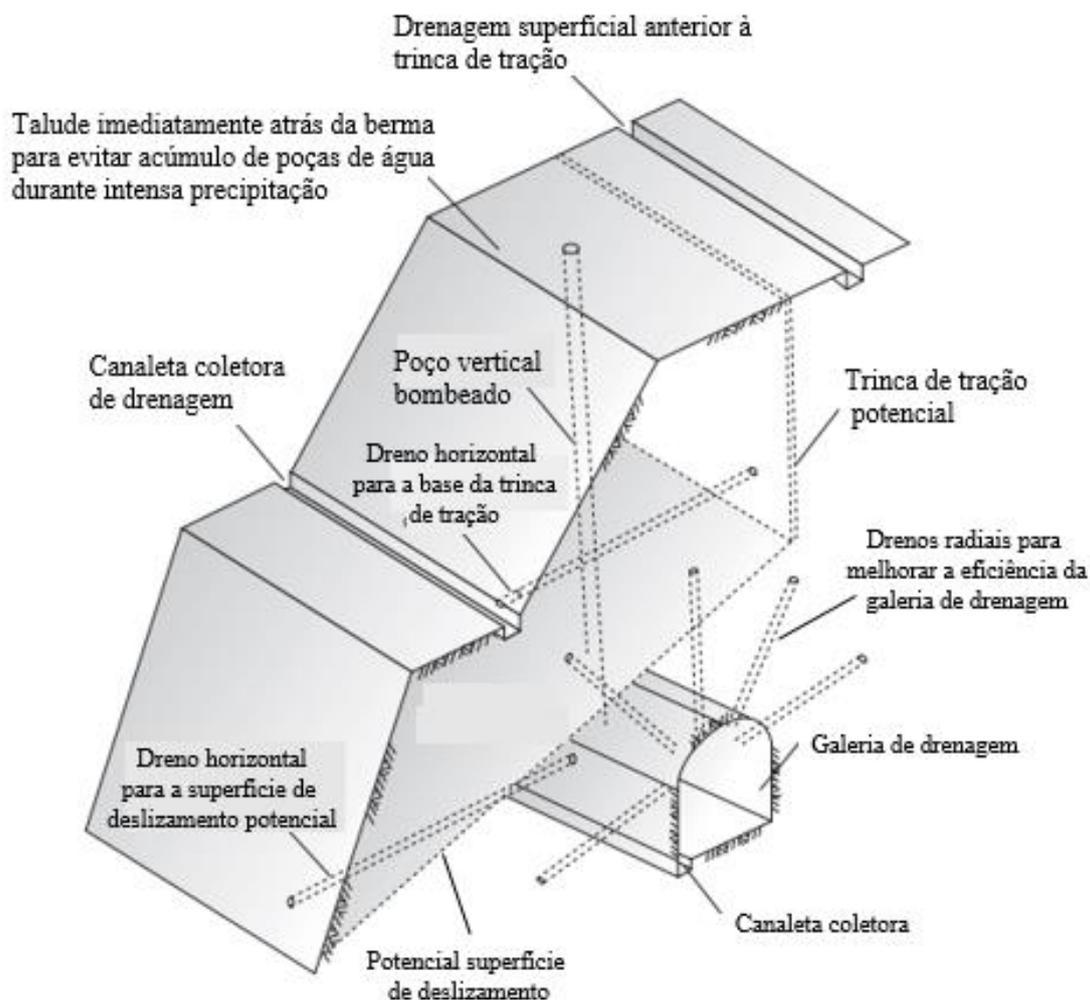


Figura 2.31 – Sistemas de drenagem para um talude, adaptado de Wyllie & Mah (2004).

Apesar da importância da drenagem para os maciços rochosos autores como Wyllie & Mah (2004) e Pohll *et al.* (2013) reconhecem que não há um método universal para o dimensionamento de um sistema de drenagem com drenos horizontais profundos. Esse costuma ser feito por meio de orientações e do controle piezométrico do nível da água. Segundo Pohll *et al.* (2013), grande parte das pesquisas de sistemas de drenagem eram voltadas para a irrigação com taludes pouco íngremes e tinham caráter qualitativo. O projeto de drenos era baseado mais na experiência do que em análises numéricas (Pohll *et al.*, 2013).

Algumas das orientações existentes são o espaçamento dos drenos a distâncias regulares (Guidicini & Nieble, 1983). Entretanto, Widodo *et al.* (2018) consideram que o espaçamento constante entre os drenos gera drenos pouco eficientes e não econômicos. Wyllie & Mah (2004) dão como diretriz espaçamento entre os drenos de 3 a 10 metros e comprimento dos drenos entre a metade e um terço da altura do talude.

No contexto de cavas de mineração, Read & Beale (2013) não fornecem valores predefinidos de comprimento para os drenos. Segundo os autores, a escolha do comprimento dos drenos deve ser feita com base na hidrogeologia, podendo atingir centenas de metros. Além disso, os drenos mais longos são geralmente mais eficientes. Os drenos devem ser instalados de modo a intersectar as feições geológicas mais importantes para o fluxo de água e o maior número de descontinuidades. Assim, é recomendado que os drenos sejam orientados perpendicularmente às principais descontinuidades (Read & Beale, 2013).

Segundo Wyllie & Mah (2004), o projeto racional de sistemas de drenagem é possível. Para isso, é determinante o conhecimento das condições de fluxo de água pelo maciço, principalmente acerca da pressão de água e da condutividade das descontinuidades. A elaboração de modelos hidrogeológicos para avaliação do fluxo de água também pode utilizar modelos de meio contínuo ou modelos de meio descontínuo (Read & Beale, 2013).

2.4.2 MÉTODO COM MEIO CONTÍNUO

A abordagem de meio contínuo é utilizada para o dimensionamento de drenos em função de sua simplicidade e versatilidade. McDonald & Harbaugh (1988) citado por Pohll *et al.* (2013) desenvolveram uma fórmula para o fluxo de água para os drenos baseado no método das diferenças finitas. Para um meio discretizado em células, o fluxo, baseado na lei de Darcy é dado pela equação 2.24 (Pohll *et al.*, 2013).

$$QD_{i,j,k} = CD_{i,j,k}(h_{i,j,k} - d_{i,j,k}), h_{i,j,k} > d_{i,j,k} \quad (2.24)$$

Onde,

$QD_{i,j,k}$ = representa a vazão do dreno na célula (i,j,k),

$CD_{i,j,k}$ = consiste na condutância de uma célula para outra,

$h_{i,j,k}$ = é a carga hidráulica na célula; e

$d_{i,j,k}$ = representa a elevação do dreno na célula.

Com esse método, Pohll *et al.* (2013) dimensionaram os drenos para a drenagem de um talude no programa *Modflow*, o qual fornece resoluções numéricas para o problema. Como requisitos, as células devem satisfazer as condições de volume elementar representativo e é necessário calibrar a condutância do dreno para as condições transiente e estacionária. Em seguida, eles simularam várias configurações, com quantidades e tamanhos de drenos distintos, de modo a garantir a estabilidade do talude. Assim, obtiveram os mapas com a redução do nível da água, Figura 2.32 (Pohll *et al.*, 2013).

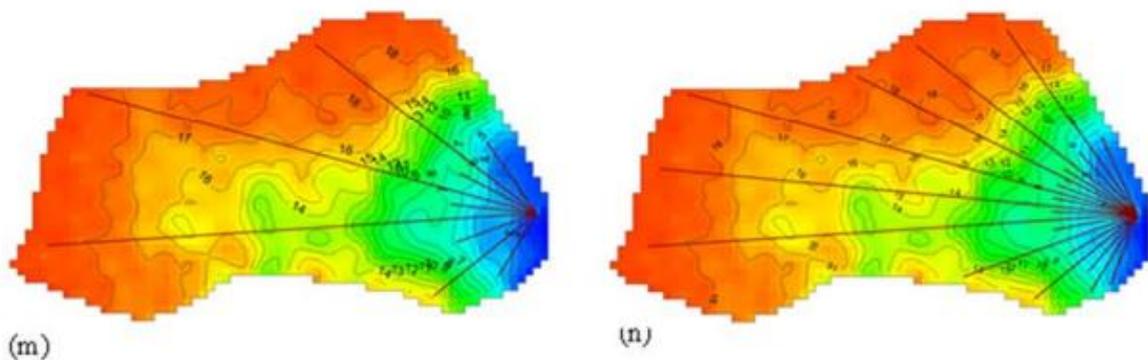


Figura 2.32 – Redução da poropressão em meio contínuo com drenos radiais (Pohll *et al.*, 2013).

A partir dessas equações, Widodo *et al.* (2018) calcularam o fluxo de água drenado e desenvolveram um algoritmo para otimizar a posição, o comprimento e o espaçamento de drenos. O algoritmo busca maior eficiência do sistema de drenagem e maior redução de poropressão, para um menor custo e menor comprimento de drenos. Ele utiliza uma abordagem de meio contínuo com o programa *Modflow* e faz diversas combinações para obter o melhor resultado. Eles concluem que o espaçamento regular entre os drenos não é a melhor alternativa (Widodo *et al.*, 2018).

Moraes (2017) analisou o efeito de túneis de drenagens e drenos radiais na estabilidade de maciços. Para taludes hipotéticos, utilizou a fórmula de Darcy e a abordagem de meio contínuo com o método dos elementos finitos para simular o fluxo de água. Ela estabeleceu diversos cenários para estudar diferentes configurações e tamanhos de drenos. O comprimento dos drenos foi mais relevante para a redução da poropressão do que a quantidade.

Moraes (2017) também fez um estudo de fluxo de água para o caso da ruptura de uma barragem na Itália, no qual foi considerado o fluxo de água pelo maciço rochoso fraturado, por um meio contínuo equivalente. A partir disso, analisou a presença de túneis de drenagens próximos das juntas de argila e verificou uma redução da poropressão e aumento do fator de segurança (Moraes, 2017).

Ismail *et al.* (2017) também analisaram um caso histórico de deslizamento, ocorrido na Malásia. Eles simularam o meio como contínuo e com cinco comprimentos de drenos distintos e sem dreno. O fluxo de água foi calculado com o método dos elementos finitos e o fator de segurança, com o método do equilíbrio limite generalizado. A partir disso, encontraram o comprimento mínimo de dreno que satisfazia o fator de segurança exigido. A partir de ensaios geofísicos, eles determinaram que havia uma grande contribuição de fluxo de água proveniente de uma camada de xisto fraturado. Dessa forma, determinaram o melhor comprimento e posição para os drenos. Estes deveriam ser instalados no pé do talude e interceptar o maciço rochoso fraturado (Ismail *et al.*, 2017).

Shaghghi *et al.* (2020) representaram a escavação do talude de uma cava de mineração. A encosta, um maciço rochoso fraturado, foi reproduzida como um meio contínuo com o método dos elementos finitos, utilizando o programa Abaqus. Para uma fratura de tração saturada no topo, foi utilizado o método dos elementos finitos estendido. Os autores estipularam diversos cenários com comprimentos de drenos e espaçamentos distintos. A partir disso, concluíram que era preferível para a eficiência do sistema comprimento de drenos maiores em vez de espaçamentos menores (Shaghghi *et al.*, 2020).

Cotesta *et al.* (2020) realizaram um modelo tridimensional da mina de Ellatzite, Bulgária, e propuseram um programa de despressurização da encosta sul, com instalação de piezômetros e de drenos horizontais profundos. Segundo os autores, os DHPs foram escolhidos por serem mais fáceis de implementar e mais eficientes do que os poços verticais e mais baratos do que as galerias subterrâneas. No entanto, antes da instalação deve ser feita a avaliação da eficiência dos drenos com o monitoramento piezométrico (Cotesta *et al.*, 2020).

Argunhan-Atalay *et al.* (2021) desenvolveram um modelo para a escavação de uma cava de mineração na Turquia. O fluxo de água foi simulado com o método dos elementos finitos e do programa SEEP/W. O modelo leva em consideração seis fases de construção e condições de fluxo transientes com e sem drenos. Argunhan-Atalay *et al.* (2021) observaram que a instalação dos drenos possibilitou a efetiva redução do nível de água, porém perceberam que houve pouca alteração do grau de saturação do meio (Argunhan-Atalay *et al.*, 2021).

2.4.3 MÉTODO COM MEIO DESCONTÍNUO

Reeves *et al.* (2013) propuseram uma metodologia para o dimensionamento de drenos. O método consiste em simular o fluxo de água em duas dimensões por uma mesma rede de fraturas discretas, gerada múltiplas vezes, para obter o comprimento e a orientação dos drenos. O objetivo do método é fazer com que o dreno intercepte em pelo menos 95% das simulações uma descontinuidade com elevado fluxo de água, como as ilustradas na Figura 2.33.

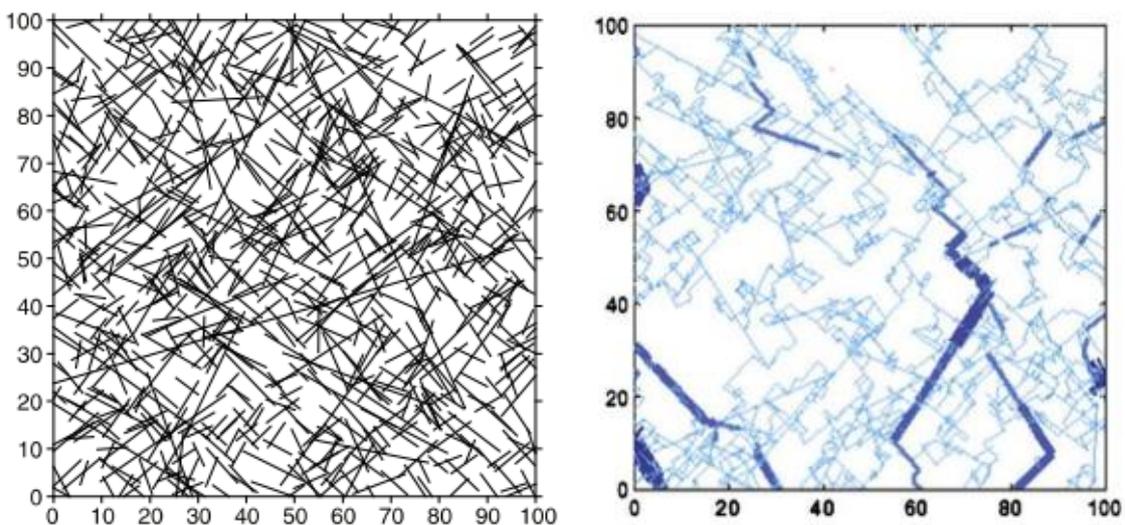


Figura 2.33 – Rede de descontinuidades em 2D e as descontinuidades com elevado fluxo de água (Reeves *et al.*, 2013).

O fluxo pelas descontinuidades foi simulado pela lei cúbica com uma diferença de carga de 100 m no eixo y para 100 redes de descontinuidade. A partir do fluxo obtido, as descontinuidades foram classificadas em três grupos: todas as descontinuidades, descontinuidades com fluxo de água e descontinuidades com fluxo dominante. O primeiro inclui todas as descontinuidades. O segundo consiste nas descontinuidades pelas quais passa um fluxo mínimo de água. O terceiro é o grupo das descontinuidades que mais contribuem para o fluxo pelo maciço rochoso. O limite

estabelecido por Reeves *et al.* (2013) para uma descontinuidade pertencer ao grupo das descontinuidades dominantes é dado pela equação 2.25. Esta baseia-se na divisão do fluxo de água que atravessa a malha, o fluxo global, pela metade do número de descontinuidades na fronteira do modelo. Estas são as descontinuidades responsáveis pela entrada e saída do fluxo na malha. Como o número de descontinuidades responsáveis pela entrada e saída do fluxo é aproximadamente o mesmo, foi feita a média entre elas.

$$F_D \geq \frac{2G_F}{N_B} \quad (2.25)$$

Onde,

F_D = é o fluxo de água por uma descontinuidade dominante;

G_F = é o fluxo de água global pela malha; e

N_B = é o número de descontinuidades pertencentes às descontinuidades com fluxo de água nas fronteiras do modelo, que estão no sentido do fluxo.

Dessa forma, a descontinuidade será dominante quando o seu fluxo de água for maior ou igual ao valor de F_D . Na sequência, Reeves *et al.* (2013) varrem a rede de descontinuidades com uma linha de varredura. A linha de varredura é iniciada paralela ao eixo x e passa pelo centro da malha. Na sequência, a linha é rotacionada de cinco em cinco graus para varrer toda a malha. É registrado o número de interseções com cada um dos três tipos de descontinuidades para cada um dos valores de orientação da linha de varredura, α_v , até completar uma volta nos modelos. Ao fazer a divisão do comprimento da linha de varredura, L_v , pelo número de interseções, n_{int} , obtém-se uma distância média de interseção, $d_{m\u00e9dia, m}$, para cada um dos três tipos de descontinuidades e para cada ângulo de orientação da linha de varredura. Foi repetido o procedimento da linha de varredura para todo o conjunto de malhas. Ao fazer a média das distâncias médias de interseção para todas as redes para um mesmo grupo de descontinuidades e uma mesma orientação, é obtida a distância média total de interseção, $d_{m\u00e9dia, total}$, para o conjunto das redes em função da orientação e do grupo de descontinuidades. O processo é ilustrado na Figura 2.34 para todas as descontinuidades. Dessa forma, foram obtidas as distâncias médias totais de interseção com os três grupos de descontinuidades: todas as descontinuidades, com as descontinuidades com fluxo e com as descontinuidades dominantes. Cada um dos grupos possuiu 72 valores de distâncias médias totais de interseção para cada um dos valores de orientação da linha de varredura adotados. Reeves *et al.* (2013) adotaram o 95

percentil do conjunto das distâncias médias para uma orientação específica obtidas em cada malha como critério para dimensionar os drenos radiais.

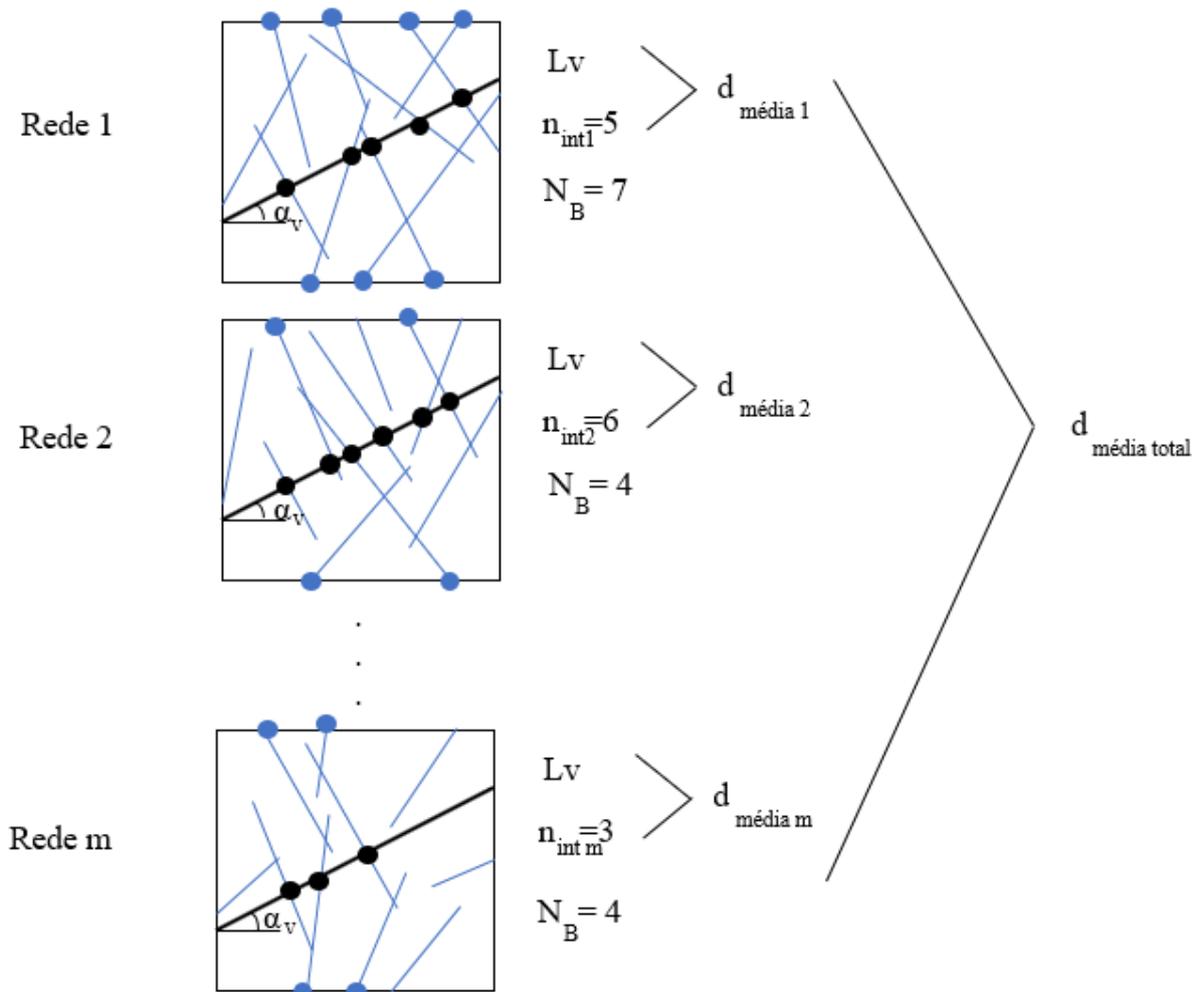


Figura 2.34 – Intersecção da linha de varredura com toda as discontinuidades e obtenção das distâncias médias de intersecção.

Assim Reeves *et al.* (2013), obtiveram a distância média total de intersecções com os três tipos de discontinuidades para o conjunto de redes de discontinuidades. A partir dos resultados obtidos para todos os ângulos, foi possível obter gráficos para analisar a distância média total para cada orientação. Foi detectado que esse valor era dependente da orientação das discontinuidades. Reeves *et al.* (2013) obtiveram um formato quadrado rotacionado para discontinuidades ortogonais paralelas aos eixos, um formato circular para orientações variáveis e um formato em losango para conjuntos ortogonais rotacionados 45 graus com diferentes intensidades de fraturamento, como mostrado na Figura 2.35. Além disso, observaram um aumento das distâncias médias totais quando é adicionado um desvio padrão à transmissividade.

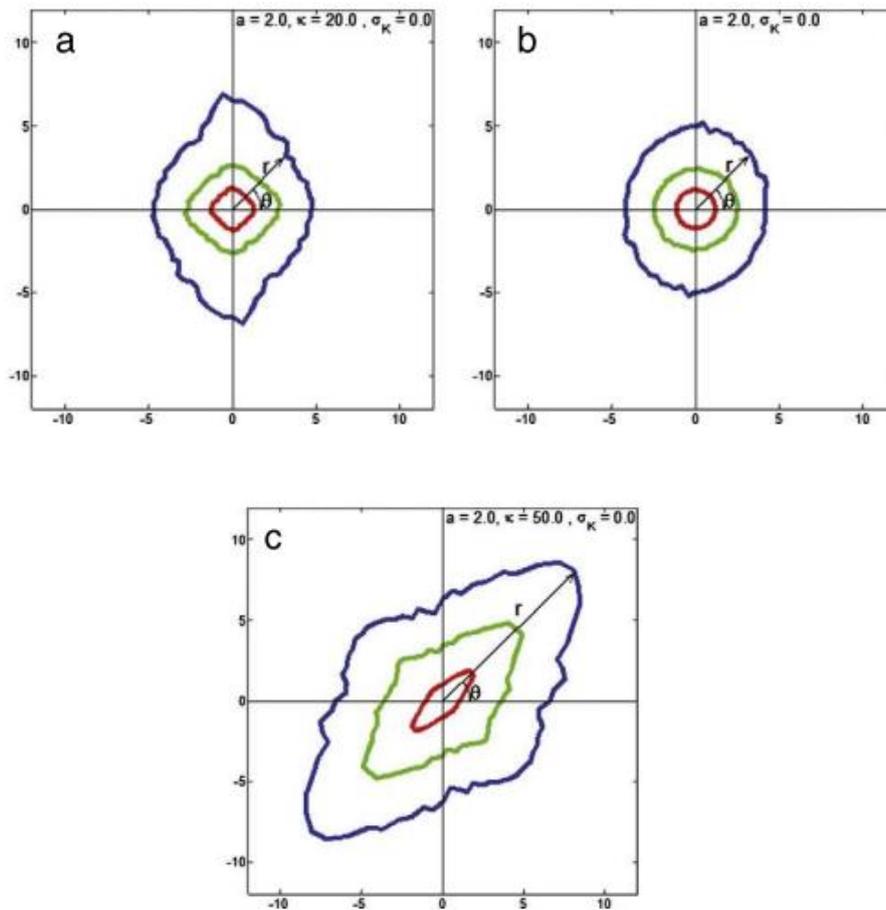


Figura 2.35 – Influência da orientação nas distâncias médias totais de interseção com os três tipos de descontinuidades.

O critério adotado por Reeves *et al.* (2013) para a seleção de dreno foi que este deveria interceptar pelo menos uma descontinuidade dominante em 95% das simulações. Desse modo, com as distâncias médias para descontinuidades dominantes e para cada rede individual, eles registraram para cada direção o quinto quantil superior. Esse corresponde ao valor a ser adotado para o comprimento do dreno em cada direção.

No entanto, Reeves *et al.* (2013) não analisaram o impacto efetivo do dreno no fluxo de água da malha. Isso foi feito por Reeves *et al.* (2014) que buscaram observar a efetividade dos drenos. Para isso, eles adotaram uma disposição de drenos radial e simularam o fluxo com e sem os drenos. O resultado das poropressões simuladas pelas malhas com e sem drenos estão ilustradas na Figura 2.36. A efetividade foi avaliada somando a diferença de carga entre todos os nós internos nas duas simulações e dividida pelo número de nós. Desse modo, Reeves *et al.* (2014) constataram que a relação entre a eficiência e o comprimento dos drenos não era linear: drenos mais compridos aumentavam a eficiência, mas esse aumento era cada vez menor. Os autores

avaliaram que o uso de drenos maiores era mais eficiente para malhas com transmissividade variável e drenos menores eram mais eficientes para malhas com transmissividade constante.

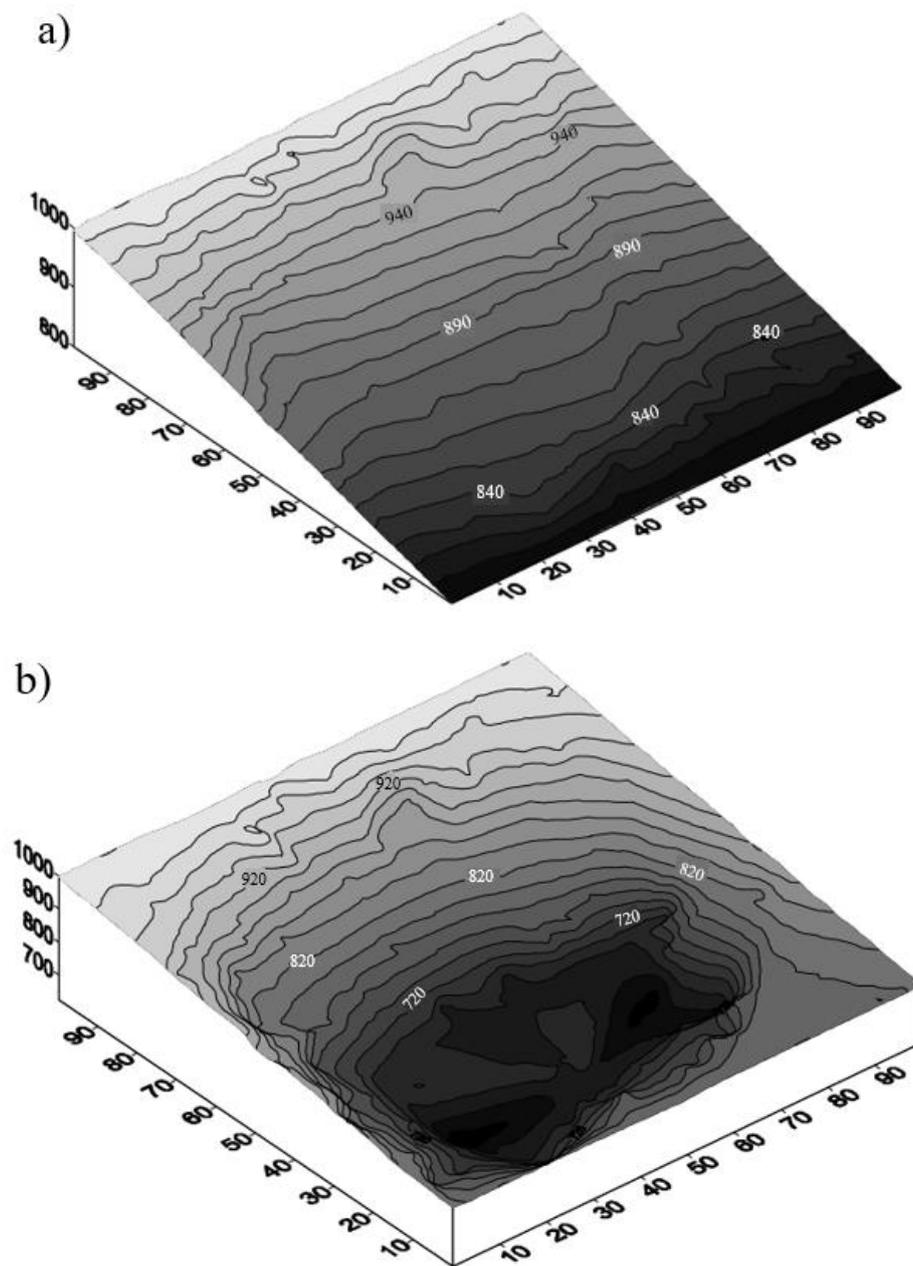


Figura 2.36 – Valores de poropressão na malha: a) sem drenos e b) com drenos, adaptado de Reeves *et al.* (2014).

3 METODOLOGIA

O objetivo desse trabalho é simular o fluxo de água com drenagem e fornecer orientações para o dimensionamento de sistemas de drenagem. Para isso, foi elaborado um código em linguagem de programação C++ para geração de redes de descontinuidades discretas e cálculo do fluxo de água com o método de Priest (1993). Esse código foi validado com base em quatro cenários de fluxo de água, descritos na seção 3.1. Após a validação, foram feitos estudos paramétricos para identificar a relação entre a média e o desvio padrão da abertura hidráulica com a média e o desvio padrão da vazão pela malha. Na sequência, foram estudadas as consequências das hipóteses normalmente assumidas para abertura hidráulica: abertura hidráulica constante, abertura hidráulica variável e abertura hidráulica correlacionada com o comprimento. Os estudos paramétricos foram apresentados na seção 3.2. Como a relação entre o fluxo na descontinuidade e a abertura hidráulica é uma lei cúbica, o impacto da abertura hidráulica no fluxo pela malha deve ser significativo.

Javadi *et al.* (2016) e Zhu *et al.* (2021) compararam somente o fluxo de água médio para abertura variável e relacionado com o comprimento, respectivamente, com o fluxo de água médio pela malha com abertura constante. Os autores também não compararam as distribuições estatísticas do fluxo de água para as diferentes hipóteses. Nesse estudo, foram utilizadas as três hipóteses em um mesmo maciço rochoso intensamente fraturado. Isso possibilitou evidenciar o impacto das hipóteses no fluxo de água e evitar que as diferenças fossem decorrentes de diferenças de malhas com distintas propriedades geométricas para as famílias de descontinuidades. A importância disso, é que o maciço rochoso fraturado está submetido a diversos processos físico-químicos que alteram as aberturas das descontinuidades, mas a simulação do fluxo com abertura constante é uma simplificação bastante utilizada. Além disso, a mecânica da fratura correlaciona o tamanho da fratura com a abertura, Em função da dificuldade de coleta de dados para corroborar os dados, compreender o impacto das hipóteses no fluxo de água pode auxiliar na escolha de modelos mais elaborados ou mais simples, mas que mantenham a representatividade, para a simulação do fluxo de água e para o dimensionamento de sistemas de drenagem.

Em seguida, o estudo do comprimento de drenos foi feito com o método de Reeves *et al.* (2013), descrito na seção 3.3. O critério para o dimensionamento é a interseção com as descontinuidades

com maiores fluxos de água. Reeves *et al.* (2013) aplicaram o método em um maciço rochoso, cujas persistências seguiam leis de potência. O método foi utilizado para obter o comprimento dos drenos e sua orientação para três maciços rochosos, cujas famílias de descontinuidades seguiam o modelo de Baecher e distribuições estatísticas distintas da lei de potência para as persistências. Além da hipótese de abertura variável utilizada por Reeves *et al.* (2013), foi utilizada também a abertura constante.

Para o maciço rochoso de Monte Seco, os resultados obtidos foram comparados com o estudo de eficiência de drenagem de Reeves *et al.* (2014) na seção 3.4 para sistemas de dreno em paralelo. Nessa fase, foram simulados os fluxos de água para diferentes orientações, comprimento e quantidade de drenos. Dessa forma, é possível compreender as relações entre as propriedades do dreno e a redução da poropressão para dimensionar sistemas mais eficientes.

3.1 VALIDAÇÃO DO CÓDIGO

Inicialmente, foi elaborado um código para criação da malha e cálculo do fluxo de água pelas descontinuidades com o método de Priest (1993). A linguagem C++ orientada a objeto foi utilizada, pois permite o uso dos conceitos de classes e objetos que organizam e simplificam a programação. As classes agrupam todas as propriedades de um elemento e as funções que atuam sobre ele. O objeto é o elemento sobre o qual incide determinada análise, fórmula, função, entre outros. A vantagem dessa forma de programar é que é possível evitar repetir linhas de códigos, pois ela permite o acesso rápido a todas as funções de uma classe. Assim, não é necessário reescrever a função para cada objeto criado dentro de uma classe, basta fazer referência à função desejada. Por isso, isso é um método de programação mais eficiente.

Para validação, o código foi testado em quatro problemas de fluxo de água. O primeiro consiste no cálculo do fluxo de água por uma malha simples com duas descontinuidades, mostradas na Figura 3.1. São duas retas simples, que se cruzam a 45 graus. Os nós 2 e 4 possuem uma carga hidráulica de 10 m, o nó 1 de 20 m e o nó 3 de 0 m. As propriedades geométricas das descontinuidades eram conhecidas; o objetivo desejado era obter os fluxos de água. Pelo princípio da superposição descrito em Zhang *et al.* (1996), o problema podia ser simplificado em um cálculo de fluxo de água por duas descontinuidades separadas. Como os nós 2 e 4, possuíam a mesma carga hidráulica era fácil determinar que não deveria haver fluxo de água por essa descontinuidade e que a carga hidráulica no nó 5 deveria ser igual a 10 metros. Assim, para validar o código bastava confirmar essa observação e que o fluxo de água pela

descontinuidade 1-5 e 5-3 era o mesmo que o obtido pela lei cúbica de Snow (1965) com valores de 1 m, 9,81 m/s² e 1·10⁻⁶ m²/s para a espessura do modelo, a aceleração da gravidade e a viscosidade cinemática da água, respectivamente.

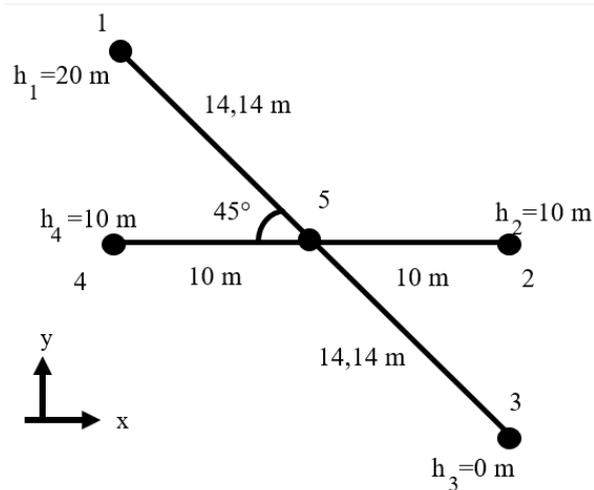


Figura 3.1 – Malha 1 para validação do código

O segundo e terceiro problemas testaram o código em duas malhas ortogonais, uma isotrópica e outra anisotrópica, ilustradas nas Figuras 3.2b e 3.2c, respectivamente. Foi aplicada uma diferença de carga hidráulica de 20 m na malha no eixo y com carga hidráulica máxima, h , igual a 20 m, como mostrado na Figura 3.2a. Nas laterais da malha, a carga hidráulica reduzia progressivamente de 20 a 0 m. Novamente, o resultado das malhas é simples de ser obtido a partir do princípio da superposição. Assim, os resultados esperados eram de fluxo igual a zero para o eixo x e no eixo y, o fluxo em cada descontinuidade deveria ser igual ao fornecido pela lei cúbica. Além disso, o fluxo de água total pela malha deveria ser igual para as duas malhas e igual a quatro vezes o fluxo de água por uma única descontinuidade.

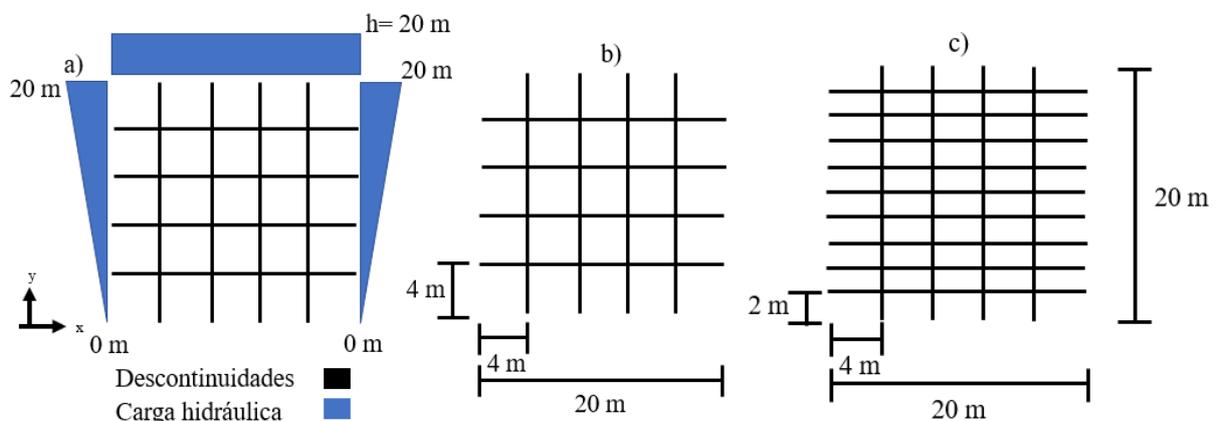


Figura 3.2 – Malhas para validação do código: a) condições de contorno inseridas, b) malha isotrópica e c) malha anisotrópica.

O quarto problema foi utilizado para verificar se a drenagem da malha aproxima-se da obtida por um meio contínuo. A malha utilizada foi a anisotrópica da fase anterior, com as mesmas condições de contorno, mas desta vez foi inserido um dreno de 9 m na parte central e inferior da malha, como exibido na Figura 3.3. Por causa da inserção do dreno, o princípio da superposição não é mais válido. No entanto, os resultados obtidos com a condutividade hidráulica equivalente devem ser próximos dos resultados de meio contínuo, pois o modelo possui dimensões que superaram o volume elementar representativo da malha analisada. Assim, foram obtidas as condutividades hidráulicas equivalentes da rede de discontinuidades da Figura 3.3 pelas equações de Zhang *et al.* (1996). Essas foram inseridas no SEEP/W do Geostudio, assim como as condições de contorno, para análise de fluxo em meio contínuo. O fluxo de água para o dreno e de saída do modelo foram comparados na sequência.

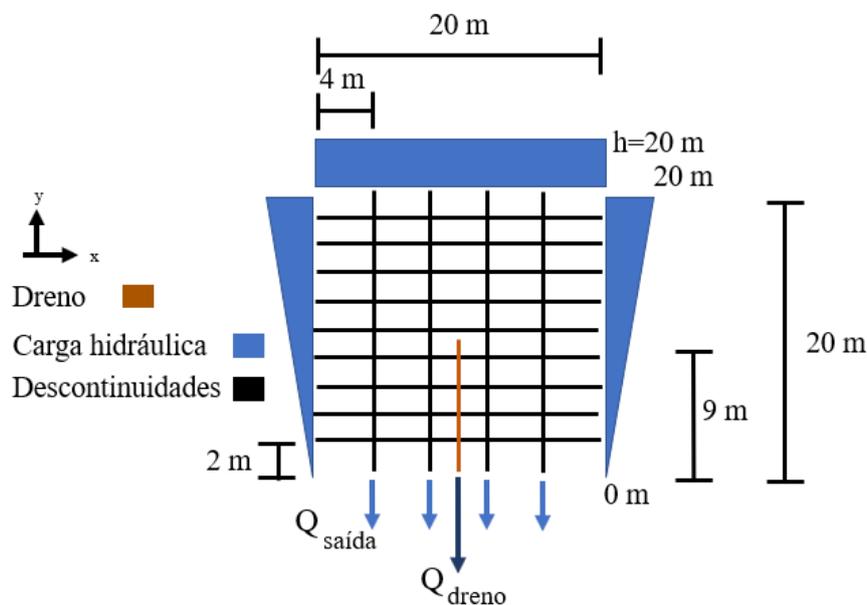


Figura 3.3 – Malha 3 para validação do código com dreno.

3.2 ANÁLISE PARAMÉTRICA

A fim de avaliar o impacto das incertezas da abertura hidráulica no fluxo de água, foram experimentados três valores de abertura hidráulica no cálculo do fluxo pela malha para três valores de desvio padrão. Também foram testadas as hipóteses de abertura hidráulica constante, variável e correlacionada com o comprimento. O maciço rochoso escolhido para essa análise foi o de Monte Seco.

O maciço rochoso de Monte Seco está localizado no Espírito Santo e é atravessado pela Estrada de Ferro Vitória-Minas da Vale. Essa ferrovia é utilizada para o transporte do minério de ferro

do quadrilátero ferrífero para o porto de Tubarão no Espírito Santo. Durante a construção dos túneis foi feita a opção por não revestir as paredes, no entanto com o passar do tempo os túneis ficaram sujeitos a queda de blocos (Cacciari, 2014). Por esse motivo, Cacciari (2014) fez um levantamento das descontinuidades com escaneamento a laser em 3D em uma região do túnel intensamente fraturada. A partir desse levantamento e da análise estatística dos dados, foram obtidas as distribuições estatísticas para a intensidade, a orientação e a persistência da família de descontinuidades (Cacciari & Futai, 2017). Essas propriedades geométricas foram utilizadas na sequência para representar o maciço rochoso no UnBlocksGen e estão listadas a seguir na Tabela 3.1 (Rasmussen *et al.*, 2019).

Tabela 3.1 – Parâmetros das descontinuidades de Monte Seco (Rasmussen *et al.*, 2019).

	Família 1	Família 2	Família 3
Modelo	Baecher	Baecher	Baecher
Rumo de máximo mergulho (graus)	110	180	258
Mergulho (graus)	48	71	65
Constante de Fisher (k_f)	50000	23	30
Distribuição probabilística	Determinístico	Lognormal	Lognormal
Raio médio (m)	200	1,45	2,04
Desvio padrão do raio (m)	0	1,04	0,89
Critério P	P10 = 1,2 m ⁻¹	P32 = 1,24 m ² /m ³	P32 = 2,12 m ² /m ³

Inicialmente, foram criadas as redes de descontinuidades para as análises de fluxo. As propriedades geométricas e a quantidade de simulações desejadas foram inseridas no programa UnBlocksGen de Rasmussen (2020). Esse programa cria descontinuidades tridimensionais descritas pelo modelo de Baecher até satisfazer um dos critérios especificados por Dershowitz & Herda (1992). Na sequência, é feita a interseção desse modelo tridimensional com um plano horizontal para a obtenção da rede em duas dimensões. O resultado para cada uma das malhas é exportado em um arquivo específico em formato vtk para visualização no programa *Paraview*.

Depois disso, foi criada a rotina no código desenvolvido para a condução da análise paramétrica desejada. Foram indicados o tamanho e a quantidade de malhas, as condições de contorno, a abertura hidráulica média e o desvio padrão. Com as informações fornecidas, o código leu os arquivos, criou os objetos para as descontinuidades e para os nós. O código verificou as interseções entre as descontinuidades, quando havia uma intercessão, um novo nó e quatro novas descontinuidades eram criadas e as duas descontinuidades iniciais eram apagadas. Cada novo nó criado recebeu um número identificação que serviu para a construção da matriz na

sequência, conforme as equações de Priest (1993). Depois disso, o código resolveu o sistema de equações para obter o fluxo de água nas discontinuidades e as cargas hidráulicas nos nós. Como o programa utilizou a lei cúbica para o cálculo do fluxo, foram consideradas as premissas desta válidas: fluxo lento e laminar, fluido newtoniano e incompressível e maciço rochoso saturado. O programa repetiu esse procedimento para cada um dos arquivos da malha e exportou os resultados de fluxo total de saída referentes a cada um deles. O processo de geração de malhas, cálculo do fluxo e obtenção de resultados está esquematizado na Figura 3.4 abaixo.

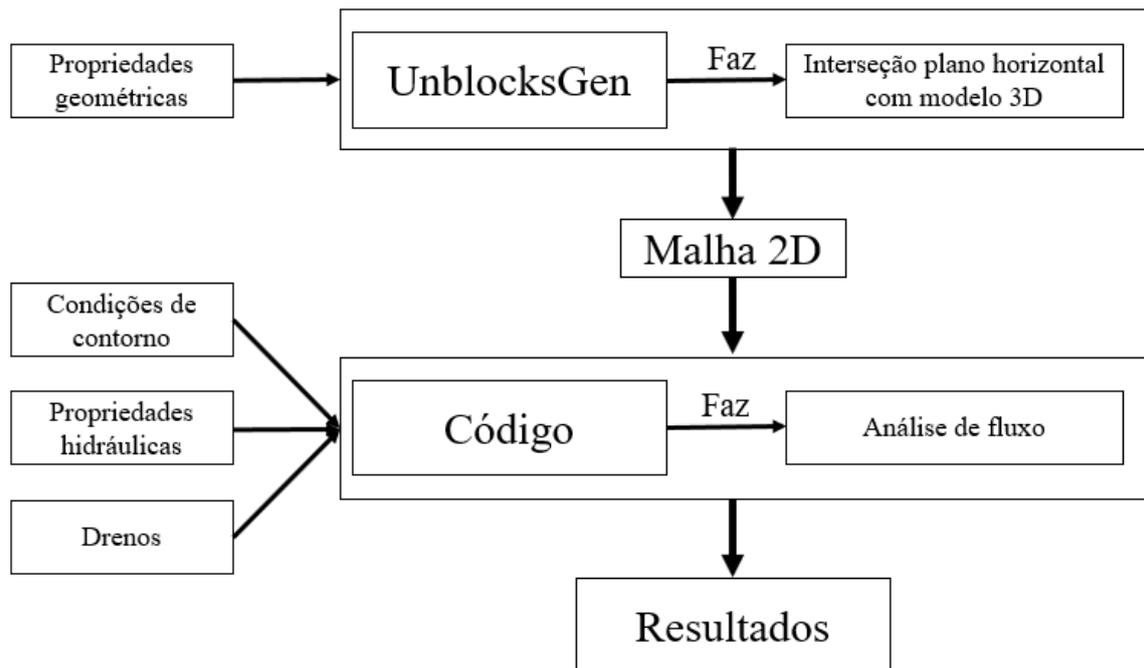


Figura 3.4 – Esquema do processo de criação de malha e obtenção de resultados

Esse procedimento foi o utilizado para a criação de malhas e cálculo do fluxo de água para a análise paramétrica. Foram criados no programa UnBlocksGen 100 modelos de DFN de 20 por 20 metros com base nas propriedades geométricas e estatísticas das famílias de discontinuidades da Tabela 3.2. Na sequência, foi aplicada uma diferença de carga hidráulica de 20 m no eixo y, para o cálculo do fluxo de saída da malha. O fluxo de saída foi obtido pela soma da componente do fluxo no eixo y em cada discontinuidade na fronteira inferior do modelo. Na Figura 3.5, está ilustrada a primeira malha DFN gerada, com as três famílias de discontinuidades, as condições de contorno para o fluxo de água e o fluxo de saída.

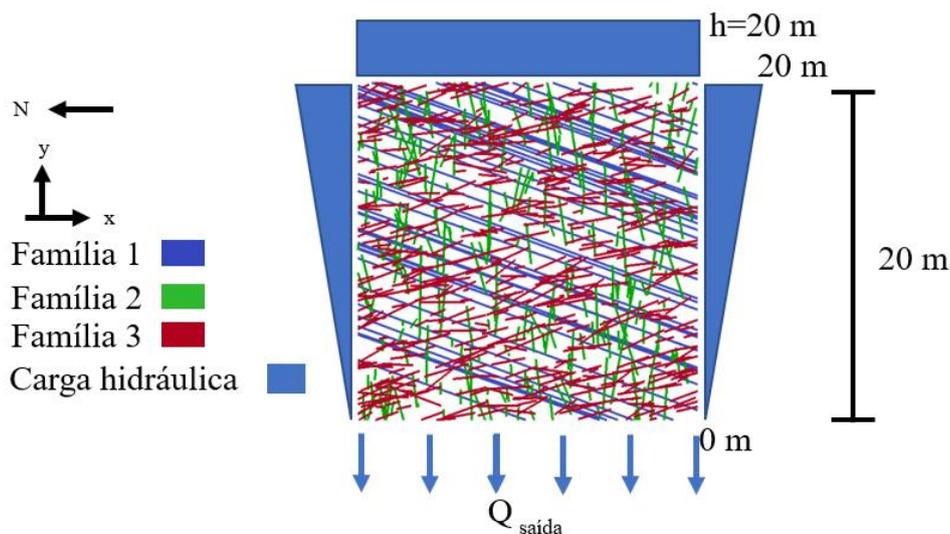


Figura 3.5 – Rede de descontinuidades para o maciço de Monte Seco com as condições de fronteira e o fluxo de saída para a análise paramétrica.

A importância de usar uma grande quantidade de redes de descontinuidades decorre das incertezas relacionadas à geometria das descontinuidades. As incertezas provêm da dificuldade para coleta de dados verificada na revisão bibliográfica. Por isso, simular um número maior de malhas deve fornecer resultados mais representativos. Do mesmo modo que para a geometria das descontinuidades, pode haver dificuldades na determinação da abertura hidráulica. Assim, é necessário conhecer melhor o impacto delas no fluxo para tomar melhores decisões.

Para isso, foram adotados valores de abertura hidráulica de 0,5 mm, 1 mm e 2 mm para todas as famílias de descontinuidades em três cenários distintos. Inicialmente, a abertura foi considerada constante. Em seguida, foi adotada uma distribuição lognormal com desvios padrões de 0,5 mm e de 1 mm para os três valores de abertura hidráulica média. Assim, foi obtido um valor de fluxo de água médio pela malha para nove cenários com as combinações de abertura hidráulica média e de desvio padrão, incluindo o desvio igual a zero. Cada cenário foi simulado com as mesmas cem malhas.

Além disso, foi analisado o efeito na dispersão dos resultados do fluxo de água das hipóteses comumente utilizadas acerca da abertura hidráulica. Estas são abertura hidráulica constante, abertura hidráulica variável e abertura hidráulica correlacionada com o tamanho da descontinuidade. Para essa última, foi utilizada a relação de Vermilye & Scholz (1995), equação 2.23, com a constante $C_2 = 1,8 \cdot 10^{-3}$ obtida pelos autores. Adotou-se novamente a distribuição lognormal com média e desvio padrão iguais a 0,5 mm para a abertura hidráulica variável. Dessa vez, foram realizadas 200 simulações para cada uma das hipóteses e foram gerados

gráficos de densidade de probabilidade com os valores de fluxo de água de saída de cada uma das simulações. Os resultados observados na literatura apontam para valores de fluxo distintos em função da hipótese adotada. Por um lado, Javadi *et al.* (2016) e Reeves *et al.* (2013) obtiveram valores de fluxo menores para a abertura hidráulica variável em relação à abertura hidráulica constante. Por outro lado, Hyman *et al.* (2016) e Zhu *et al.* (2021) obtiveram valores maiores de fluxo de água para abertura hidráulica correlacionada com o comprimento em relação ao fluxo de água com abertura constante.

Um outro impacto também observado foi na distribuição de probabilidade do fluxo de água. Min *et al.* (2004) obtiveram uma distribuição normal para a permeabilidade intrínseca com abertura constante. É possível afirmar que uma variável aleatória com distribuição normal multiplicada por uma constante forma uma outra variável aleatória com distribuição normal (Ang & Tang, 2007). Como a relação entre a permeabilidade intrínseca e o fluxo de água ocorre por meio de constantes: aceleração da gravidade e viscosidade cinemática, na equação 2.21, e carga hidráulica e área da seção de saída na equação 2.14, é possível inferir que o fluxo de água também seguiu uma distribuição normal. No entanto, Javadi *et al.* (2016) obtiveram uma distribuição lognormal para abertura variável, a mesma adotada para a abertura hidráulica. Com os resultados obtidos, foi feito o teste do qui-quadrado para verificar qual distribuição, normal ou lognormal, representa melhor o fluxo de água para cada hipótese.

3.3 ESTUDO DOS MACIÇOS ROCHOSOS

Reeves *et al.* (2013) desenvolveram um método para dimensionar drenos radiais com base na interseção com descontinuidades com elevado fluxo de água. O método foi aplicado em um maciço rochoso com duas famílias de descontinuidades, cujas distribuições de persistências seguiam uma lei de potência, uma família com direção média de +45° com relação ao eixo y e outra com -45° com relação ao eixo y, mostradas na Figura 2.33. O objetivo nessa etapa foi obter os comprimentos de dreno para maciços rochosos que seguiam o modelo de Baecher, possuíam distribuições de persistência distintas da lei de potência e diferentes configurações geométricas. Esse método foi aplicado nos seguintes maciços rochosos fraturados de Monte Seco, Tabela 3.1 (Rasmussen *et al.*, 2019); El Teniente, Tabela 3.2 (Hekmatnejad *et al.*, 2021); e Yangfanggou, Tabela 3.3 (Cui *et al.*, 2020). Também foi utilizada a abertura hidráulica, no lugar da transmissividade, como parâmetro hidráulico para o cálculo do fluxo de água.

A mina de El Teniente está localizada na cordilheira do Andes no Chile a 120 km de Santiago e pertence à Corporação Nacional do Cobre. A mina possui uma extensão de mais de 3000 km de galerias e está em operação desde 1905 (Hekmatnejad *et al.*, 2021). Hekmatnejad *et al.* (2021) conduziram um estudo para avaliar a presença de blocos suspensos em um complexo máfico da mina de El Teniente, denominada de mina Esmeralda. Para isso, os autores determinaram as propriedades das descontinuidades baseadas em furos de sondagens, afloramentos nas paredes e em análises estatísticas para dois blocos distintos. Os resultados do segundo, por ter sido o mais fraturado, foram utilizados nesse trabalho e estão mostrados na Tabela 3.2 abaixo. Hekmatnejad *et al.* (2021) forneceram somente um valor médio de P_{32} para todos os conjuntos de descontinuidades, mas deu também a contribuição percentual de cada um deles. Como os autores atribuíram a mesma distribuição do raio das descontinuidades para todos os conjuntos, o valor do P_{32} individual foi obtido multiplicando o P_{32} médio pela contribuição de cada um dos conjuntos.

Tabela 3.2 – Parâmetros das descontinuidades de El Teniente (Hekmatnejad *et al.*, 2021).

	Família 1	Família 2	Família 3
Modelo	Baecher	Baecher	Baecher
Rumo de máximo mergulho (graus)	164	56	303
Mergulho (graus)	43	43	29
Constante de Fisher (k_f)	7,21	7,62	7,44
Distribuição probabilística	Lognormal	Lognormal	Lognormal
Raio médio (m)	2,556	2,556	2,556
Desvio padrão do raio (m)	0,448	0,448	0,448
Critério P_{32} (m^2/m^3)	$P_{32} = 1,11$	$P_{32} = 1,31$	$P_{32} = 1,23$

O maciço rochoso de Yangfanggou está localizado no rio Yalong, no sudoeste da China, e serve de suporte para a ombreira direita da barragem hidroelétrica de Yangfanggou. Esta é uma das treze maiores usinas hidrelétricas da China e está classificada como de grande importância. O maciço é composto essencialmente por granito e possui quatro conjunto de descontinuidades. Os levantamentos foram feitos por meio de fotogrametria da face do talude e com o uso do programa *3DM Analyst* foram obtidos os conjuntos das descontinuidades com as orientações, densidade volumétrica e diâmetro das descontinuidades (Cui *et al.*, 2020).

Tabela 3.3 – Parâmetros das descontinuidades de Yangfanggou (Cui *et al.* 2020).

	Família 1	Família 2	Família 3	Família 4
Modelo	Baecher	Baecher	Baecher	Baecher
Rumo de máximo mergulho (graus)	106	200	356	267
Mergulho (graus)	62	55	72	83
Constante de Fisher (k_f)	56,9	54,9	40,4	39,6
Distribuição probabilística	Exponencial	Exponencial	Exponencial	Exponencial
Raio médio (m)	2,165	3,155	3,685	2,61
Critério P30 (descontinuidades/m ³)	0,009971	0,003789	0,005086	0,0101786

Nesta etapa, foram geradas 200 redes de descontinuidades para cada um dos maciços no UnBlocksGen. O tamanho dos modelos gerados foram 60 por 60 metros para o maciço de Yangfanggou, 30 por 30 metros para o maciço de El Teniente e de 20 por 20 metros para o maciço de Monte Seco. A diferença entre os tamanhos foi por causa da persistência e da intensidade das descontinuidades. Por um lado, descontinuidades muito grandes para modelos pequenos formavam caminhos de fluxo com poucas descontinuidades, ou seja, as descontinuidades praticamente atravessavam todo o modelo. Por outro lado, intensidades de fraturamento elevadas exigiam um tempo computacional maior para serem criadas e para o cálculo das interseções.

Do mesmo modo que na etapa anterior e no trabalho de Reeves *et al.* (2013), foi adotada uma diferença de carga igual ao tamanho do modelo como condição de contorno. O código calculou o fluxo de água pelas malhas com a lei cúbica para cada uma das redes com uma abertura hidráulica igual a 0,5 mm para as descontinuidades em um primeiro cenário. Em um segundo cenário, a abertura hidráulica foi considerada variável com distribuição lognormal com mesma média e desvio padrão também igual a 0,5 mm. Para garantir que fossem quantidades reais, esses valores foram baseados no trabalho de Anna (1998).

Em seguida, o programa classificou as descontinuidades em descontinuidades dominantes, descontinuidades com fluxo e todas as descontinuidades. Para as descontinuidades pertencerem ao grupo das descontinuidades com fluxo foi adotado um valor mínimo de fluxo igual a $1 \cdot 10^{-11}$ m³/s. Para as descontinuidades dominantes, foi usado o mesmo critério de Reeves *et al.* (2013). O fluxo de água na saída das malhas foi calculado e adotado para o fluxo global pela malha. Depois disso, os resultados de carga hidráulica nos nós e tipos de descontinuidades foram exportados para o *Paraview* em formato *vtk* para visualização e auxílio na interpretação dos resultados.

A partir disso, o programa passou uma linha de varredura pelos modelos, que contava o número de interseções da linha com cada um dos três tipos de descontinuidades. Ao dividir o comprimento da linha de varredura pelo número de interseções, era obtida a distância média de interseção para cada um dos grupos e para determinada orientação da linha. Foram definidas 72 orientações de linha, iniciando em paralelo ao eixo x e rotacionando de cinco em cinco graus no sentido anti-horário. Dessa forma, o procedimento era repetido e obtinha-se uma distância média de interseção para cada ângulo e para cada grupo de descontinuidades até completar uma volta na malha. Os resultados das distâncias médias para cada ângulo e malha foram exportados em formato texto, para a geração dos gráficos no Excel. Nesse programa, foram feitas as médias das 200 simulações das distâncias médias de interseção com os três grupos de descontinuidade para cada ângulo de orientação da linha de varredura. Essas foram denominadas de distâncias médias totais de interseção. Foram obtidos também o décimo maior valor de distância média de interseção com as descontinuidades dominantes para cada orientação. Esse valor garantiria que as distâncias médias de interseção em 190 de 200 simulações fossem menores do que esse valor. Isso correspondia ao intervalo de confiança de Reeves *et al.* (2013) de 95% para interceptar em média uma descontinuidade dominante em 95% das simulações. Esse procedimento foi repetido para os três maciços rochosos para os cenários de abertura hidráulica constante e variável.

3.4 DRENAGEM

Reeves *et al.* (2013) elaborou o seu método para uma disposição radial dos drenos. Nessa etapa, foi verificado se o método também se aplicava para a disposição de drenos em paralelo. Isso foi feito para o maciço rochoso de Monte Seco, que forneceu valores de comprimento de drenos para todas as direções. Para tanto, foram utilizadas cinquenta malhas da etapa anterior e foram simulados o fluxo de água pela malha com e sem dreno, com abertura hidráulica constante ou variável e nas mesmas condições de contorno das etapas anteriores. O dreno de 10 m de comprimento foi posicionado no centro inferior da malha e orientado em 90, 75, 60 e 45 graus com relação ao eixo x e considerado a pressão atmosférica. A partir disso, foi verificado qual orientação gerava a maior redução de carga hidráulica na malha e qual o impacto na vazão do dreno. A eficiência do sistema de drenagem foi avaliada com a fórmula proposta por Reeves *et al.* (2014): a diferença entre a carga hidráulica nos nós na simulação sem dreno e com dreno dividida pelo número de nós da simulação sem drenos. Foram obtidas as eficiências e as vazões nos drenos para as cinquenta redes de descontinuidade, para as quais foram calculadas as

médias da eficiência e das vazões para cada ângulo de orientação. As malhas com o dreno foram exportadas para o *Paraview* para melhor visualização dos resultados.

Com a melhor orientação de dreno encontrada, buscou-se uma relação entre o comprimento do dreno e a eficiência da drenagem e entre o comprimento e a vazão do dreno. Novamente, foram realizados os cálculos de fluxo de água para as mesmas cinquenta redes de descontinuidades e condições de contorno com abertura constante e variável. Foram testados comprimentos de drenos de 6, 8, 10, 12 e 14 m. Também foram encontrados os valores de eficiência e de vazão no dreno para cada uma das malhas e cada um dos comprimentos com abertura constante e variável. A partir dos resultados para malhas individuais foram obtidas as médias das eficiências e das vazões de todas as malhas para cada um dos cenários.

Em seguida, foram estudados sistemas de drenagem com múltiplos drenos, para identificar se um sistema com drenos mais curtos em maior quantidade é mais efetivo que um mais longo em menor número. Foram simulados 1, 2, 3 e 4 drenos com 6, 10 e 12 metros nessa fase, apenas com abertura hidráulica constante, para as mesmas 50 malhas anteriores. Além disso, foi adotado um espaçamento constante entre os drenos. Desta vez, foram obtidas para as cinquenta redes apenas as eficiências para os três comprimentos de drenos nas quatro quantidades. Também foram calculadas as médias das eficiências das malhas para as análises e os resultados foram exportados para o *Paraview*. Todas as simulações com sistemas de drenagem estão resumidas na tabela 3.4 a seguir.

Tabela 3.4 – Resumo dos sistemas de drenagens simulados

Orientação (grau) – abertura constante e variável	90, 75, 60, 45
Comprimento (m) – abertura constante e variável	6, 8, 10, 12 e 14 m
Quantidade (drenos com 6 metros) – abertura constante	1, 2, 3 e 4 drenos
Quantidade (drenos com 10 metros) – abertura constante	1, 2, 3 e 4 drenos
Quantidade (drenos com 12 metros) – abertura constante	1, 2, 3 e 4 drenos

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os principais resultados da pesquisa. Inicialmente, apresentam-se o código em C++ elaborado e as validações realizadas. Depois disso, são descritos os resultados das análises paramétricas. Na sequência, exibem-se as análises feitas pelo método de Reeves *et al.* (2013) e os resultados de comprimento de dreno para cada um dos maciços rochosos. Por fim, são detalhadas as relações entre a eficiência do sistema de drenagem com os parâmetros dos drenos: orientação, comprimento e quantidade.

4.1 CÓDIGO COMPUTACIONAL

Nesta etapa, são descritas as classes e as funções do código computacional criado para gerar malhas e calcular o fluxo de água. Também são apresentadas as validações efetuadas para analisar o funcionamento do código.

4.1.1 ESTRUTURA DO CÓDIGO

Inicialmente, foi criado o código para resolução de problemas de fluxo estacionário em duas dimensões em linguagem C++ orientada a objetos. A programação orientada a objetos facilitou a organização do código por meio da criação de classes. As classes do código podem ser divididas em dois tipos: as que englobam os elementos da malha e as analíticas. No primeiro grupo, são incluídos os nós, as descontinuidades, os drenos e os dados geométricos. No segundo grupo, reúnem-se os cenários e as funções que permitiram realizar as análises conduzidas nesse trabalho.

A classe de nós, *Nodes*, possui como variáveis a posição geométrica, a carga hidráulica, o tipo de nó – interno ou externo -, e a identificação do nó. A classe possui as funções para exibir todas as informações dos nós contidas nas variáveis. A partir dessa classe, foram criados os objetos nós que foram utilizados para criar as descontinuidades e para efetuar o cálculo da carga hidráulica na malha. A classe está apresentada no apêndice A.1.

A classe das descontinuidades, *Discontinuities*, é formada a partir de dois nós, que localizam a descontinuidade e a conectam ao restante da malha. Isso é feito pelas variáveis índice dos nós. Além dessas, a classe possui variáveis para as constantes da aceleração da gravidade e da

viscosidade cinemática da água e todas as propriedades necessárias para a execução da equação cúbica do fluxo. Essas são a largura, a abertura hidráulica, o comprimento e a condutância. A classe também tem um identificador para as descontinuidades para a família a que pertencem, duas variáveis verdadeiro ou falso para caracterizá-las em descontinuidades com fluxo e em dominante e uma para o fluxo. Assim como para a classe dos nós, a classe das descontinuidades dispõe de uma função para exibir suas propriedades. A classe está disponibilizada no apêndice A.2.

A classe dos drenos, *Drains*, é mais simples. Esta é constituída apenas por uma linha, formada por dois pontos para localizar o dreno. Como variáveis do dreno, a classe possui uma para o fluxo total recebido e um identificador. Do mesmo modo que as outras, essa também exibe as informações relativas ao fluxo e à identificação. A classe está mostrada no apêndice A.3.

A classe dados, *Data*, faz referência às propriedades geométricas da malha, à posição das descontinuidades. Essa classe tem a função, *read_vtkfile()*, que possibilita a leitura do arquivo vtk, proveniente do UnblocksGen. Ela é responsável por transformar o formato dos dados recebidos para outro que facilite a posterior criação das descontinuidades. A classe está apresentada no apêndice A.4.

A classe cenário, *Scene*, é a mais importante, pois é a que recebe as informações da classe de dados, cria a malha, insere as condições de contorno, calcula o fluxo de água e efetua as demais análises. A classe permite a criação de um objeto cenário que possui vetores de nós, descontinuidades e de drenos, onde são armazenados os objetos das classes correspondentes. As relações de posse estão ilustradas na Figura 4.1 abaixo. Para a criação dos nós e das descontinuidades, a classe possui a função *get_vtkdata()*, mostrada no apêndice A.7. A partir disso, ela recebe o texto proveniente da classe dados e cria a malha. A função seguinte é a criação das descontinuidades, *create_discontinuities()*, a partir dela são inseridas as condições de contorno, são criados os nós e as descontinuidades da malha, são realizadas as interseções das descontinuidades entre si e com os drenos, se houver. A função de análise, *analysis()*, calcula o fluxo de água pela malha e nas descontinuidades, além de classificar as descontinuidades. A classe possui também as funções para executar as linhas de varredura das descontinuidades com fluxo e dominantes, para exibir as informações dos seus nós e das descontinuidades e exportá-los em formato texto. Finalmente, a classe dispõe das funções de exportação de arquivo em formato vtk, para facilitar a visualização dos dados no programa *Paraview*. Essas funções são *export_nodes_vtk()*, para os nós, *export_discontinuities_vtk()*,

para as descontinuidades e são *export_drains_vtk()*, para os drenos. A classe toda pode ser vista no apêndice A.5.

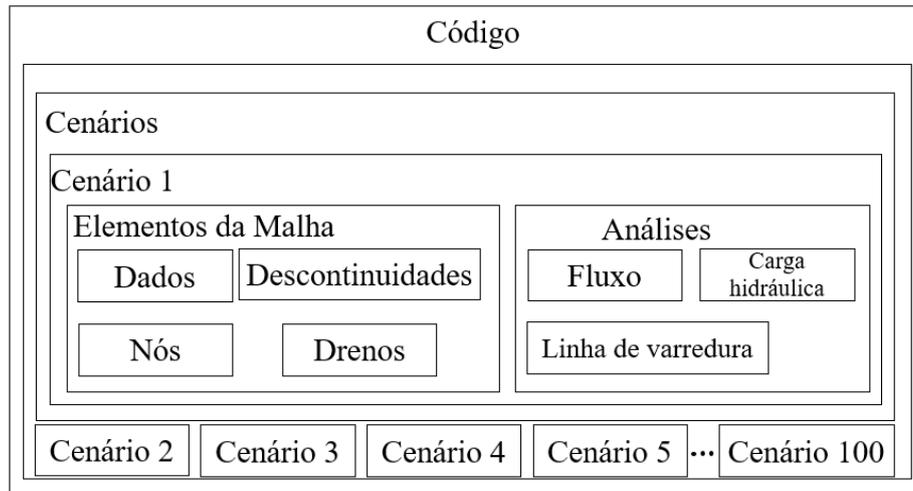


Figura 4.1 – Conjunto das classes e relações de pertencimento no código.

A classe cenários, *Scenes*, viabiliza a simulação de múltiplas malhas em um único procedimento e, a partir disso, gerar os dados que foram utilizados nas análises estatísticas. A classe possui um vetor que agrupa todos os objetos cenário criados. As funções dessa classe acessam o objeto e aplicam a função da classe cenário correspondente para todas as malhas criadas. Por exemplo, a função *scenes_get_vtkdata()*, ilustrada na Figura 4.2 abaixo, irá acessar o objeto cenário *i* do vetor de cenário, aplicará a função *get_vtkdata()* do cenário *i*, emitirá a resposta se conseguiu e repetirá a função para todos os outros objetos cenário. A classe está apresentada no apêndice A.6.

```

void scenes_get_vtkdata(){
    for(int i=0; i<=scenes.size()-1;++i){
        scenes[i].get_vtkdata();
        cout<<"Scene " << i <<" got data" << endl;
    }
}
  
```

Figura 4.2 – Exemplo da relação entre a classe cenários e a classe cenário

4.1.2 VALIDAÇÃO

A validação do código, para verificação de seu funcionamento, foi feita por meio de quatro testes de fluxo de água. O primeiro consiste no cálculo do fluxo de água por uma malha simples com duas descontinuidades. As vazões encontradas para as descontinuidades 1-5 e 5-3 foram iguais a $7,23 \cdot 10^{-6}$ m³/s e para as descontinuidades 2-5 e 5-4 foram iguais a 0 m³/s, como

ilustrado na Figura 4.3. O valor da condutância encontrado para os trechos entre os nós 1 e 5 e entre os nós 5 e 3 foram iguais a $7,23 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Para os trechos entre os nós 4 e 5 e 5 e 2, o valor da condutância foi igual a $1,02 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Além disso, foi obtida a carga hidráulica igual a 10 m para o nó 5.

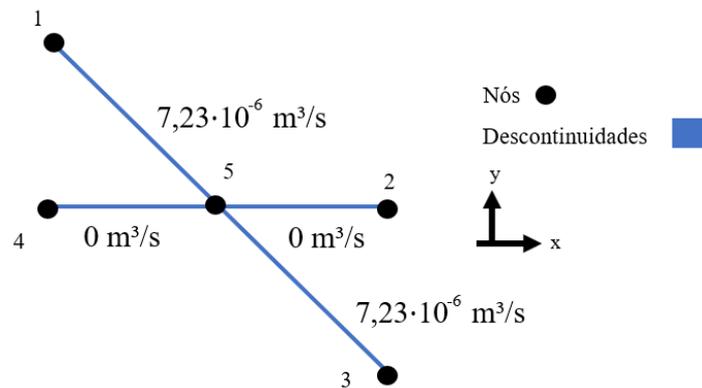


Figura 4.3 – Resultado das vazões para a primeira validação do código.

Os valores da condutância eram os esperados em função da equação 2.10. A perda de carga nas descontinuidades foi condizente com os valores de vazão e de condutância. Esses valores eram igualmente esperados resolvendo o problema pelo método de Priest (1993). Também foi possível identificar o princípio da superposição mencionado por Zhang *et al.* (1996), já que a descontinuidade 2-4 manteve a pressão, pois era esperado que essa descontinuidade tivesse vazão nula e não houvesse perda de carga. Pelo mesmo princípio, a vazão de $7,23 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ pela outra descontinuidade estava de acordo com uma perda de carga de 20 metros e um comprimento de 28,28 m. Dessa forma, o código foi aceito na primeira validação.

Na sequência, foram geradas as duas malhas ortogonais – uma isotrópica, outra anisotrópica. A Figura 4.4 mostra a queda de carga hidráulica na rede de descontinuidade. Foi possível observar redução de pressão gradual ao longo do eixo y nas duas malhas. A Figura 4.5 ilustra o fluxo de água pelas descontinuidades. Foi obtido apenas fluxo de água na direção vertical em ambos os cenários. A condutância de todos os trechos na malha isotrópica foi igual a $2,56 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ para cada comprimento de 4 metros. Esse valor de condutância foi o mesmo na malha dois para as descontinuidades com 4 metros e igual a $5,11 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ para as descontinuidades com 2 metros. O fluxo de água nos dois casos foi igual a $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ na direção do eixo y, mas em sentido contrário. O fluxo total foi igual a $4,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ para ambas as malhas, quatro vezes maior. Assim, ao dividir pela área, já que o gradiente era igual a 1, foi possível obter a condutividade hidráulica das malhas: $2,0 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ para a primeira em ambas as direções e para a segunda no eixo y. A partir da condutância também foi possível obter a condutividade de $4,6 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ da

segunda malha na direção x. Para isso, bastou multiplicar a condutividade anterior por nove quartos, por causa do princípio da superposição. Alternativamente, pode-se transformar a condutância de um comprimento de 2 metros para um de vinte, multiplicando pelo número de discontinuidades e dividindo pelo tamanho do modelo.

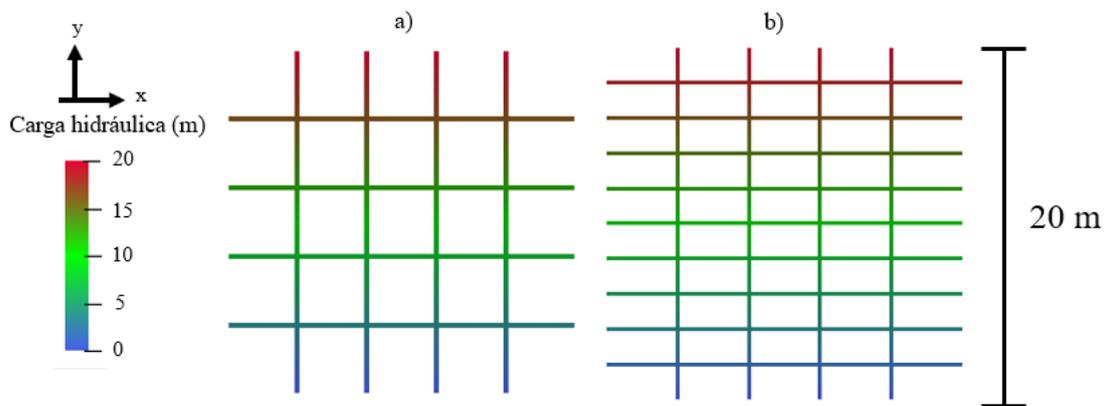


Figura 4.4 – Queda de carga hidráulica na malha ortogonal: a) isotrópica, b) anisotrópica.

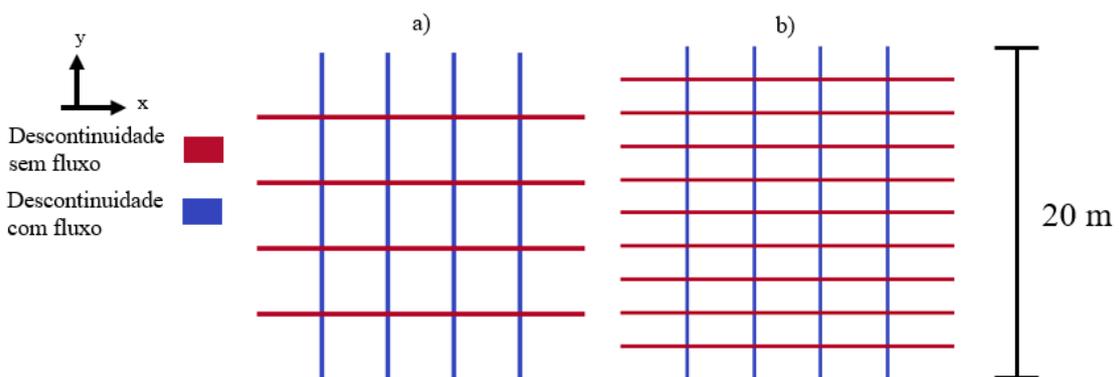


Figura 4.5 – Fluxo de água na malha ortogonal: a) isotrópica, b) anisotrópica.

A queda de pressão gradual ao longo da malha era o resultado esperado para uma malha ortogonal em função de sua semelhança com um meio contínuo. Isso foi observado nas duas redes de discontinuidades. O fluxo de água exclusivamente na direção y também é condizente com essa situação. Além disso, os valores das condutâncias são efetivamente os obtidos pela equação 2.10. A partir destes, foi possível obter a condutividade hidráulica das redes nas duas direções. O valor da condutividade obtida a partir da condutância ou pela divisão do fluxo de água pela diferença de carga hidráulica é o mesmo. Por esses motivos, o código foi aceito nessas duas verificações.

Com base nas condutividades hidráulicas obtidas para a segunda malha, anisotrópica, é que foi simulado o meio contínuo na última verificação, por meio da inserção de um dreno de 9 m na parte central e inferior da malha. Com a inserção do dreno, a variação da poropressão não foi

mais uniforme. O dreno conseguiu efetivamente reduzir a carga hidráulica no interior da malha, como ilustrado na Figura 4.6a. Os valores de carga hidráulica nos nós foram muito próximos dos valores de meio contínuo. A vazão no dreno para ambas as simulações foi aproximadamente igual a $7,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ e a vazão de saída da malha igual a $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

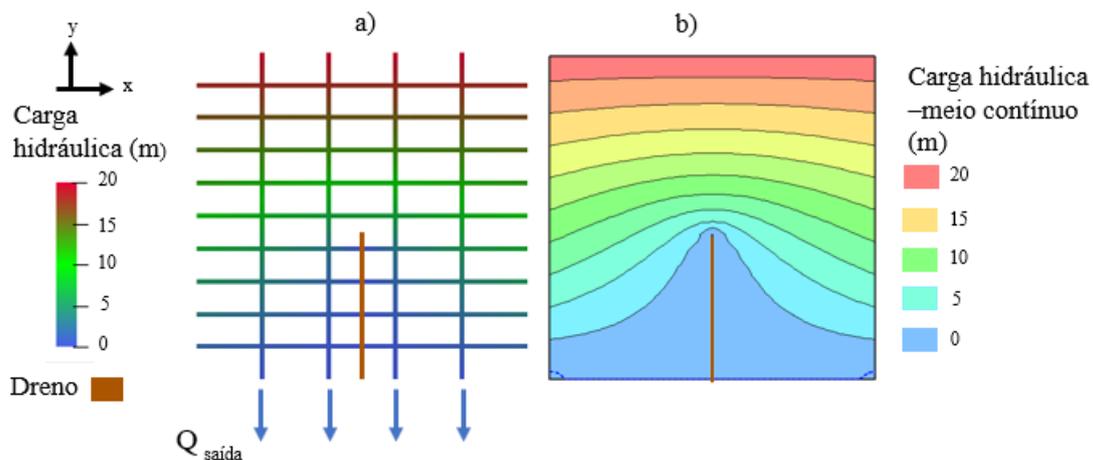


Figura 4.6 – Comparação drenagem: a) com o código e b) com meio contínuo equivalente usando o SEEP/W.

Em função da presença do dreno, o princípio da superposição descrito em Zhang *et al.* (1996) não é mais aplicável. No entanto, ele ainda forneceu um bom parâmetro para a condutividade hidráulica e os valores encontrados para o fluxo de água pelo dreno e pelo maciço; as cargas hidráulicas nos nós também foram muito próximas em ambos os casos. Desse modo, o código foi aceito nas validações.

4.2 ANÁLISE PARAMÉTRICA

Com o uso do código, foi possível gerar 100 redes de descontinuidades para o maciço rochoso de Monte Seco e calcular o fluxo de água para os cenários de abertura constante e variável, com diferentes valores de média e desvio padrão. A Figura 4.7 mostra a malha gerada número 3 e a redução da carga hidráulica. É possível observar que o maciço de Monte Seco é intensamente fraturado, com destaque para a família 1 de descontinuidades. Esta possui uma persistência muito elevada e contribui para a conexão entre as descontinuidades.

Na Figura 4.7a está ilustrada a redução da carga hidráulica para o cenário de abertura constante e igual a 0,5 mm, assim como as condições de contorno adotadas e o local de medição do fluxo de saída. A Figura 4.7b mostra a redução da carga hidráulica para abertura hidráulica constante e igual a 1 mm. Ambos os cenários apresentaram os mesmos resultados de carga hidráulica. Os

mesmos valores também foram observados para a abertura igual a 2 mm. A redução da carga hidráulica foi aproximadamente uniforme, com maiores variações em locais menos conectados. Algumas descontinuidades, na cor azul, não tiveram conexão alguma e apresentaram carga hidráulica nula.

As Figuras 4.7c e 4.7d mostram a redução da carga hidráulica para o fluxo de água com abertura variável. A abertura hidráulica foi simulada com média e desvio padrão iguais a 0,5 mm na Figura 4.7c e iguais a 1 mm na Figura 4.7d. Nestes dois casos, os valores da carga hidráulica foram semelhantes. Houve pequenas variações, para mais ou para menos, em determinados locais, em relação aos cenários de abertura constante.

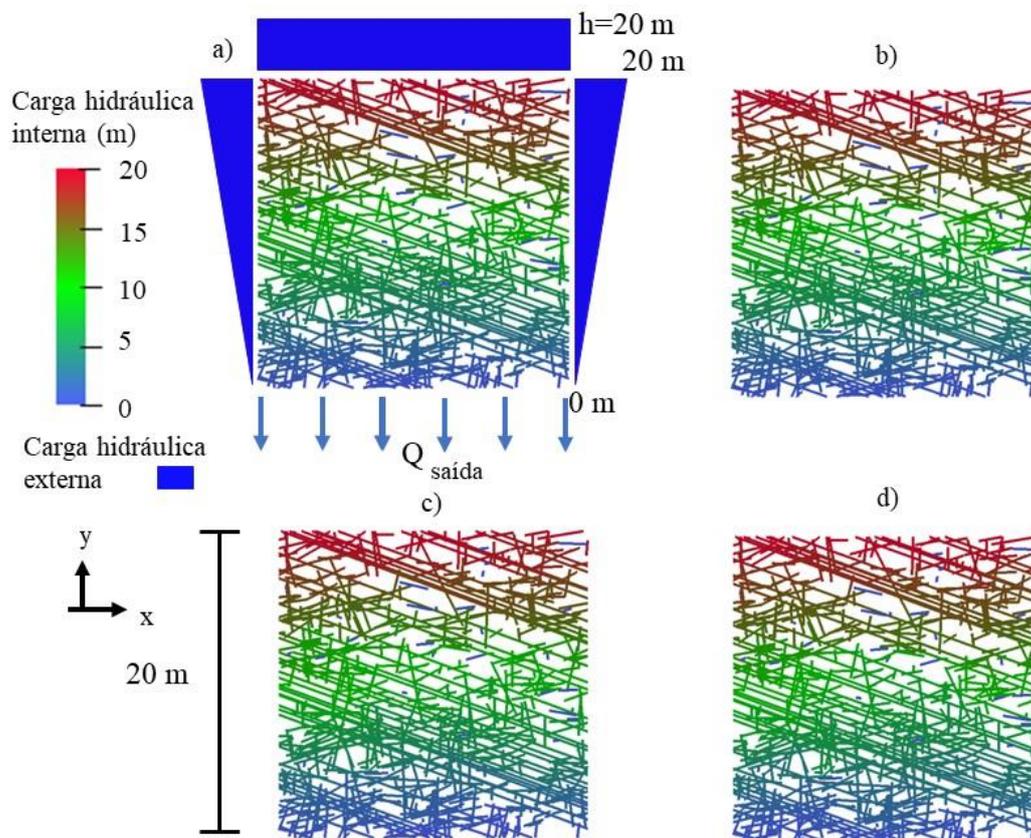


Figura 4.7 – Carga hidráulica na malha 3 de Monte Seco para: a) abertura constante de 0,5 mm, b) abertura constante de 1 mm, c) abertura com 0,5 mm de média e de desvio padrão e d) abertura com 1 mm de média e de desvio padrão

Os resultados das vazões médias das 100 simulações de fluxo de água pela malha no maciço rochoso de Monte Seco, para diferentes médias e desvios padrões da abertura hidráulica das descontinuidades, são apresentados na Tabela 4.1 abaixo.

Foi constatada uma redução do valor da vazão para uma mesma abertura quando incorporado o desvio padrão. Para uma abertura hidráulica igual a 0,5 mm, a vazão reduziu-se

progressivamente de $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ para $4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ e, finalmente para $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. Para uma abertura hidráulica igual a 2 mm, o decréscimo proporcionalmente menor de $0,0771 \text{ m}^3/\text{s}$ para $0,0693 \text{ m}^3/\text{s}$ e, finalmente para $0,0531 \text{ m}^3/\text{s}$. Para a abertura igual a 1 mm, a proporção da redução foi um valor intermediário entre as observadas anteriormente. Isso indica que o valor da covariância da abertura hidráulica implica em maiores ou menores reduções da vazão média de saída.

Tabela 4.1 – Resultados das vazões médias pela malha para variações da medida média e do desvio padrão da abertura hidráulica

		Média da abertura hidráulica		
		0,5 mm	1 mm	2 mm
Desvio padrão da abertura hidráulica	0,0 mm	0,0012	0,0096	0,0771
	0,5 mm	0,0004	0,0069	0,0693
	1 mm	0,0002	0,0031	0,0531

A Figura 4.8 exibe o gráfico que traz a relação entre a abertura hidráulica média das discontinuidades e a vazão média pela malha para desvios padrões: nulo, de 0,5 e de 1 mm. Para uma abertura hidráulica igual a 0,5 mm e constante, a vazão média encontrada foi igual a $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Esse valor aumentou para $9,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ para abertura hidráulica constante igual a 1 mm. No entanto, o acréscimo do valor da vazão média não foi linear e aumentou para $7,7 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$. Assim, a vazão média se caracterizou por aumentar potencialmente. Isso foi observado para os três valores de desvio padrão utilizados. A Figura 4.8 mostrou que a redução da vazão em função do desvio padrão da abertura hidráulica tem uma proporção bem menor que a provocada pelo aumento da abertura hidráulica média.

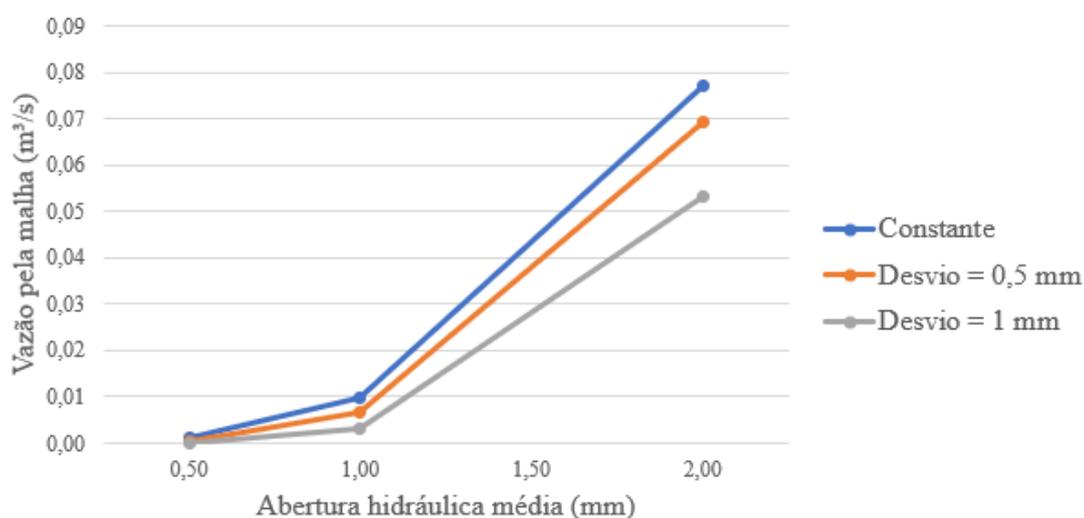


Figura 4.8 – Relação entre a vazão média pela rede de discontinuidades e a abertura hidráulica para três desvios padrões.

Na Tabela 4.2 foram listados os resultados do desvio padrão das vazões médias das 100 simulações de fluxo de água pela malha para os três valores de médias e desvios padrões da abertura hidráulica das descontinuidades estudados. Esses valores estão ilustrados na forma de gráfico na Figura 4.9. Ao contrário do encontrado anteriormente para a vazão média, não foi possível obter uma relação clara entre o desvio padrão da vazão e o da abertura hidráulica. Para uma abertura hidráulica média igual a 0,5 mm, o aumento da vazão, de desvio nulo para desvio igual a 1 mm, foi significativo. No entanto, houve uma pequena redução com o desvio igual a 0,5 mm. Para a abertura hidráulica de 1 mm, a tendência foi contrária: inicialmente houve um leve aumento e, na sequência, uma redução. Por sua vez, com a abertura hidráulica igual a 2 mm verificou-se apenas um pequeno aumento no desvio padrão do fluxo de 0,01633 m³/s a 0,01767 m³/s.

Tabela 4.2 – Resultados do desvio padrão da vazão pela malha para variações da média e do desvio padrão da abertura hidráulica

		Média da abertura hidráulica		
		0,5 mm	1 mm	2 mm
Desvio padrão da abertura hidráulica	0,0 mm	0,00024	0,00204	0,01633
	0,5 mm	0,00019	0,00208	0,01718
	1 mm	0,00049	0,00141	0,01767

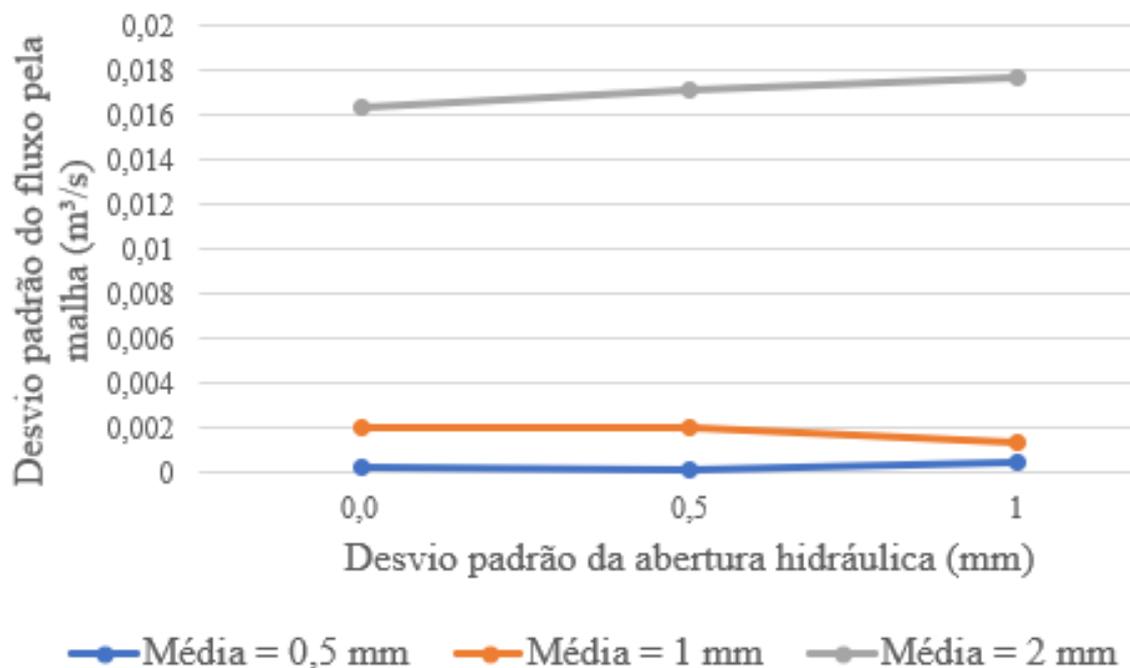


Figura 4.9 – Relação entre o desvio padrão da vazão pela rede de descontinuidades e o aumento do desvio padrão da abertura hidráulica das descontinuidades.

No entanto, foi possível perceber uma relação entre a abertura hidráulica média e o desvio padrão do fluxo de água. Assim como foi visto com a vazão média, o desvio padrão também cresce com a média da abertura hidráulica. Além disso, esse aumento também não é linear, pois para um desvio padrão de 0,5 mm, os valores de desvio padrão de fluxo de água foram de $1,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, $2,08 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ e $1,72 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ para 0,5 mm, 1 mm, 2 mm de abertura hidráulica, respectivamente.

Na sequência foram testadas as hipóteses que incidem sobre a abertura hidráulica para o cálculo do fluxo. A distribuição dos valores de fluxo de água de saída da malha para as hipóteses de abertura constante e variável é apresentada na Figura 4.10 para as hipóteses de abertura constante e variável. Dessa vez foram realizados os cálculos de fluxo de água por 200 redes de descontinuidades. O valor médio de vazão obtido para a hipótese de abertura constante foi igual a $1,19 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ e um desvio igual a $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. Valores esses bem próximos dos obtidos na etapa anterior para 100 malhas. Para a hipótese de abertura variável, os resultados obtidos foram de $4,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ para o fluxo de água com um desvio de $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, igualmente próximos dos valores para 100 simulações. Desse modo, o maior valor de fluxo de água médio foi encontrado com abertura hidráulica constante. Novamente, a variação do desvio padrão foi relativamente pequena. Entretanto a covariância no segundo caso é muito maior do que no primeiro.

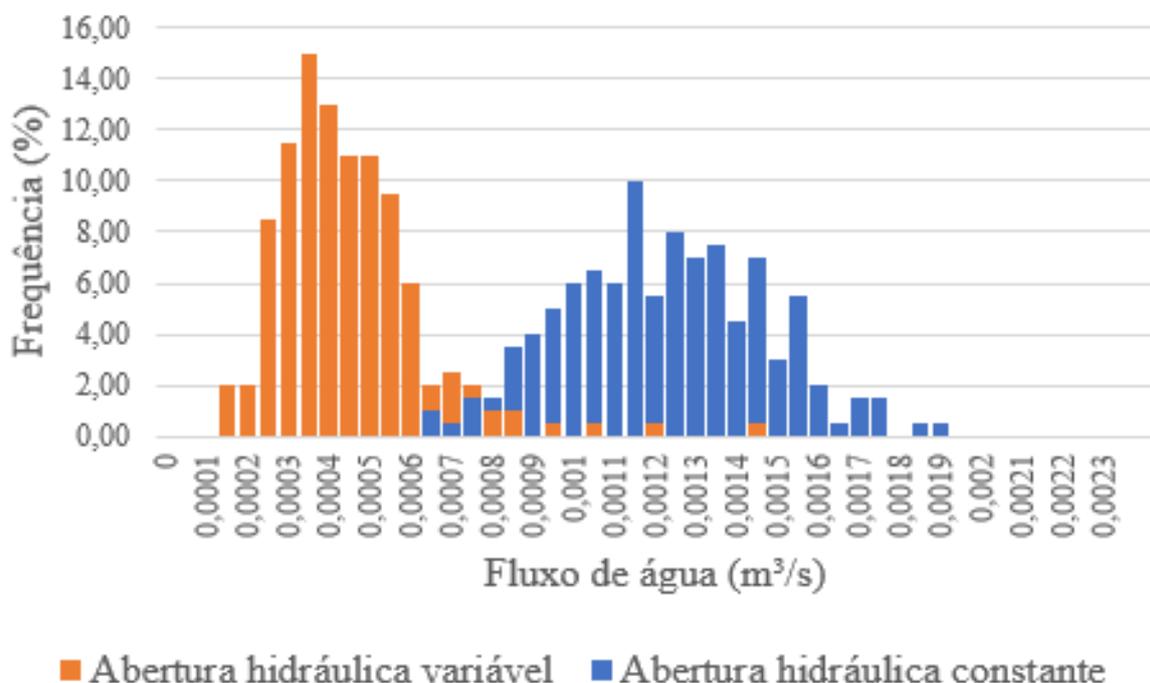


Figura 4.10 – Frequência do fluxo de água médio pela malha para o maciço de Monte Seco com a abertura hidráulica constante e variável.

Uma diferença notável entre os dois cenários é que para abertura hidráulica constante a vazão segue uma distribuição normal, enquanto para abertura variável ela parece seguir uma distribuição lognormal. A primeira observação está de acordo com os resultados de Min *et al.* (2004), que modelou o fluxo com abertura constante, e a segunda, com Javadi *et al.* (2016), que modelou o fluxo de água com distribuição lognormal para a abertura. Essa observação foi confirmada pelos testes de aderência do qui-quadrado com 95% de confiabilidade, os resultados estão mostrados na Tabela 4.3. As distribuições normais e lognormais foram ambas aprovadas para a abertura constante, mas a distribuição que melhor representou os dados nesse cenário foi a distribuição normal. A distribuição lognormal foi a única aprovada para o fluxo de água com abertura variável.

Tabela 4.3 – Testes de aderência para o fluxo de saída.

	Distribuição	Graus de Liberdade	Confiabilidade	Somatório dos erros	Valor crítico	Teste de aderência
Abertura constante	Normal	23	95%	7,82	35,17	Aprovada
	Lognormal	23	95%	13,17	35,17	Aprovada
Abertura variável	Normal	16	95%	51,67	30,14	Rejeitada
	Lognormal	16	95%	6,33	30,14	Aprovada
Abertura correlacionada	Normal	18	95%	4,38	28,87	Aprovada
	Lognormal	18	95%	26,91	28,87	Aprovada

A Figura 4.11 mostra a distribuição dos valores de fluxo de água de saída da malha para a abertura hidráulica correlacionada com o comprimento da descontinuidade. A abertura hidráulica de cada segmento de descontinuidade foi calculada a partir do comprimento com a equação 4.1 adaptada de Vermilye & Scholz (1995) com a constante $C_2 = 1,8 \cdot 10^{-3}$ obtida pelos autores.

$$e_h = 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot l^{0,5} \quad (4.1)$$

Nessa situação, o maior valor médio do fluxo de água foi igual a $9,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. O desvio padrão foi de $1,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Assim como para o fluxo de água com abertura constante, a distribuição normal apresentou a melhor aderência aos resultados do fluxo de água para o teste do qui-quadrado. A distribuição lognormal também foi aprovada, mas estava próxima do limite da aceitabilidade para um grau de confiabilidade de 95%.

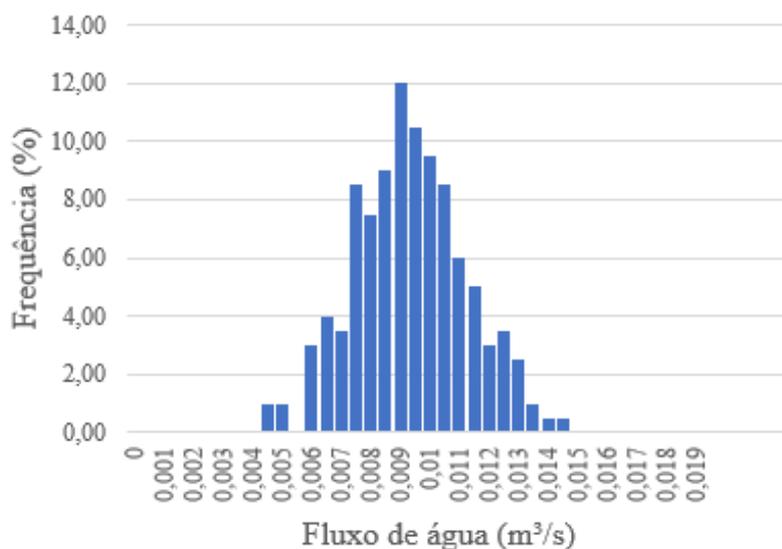


Figura 4.11 – Frequência do fluxo de água médio pela malha para o maciço de Monte Seco com a abertura hidráulica correlacionada à persistência.

No início dos estudos paramétricos foram geradas as redes de descontinuidades e obtidas as cargas hidráulicas nas malhas. Foi observado que o maciço rochoso de Monte Seco é intensamente fraturado. Como o maciço possuía elevada conexão entre as descontinuidades, era semelhante a um meio contínuo. A redução da carga hidráulica foi aproximadamente uniforme, o que está de acordo com o esperado para um meio quase contínuo dadas as condições de contorno. Nesse contexto, a família 1 foi importante, em função de sua persistência elevada, para conectar as outras famílias.

Além disso, para a abertura constante, a redução da carga hidráulica não foi impactada pela abertura hidráulica média das descontinuidades. Para a abertura variável, houve somente pequenas variações, apesar da mudança da condutância das descontinuidades. Isso provavelmente deveu-se à elevada conectividade das descontinuidades, que gerou diferentes caminhos de fluxo e possibilitou um equilíbrio da carga hidráulica.

O objetivo desses estudos paramétricos foi encontrar relações entre o fluxo de água de saída da malha e a abertura hidráulica adotada para as descontinuidades. Em contraste com carga hidráulica, o fluxo de água foi muito impactado pela abertura hidráulica das descontinuidades. O fluxo de água médio de saída aumentou muito com o incremento da média da abertura hidráulica. Essa variação foi de $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, para uma abertura de 0,5 mm, a $0,077 \text{ m}^3/\text{s}$ para uma abertura de 2 mm. Assim um aumento de 4 vezes da abertura hidráulica resultou em um fluxo aproximadamente 64 vezes maior. Uma relação dessa ordem era esperada em função da lei cúbica, dado que o fluxo de água por uma descontinuidade está ligado ao cubo da abertura

hidráulica. No entanto, a interação das descontinuidades entre si poderia ter alterado em parte essa razão, o que aconteceu em pequena proporção.

Em função da magnitude do vínculo entre a abertura hidráulica e o fluxo de água, observado na Figura 4.8, poderia supor-se que uma abertura hidráulica variável geraria maiores valores em partes da malha, e conseqüentemente uma vazão maior. No entanto, foi observado exatamente o oposto disso. Para os três valores de abertura hidráulica, o valor do fluxo de água médio foi menor para abertura variável do que para abertura constante. O motivo para isso seria o controle que as descontinuidades com menores condutâncias exercem no fluxo pela malha, criam zonas de maiores resistências ao fluxo e o reduzem como um todo. Isso depende da proporção do desvio padrão com relação à média, como obtido na análise da covariância dos resultados listados na Tabela 4.1. Quando a razão entre o desvio padrão e a média da abertura hidráulica era maior, a redução do fluxo de água aumentava. No entanto, o fator preponderante para o fluxo de água médio de saída continua a ser o valor médio da abertura hidráulica.

Na sequência, foi estudada a relação entre os desvios padrão do fluxo de água médio e da abertura hidráulica. Não foi possível encontrar nenhuma ligação clara entre os dois parâmetros, já que para alguns valores houve um pequeno aumento e para outros, uma pequena redução. Isso pode ter ocorrido na atribuição das aberturas hidráulicas às descontinuidades. Em algumas malhas, as descontinuidades com maiores aberturas hidráulicas foram atribuídas às descontinuidades nos caminhos preferenciais da abertura constante de fluxo e geraram maior vazão pela malha, em outras os caminhos preferenciais receberam menores aberturas hidráulicas e reduziram o fluxo de água. A elevada conectividade das descontinuidades possibilitou a alteração dos caminhos com poucas modificações e pode ter contribuído para que os valores de fluxo de água pelas malhas sejam próximos, conseqüentemente com o equilíbrio do desvio padrão do fluxo de saída da malha. As variações observadas podem ter ocorrido em função da combinação da geometria da malha e das aberturas hidráulicas que em uma malha específica ou em um conjunto de malha geraram valores de fluxo maiores ou menores e impactaram a média.

Além disso, foi observado novamente um vínculo entre o fluxo de água pela malha e a abertura hidráulica média. Isso era esperado em função da importância da abertura hidráulica média para o fluxo de água, como observado anteriormente, e pela importância da abertura hidráulica para a o cálculo do fluxo de água com a lei cúbica. O fato do fluxo de água ter apresentado um desvio padrão, mesmo para o caso de desvio padrão da abertura hidráulica nula, mostrou que a

variabilidade das geometrias das malhas contribuiu significativamente para o desvio padrão do fluxo de água de saída.

Dessa forma, a conectividade decorrente da elevada intensidade de fraturamento parece ter sido um fator preponderante para os resultados observados. Além disso, é possível que a covariância ainda seja um elemento importante como observado na Tabela 4.1, mas que tenha tido a importância reduzida em função da conectividade. Assim, desvios padrões mais elevados de abertura hidráulica podem ainda contribuir para o aumento do desvio padrão do fluxo de água pela malha. Por isso, recomenda-se a ampliação desse estudo para maciços menos fraturados e desvios padrões maiores. No primeiro caso, isso deve reduzir as possibilidades de formação de novos caminhos de fluxo e no segundo a maior variação da abertura hidráulica deve impactar o fluxo de modo mais significativo.

Finalmente, foram analisados os resultados de fluxo de saída de malha para 200 simulações para as três hipóteses comumente adotadas nesses estudos sobre a abertura hidráulica: constante, variável e correlacionada com o comprimento. As primeiras observações foram feitas sobre as médias e os desvios padrões do fluxo de saída para a hipótese de abertura constante e de abertura variável. Esses foram muito próximos dos obtidos anteriormente para 100 simulações. Desse modo, este parece ser um bom número para a realização desse estudo para o caso do maciço do Monte Seco. O valor médio de fluxo de água foi novamente maior para o caso de abertura constante do que para abertura variável. Contudo o maior valor médio encontrado foi para a abertura correlacionada com o comprimento. Isso pode ter ocorrido por dois motivos. O primeiro pode ter sido a geração de valores médios de abertura hidráulica maiores pela fórmula de Vermilye & Scholz (1995), o que impacta significativamente no fluxo, como visto anteriormente. O segundo motivo pode ser a associação da abertura à raiz do comprimento. Por um lado, isso fez com que o programa calculasse que descontinuidades maiores carregaram maiores quantidades de água a maiores distâncias, o que facilitou o fluxo. Por outro lado, as descontinuidades menores possuíam menores aberturas, mas, como o maciço rochoso de Monte Seco é muito segmentado, havia outras disponibilidades de caminho de fluxo, alguns pelas descontinuidades maiores com menores resistências ao fluxo.

Além disso, foi possível obter a distribuição do fluxo de saída. Para a abertura constante, a melhor distribuição para os dados de acordo com o teste do qui-quadrado foi a normal, assim como para a abertura correlacionada com a largura. Isso indicou que a variabilidade do valor de fluxo estava associada com as modificações da geometria das redes de descontinuidade. Para

a abertura variável, no entanto, o fluxo seguiu uma distribuição lognormal à semelhança da abertura hidráulica.

Desse modo, ficou claro o impacto da média da abertura hidráulica sobre o fluxo de água pelo maciço rochoso fraturado. Essa demonstrou ser um parâmetro mais importante do que o desvio padrão da própria abertura. Assim, em um trabalho de sondagem do maciço rochoso, a propriedade mais importante a ser determinada para estudos de fluxo é o valor médio da abertura hidráulica e, em menor grau, o desvio padrão da mesma. Dessa forma, a obtenção de aberturas hidráulicas médias com ensaios *packer* para um conjunto de descontinuidades parece ser o suficiente para estudos de fluxo de água em maciços intensamente fraturados.

Além disso, foi verificado o impacto das diferentes hipóteses da abertura hidráulica no fluxo de água. A abertura hidráulica variável gerou um fluxo menor, o que significa uma condutividade hidráulica equivalente menor. O fluxo seria um pouco maior com abertura constante, e bem maior para abertura correlacionada ao comprimento. No entanto, para as condições de contorno adotadas, não parecia haver uma diferença significativa na carga hidráulica para abertura constante ou variável. Isso foi devido às mesmas condições de contorno adotadas e às malhas semelhantes, o que gerou aproximadamente a mesma perda de carga pelo sistema. Novamente, maciços pouco fraturados podem gerar uma maior variabilidade das redes de descontinuidades e provocar maiores alterações das cargas hidráulicas.

Dessa forma, foi possível avaliar o impacto da abertura hidráulica e das hipóteses mais utilizadas no fluxo de água por um maciço rochoso intensamente fraturado. No entanto, não foi possível avaliar todos os parâmetros envolvidos na caracterização do maciço rochoso fraturado, pois são muitos. Nesse estudo, foi dado um foco maior para a abertura hidráulica, em função de sua importância na fórmula da lei cúbica. A conectividade das descontinuidades se destacou na explicação dos resultados observados tanto para a variação da carga hidráulica quanto para o fluxo de água.

A conectividade decorre das propriedades geométricas das famílias de descontinuidades, da intensidade de fraturamento e dos modelos adotados para as descontinuidades. Assim, modelos distintos para as descontinuidades, como o Veneziano, devem reduzir a conectividade, por causa da coplanaridade das descontinuidades. A persistência das descontinuidades e a intensidade de fraturamento também aumentam a probabilidade de interseção das descontinuidades e a formação dos caminhos de fluxo. A escolha de um modelo em duas dimensões no lugar de três dimensões também afeta a conectividade da malha. Em malhas

bidimensionais, as descontinuidades devem se intersectar em um plano específico para haver a conexão, mas em três dimensões elas podem qualquer intersecção no volume de estudo gera conexão, assim o mergulho das descontinuidades se torna mais significativo. Desse modo, malhas bidimensionais possuem uma tendência de gerar maciços menos conectados do que malhas tridimensionais, que são mais realistas.

A redução da conectividade das malhas gera menos caminhos de fluxo de água pelo maciço rochoso. Isso reduz a permeabilidade do maciço rochoso. Além disso, o fluxo de água e a carga hidráulica se tornam mais suscetíveis à variação da abertura hidráulica. Desse modo, o fluxo de água deve ser ainda mais condicionado às descontinuidades com menores aberturas hidráulicas, o que deve aumentar ainda mais a diferença para a abertura constante. Com relação à carga hidráulica, as regiões das malhas com maiores aberturas hidráulicas devem possuir maiores cargas hidráulicas. As variações das cargas hidráulicas no interior das malhas também devem ser maiores, em função da conectividade das descontinuidades e das aberturas hidráulicas predominantes nos caminhos de fluxo.

Ao contrário, a simulação com maciços em três dimensões deve aumentar os caminhos de fluxo de água. No caso do maciço rochoso de Monte Seco, a redução da carga hidráulica pela malha deve ser ainda mais próxima da redução uniforme. Assim como, o fluxo de água pela malha para a abertura constante deve ser mais próximo do fluxo de água para abertura variável e os dois devem ser maiores. Dessa forma, muitas combinações de parâmetros e de modelos devem ainda ser testados para a completa compreensão do fluxo de água pelo maciço rochoso.

4.3 ESTUDO DOS MACIÇOS ROCHOSOS

Nessa etapa, foram geradas as redes de fraturas discretas de três maciços rochosos com geometrias distintas e estudados os fluxos de água com base no método de Reeves *et al.* (2013). A finalidade era obter a melhor direção de drenagem para cada um dos maciços e observar o impacto que a geometria deles tinha na escolha. Os resultados são apresentados separadamente para cada maciço rochoso na ordem a seguir: Yangfanggou, El Teniente e Monte Seco.

4.3.1 YANGFANGGOU

A Figura 4.12 apresenta o resultado para a primeira malha do maciço de Yangfanggou da redução da carga hidráulica pela rede e as descontinuidades com fluxo de água. Foi possível notar que o maciço ainda é bastante fraturado, porém menos que o de Monte Seco e sem

uniformidade. Há regiões com maior grau de fraturamento do que outras. Também foi possível perceber algumas descontinuidades isoladas, pelas quais não há fluxo de água. Apesar da condição de contorno ter sido de gradiente uniforme, foi possível constatar na Figura 4.12a que a queda de carga pela malha ocorreu de modo quase uniforme. Embora a variação seja pequena, há locais em que a redução é maior do que em outros. Para a simulação com abertura variável, também foram obtidas cargas nos nós um pouco variáveis quando comparadas à simulação com abertura constante, assim como ocorreu para o maciço de Monte Seco. A Figura 4.12b, mostra que grande parte da rede conduz água. No entanto, há diferentes concentrações de descontinuidades com fluxo no modelo. Os locais com mais descontinuidades com fluxo na Figura 4.12b são os mesmos com maior uniformidade na redução da carga hidráulica na Figura 4.12a.

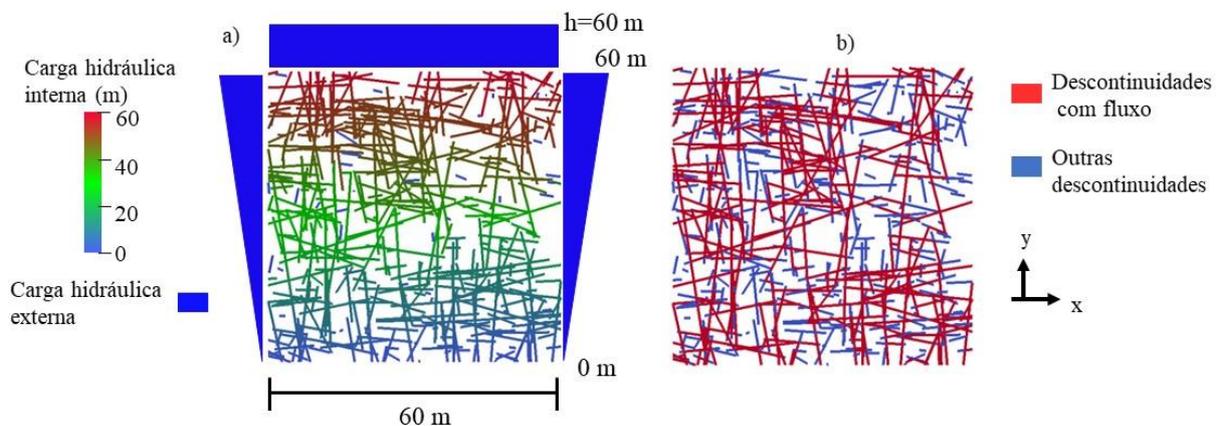


Figura 4.12 – Fluxo de água pelas descontinuidades da malha 1 do maciço rochoso Yangfangou com abertura constante: a) carga hidráulica nas descontinuidades, b) descontinuidades com fluxo.

Na Figura 4.13 estão ilustradas as descontinuidades dominantes em três situações distintas. A primeira é para a malha número 1 do maciço de Yangfangou com a abertura constante, a segunda é para a malha número 196 também com abertura constante, e a terceira é novamente para a malha 196, mas com abertura variável. A figura mostra o número de descontinuidades dominantes muito menor do que a quantidade de descontinuidades. As descontinuidades dominantes estão orientadas predominantemente na direção do eixo y, no sentido do fluxo. Além disso, nas Figuras 4.13a e 4.13b, elas parecem conectar principalmente regiões com maior número de descontinuidades ou estarem próximas das fronteiras. Na Figura 4.13c, apesar de ser a mesma malha, há um número bem maior de descontinuidades dominantes do que nas figuras

anteriores, principalmente no eixo x. Houve também a alteração de algumas descontinuidades que deixaram de fazer parte do grupo.

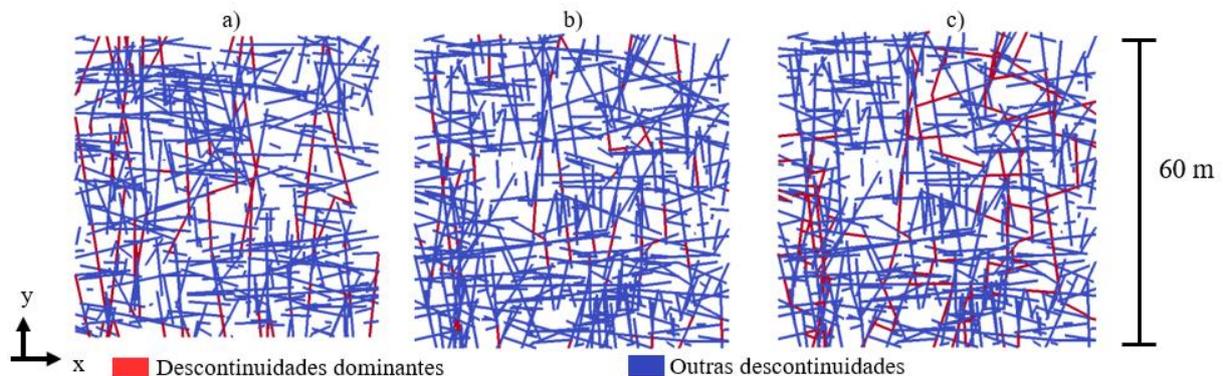


Figura 4.13 – Comparação das descontinuidades dominantes: a) malha 1 com abertura hidráulica constante, b) malha 196, com abertura hidráulica constante e c) malha 196 com abertura hidráulica variável.

O resultado da linha de varredura para os três tipos de descontinuidades está mostrado na Figura 4.14. A figura evidencia formas muito diferentes para todas as descontinuidades, para as descontinuidades com fluxo de água e para as descontinuidades dominantes. Na Figura 4.14a, estão ilustradas as distâncias médias totais de interseção com os três tipos de descontinuidades para abertura constante. As maiores distâncias foram para as descontinuidades dominantes, que variaram de aproximadamente 15 metros no eixo x a mais de 40 metros no eixo y. A figura gerada tem um formato aproximadamente retangular, mais achatado no eixo x e mais circular nas extremidades. Esse formato não está de acordo com as observações realizadas por Reeves *et al.* (2013).

A linha de varredura para todas as descontinuidades e para as descontinuidades com fluxo formou um quadrado rotacionado, destacado na Figura 4.14c. Isso está conforme o observado por Reeves *et al.* (2013) para duas famílias de descontinuidades ortogonais e paralelas aos eixos. Para esses dois tipos de descontinuidades não houve mudança nos resultados quando simulado o fluxo com abertura constante ou variável. Para o fluxo de água com abertura variável, Figura 4.14b, novamente o resultado das descontinuidades dominantes divergiu de Reeves *et al.* (2013). Apesar de estar mais próximo da forma da Figura 4.14c, principalmente nas laterais, as distâncias médias de interseção tinham aumentado rápida e significativamente próximas ao eixo y.

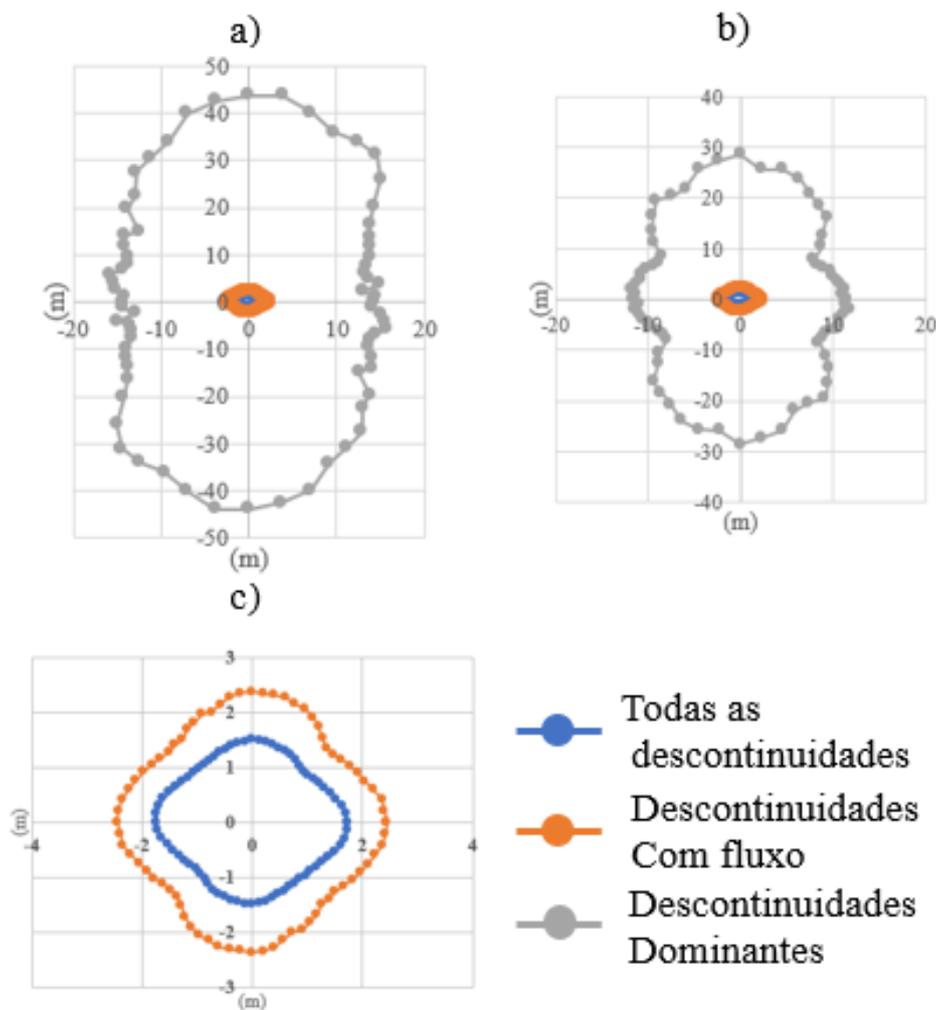


Figura 4.14 – Distâncias médias totais de interseção de Yangfanggou para: a) abertura constante, b) abertura variável e c) em maior detalhe para as descontinuidades com fluxo e todas as descontinuidades

A Figura 4.15 expõe as distâncias médias totais de interseção em função da orientação da linha de varredura com o eixo x anti-horário e o décimo maior valor de distâncias médias dentre os 200 de cada modelo para cada ângulo de orientação da linha de varredura. Esse valor foi o critério que Reeves *et al.* (2013) adotaram para o dimensionamento do dreno. Do mesmo modo que na Figura 4.14b, o valor médio das simulações apresentou um incremento entre os ângulos 45 e 135 e entre 225 e 315, que correspondem aos valores em torno do eixo y. Para a mesma faixa de valores o décimo maior valor também foi o maior possível, maior do que 60 metros, tamanho do modelo adotado. Para os outros ângulos, ele variou entre 20 e 30 metros.

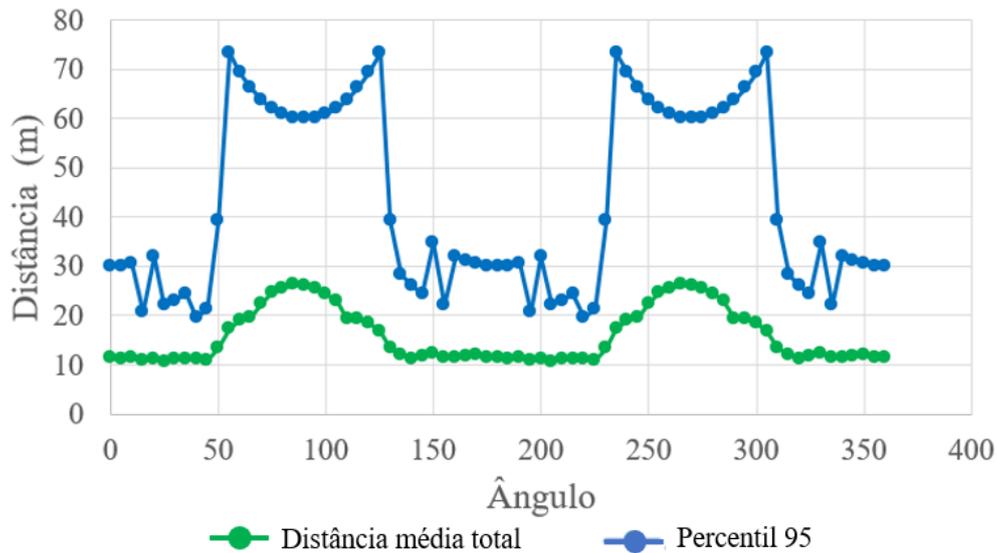


Figura 4.15 – Distâncias média total e percentil 95 para o maciço rochoso fraturado de Yangfanggou para abertura variável.

O cálculo do fluxo de água pela malha com o código gerou resultados condizentes com o esperado. Na primeira figura, 4.12a, do maciço de Yangfanggou, foi obtida uma redução aproximadamente uniforme da carga hidráulica. A redução uniforme da carga pelo meio era o resultado aguardado para um meio contínuo, o que indica que a rede se assemelhou a um meio contínuo. A proximidade ocorreu em função do grau de intensidade de fraturamento razoavelmente grande, porém com regiões mais fraturadas do que outras. Em função da conectividade da malha, a redução da carga sofreu alterações. Isso pôde ser observado ao comparar as reduções de carga hidráulica na Figura 4.12a com as discontinuidades com fluxo de água na Figura 4.12b.

Apesar de haver quatro famílias de discontinuidades, não foi possível identificá-las nas Figuras 4.12 e 4.13. Isso aconteceu, porque as direções das famílias 1 e 4 e das famílias 2 e 3 se equivaleram. Dessa forma, o resultado foi semelhante a duas famílias de discontinuidades ortogonais. Na Figura 4.12b, a direção principal do fluxo de água pareceu não impactar nas discontinuidades com fluxo, ao contrário da Figura 4.13, onde as discontinuidades dominantes estão predominantemente no sentido do eixo y, do gradiente hidráulico. Além disso, essas estavam presentes principalmente nas regiões menos fraturadas e possuíam o papel de fazer a conexão entre as regiões mais fraturadas.

O número de discontinuidades dominantes foi muito baixo para o fluxo com abertura constante. Uma explicação para isso pode ser a distribuição exponencial do raio das discontinuidades. A combinação de discontinuidades curtas e longas gerou regiões com maiores intensidades de

fraturamento e outras com menores graus. Dessa forma, ao calcular o limite de fluxo para as descontinuidades dominantes, o número de descontinuidades com fluxo pode ter variado muito. Essa variação pode ter feito com que o limite de fluxo dominante crescesse e somente as descontinuidades nas conexões entre as regiões mais fraturadas, onde há concentração de fluxo, fossem classificadas como dominantes.

Foi observado na análise paramétrica que a abertura hidráulica variável reduzia o fluxo pela malha. Isso pode ter reduzido o limite e facilitado que um maior número de descontinuidades fossem caracterizadas como dominantes. Assim, o número de descontinuidades dominantes aumentou para a abertura variável, principalmente as paralelas ao eixo x. No entanto, apesar desse aumento, foi observado na Figura 4.13b e 4.13c que algumas descontinuidades deixaram de fazer parte do grupo. Isso corroborou a conclusão da análise paramétrica de que as aberturas variáveis alteram os caminhos do fluxo de água.

O estudo da linha de varredura mostrou uma grande divergência entre os resultados obtidos para as descontinuidades dominantes para a abertura constante e variável com as observações de Reeves *et al.* (2013). Um dos motivos para isso, pode ter sido a orientação das famílias de descontinuidades. Conforme Reeves *et al.* (2013), o formato esperado era um losango do mesmo modo que os obtidos para as todas as descontinuidades e para as descontinuidades com fluxo de água. O caso de abertura constante, Figura 4.14a, apresentou distâncias médias totais de interseção muito elevadas e um formato retangular. O motivo para isso foi o pequeno número de descontinuidades dominantes em algumas simulações como observado na Figura 4.13a e 4.13b. Isso fez com que a linha de varredura não interceptasse descontinuidades dominantes em diversas orientações para muitas simulações, o que elevou a distância média. Por causa disso, o percentil 95 da maior distância média para as 200 malhas foi o próprio tamanho do modelo para todas as orientações. Dessa forma, não foi possível obter o comprimento do dreno pelo método de Reeves *et al.* (2013) para abertura constante. Assim, o método não se mostrou adequado para o dimensionamento de drenos para o maciço de Yangfanggou.

O resultado das descontinuidades dominantes para abertura variável foi bastante distinto do obtido para abertura variável. Para orientações das linhas de varredura próximas ao eixo x, o formato aproximou-se do obtido com as descontinuidades com fluxo. No entanto, próximo ao eixo y, esse resultado mudou muito. A causa disso, foi a orientação das descontinuidades dominantes, principalmente paralelas ao eixo y, observada na Figura 4.13. Isso fez com que fosse mais difícil para a linha de varredura interceptá-las quando estivessem quase paralelas.

Por isso, houve um aumento da distância média para linhas de varredura próximas a 90 e a 270 graus.

Um dos motivos para a diferença dos resultados obtidos para o método de Reeves *et al.* (2013) pode ter sido a orientação das famílias de descontinuidades. No estudo do Reeves *et al.* (2013), as famílias de descontinuidades eram ortogonais entre si possuíam uma orientação de 45° com relação aos eixos, o que pode ter gerado mais caminhos de fluxo e facilitado a interseção da linha de varredura com as descontinuidades dominantes. Nesse estudo, duas famílias de descontinuidades estavam paralelas ao gradiente hidráulico, o que facilitou a formação de caminhos preferenciais na direção y e a maior dificuldade de interseção da linha de varredura. Os resultados da linha de varredura e de todas as descontinuidades condizentes com os de Reeves *et al.* (2013) obteve os resultados esperados para as propriedades geométricas das famílias de descontinuidades. A característica das descontinuidades dominantes que as distinguem das demais é a intensidade do fluxo. Dadas as condições de contorno, o fluxo de água buscou as menores distâncias entre as duas diferenças de carga, favorecido pela orientação das descontinuidades paralelas ao gradiente hidráulico. Isso formou caminhos de fluxo, com maior intensidade, preferencialmente na direção do eixo y.

O aumento da distância média próxima ao eixo y também foi observado na Figura 4.15 para a distância 5% maior. Os valores próximos ao eixo y aumentaram muito, o que impossibilitou a determinação do comprimento do dreno para essas orientações. Para os outros ângulos, esse comprimento variou entre 20 e 30 metros. A realização de um número maior de simulações pode reduzir essa variação e fornecer um valor mais exato.

Em função do impacto das condições de contorno no fluxo de água e da instalação de um dreno que as modifica, faz sentido também analisar a tendência das descontinuidades com fluxo de água. Estas apresentaram a menor distância média para 45 graus, o que está no limite do observado das descontinuidades dominantes. Assim, ao considerar esse princípio, a melhor recomendação foi um dreno com 20 metros orientado a 45 graus com o eixo x para fluxo de água com abertura variável.

Apesar de ser bastante fraturados, o maciço de Yangfanggou apresentou elevadas distâncias médias para linhas de varredura próximas do eixo y. No caso de maciços menos fraturados, pode haver casos em que há somente um caminho de fluxo por malha ou até mesmo nenhum. Isso geraria elevados valores de distâncias médias também para as descontinuidades com fluxo

de água. Isso pode significar a necessidade de adotar as descontinuidades com fluxo de água como critério e de reduzir o percentil.

Dessa forma, foram encontradas limitações na aplicação do método de Reeves *et al.* (2013), quando utilizada a abertura hidráulica no lugar da transmissividade das descontinuidades. Este estudo sugere também que a distribuição exponencial do raio das descontinuidades afeta os resultados, em conjunto com as outras propriedades como a intensidade de fraturamento e a orientação das famílias de descontinuidades. Além disso, em função das condições de contorno observadas, as distâncias médias das descontinuidades com fluxo podem fornecer um melhor critério para a escolha de orientação, principalmente em maciços menos fraturados.

4.3.2 EL TENIENTE

Na Figura 4.16a, foi observado um maciço com um grau de fraturamento relativamente elevado, mas com descontinuidades menores do que as do maciço de Yangfanggou e maior variabilidade da direção. Foi possível notar que não há uma redução uniforme da carga hidráulica. Onde há muita interseção descontinuidades, a redução é mais uniforme. Na região central da malha, onde é menos conectada, há também uma grande diferença de carga hidráulica com aproximadamente 20 m de carga hidráulicas na parte superior e com 10 m de carga hidráulica na parte inferior. As descontinuidades com fluxo de água ainda compõem uma parte importante da rede, mas foi possível notar que também na região central há uma falta delas, como ilustrado na Figura 4.16b. Um exemplo de rotina para aplicação do método de Reeves *et al.* (2013) no maciço rochoso de El Teniente está disponibilizado no apêndice B.1.

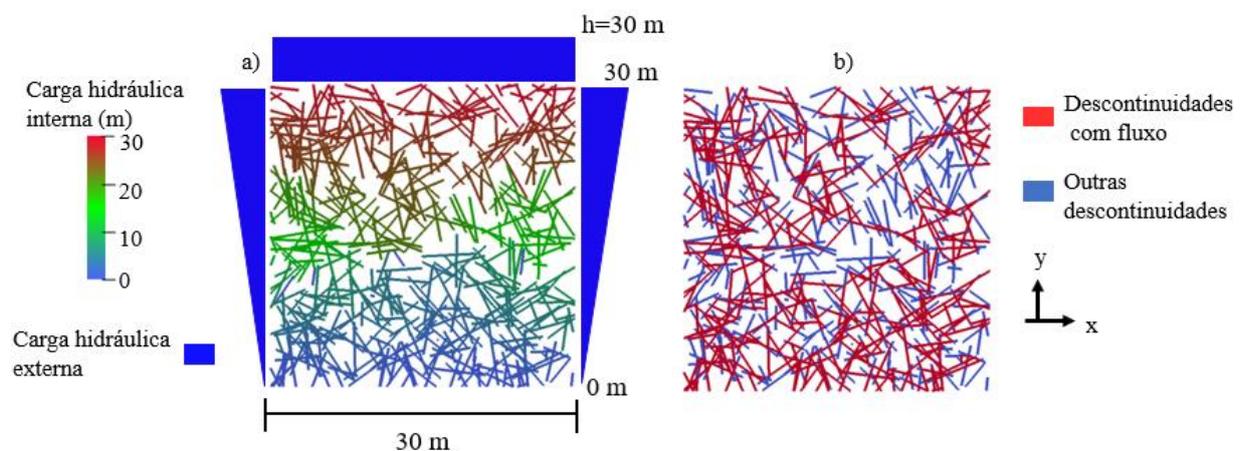


Figura 4.16 – Fluxo de água pelas descontinuidades da mina de El Teniente com abertura constante: a) carga hidráulica nos nós e b) descontinuidades com fluxo de água.

A Figura 4.17 mostra a diferença do grupo das descontinuidades dominantes para o fluxo com abertura constante e variável. Para ambos os casos, houve mais descontinuidades dominantes do que no maciço de Yangfanggou. Foi percebida a mesma tendência das descontinuidades dominantes de estarem orientadas no sentido do fluxo de água. De um modo geral, os caminhos de fluxo na malha com abertura constante, ilustrados na Figura 4.17a, foram parecidos com os da malha com abertura variável, ilustrados na Figura 4.17b. O uso da abertura variável alterou apenas as descontinuidades atravessadas pelos caminhos de fluxo.

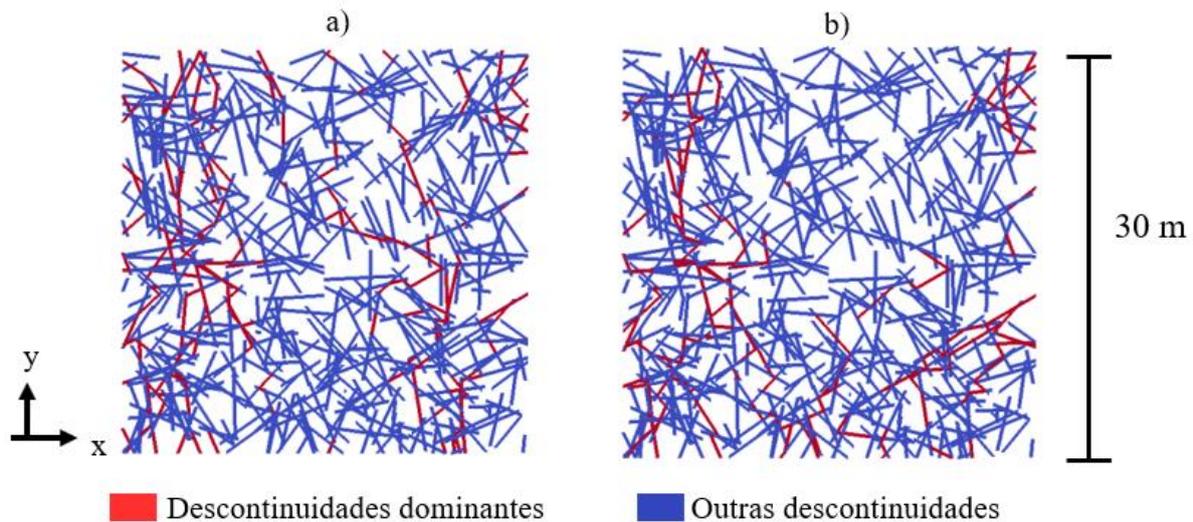


Figura 4.17 – Comparação das descontinuidades dominantes da malha 1: a) com abertura hidráulica constante e b) com abertura hidráulica variável.

Ao contrário do que aconteceu com o maciço de Yangfanggou, desta vez foi possível obter as distâncias médias totais para o caso da abertura constante. Foi observado um comportamento semelhante das distâncias médias totais com a abertura constante e com a abertura variável, um pouco maiores neste caso. Assim como no maciço de Yangfanggou para as descontinuidades dominantes com abertura variável, essas apresentaram um formato irregular para o maciço de El Teniente. Do mesmo modo, as distâncias médias totais de interseção cresceram muito – aproximadamente 15 metros - próximo ao eixo y. Essas distâncias foram muito maiores do que para o eixo x, com aproximadamente 4 metros para a abertura constante e mais ou menos 6 metros para a abertura variável. As distâncias médias totais de interseção com todas as descontinuidades e com as descontinuidades com fluxo foram muito menores - cerca de 0,80 metro e 1 metro, respectivamente. O formato da figura para esses dois grupos é aproximadamente circular, o que está de acordo com os dados de Reeves *et al.* (2013). Esse comportamento foi visto de forma parcial nas laterais dos gráficos das Figuras 4.18a e 4.18b para as descontinuidades dominantes.

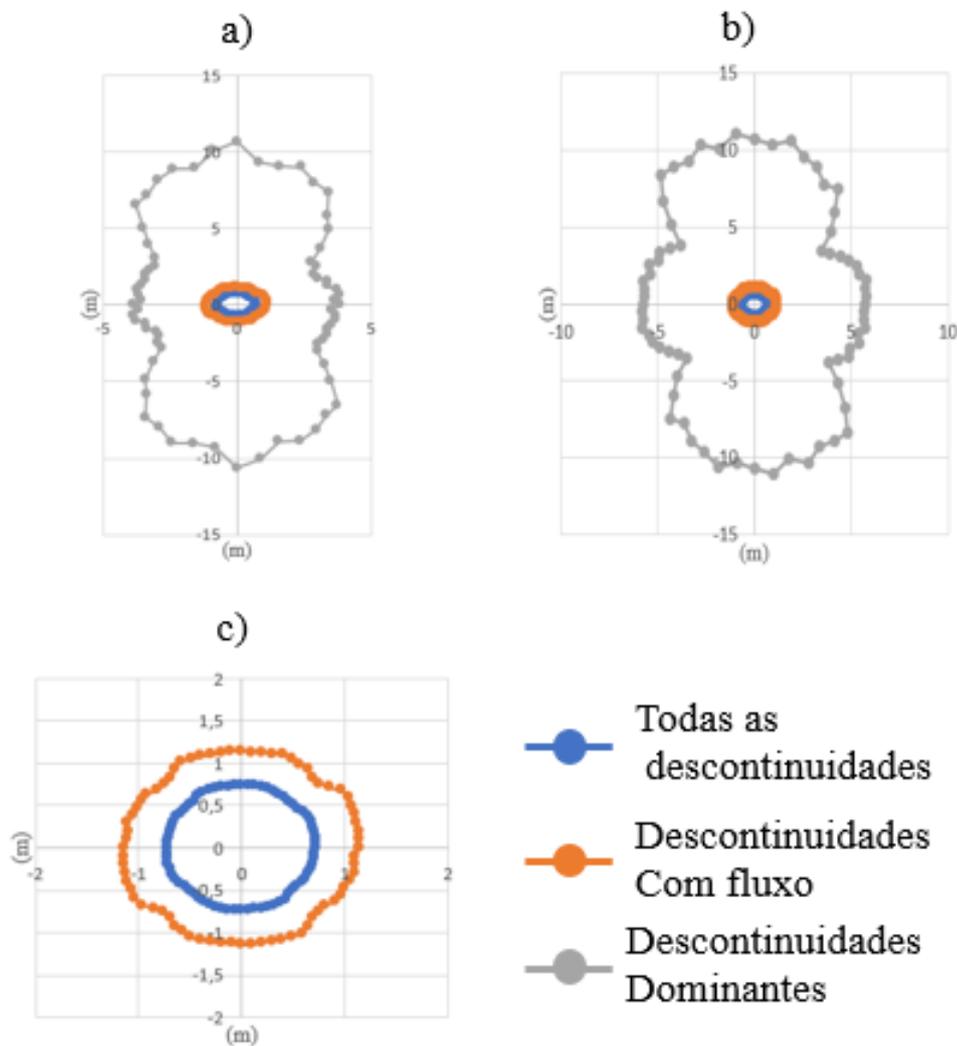


Figura 4.18 – Distâncias médias totais de interseção de El Teniente para: a) abertura constante, b) abertura variável e c) em maior detalhe para as descontinuidades com fluxo e todas as descontinuidades.

A partir da Figura 4.19 foi possível observar resultados semelhantes para os gráficos do fluxo com abertura constante, Figura 4.19a, e abertura variável, Figura 4.19b. Ambos apresentaram a maior distância próximas aos valores de 90 e de 270 graus, do mesmo modo que a abertura variável no maciço de Yangfanggou. Em El Teniente, a distância correspondeu a 30 m ou mais, o tamanho do modelo. Para as outras orientações, os valores para a abertura constante e variável divergiram um pouco, pois a última apresentou maiores distâncias médias para o percentil 95. Para o cenário com abertura constante, as distâncias médias de interseção para 95% dos modelos foram de aproximadamente 7,50 metros. Para a abertura variável, essas variaram entre 15 e 10 metros.

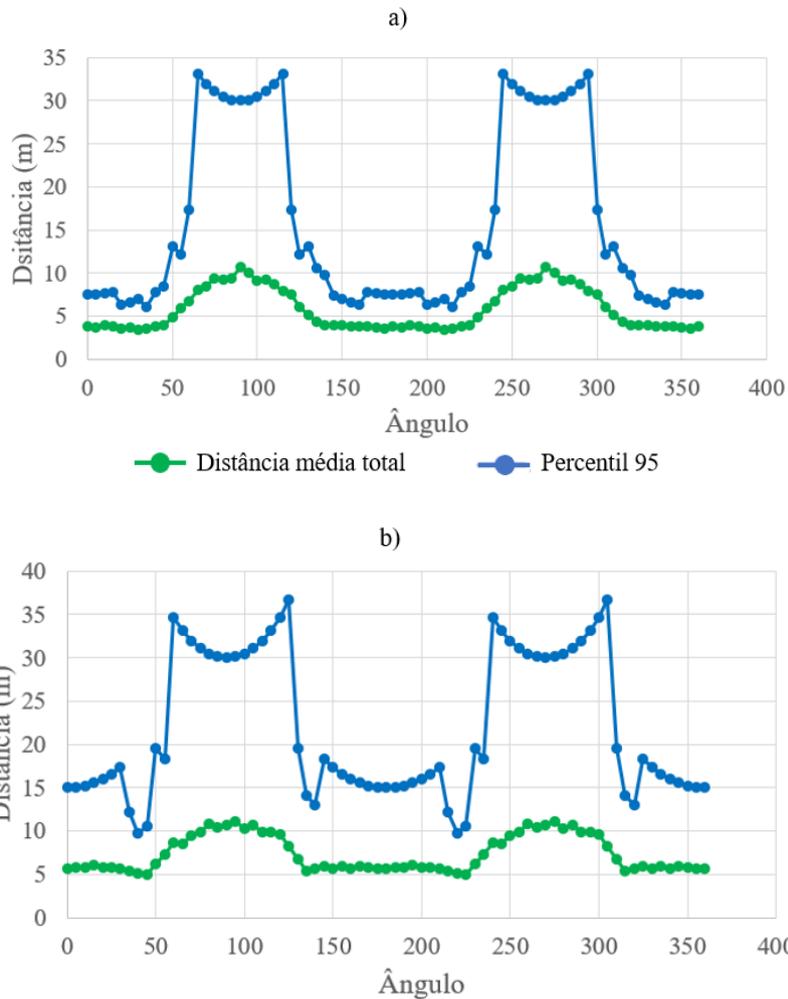


Figura 4.19 – Distâncias média total e percentil 95 de El Teniente para: a) abertura constante e b) abertura variável.

A partir da Figura 4.16a, foi observada a queda de carga hidráulica na malha. Com base nos resultados, foi vista uma queda de carga hidráulica não uniforme e regiões com alteração brusca da poropressão. Esta é causada pela conectividade da malha. O coeficiente de Fisher muito pequeno gerou famílias de descontinuidades com orientações muito variáveis. Em função disso, a malha analisada, apresentou uma região central com pouca conexão. Dessa forma, a parte de cima recebeu mais contribuição da condição de fronteira superior, assim como a de baixo recebeu da inferior. Isso gerou uma grande diferença de carga hidráulica entre as duas. Nas regiões laterais, mais bem conectadas, a transição foi mais suave. Isso também pôde ser visto na Figura 4.16b, onde há poucas descontinuidades com fluxo no meio do modelo e mais nas laterais.

O alto grau de variabilidade da malha também dificultou o reconhecimento das famílias de descontinuidades. Além disso, a distribuição lognormal do raio das descontinuidades não gerou

a mesma quantidade de descontinuidades longas do que a distribuição exponencial para o maciço de Yangfanggou. Essa diferença foi percebida, apesar do raio médio das descontinuidades ser aproximadamente do mesmo tamanho nos dois maciços. A distribuição lognormal pareceu agrupar menos as descontinuidades do que a distribuição exponencial. Talvez isso e a orientação média das famílias de descontinuidades tenham levado à obtenção de um maior número de descontinuidades com fluxo dominante. Novamente, a direção de gradiente e de fluxo influenciaram na classificação das descontinuidades dominantes. Ao contrário do que aconteceu com o maciço de Yangfanggou, a escolha de abertura constante ou variável não alterou muito os resultados na Figura 4.17. O efeito maior foi a alteração dos caminhos de fluxo, já que a condutância de algumas descontinuidades aumentou e a de outras diminuiu.

Em função disso, é possível compreender os impactos nos resultados da linha de varredura. Em primeiro lugar, foi possível obter valores de distâncias médias totais para as descontinuidades dominantes para a abertura constante, como observado na Figura 4.18a. Em segundo lugar, esses tiveram um comportamento semelhante ao da linha de varredura para abertura variável. No entanto, continuou a mesma distorção em torno do eixo y. Dessa vez, as orientações médias das famílias de descontinuidades eram mais próximas das famílias de descontinuidades de Reeves *et al.* (2013), mas o coeficiente de Fisher era menor, o que gerou maior variabilidade. Assim, muitas descontinuidades estavam paralelas ao eixo y e novamente favoreceram o fluxo de água pelas descontinuidades nessa direção.

A diferença entre os resultados para abertura constante e abertura variável é que as distâncias médias totais para a abertura variável foram um pouco maiores do que as para abertura constante. A variabilidade da abertura teria controlado a vazão ao facilitar o fluxo pelas de maior abertura e reduzido nas demais. Dessa forma, ela teria reduzido o número de descontinuidades dominantes. O aumento da distância com o desvio padrão também foi observado por Reeves *et al.* (2013), porém esse mostrou ser mais significativo para a transmissividade do que para a abertura hidráulica. Finalmente, as distâncias médias para todas as descontinuidades e para as descontinuidades com fluxo de água tiveram formato aproximadamente circular, como visto na Figura 4.18c, o que está novamente de acordo com Reeves *et al.* (2013).

O mesmo comportamento das dez maiores direções de interseção média foi observado na Figura 4.19. Assim como para o maciço de Yangfanggou, as maiores direções estão em torno de 90 e 270 graus que correspondem ao eixo y na Figura 4.18. Esses valores elevados traduziram-se no

aumento dos valores médios e médios totais para essas orientações observado nas Figuras 4.18 e 4.19. Com base no critério de Reeves *et al.* (2013), a escolha do dreno seria de 7,5 metros para o cenário de abertura constante. Como há pouca variação entre os valores de orientação próximos ao eixo x, esta poderia ser escolhida livremente. Para a abertura variável, o comprimento varia entre 15 e 10 metros. Embora essa diferença possa significar que mais simulações deveriam ser feitas, os resultados obtidos até o momento permitem sugerir o comprimento de 10 metros a 45 graus para intersectar pelo menos uma descontinuidade dominante. Com base nas descontinuidades com fluxo de água, a orientação do dreno ficaria a critério do projetista, já que o formato circular sugere não haver uma orientação preferencial.

4.3.3 MONTE SECO

O maciço de Monte Seco é mais intensamente fraturado do que os de El Teniente e de Yangfanggou, conforme mostrado na Figura 4.20. O maciço de Monte Seco também diferenciou-se dos outros por possuir uma família com persistência maior do que o tamanho do modelo. Na figura 4.20a, é ilustrada a queda de carga hidráulica nos nós. Assim como para a malha 3 na análise paramétrica, a redução foi bastante uniforme, com algumas diferenças, onde há menos conexão entre as descontinuidades. Houve também uma extensa rede de descontinuidades com fluxo de água, mostradas na Figura 4.20b. A maior parte das descontinuidades que não fizeram parte do grupo pertenciam à família 3 e estavam orientadas aproximadamente em paralelo ao eixo x. Assim, as famílias 1 e 2 destacaram-se no grupo das descontinuidades com fluxo.

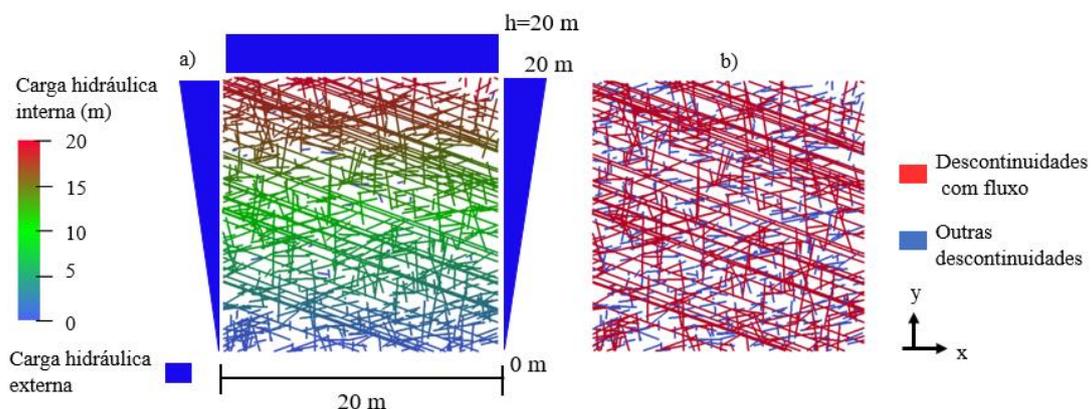


Figura 4.20 – Fluxo de água pelas descontinuidades do maciço rochoso Monte Seco com abertura constante na malha 1: a) carga hidráulica nas descontinuidades, b) descontinuidades com fluxo

A Figura 4.21 exibe as descontinuidades dominantes para as malhas 3 e 21. A partir delas foi possível observar o mesmo resultado da malha de Yangfanggou. Dessa vez também verificou-se o predomínio das descontinuidades orientadas em paralelo ao eixo y no grupo das descontinuidades dominantes. Na Figura 4.21a, a malha 1 com abertura constante possui algumas descontinuidades da família 1 nas descontinuidades dominantes, porém essa presença é muito menos marcante do que nas descontinuidades com fluxo. As descontinuidades da família 3 também são difíceis de perceber nesse grupo. Na Figura 4.21b, isso ficou ainda mais claro na malha 21, com praticamente todas as descontinuidades dominantes pertencentes à família 2. No entanto, para o fluxo com abertura variável, ilustrado na Figura 4.21c, houve um maior número de descontinuidades dominantes, inclusive as das famílias 1 e 3, assim como ocorreu para o maciço de Yangfanggou.

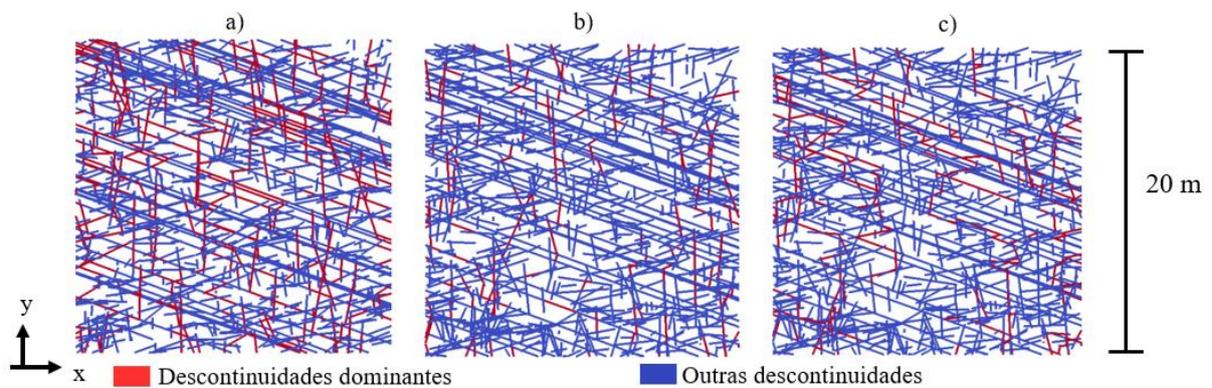


Figura 4.21 – Comparação das descontinuidades dominantes: a) malha 1 com abertura hidráulica constante, b) malha 21, com abertura hidráulica constante e c) malha 21 com abertura hidráulica variável.

Como ocorreu nos outros maciços, também foi percebido o mesmo aumento das distâncias médias totais para as descontinuidades dominantes no caso de abertura constante próximo ao eixo y, mostrado na Figura 4.22a. Isso não foi observado para a abertura variável, conforme a Figura 4.22b. As distâncias médias totais de todas as descontinuidades foram bastante reduzidas, menores do que um metro. As descontinuidades com fluxo de água também foram majoritariamente inferiores a um metro, chegando no máximo a 1,64 metro. O formato também foi idêntico, muito parecido com o da distância média total das descontinuidades dominantes com abertura variável. Esse foi mais arredondado no centro e mais pontiagudo nas extremidades na direção paralela à família 1. Em função disso, a linha de varredura apresentou nessa região as maiores distâncias médias totais de interseção, exceção às distâncias próximas ao eixo y para abertura constante. Somente uma pequena parte da figura pôde ser vista para a abertura

constante nas laterais. Nesse local, também foi possível observar aumento da maior distância média total de 2,30 metros para a abertura constante a 3,45 metros para a abertura variável.

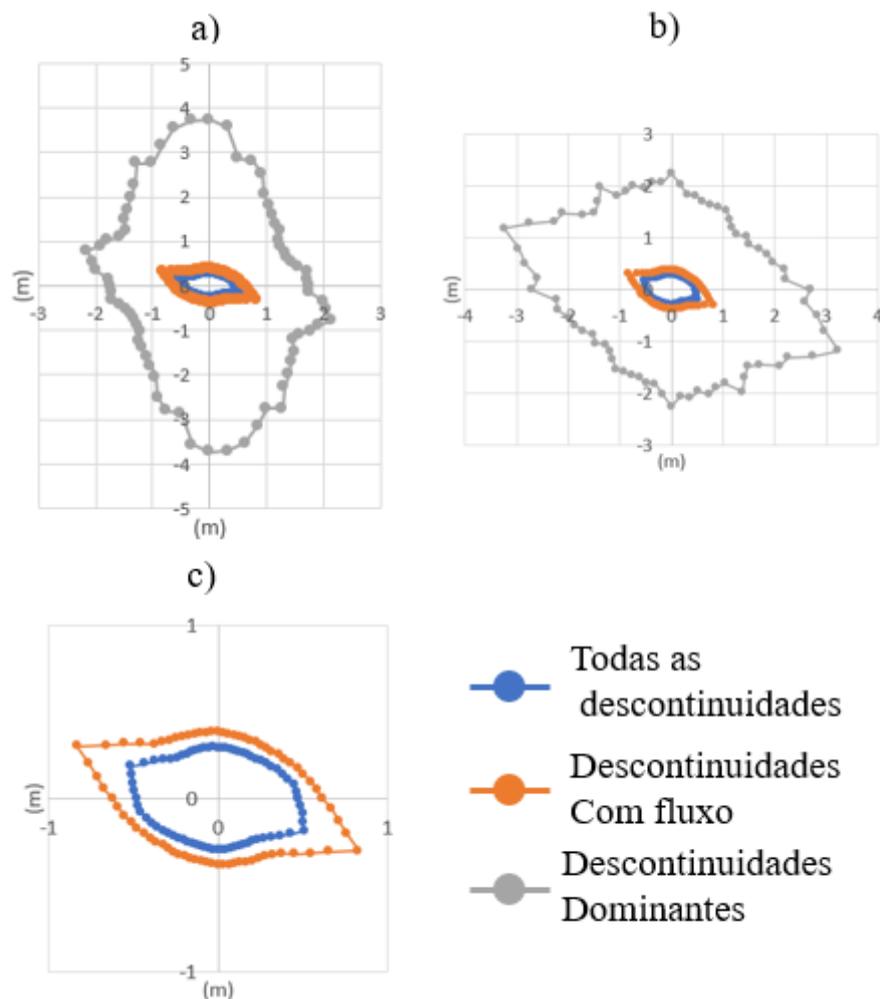


Figura 4.22 – Distâncias médias totais de interseção de Monte Seco para: a) abertura constante, b) abertura variável e c) em maior detalhe para as descontinuidades com fluxo e todas as descontinuidades.

O maciço rochoso de Monte Seco apresentou distâncias médias totais menores do que as dos maciços de Yangfanggou e de El Teniente. Embora tenha tido a mesma distorção próxima ao eixo y para a abertura constante, ilustrado na Figura 4.23a, essa não foi tão grande quanto nos outros, de modo que não atingiu o tamanho do modelo. Foi, assim, possível obter o 95° percentil da distância média de interseção para o cenário de abertura constante, o que não havia acontecido anteriormente. O menor valor encontrado foi de 2,66 metros, para um ângulo de orientação de 20 graus do dreno com a horizontal.

Para as distâncias médias totais com abertura variável, não foi observada uma distorção no eixo y como a que aconteceu com os outros maciços. Em Monte Seco, as distâncias médias totais das descontinuidades dominantes seguiram as mesmas tendências dos grupos contendo todas as descontinuidades e descontinuidades com fluxo de água. Os valores ainda apresentaram algumas variações de uma orientação para a outra para o décimo maior valor, o que pode indicar a necessidade de mais algumas simulações para se obter um valor preciso. Com as 200 simulações realizadas, o menor comprimento de dreno escolhido seria igual a 2,60 metros, para uma orientação de 45 graus.

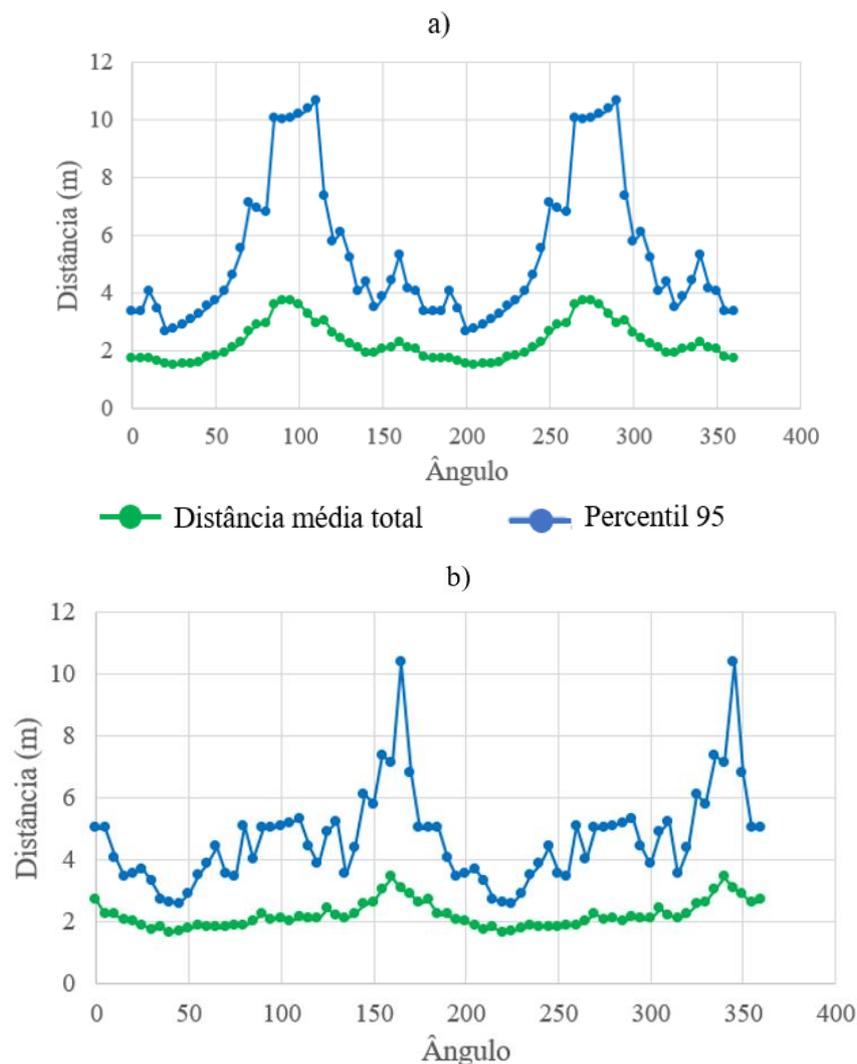


Figura 4.23 – Distância média total e percentil 95 de Monte Seco para: a) abertura constante e b) abertura variável.

O maciço rochoso de Monte Seco apresentou um gradiente mais próximo do uniforme para a redução da carga hidráulica do que os outros, Figura 4.20a. O motivo encontrado para isso foi a intensidade de fraturamento mais elevada e, principalmente, a presença das descontinuidades

da família 1 com persistência muito elevada que não ocorreu nos outros maciços. Essas foram as principais responsáveis pela conexão das descontinuidades da malha. A partir da Figura 4.20b, foi percebido que as descontinuidades da família 2 também contribuíram para o fluxo de água. Estas foram favorecidas pelo sentido do gradiente hidráulico e por permitirem a conexão das descontinuidades da família 1 entre elas. As descontinuidades da família 3, no entanto, não auxiliaram tanto, pois estavam praticamente perpendiculares ao gradiente e foram muito menos persistentes do que as descontinuidades da família 1. Dessa forma, ficou caracterizada a importância da persistência das descontinuidades para o fluxo de água. Por causa disso, a Figura 4.20b mostrou também uma extensa rede de descontinuidades com fluxo de água. Assim, a rede de descontinuidades do maciço rochoso de Monte Seco forneceu uma grande quantidade de caminhos de fluxo possíveis.

Com relação às descontinuidades dominantes, foi observada a predominância das descontinuidades paralelas ao sentido do fluxo para a abertura constante, assim como ocorreu com o maciço de Yangfanggou. Por isso, as descontinuidades da família 2 se destacaram, porém ainda foram encontradas descontinuidades da família 1, o que evidenciou novamente seu papel como condutoras de fluxo. No entanto, em determinadas configurações de malha, exemplificada na Figura 4.21b, houve poucas descontinuidades dominantes da família 1. Os motivos podem ter sido a grande proximidade das descontinuidades da família 2 umas das outras, que teria facilitado o caminho de fluxo por elas, assim como as da família 1, que teriam fornecido vários caminhos localmente e reduzido o fluxo pelas descontinuidades individuais. Assim como para os outros maciços rochosos, a comparação entre as figuras 4.21b e 4.21c mostrou que a abertura variável contribuiu para a alteração dos caminhos de fluxo. Essa mudança favoreceu principalmente as descontinuidades mais persistentes da família 1.

O formato obtido com a linha de varredura é distinto dos observados por Reeves *et al.* (2013). No entanto, foi possível analisá-la a partir desses. A figura está mais bem formada para o cenário de abertura variável. Essa foi mais circular no centro e pontiaguda nas laterais. O formato circular corresponde a uma malha com descontinuidades orientadas aleatoriamente, o que pode ter ocorrido em função da combinação das três famílias de descontinuidades orientadas em ângulos diferentes. A linha formada pelas duas partes pontiagudas da figura é aproximadamente paralela à família 1 de descontinuidade. Por isso, para esses ângulos há menos interseções com essa família. O formato é devido principalmente ao encontro das famílias 2 e 3, por isso o ângulo agudo. Esse resultado foi o obtido para todas as descontinuidades, para as descontinuidades com fluxo de água e para as descontinuidades

dominantes com abertura variável. Para a abertura constante, houve a interferência no eixo y, já observada nos maciços anteriores, embora em menor medida. No entanto, nas laterais das figuras, aproximadamente paralelo ao eixo x, os formatos das figuras foram parecidos. Nessa região, as distâncias médias para a abertura constante foram menores do que para as aberturas variáveis. Em função do alto grau de fraturamento do maciço, os valores médios obtidos para os três tipos de descontinuidades foram muito baixos, não ultrapassando 3 metros.

As distâncias médias para cada simulação também refletiram esses resultados, como mostrado na Figura 4.23. Desta vez, o limite de Reeves *et al.* (2013) pôde ser analisado para a abertura constante e para a abertura variável, pois todos os valores foram menores do que o tamanho do modelo. Apesar de ainda ter havido o aumento da distância para valores próximos de 90 e de 270 graus, esse foi menor do que nos outros maciços e não atingiu o tamanho do modelo. Desse modo, pelo critério de Reeve *et al.* (2013) para a abertura constante seria escolhido o comprimento de 10 metros para uma orientação ortogonal. O menor valor de comprimento para o dreno seria de 2,76 metros e uma orientação de 20 graus com o eixo x. Para a abertura variável, esse valor se reduziria para 2,60 metros e uma orientação de 45 graus com o eixo x. No entanto, esses comprimentos são excessivamente curtos para a instalação prática de um dreno e para o uso de uma drenagem efetiva em um maciço rochoso, mesmo que intersecte uma descontinuidade que conduza uma vazão de água maior. Dessa forma, o método de Reeves *et al.* (2013) também não foi adequado para o dimensionamento de drenos. Uma forma de dimensionamento que poderia ser utilizada é a simulação do fluxo de água com drenos e o uso de critérios para uma redução mínima da carga hidráulica em todos os nós da malha ou em uma região específica até atingir um valor limite para garantir a estabilidade do talude.

Em síntese, o método de Reeves *et al.* (2013) foi aplicado em três maciços rochosos com diferentes geometrias das descontinuidades para escolha de comprimento de drenos. Com base nele, foi possível analisar o impacto das geometrias no fluxo de água. No entanto, o uso da abertura hidráulica no lugar da transmissividade mostrou-se muito dependente das condições de contorno, o que resultou na inaplicabilidade do método para algumas orientações, pois não havia interseção com descontinuidades dominantes em quantidade suficiente. Além disso, o método forneceu valores muito pequenos para comprimentos de dreno para um maciço muito fraturado, o que também não é realista. Por esses motivos, o método de Reeves *et al.* (2013) apresentou uma aplicabilidade limitada quanto à escolha do comprimento dos drenos. Entretanto, foi uma ferramenta útil para analisar o papel das famílias das descontinuidades e o impacto da variabilidade da abertura hidráulica no fluxo de água pela malha.

4.4 DRENAGEM

Na Figura 4.24 está ilustrada a queda de carga hidráulica na malha em função da orientação de um dreno de 10 m para os ângulos de 90, 60 e 45 graus. Foi possível observar que o dreno consegue reduzir efetivamente as cargas hidráulicas das descontinuidades próximas a ele. Houve uma diferença entre os lados esquerdo e direito da malha, com menores poropressões do lado direito. O dreno a 90 graus, Figura 4.24a, conseguiu diminuir a carga hidráulica na região central da malha, onde as cargas eram maiores. Os drenos orientados a 60 e 45 graus, figuras 4.24b e 4.24c, reduziram menos a carga hidráulica na região central e um pouco mais do lado direito. Não foi possível perceber grandes diferenças de carga hidráulica na malha 1 para abertura constante ou variável, por isso apenas a primeira foi ilustrada. Um exemplo de rotina para estudo da eficiência da drenagem e da vazão está disponibilizado no apêndice B.2.

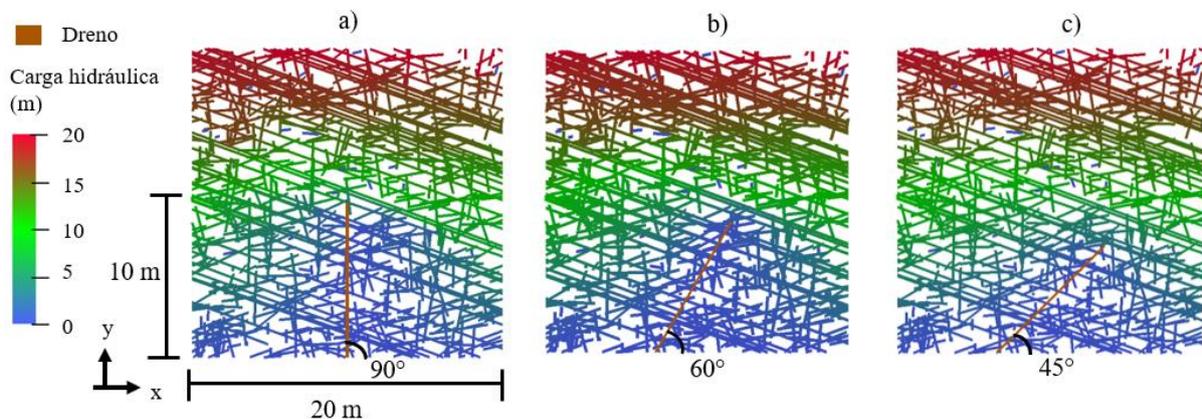


Figura 4.24 – Redução da carga hidráulica nos nós da malha 1 para diferentes orientações de dreno

A Figura 4.25 mostrou a eficiência média dos drenos após 50 simulações para reduzir a carga hidráulica nos nós. O gráfico evidenciou que a eficiência do dreno é dependente de sua orientação. Assim, a eficiência do sistema de drenagem aumentou com o ângulo da orientação do dreno em relação ao eixo x. A diferença foi bastante significativa, pois foi de 0,86 m/nó a 1,36 m/nó para orientações de 45 a 90 graus. Contudo, essa relação não foi diretamente proporcional ao ângulo, pois o incremento da eficiência foi maior de 45 graus para 60 e de 75 para 90 graus foi quase nulo, apenas $1,2 \cdot 10^{-3}$ m/nó. Além disso, para o fluxo com abertura variável, o gráfico não somente exibiu o mesmo comportamento, mas a eficiência média obtida foi muito próxima para os quatro ângulos escolhidos.

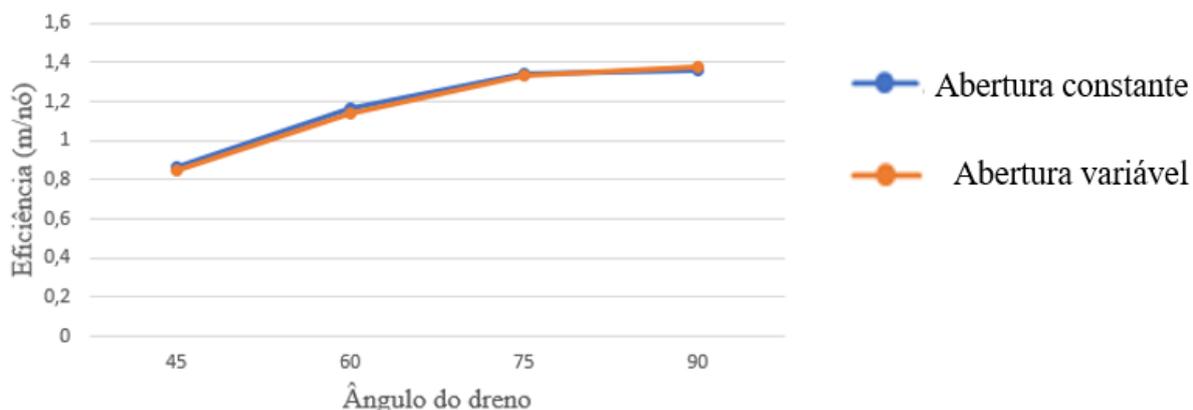


Figura 4.25 – Eficiência da drenagem em função da orientação do dreno

A Figura 4.26 mostra um gráfico com comportamento semelhante ao da Figura 4.25. Como a eficiência, a vazão no dreno também foi maior para ângulos de orientação maiores em relação ao eixo x. Essa também pareceu ser proporcional ao seno do ângulo de orientação do dreno com o eixo x, embora a vazão média tenha diminuído ligeiramente de 75 graus para 90 graus. No entanto, uma diferença perceptível é que os valores de vazão para a abertura variável foram menores do que os da abertura constante.

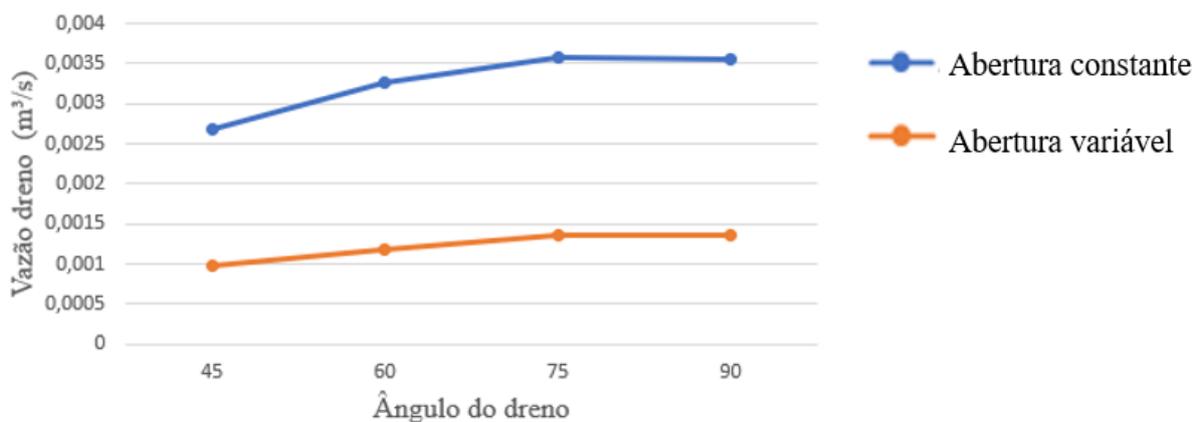


Figura 4.26 – Vazão no dreno em função da orientação

Ademais da orientação do dreno, a eficiência também depende do comprimento do dreno. O crescimento foi mais do que linear. Isso pode ser verificado na Figura 4.27: para um comprimento de 6 m e abertura constante, a eficiência foi de 0,51 m/nó; para um comprimento de 10 metros, a eficiência chegou a 1,36 m/nó, quase o triplo; para um comprimento de 12 m, a eficiência foi de 1,89 m/nó, mais do que o triplo da eficiência do dreno com 6 m, para o dobro do comprimento. Em comparação com a Figura 4.25, foi possível notar que o dreno com comprimento de 6 m possui uma eficiência menor do que o dreno de 10 metros orientado a 45

graus. Assim como para a orientação do dreno, as eficiências dos drenos foram muito semelhantes após 50 simulações para fluxo de água com abertura constante e variável.

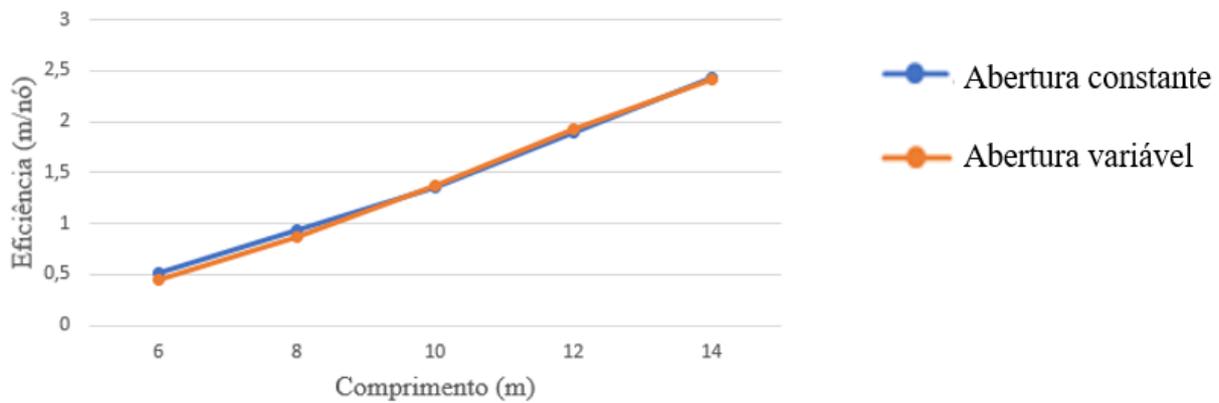


Figura 4.27 – Eficiência da drenagem em função do comprimento do dreno

Na Figura 4.28, foi possível perceber o mesmo comportamento da vazão no dreno em relação ao comprimento. O crescimento da vazão, assim como a eficiência, ocorre de forma levemente exponencial. Além disso, como na Figura 4.26, a vazão no dreno foi menor para a abertura variável do que para a abertura constante. A vazão aumentou de $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ para $3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ e para $6,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ para comprimentos de 6, de 10 e de 14 metros, respectivamente, e abertura constante. Para a abertura variável, esses valores foram bastante reduzidos: para $6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ para $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ e $2,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ para comprimentos de 6, de 10 e de 14 metros, respectivamente.

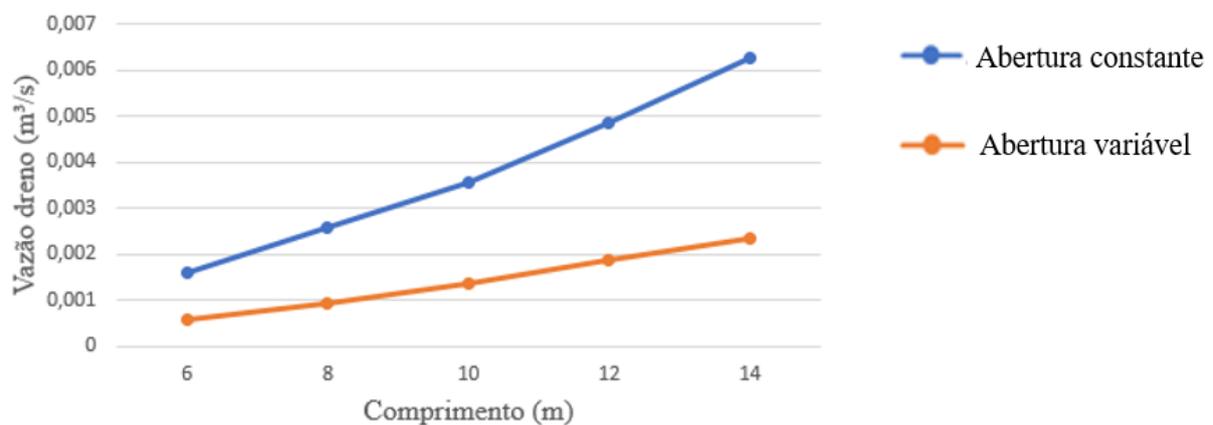


Figura 4.28 – Vazão no dreno em função do comprimento

A Figura 4.29, mostrou três sistemas de drenagem com drenos de 12 metros de comprimento espaçados uniformemente. Os sistemas foram constituídos por 2, 3 e 4 drenos nas Figuras 4.29a, 4.29b e 4.29c, respectivamente. Na Figura 4.29a foi possível observar que o uso de dois drenos conseguiu reduzir a carga hidráulica na região central da malha de forma considerável, mas não

conseguiu reduzir muito além do comprimento dos drenos. A mudança para o uso de três drenos e quatro drenos não teve efeito muito perceptível. Essa ocorreu mais nas laterais, próximas das fronteiras, e na região central próxima à extremidade dos drenos.

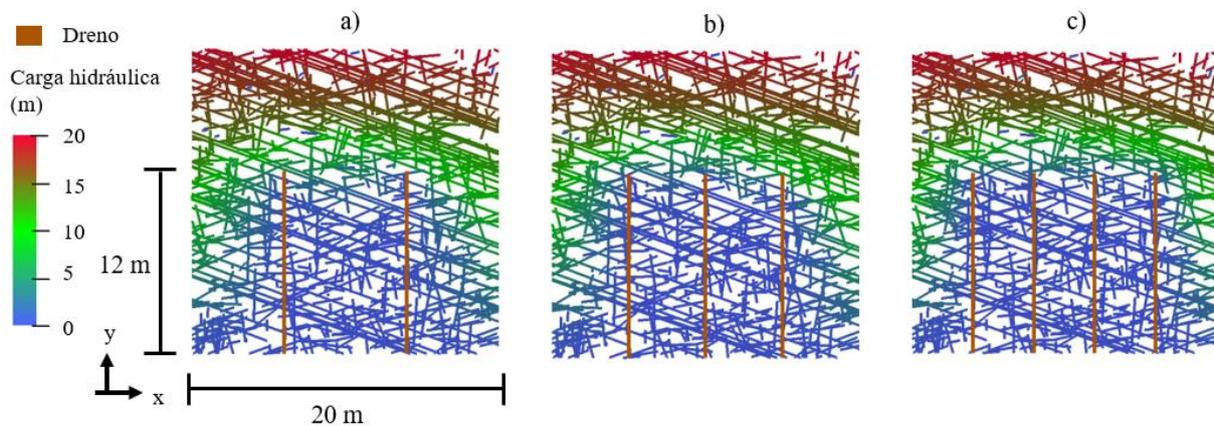


Figura 4.29 – Redução da carga hidráulica nos nós da malha 1 para diferentes quantidades de dreno de 12 metros: a) dois drenos, b) três drenos e c) quatro drenos

Como os resultados para abertura variável e abertura constante foram muito próximos uns dos outros, os sistemas de drenagem com números de dreno diferentes foram testados apenas para abertura constante. O resultado é exposto na Figura 4.30. A partir dela foi possível notar que a eficiência é pouco alterada com o aumento do número de drenos. Para drenos com comprimento de 6 m, a eficiência aumentou de 0,51 m/nó para 1,11m/nó. Apesar da eficiência ter dobrado, foram necessários quatro vezes mais drenos. Além disso, o maior acréscimo ocorreu de um dreno para dois, quando a eficiência passou de 0,51 m/nó para 0,86 m/nó. Isso também foi constatado para o comprimento de 10 metros. A variação total foi de 1,36 m/nó para 2,60 m/nó para 1 e 4 drenos, respectivamente, mas para dois drenos a eficiência já tinha sido de 2,07 m/nó. Para o comprimento de 12 metros a relação foi mais próxima da linear com um crescimento gradual de 2,42, 2,81, 3,15 e 3,44 m/nó. Dessa forma, um dreno com comprimento de 12 metros apresentou eficiência média maior do que quatro drenos com comprimento de 6 metros. A eficiência média também foi superior à de três drenos com comprimento de 10 metros e pouco inferior à de 4 drenos. Um sistema com dois drenos com comprimentos de 12 metros alcançou eficiência maior do que qualquer sistema de drenagem com comprimentos inferiores analisados.

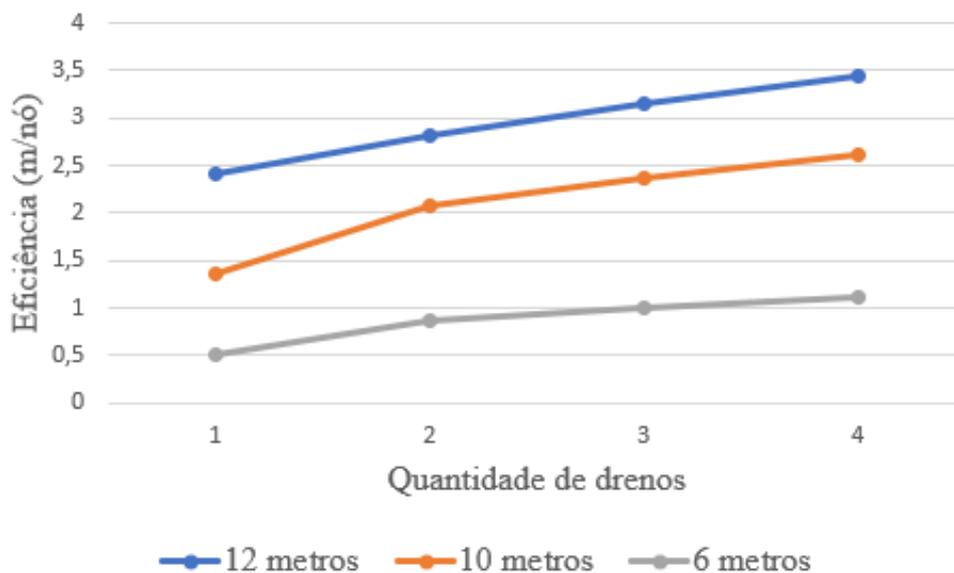


Figura 4.30 – Eficiência do sistema de drenagem em função comprimento e do número de drenos

No início do estudo de drenagem, foi observada a redução da carga hidráulica para uma rede de descontinuidades. Para ambas as simulações, o dreno conseguiu reduzir a carga hidráulica na malha. A redução foi maior para as regiões mais próximas do dreno. Como era esperado, os resultados encontrados para a redução da carga hidráulica pela malha foram muito semelhantes à de um meio contínuo, em função da elevada intensidade de fraturamento da malha. No entanto, apesar da colocação do dreno ortogonal e no centro da malha, foi constatada pequena uma diferença na carga hidráulica do lado esquerdo e do lado direito. As cargas do lado esquerdo foram maiores do que as do lado direito. A causa disso, foi a orientação das descontinuidades persistentes da família 1. Essas intersectaram a fronteira da malha em um ponto mais elevado à esquerda, o que favoreceu o fluxo. De modo análogo, a interseção da família 1 no lado direito foi em um ponto inferior o que reduziu as cargas. Quando os drenos foram inclinados, houve uma maior redução das poropressões do lado direito e houve um aumento das poropressões do lado esquerdo. Em maciços menos fraturados, é esperado que a redução da carga hidráulica pela malha seja menos uniforme e mais dependente a orientação e da conectividade das famílias de descontinuidades.

A partir da redução das cargas observadas na Figura 4.24 foi possível compreender o gráfico da Figura 4.25, que mostrou a relação entre a eficiência do sistema de drenagem e a orientação. Verificou-se que a eficiência aumentava com o ângulo do dreno em relação ao eixo x. Isso ocorreu porque o dreno instalado ortogonalmente atingia uma região com poropressão maior, reduzindo para perto de zero a pressão nas descontinuidades mais próximas. Quando o dreno

foi orientado a 45 graus, a pressão nas descontinuidades também diminuiu para próximo de zero. A carga hidráulica inicial era menor por possuir menores valores de posição no eixo y. Além disso, a assimetria causada pelas descontinuidades da família 1 gerou menores valores de carga hidráulica do lado direito. O dreno também ficou mais distante do lado esquerdo da malha, onde havia poropressões mais elevadas. Assim, a redução total das cargas nos nós foi menor para o dreno inclinado, o que reduziu a sua eficiência média.

Um outro ponto notado na Figura 4.25 foi eficiências médias do dreno para abertura constante e variável praticamente idênticas. Isso também foi observado por Reeves *et al.* (2014) para comprimentos de drenos de 30 e 45 metros, mas eles obtiveram uma diferença maior para 15 metros. No entanto, calcularam a eficiência média com base em apenas 5 malhas. Isso mostra que pode haver uma diferença de eficiência para a abertura constante e variável para uma rede individual, mas para um número maior de malhas simuladas, parece haver uma tendência de os dois se equivalerem.

O impacto maior da abertura variável foi no fluxo de água de saída pelo dreno. O fluxo foi bastante menor do que para abertura constante. Ainda assim, os dois apresentaram a mesma tendência de aumento da eficiência com o ângulo de orientação do dreno. Isso está de acordo com as observações feitas na análise paramétrica que mostrou que a condutividade equivalente da malha com abertura variável era menor do que a de abertura constante. A semelhança entre os gráficos de eficiência e de vazão, tanto para a orientação, Figuras 4.25 e 4.26, quanto para o comprimento, Figuras 4.27 e 4.28, sugerem a mesma associação dos dois parâmetros com a capacidade do dreno de reduzir a poropressão no maciço.

Desse modo, o mais importante para a eficiência da drenagem em maciço intensamente fraturados foi atingir os locais com maiores cargas hidráulicas para ambas as hipóteses de abertura constante e variável. Essa constatação está em desacordo com os pressupostos do método de Reeves *et al.* (2013). Estes escolheram como critério para dimensionamento dos drenos a intersecção com uma descontinuidade com fluxo dominante, pois essa facilitaria o fluxo para o dreno, o que não ocorreu. No entanto, também foi verificado nos estudos dos maciços rochosos que o fluxo dependia das condições de contorno, as quais foram alteradas em função da presença do dreno. Dessa forma, foi possível concluir, a partir do conceito de eficiência de Reeves *et al.* (2014), que o método de Reeves *et al.* (2013) não forneceu a orientação de dreno individual mais eficiente para o maciço de Monte Seco.

Da mesma forma, a escolha do comprimento do dreno pelo método de Reeves *et al.* (2013) apresentou alguns problemas. O primeiro foi observado na análise do maciço de Monte Seco que o comprimento do dreno encontrado foi muito curto. O segundo é que a partir da Figura 4.27 não foi constatada uma mudança de comportamento marcante da relação entre a eficiência e o comprimento do dreno. Manteve-se uma relação levemente exponencial para todas as distâncias. Não houve nenhuma mudança que denotasse o impacto do cruzamento com uma descontinuidade dominante. Pelo contrário, a escolha do comprimento pelo método de Reeves *et al.* (2013) teria gerado valores de eficiência ainda menores do que os obtidos para drenos de 6 metros de comprimento.

Como foi observado anteriormente, o comportamento do meio se assemelhou ao de um meio contínuo em função da elevada intensidade de fraturamento. Assim, drenos maiores intersectavam mais descontinuidades com maiores cargas hidráulicas, o que explica essa relação crescente da eficiência com o comprimento de drenos. Em maciços menos fraturados, é possível que um dreno não intersecte descontinuidades, ou que intersecte uma, mas sem a garantia de intersectar outras descontinuidades com o aumento do comprimento. No caso de maciços pouco fraturados, a eficiência da drenagem deve ser mais dependente da posição do dreno e da intersecção com algumas descontinuidades do que do comprimento. O uso de modelos tridimensionais facilita a intersecção do dreno com as descontinuidades, o que pode facilitar a drenagem do maciço rochoso, mas também deve ser estudado com diferentes intensidades de fraturamento.

Tanto nos estudos de orientação quanto de comprimento, o cálculo do fluxo de água com abertura variável, não apresentou vantagens claras. Esse forneceu os mesmos valores de eficiência para uma vazão de dreno menor. Assim o dimensionamento da capacidade do dreno seria a favor da segurança, se calculado a partir do fluxo de água com abertura constante. Por esse motivo, diferentes sistemas de drenagem foram testados com diferentes quantidades e tamanhos de dreno considerando apenas a abertura constante das descontinuidades.

A partir do estudo dos sistemas de drenagem com drenos em paralelo, foi constatado que a adição de drenos aumentava a eficiência. No entanto, esse aumento não era proporcional: assim a contribuição marginal de cada dreno diminui progressivamente. Isso também foi observado por Reeves *et al.* (2014) para uma disposição radial de drenos. Em conjunto com o efeito do comprimento do dreno na eficiência percebido anteriormente, isso explica a razão pela qual drenos mais compridos em menor número foram mais eficientes do que drenos menores em maior número. Dessa forma, com base no critério de eficiência adotado seria preferível escolher

drenos mais compridos do que em maior quantidade, o que está de acordo com os resultados encontrados na literatura com análises de meio contínuo como Shaghghi *et al.* (2020) e Moraes (2017).

No entanto, como o fluxo de água é bastante dependente da geometria da rede, e tendo em vista que em função do local e das necessidades podem ser atribuídos diferentes critérios de eficiência, essa análise deve ser feita caso a caso. Além disso, é importante ressaltar que neste estudo foi considerada a média das malhas em função das dificuldades inerente a coleta de dados em maciços rochosos fraturados. Maiores conhecimentos acerca das descontinuidades podem resultar em redes de descontinuidades mais específicas e, portanto, alterar os resultados obtidos.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um novo código computacional para a representação de maciços rochosos fraturados por meio de redes de fraturas discretas em duas dimensões e cálculo de fluxo estacionário. O código foi utilizado para estudar o comportamento do fluxo de água por maciços rochosos fraturados e saturados para descontinuidades com abertura hidráulica constante ou descrita por uma distribuição lognormal, para diferentes valores de média e de desvio padrão, e ainda para abertura hidráulica correlacionada com o comprimento. Depois, foi testado o método de Reeves *et al.* (2013) para os maciços de Yangfanggou, de El Teniente e de Monte Seco, cada um com propriedades geométricas das famílias de descontinuidades específicas. Por fim, foram avaliados sistemas de drenagem distintos para o maciço de Monte Seco.

Inicialmente, foi feita a validação do código com um problema de fluxo básico com duas descontinuidades. O programa forneceu os valores esperados de fluxo de água, de carga hidráulica e de condutância, portanto foi considerado válido. Em seguida, o programa foi testado em duas malhas ortogonais com diferentes intensidades de fraturamento e sob gradiente constante. Novamente, os valores para as vazões, para a redução da carga hidráulica, gradual e uniforme, e para as condutâncias foram os esperados, assim como a vazão de saída da malha, que atendeu ao princípio da superposição de Zhang *et al.* (1996). A partir desse princípio, foram obtidas as condutividades hidráulicas equivalentes para um meio contínuo, para estudo de drenagem da malha. Os resultados da drenagem do maciço obtidos pelo programa e os do meio contínuo pelo SEEP /W do Geostudio foram bastante próximos para as vazões nos drenos, redução das cargas hidráulicas nos nós e vazões de saída da malha. Por isso, o programa foi considerado válido.

A análise paramétrica revelou uma relação de potência entre a abertura hidráulica média e o fluxo de água pela malha, o que estava de acordo com a lei cúbica do fluxo de água pelas descontinuidades. O aumento do desvio padrão, no entanto, reduzia o fluxo de água, como observado por Javadi *et al.* (2016) e Reeves *et al.* (2013). Isso mostrou que as descontinuidades com menor abertura hidráulica restringiam o fluxo pela malha. Não foi possível obter uma relação clara entre o desvio padrão do fluxo de água de saída e o desvio padrão da abertura hidráulica. Verificou-se ainda que a média da abertura hidráulica também aumentava o desvio

padrão da vazão de saída. Por isso, esse é o parâmetro mais importante de ser determinado em estudos de fluxo de água pelo maciço, e maiores recursos devem ser investidos na sua estimativa. Ao contrário do fluxo de água, a carga hidráulica nas descontinuidades foi pouco afetada pela variação da abertura hidráulica. A redução pela malha foi a mesma para os diferentes valores de abertura constante adotados. Para a abertura variável, houve somente pequenas diferenças de carga hidráulica, possivelmente em função da elevada conectividade das descontinuidades do maciço de Monte Seco.

Na análise paramétrica, foram igualmente testadas as hipóteses mais comumente utilizadas acerca da abertura hidráulica. A abertura hidráulica variável com distribuição lognormal gerou os menores valores de vazão média de saída. Além disso, o fluxo de água seguiu a mesma distribuição, o que evidenciou mais uma vez a influência da abertura hidráulica no fluxo. O mesmo comportamento foi observado por Javadi *et al.* (2016). A abertura constante forneceu valores médios mais elevados de fluxo de água e foi mais bem representada por uma distribuição normal, o que estava de acordo com os resultados de Min *et al.* (2004). Por fim, a correlação entre abertura hidráulica e comprimento foi a que gerou as maiores vazões, como observado por Hyman *et al.* (2016) e Zhu *et al.* (2021), a distribuição normal foi novamente a que melhor se adequou aos dados de vazão de saída. Isso evidenciou que a distribuição de fluxo de água estava ligada, em primeiro, à distribuição da abertura hidráulica e, em segundo lugar, à geometria da malha. A conformidade dos resultados obtidos com os observados por outros autores corroborou o bom funcionamento do código e mostrou as tendências de cada uma das hipóteses da abertura hidráulica para as redes de descontinuidades de um maciço rochoso específico. Dessa forma, fica a critério dos projetistas, de suas necessidades e dos dados disponíveis qual das hipóteses de abertura hidráulica utilizar.

Nos estudos dos maciços rochosos, o programa permitiu efetivamente obter a redução de cargas nas malhas, as descontinuidades com fluxo de água e as descontinuidades dominantes. Assim foi possível observar no programa *Paraview* que a redução era aproximadamente uniforme, principalmente no maciço de Monte Seco, muito fraturado, e em função da família de descontinuidades muito persistente. Para os outros maciços, essa foi mais variável e dependia da conectividade das descontinuidades.

No entanto, o método de Reeves *et al.* (2013) não forneceu bons resultados quando utilizada a abertura hidráulica no lugar da transmissividade, principalmente em relação às descontinuidades dominantes. Não foi possível determinar o comprimento e a melhor orientação dos drenos para o maciço Yangfanggou com abertura hidráulica constante. Isso pode

estar relacionado com a distribuição exponencial do diâmetro das descontinuidades do maciço rochoso ou com a intensidade de fraturamento. Para a abertura variável, foi possível determinar o comprimento de drenos para algumas orientações, mas, para orientações paralelas às descontinuidades dominantes e ao sentido do fluxo, os valores aumentaram muito, o que prejudicou a análise. Isso aconteceu também com os maciços de El Teniente para abertura constante e variável e para o maciço de Monte Seco para a abertura constante. A análise da simulação do fluxo com abertura constante e com abertura variável com o programa *Paraview* mostrou que essas duas hipóteses geram caminhos de fluxo distintos e isso influenciou os resultados. As simulações de fluxo de água no maciço de Monte Seco para abertura variável obtiveram valores de comprimento de drenos, assim como as orientações que minimizam o comprimento. Entretanto, os comprimentos obtidos foram muito curtos – inferiores a 3 metros. A família 1 de descontinuidades de Monte Seco destacou-se na condução de fluxo de água e na conectividade da malha em função de sua elevada persistência. Diferentemente das descontinuidades dominantes, os grupos das descontinuidades com fluxo e todas as descontinuidades forneceram bons resultados para os gráficos de distâncias médias totais para todos os maciços rochosos. Os resultados estavam de acordo com as observações de Reeves *et al.* (2013).

A orientação e o comprimento obtidos pelo método de Reeves *et al.* (2013) não foram os mais eficientes. As relações encontradas mostravam que a eficiência de um dreno aumentava quanto maior o ângulo com o eixo x no caso de um maciço rochoso intensamente fraturado. Além disso, o aumento da eficiência com o incremento do comprimento de dreno foi mais do que linear. Assim, o pressuposto de Reeves *et al.* (2013) de que um dreno seria eficiente se interceptasse uma descontinuidade com fluxo dominante não se confirmaram neste caso. Para uma malha intensamente fraturada como a de Monte Seco, o principal requisito para melhorar a eficiência da drenagem foi atingir regiões com maiores cargas hidráulicas. A eficiência também revelou-se indiferente na simulação do fluxo de água por abertura constante ou variável na média, porém o fluxo pelo dreno foi maior com abertura constante. Por isso, o uso da abertura constante parece ser a forma mais segura para o dimensionamento de dreno em problemas de fluxo de água em maciço rochoso fraturado. Por fim, a simulação com diferentes quantidades e tamanhos de drenos mostrou que drenos instalados em paralelo mais compridos em menores quantidades são mais efetivos que drenos menos compridos em maiores quantidades.

5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como há uma grande variedade de parâmetros envolvidas no estudo de fluxo de água por maciços rochosos fraturados, ainda há muito por ser explorado. Como sugestões para pesquisas futuras, recomenda-se:

- Reproduzir as análises paramétricas do fluxo de água para três dimensões;
- Realizar a análise paramétrica do fluxo de água pelo maciço com diferentes intensidades de fraturamento das famílias;
- Realizar a análise paramétrica do fluxo de água com diferentes orientações e variabilidades das famílias de descontinuidades;
- Aplicar o método de Reeves *et al.* (2013) levando em consideração a dependência da abertura hidráulica e do comprimento das descontinuidades;
- Aplicar o método de Reeves *et al.* (2013) e alterar as propriedades dos maciços rochosos estudados;
- Estudar a eficiência de um sistema de drenagem com espaçamentos irregulares para uma malha específica;
- Replicar os estudos de eficiência de sistemas de drenagem para novos critérios de eficiência, como para uma região específica do modelo;
- Pesquisar sistemas de drenagem e sua eficiência para redes de fraturas discretas em 3D.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILAR, L.J. (2008). Programação em C++: Algoritmos, Estruturas de Dados e Objetos. 2nd edn. McGraw-Hill Editora, São Paulo, 780 p.
- ALGHALANDIS, Y.F. (2017). ADFNE: open source software for discrete fracture network engineering, two and three dimensional applications. *Comput. Geosci.*, 102: 1–11.
- ANG, A. H-S., & TANG, W. H. (2007). *Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications in Civil & Environmental Engineering*. John Willey & Sons, 432 p.
- ANNA, L.O. (1998). Preliminary Three-dimensional Discrete Fracture Model, Tiva Canyon Tuff, Yucca Mountain Area, Nye County, Nevada. Report 97-833, US Geological Survey, Denver, Estados Unidos, 37 p.
- ARGUNHAN-ATALAY, C., YAZICIGIL, H. & EKMEKCI, M. (2021). Assessment of

- performance of horizontal drains in an open pit mine in eastern turkey. *Environ. Earth Sci.*, 80(3): 108.
- AZEVEDO, A.A., ALBUQUERQUE FILHO, J.L. & MANCUSO, M.A. (2018). Águas subterrâneas. *Geologia de Engenharia e Ambiental*, Oliveira, A.M. dos S. & Monticelli, J.J. (Eds.), ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, São Paulo, pp. 181–201.
- BAECHER, G.B., LANNEY, N.A. & EINSTEIN, H.H. (1977). Statistical description of rock properties and sampling. The 18th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), ARMA-77-0400.
- BASTOS, I.G. (2006) - Estabilização de Encostas através de Drenagem Profunda: Estudo de um Caso de Estabilização com Túnel de Drenagem. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil. 204 p.
- BONNET, E., BOUR, O., ODLING, N.E., DAVY, P., MAIN, I., COWIE, P. & BERKOWITZ, B. (2001). Scaling of fracture systems in geological media. *Rev. Geophys.*, 39(3): 347–383.
- BRÅTVEIT, K., BRULAND, A. & BREVIK, O. (2016). Rock falls in selected norwegian hydropower tunnels subjected to hydropeaking. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, 52: 202–207.
- CACCIARI, P.P. (2014) Estudo de um Túnel em Maciço Rochoso Fraturado por Investigação Geológico-Geotécnica e Análises pelo Método dos Elementos Distintos. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Estruturas e Getécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 212 p.
- CACCIARI, P.P. & FUTAI, M.M. (2017). Modeling a shallow rock tunnel using terrestrial laser scanning and discrete fracture networks. *Rock Mech. Rock Eng.*, 50(5): 1217–1242.
- CHEN, T. (2020). Equivalent permeability distribution for fractured porous rocks: correlating fracture aperture and length. *Geofluids*, 2020: 1–12.
- COTESTA, L., XIANG, J., PAUDEL, B., STERRETT, R., SJÖBERG, J., DILOV, T., VASILEV, I. & YALAMOV, Z. (2020). Advanced three-dimensional geomechanical and hydrogeological modelling for a deep open pit. *Slope Stability 2020: 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*, . Australian Centre for Geomechanics PP - Perth, Perth, 1383–1398.
- CUI, Z., ZHANG, Y., SHENG, Q. & CUI, L. (2020). Investigating the scale effect of rock mass in the yangfanggou hydropower plant with the discrete fracture network engineering approach. *Int. J. Geomech.*, 20(4): 4020033.
- DAVY, P., DARCEL, C., LE GOC, R., MUNIER, R., SELROOS, J.-O. & MAS IVARS, D. (2018). DFN, why, how and what for, concepts, theories and issues. 2nd International Discrete Fracture Network Engineering Conference, . OnePetro, Seatle, USA, 1–9.
- DAVY, P., LE GOC, R., DARCEL, C., BOUR, O., DE DREUZY, J.-R. & MUNIER, R. (2010).

- A likely universal model of fracture scaling and its consequence for crustal hydromechanics. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 115(B10): 1–13.
- DERSHOWITZ, W.S. & EINSTEIN, H.H. (1988). Characterizing rock joint geometry with joint system models. *Rock Mech. Rock Eng.*, 21(1): 21–51.
- DERSHOWITZ, W.S. & HERDA, H.H. (1992). Interpretation of fracture spacing and intensity. 33rd U.S. Symposium on Rock Mechanics, USRMS 1992, . American Rock Mechanics Association (ARMA), 30: , 757–766.
- EINSTEIN, H.H. & BAECHER, G.B. (1983). Probabilistic and statistical methods in engineering geology. *Rock Mech. Rock Eng.*, 16(1): 39–72.
- FERRARI, C., BONAFEDE, M. & BELARDINELLI, M.E. (2016). LibHalfSpace: a c++ object-oriented library to study deformation and stress in elastic half-spaces. *Comput. Geosci.*, 96: 136–146.
- FOSSSEN, H. (2017). *Structural Geology. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 2 vol., 610p.*
- FOX, A., LA POINTE, P., SIMEONOV, A., HERMANSON, J. & OEHRMAN, J. (2007). Statistical Geological Discrete Fracture Network Model. Forsmark modelling stage 2.2. Report R-07-46, SKB, Estocolmo, Suécia, 265p.
- FU, G.Y., MA, G.W., QU, X.L. & HUANG, D. (2016). Stochastic analysis of progressive failure of fractured rock masses containing non-persistent joint sets using key block analysis. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, 51: 258–269.
- GIL, L. & BUGEDA, G. (2001). A c++ object-oriented programming strategy for the implementation of the finite element sensitivity analysis for a non-linear structural material model. *Adv. Eng. Softw.*, 32(12): 927–935.
- GUIDICINI, G. & NIEBLE, C.M. (1983). *Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. Blucher, São Paulo, 196 p.*
- HASUI, Y., SALAMUNI, E. & MORALES, N. (2019). *Geologia Estrutural Aplicada. 2nd edn. ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, São Paulo, SP, 478 p.*
- HE, J., CHEN, S.H. & SHAHROUR, I. (2012). A revised solution of equivalent permeability tensor for discontinuous fractures. *J. Hydrodyn. Ser. B*, 24(5): 711–717.
- HEKMATNEJAD, A., CRESPIAN, B., PAN, P., ZHI, EMERY, X., MANCILLA, F., MORALES, M., SEYEDRAHIMI-NIARAQ, M., SCHACHTER, P. & GONZALEZ, R. (2021). A hybrid approach to predict hang-up frequency in real scale block cave mining at el teniente mine, chile. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, 118: 104160.
- HERBERT, A.W. (1996). Modelling approaches for discrete fracture network flow analysis. *Dev. Geotech. Eng.*, 79(C): 213–229.
- HOEK, E. (2007). *Practical Rock Engineering. Disponível em:*

<<https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>> Acessado em 8 de mar. de 2021.

- HUANG, N., LIU, R., JIANG, Y. & CHENG, Y. (2021). Development and application of three-dimensional discrete fracture network modeling approach for fluid flow in fractured rock masses. *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 91: 103957.
- HYMAN, J.D., ALDRICH, G., VISWANATHAN, H., MAKEDONSKA, N. & KARRA, S. (2016). Fracture size and transmissivity correlations: implications for transport simulations in sparse three-dimensional discrete fracture networks following a truncated power law distribution of fracture size. *Water Resour. Res.*, 52(8): 6472–6489.
- HYMAN, J.D., KARRA, S., MAKEDONSKA, N., GABLE, C.W., PAINTER, S.L. & VISWANATHAN, H.S. (2015). DfnWorks: a discrete fracture network framework for modeling subsurface flow and transport. *Comput. Geosci.*, 84: 10–19.
- ISMAIL, M.A.M., NG, S.M. & ABUSTAN, I. (2017). Parametric study of horizontal drains for slope stability measure: a case study in putrajaya, malaysia. *KSCE J. Civ. Eng.*, 21(6): 2162–2167.
- JAVADI, M., SHARIFZADEH, M. & SHAHRIAR, K. (2016). Uncertainty analysis of groundwater inflow into underground excavations by stochastic discontinuum method: case study of siah bisheh pumped storage project, iran. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, 51: 424–438.
- JING, L. (2003). A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 40(3): 283–353.
- JING, L. & HUDSON, J.A. (2002). Numerical methods in rock mechanics. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 39(4): 409–427.
- KALBACHER, T., METTIER, R., MCDERMOTT, C., WANG, W., KOSAKOWSKI, G., TANIGUCHI, T. & KOLDITZ, O. (2007). Geometric modelling and object-oriented software concepts applied to a heterogeneous fractured network from the grimsel rock laboratory. *Comput. Geosci.*, 11(1): 9–26.
- KANJI, M.A. (2004). Parecer Técnico sobre as Causas da Ruptura da Barragem de Camará Disponível em <<https://livrozilla.com/doc/1250857/parecer-técnico-sobre-as-causas-da-ruptura-da-barragem-ca>>. Acessado em 16 de mar. de 2022.
- KARIMZADE, E., SHARIFZADEH, M., ZAREI, H.R., SHAHRIAR, K. & CHERAGHI SEIFABAD, M. (2017). Prediction of water inflow into underground excavations in fractured rocks using a 3d discrete fracture network (dfn) model. *Arab. J. Geosci.*, 10(9): 206.
- KULATILAKE, P. & WU, T.H. (1984). Estimation of mean trace length of discontinuities. *Rock Mech. Rock Eng.*, 17(4): 215–232.
- LAFORE, R. (2001). *Object-Oriented Programming in C++*. Sams Publishing, Indianapolis,

EUA, 1012 p.

- LEI, Q., LATHAM, J.P. & TSANG, C.F. (2017). The use of discrete fracture networks for modelling coupled geomechanical and hydrological behaviour of fractured rocks. *Comput. Geotech.*, 85: 151–176.
- LEI, Q., WANG, X., MIN, K.B. & RUTQVIST, J. (2020). Interactive roles of geometrical distribution and geomechanical deformation of fracture networks in fluid flow through fractured geological media. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 12(4): 780–792.
- MERRIEN-SOUKATCHOFF, V., KORINI, T. & THORAVAL, A. (2012). Use of an integrated discrete fracture network code for stochastic stability analyses of fractured rock masses. *Rock Mech. Rock Eng.*, 45(2): 159–181.
- MIN, K.-B., JING, L. & STEPHANSSON, O. (2004). Determining the equivalent permeability tensor for fractured rock masses using a stochastic rev approach: method and application to the field data from sellafeld, uk. *Hydrogeol. J.*, 12(5): 497–510.
- MIOTO, J.A., MAGALHÃES, F.S. & CAMPANHA, G.A. DA C. (2018). Estruturas e estado de tensões de maciços rochosos fraturados. *Geologia de Engenharia e Ambiental*, Oliveira, A.M. dos S. & Monticelli, J.J. (Eds.), ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, São Paulo, pp. 127–158.
- MORAES, L.K.C. (2017). Efeitos de Túneis Drenantes no Comportamento de Taludes. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 136 p.
- ODA, M. (1985). Permeability tensor for discontinuous rock masses. *Geotechnique*, 35(4): 483–495.
- OJIMA, L.M. & SERRA JUNIOR, E. (2018). Caracterização e classificação de maciços rochosos. *Geologia de Engenharia e Ambiental*, Oliveira, A.M. dos S. & Monticelli, J.J. (Eds.), ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, São Paulo, pp. 335–356.
- PATTON, F.D. & DEERE, D.U. (1971) Significant geological factors in rock slope stability. 1st International Conference Stability in Open Pit Mining, AIME, Vancouver, Canada, 2: pp. 23-47.
- PHILLIPS, T., KAMPMAN, N., BISDOM, K., FORBES INSKIP, N.D., DEN HARTOG, S.A.M., CNUUDE, V. & BUSCH, A. (2020). Controls on the intrinsic flow properties of mudrock fractures: a review of their importance in subsurface storage. *Earth-Science Rev.*, 211: 103390.
- POHLL, G.M., CARROLL, R.W.H., REEVES, D.M., PARASHAR, R., MUHUNTHAN, B., THIYAGARJAH, S., BADGER, T., LOWELL, S. & WILLOUGHBY, K.A. (2013). Design Guidelines for Horizontal Drains used for Slope Stabilization. Research Report 787.1, Washington State Department of Transportation, Olympia, USA, 377 p.
- PRIEST, S.D. (1993). *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*. Chapman & Hall,

Londres, UK, 490 p.

- RASMUSSEN, L.L. (2020). UnBlocksgen: a python library for 3d rock mass generation and analysis. *SoftwareX*, 12: 100577.
- RASMUSSEN, L.L., CACCIARI, P.P., FUTAI, M.M., DE FARIAS, M.M. & DE ASSIS, A.P. (2019). Efficient 3d probabilistic stability analysis of rock tunnels using a lattice model and cloud computing. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, 85: 282–293.
- READ, J. & BEALE, G. (2013). *Guidelines for Evaluating Water in Pit Slope Stability*. Csiro Publishing, Leiden, Países Baixos, 600 p.
- REEVES, D.M., PARASHAR, R., POHLL, G. & CARROLL, R. (2014). Use of dfn concepts in understanding hillslope drainage in fractured rock. *International Discrete Fracture Network Engineering Conference, DFNE 2014-277*.
- REEVES, D.M., PARASHAR, R., POHLL, G., CARROLL, R., BADGER, T. & WILLOUGHBY, K. (2013). The use of discrete fracture network simulations in the design of horizontal hillslope drainage networks in fractured rock. *Eng. Geol.*, 163(2013): 132–143.
- ROBINSON, J.A. (2004). *Object-Oriented Programming in C++*. Software Design for Engineers and Scientists, Elsevier, 414 p.
- ROCSCIENCE. (2022). RS2 User Guide. Disponível em: <<https://www.rocscience.com/help/rs2/documentation/rs2-model/joints/joint-networks/add-joint-networks/joint-model-veneiziano>> Acesso em: 14 de maio de 2022.
- SCHULTZ, R.A., KLIMCZAK, C., FOSSEN, H., OLSON, J.E., EXNER, U., REEVES, D.M. & SOLIVA, R. (2013). Statistical tests of scaling relationships for geologic structures. *J. Struct. Geol.*, 48: 85–94.
- SEED, H.B. & DUNCAN, J.M. (1987). The failure of teton dam. *Eng. Geol.*, 24(1–4): 173–205.
- SHAGHAGHI, T., GHADRAN, M. & TOLOOIYAN, A. (2020). Design and optimisation of drainage systems for fractured slopes using the xfem and fem. *Simul. Model. Pract. Theory*, 103: 102110.
- SILVA, J.P., GOMES, I.F., SANTOS, R.F.V.C., MIRANDA, T.S. DE, GUEDES, R.P., BARBOSA, J.A., GUIMARÃES, E.X., BESERRA, L.B. & GUIMARÃES, L.J. DO N. (2021). Topological analysis of fracture networks integrated with flow simulation models for equivalent fracture permeability estimation. *J. Struct. Geol.*, 147: 104338.
- SNOW, D.T. (1965). *A Parallel Plate Model of Fractured Permeable Media*. PhD Thesis, University of California, Berkeley, USA, 359 p.
- STAUB, I., FREDRIKSSON, A. & OUTTERS, N. (2002). Strategy for a Rock Mechanics Site Descriptive Model. Development and testing of the theoretical approach. Report R-02-02, SKB, Estocolmo, Suécia, 236 p.

- VARNES, D.J. (1978). Slope movement types and processes. Spec. Rep., 176: 11–33.
- VAZAIOS, I., DIEDERICHS, M. & VLACHOPOULOS, N. (2014). Factors affecting realism of DFNs for Mechanical Stability Analysis in Tunneling Environment. International Discrete Fracture Network Engineering Conference, DFNE 2014-144.
- VAZAIOS, I., VLACHOPOULOS, N. & DIEDERICHS, M.S. (2015). DFN generation for mechanical stability analysis of underground works. ITA WTC 2015 Congress and 41st General Assembly, Dubrovnik, Croatia, 22–28.
- VERMILYE, J.M. & SCHOLZ, C.H. (1995). Relation between vein length and aperture. *J. Struct. Geol.*, 17(3): 423–434.
- WANG, W., JI, X. & WANG, Y. (1999). Object-oriented programming in boundary element methods using c++. *Adv. Eng. Softw.*, 30(2): 127–132.
- WARBURTON, P.M. (1980). A stereological interpretation of joint trace data. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 17(4): 181–190.
- WIDODO, L.E., CAHYADI, T.A., SYIHAB, Z., NOTOSISWOYO, S., ISKANDAR, I. & RUSTAMAJI, H.C. (2018). Development of drain hole design optimisation: a conceptual model for open pit mine slope drainage system with fractured media using a multi-stage genetic algorithm. *Environ. Earth Sci.*, 77(20): 721.
- WU, J., GOTO, T. NORI & KOIKE, K. (2021). Estimating fractured rock effective permeability using discrete fracture networks constrained by electrical resistivity data. *Eng. Geol.*, 289: 106178.
- WYLLIE, D.C. & MAH, C. (2004). *Rock Slope Engineering*. CRC Press, New York, USA, 431 p.
- XIAO, H. & HE, L. (2022). Implementation of manifold coverage for 3d rock fracture network modeling and its application in rock permeability prediction. *Comput. Geotech.*, 145: 104702.
- XIE, L.Z., GAO, C., REN, L. & LI, C.B. (2015). Numerical investigation of geometrical and hydraulic properties in a single rock fracture during shear displacement with the navier–stokes equations. *Environ. Earth Sci.*, 73(11): 7061–7074.
- ZHANG, X., SANDERSON, D.J., HARKNESS, R.M. & LAST, N.C. (1996). Evaluation of the 2-d permeability tensor for fractured rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 33(1): 17–37.
- ZHU, W., KHIREVICH, S. & PATZEK, T.W. (2021). Impact of fracture geometry and topology on the connectivity and flow properties of stochastic fracture networks. *Water Resour. Res.*, 57(7): e2020WR028652.

A – CLASSES E FUNÇÕES

A.1 – CLASSE NÓS

//This program is free software: you can redistribute it and/or modify it under the terms of the
//GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either version 3
//of the License, or any later version.

//This program is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY
//WARRANTY; without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS
//FOR A PARTICULAR PURPOSE.

//See the GNU General Public License for more details.

//You should have received a copy of the GNU General Public License along with this program.
//If not, see <<https://www.gnu.org/licenses/>>.

```
#ifndef NODE_H
#define NODE_H

#include <iostream>
#include <Eigen/Geometry>
#include <vector>

using namespace std;
using namespace Eigen;

template<typename Scalar> using Vector2 = Eigen::Matrix<Scalar,2,1>;
using Vector2r = Vector2<double>;

class Node{
public:
    Node()
    : Point(0,0),internalnode(0), head(0.0)
    { ++total_nodes;
      node_id=total_nodes;
    }

    Node(const int& _type, double _x, double _y, double _head)
    : Point(_x,_y),internalnode(_type), head(_head)
    {
        ++total_nodes;
        node_id=total_nodes;
    }

    void exhibit_Information(){
        cout << "Node : " << node_id<< " position : ( "<< Point(0) <<" ; "<< Point(1) <<" ),
        head: " << head<< endl;
    };

    Vector2r Point= Vector2r::Zero();

    double head = 0.0;
    double pressureHead = 0.0;
    static int total_nodes;
    int node_id;
    int internalnode = 0;
};

int Node::total_nodes(0);

#endif
```

A.2 – CLASSE DESCONTINUIDADES

//This program is free software: you can redistribute it and/or modify it under the terms of the
//GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either version 3
//of the License, or any later version.

//This program is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY
//WARRANTY; without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS
//FOR A PARTICULAR PURPOSE.

//See the GNU General Public License for more details.

//You should have received a copy of the GNU General Public License along with this program.

//If not, see <<https://www.gnu.org/licenses/>>.

```
#ifndef DISCONTINUITIES_H
#define DISCONTINUITIES_H

#include <iostream>
#include <Eigen/Geometry>
#include "Geometry.hpp"
#include "Line2D.hpp"
#include "EigenTypes.hpp"
#include <vector>
#include <math.h>

using namespace std;
using namespace Eigen;

template<typename Scalar> using Vector2 = Eigen::Matrix<Scalar,2,1>;
using Vector2r = Vector2<double>;

#define PI 3.14159265

class Discontinuity{
public:
    Discontinuity(Node _pointA, double _orientation, double _length, double _aperture, double
    _large):
        pointA (_pointA), orientation (_orientation), length(_length),
        aperture(_aperture), large(_large), line(_pointA.Point,pointB.Point)
    {
        pointB.Point(0)=pointA.Point(0)+length*cos(orientation*PI/180);
        pointB.Point(1)=pointA.Point(1)+length*sin(orientation*PI/180);
        pointB.internalnode=1;
        line.pointB=pointB.Point;
        ++total_discontinuities;
        discontinuity_id=total_discontinuities;
    }

    Discontinuity(Node _pointA,Node _pointB, double _aperture, double _large):
        pointA (_pointA), pointB (_pointB),
        aperture(_aperture), large(_large), line(_pointA.Point, _pointB.Point)
    {
        length=(pointB.Point-pointA.Point).norm();
        orientation=atan((pointB.Point(1)-pointA.Point(1))/(pointB.Point(0)-
        pointA.Point(0)))*180/PI;
        ++total_discontinuities;
        discontinuity_id=total_discontinuities;
    }

    void exhibit_flow(){
        cout <<"flow :" << flow << endl;
    };
};
```

```

void exhibit_Information(){
    cout << "Discontinuity: "<<discontinuity_id<<" from node "<< pointA.node_id<< " to node:
    "<< pointB.node_id << " length: "
    << length << " Aperture : " << aperture <<" Conductance: " << Conductance << " flow : "
    << flow << endl;

}

double flow = 0;

int indice_no1 = 0;
int indice_no2 = 0;
Node pointA;
Node pointB;
Line2D line;
double orientation;

double large = 1.0;
double length;
double aperture;
double Conductance;
double g=9.81;
double visc_cin=0.000001;
bool backbone_discontinuity=false;
bool dominant_discontinuity=false;
static int total_discontinuities;
int discontinuity_id;
int discontinuity_set;
};
int Discontinuity::total_discontinuities(0);
#endif

```

A.3 – CLASSE DRENO

//This program is free software: you can redistribute it and/or modify it under the terms of the
//GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either version 3
//of the License, or any later version.

//This program is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY
//WARRANTY; without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS
//FOR A PARTICULAR PURPOSE.

//See the GNU General Public License for more details.

//You should have received a copy of the GNU General Public License along with this program.

//If not, see <<https://www.gnu.org/licenses/>>.

```
#ifndef DRAIN_H
#define DRAIN_H

#include <iostream>
#include <Eigen/Geometry>
#include <vector>
#include "Line2D.hpp"

using namespace std;
using namespace Eigen;

template<typename Scalar> using Vector2 = Eigen::Matrix<Scalar,2,1>;
using Vector2r = Vector2<double>;

class Drain{
public:

    Drain(Vector2r _point1,Vector2r _point2)
    : line (_point1,_point2)
    {
        ++total_drains;
        drain_id=total_drains;
    }

    void exhibit_Information(){
        cout << "Drain : " << drain_id<< " Total flow: " << flow<< endl;
    };

    Line2D line;
    double flow = 0.0;
    double head = 0.0;
    static int total_drains;
    int drain_id;
    vector<int> cross_node_id;
};

int Drain::total_drains(0);

#endif
```

A.4 – CLASSE DADOS

//This program is free software: you can redistribute it and/or modify it under the terms of the
//GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either version 3
//of the License, or any later version.

//This program is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY
//WARRANTY; without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS
//FOR A PARTICULAR PURPOSE.

//See the GNU General Public License for more details.

//You should have received a copy of the GNU General Public License along with this program.

//If not, see <<https://www.gnu.org/licenses/>>.

```
#ifndef DATA_H
#define DATA_H

#include <iostream>
#include <fstream>
#include <Eigen/Geometry>
#include <vector>
#include <string>

using namespace std;
using namespace Eigen;

template<typename Scalar> using Vector2 = Eigen::Matrix<Scalar,2,1>;
using Vector2r = Vector2<double>;

class Data{
public:
    vector<vector<string>> text;
    vector<double> verification;
    vector<string> text_line_vtkpoints;
    vector<string> text_line_vtksets;
    vector<string> files;
    string File;
    Data (string _file)
    : File(_file)
    {};

    void read_rs2file(){
        ifstream inFile(File);

        if(inFile.fail()){

            cout << "Not possible to open the file"<<endl;
            exit(1);

        }

        if(inFile.is_open()){

            vector<string> text_line;
            string line;
            string input;

            while(getline(inFile,line)){
                text_line.push_back(line);
            }

            for(int i=0;i<=text_line.size()-1;++i){
                string word;
                vector<string> text_word;
                for(int j=0;j<=text_line[i].size()-1;++j){
```

```

        if(text_line[i][j]=='\t'){
            text_word.push_back(word);
            word="";
            continue;
        }
        word.push_back(text_line[i][j]);

    }
    text_word.push_back(word);
    text.push_back(text_word);
}
for(int i=0; i<=text.size()-1;++i){
    verification.push_back(1);
    for(int j=0;j<=text[i].size()-1;++j){
        cout <<text[i][j]<<'\t';

    }
    cout<<endl;

    inFile.close();
}
for(int i=1; i<=text.size()-1;++i){
    if(text[i][0]!=text[i-1][0]){
        files.push_back(text[i][0]);
    }
}
}

void read_vtkfile(){
    ifstream inFile(File);

    if(inFile.fail()){

        cout << "Not possible to open the file"<<endl;
        exit(1);

    }

    if(inFile.is_open()){

        string line;
        string input;
        bool point=false;
        bool set=false;
        int count=0;
        int i=0;
        while(getline(inFile,line)){

            if(line=="DATASET POLYDATA"){
                point=true;
            }
            if((point)and(count<3)){
                count+=1;
            }
            if(line==" "){
                count=0;
                point=false;
            }
            if((point)and(count==3)){
                text_line_vtkpoints.push_back(line);
            }
            if(line=="SCALARS FracSetId float"){
                set=true;
            }
            if((set)and(count<3)){
                count+=1;
            }
        }
    }
}

```

```
        }
        if(line==" "){
            count=0;
            set=false;
        }
        if((set)and(count==3)){
            text_line_vtksets.push_back(line);
        }
    }
    inFile.close();
}
files.push_back(File);
}; }
#endif
```

A.5 – CLASSE CENÁRIO

//This program is free software: you can redistribute it and/or modify it under the terms of the
//GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either version 3
//of the License, or any later version.

//This program is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY
//WARRANTY; without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS
//FOR A PARTICULAR PURPOSE.

//See the GNU General Public License for more details.

//You should have received a copy of the GNU General Public License along with this program.

//If not, see <<https://www.gnu.org/licenses/>>.

```
#ifndef SCENE_H
#define SCENE_H

#include <iostream>
#include "Node.hpp"
#include "Discontinuities.hpp"
#include "Data.hpp"
#include "Drains.hpp"
#include "Scanline.hpp"
#include <Eigen/Dense>
#include <Eigen/Core>
#include <Eigen/Geometry>
#include <Eigen/Eigenvalues>
#include <Eigen/Sparse>
#include <vector>
#include <array>
#include <memory>
#include "Geometry.hpp"
#include "Line2D.hpp"
#include "EigenTypes.hpp"
#include "LinesIntersection.hpp"
#include <math.h>
#include <string>
#include <random>
#include <boost/random/lognormal_distribution.hpp>
#include <boost/random/merseenne_twister.hpp>
#include <boost/random/random_device.hpp>

using namespace std;
using namespace Eigen;

template<typename Scalar> using Vector2 = Eigen::Matrix<Scalar,2,1>;
using Vector2r = Vector2<double>;

class Scene{
public:
    string file;
    vector<Node> nodes;
    vector<Discontinuity> discontinuities;
    vector<Drain> drains;
    int drains_up=0;
    vector<Line2D> tunnel;
    Vector2r max;
    Vector2r min;
    bool withdrains=false;
    bool withtunnel=false;
    Data data;
    vector<Scanline> scanlines;
    double total_flow=0;

    Scene (string _file,Data _data)
    : max (100.0,100.0), min (0.0,0.0), file(_file),data(_data)
    {};
};
```

```
Scene (Vector2r _max,Vector2r _min,string _file,Data _data)
: max (_max), min (_min), file(_file),data(_data)
{};
```

```
int count_discontinuities=0;
vector<string> v_xcoord;
vector<string> v_ycoord;
vector<string> v_fxcoord;
vector<string> v_fycoord;
vector<string> v_set;
vector<string> v_orientation;
vector<double> v_length;
```

```
void get_vtkdata();
```

```
void create_discontinuities(){
```

```
    for(int i=0;i<=v_xcoord.size()-1;i++){
```

```
        int internalnode=0;
        double xcoord = 10;
        double ycoord = 0;
        double head=0;
        double length=0;
        double orientation=0;
        double large = 1.0;
        double aperture=0.005;
        do {
            if((stod(v_ycoord[i])<=0.001)or(stod(v_ycoord[i])>=max(1)-0.001)or(stod(v_xcoord[i])<
            =0.001)or(stod(v_xcoord[i])>=max(0)-0.001)){internalnode=0;}else{internalnode=1;}
        }while((internalnode!=0)and(internalnode!=1));
        xcoord=stod(v_xcoord[i]);
        ycoord= stod(v_ycoord[i]);
        if(ycoord<=0.001){head=0;}else if(ycoord>=max(1)-0.001){head=ycoord;}else
        if((xcoord<=0.001)or(xcoord>=max(0)-0.001)){head=ycoord;}
```

```
        Node inode(internalnode,xcoord,ycoord,head);
        nodes.push_back(inode);
        do {
            if((stod(v_fycoord[i])<=0.001)or(stod(v_fycoord[i])>=max(1)-0.001)or(stod(v_fxcoord[i]
            )<=0.001)or(stod(v_fxcoord[i])>=max(0)-0.001)){internalnode=0;}else{internalnode=1;}
        }while((internalnode!=0)and(internalnode!=1));
        xcoord=stod(v_fxcoord[i]);
        ycoord= stod(v_fycoord[i]);
        if(ycoord<=0.001){head=0;}else if(ycoord>=max(1)-0.001){head=ycoord;}else
        if((xcoord<=0.001)or(xcoord>=max(0)-0.001)){head=ycoord;}
```

```
        Node fnode(internalnode,xcoord,ycoord,head);
        nodes.push_back(fnode);
```

```
        Discontinuity discontinuity(inode,fnode, aperture,large);
        if(v_set.size(>0){discontinuity.discontinuity_set=stod(v_set[i]);}
```

```
        discontinuities.push_back(discontinuity);
```

```
    }
    int count_intersections=0;
```

```
    for (int i=0;i<= discontinuities.size()-2;++i){
        for (int j=i+1; j<=discontinuities.size()-1;++j){
```

```
            Vector2r intersection=Vector2r::Zero();
```

```

        bool contact1
        =(checkPointsEquality(discontinuities[i].pointA.Point,discontinuities[j].pointA.Point));
        bool
        contact2=(checkPointsEquality(discontinuities[i].pointA.Point,discontinuities[j].pointB.Point));
        bool
        contact3=(checkPointsEquality(discontinuities[i].pointB.Point,discontinuities[j].pointA.Point));
        bool contact4=
        (checkPointsEquality(discontinuities[i].pointB.Point,discontinuities[j].pointB.Point));

        if((contact1)or(contact2)or(contact3)or(contact4)){
            continue;
        }
        if
        (line2DLine2DIntersection(discontinuities[i].line,discontinuities[j].line,int
        ersion))){
            Node node(1,intersection(0),intersection(1),0);
            for(int k=0;k<=nodes.size()-1;++k){
                if(nodes[k].node_id==discontinuities[i].pointA.node_id){
                    nodes.emplace(nodes.begin()+k+1,node);
                }
            }

            Discontinuity discontinuity4(node, discontinuities[j].pointB,
            discontinuities[j].aperture,discontinuities[j].large);
            discontinuity4.discontinuity_id=discontinuities[j].discontinuity_id;
            discontinuity4.discontinuity_set=discontinuities[j].discontinuity_set;
            discontinuities.emplace(discontinuities.begin()+j+1, discontinuity4);

            Discontinuity discontinuity3(discontinuities[j].pointA,node,
            discontinuities[j].aperture,discontinuities[j].large);
            discontinuity3.discontinuity_id=discontinuities[j].discontinuity_id;
            discontinuity3.discontinuity_set=discontinuities[j].discontinuity_set;
            discontinuities.emplace(discontinuities.begin()+j+1, discontinuity3);

            discontinuities.erase(discontinuities.begin()+j);

            Discontinuity discontinuity2(node, discontinuities[i].pointB,
            discontinuities[i].aperture,discontinuities[i].large);
            discontinuity2.discontinuity_id=discontinuities[i].discontinuity_id;
            discontinuity2.discontinuity_set=discontinuities[i].discontinuity_set;
            discontinuities.emplace(discontinuities.begin()+i+1, discontinuity2);

            Discontinuity discontinuity1(discontinuities[i].pointA,node,
            discontinuities[i].aperture,discontinuities[i].large);
            discontinuity1.discontinuity_id=discontinuities[i].discontinuity_id;
            discontinuity1.discontinuity_set=discontinuities[i].discontinuity_set;
            discontinuities.emplace(discontinuities.begin()+i+1, discontinuity1);

            discontinuities.erase(discontinuities.begin()+i);

            count_intersections+=1;
            --j;
        }
    }
}

if(drains.size(>0){
double drainshead;
drainshead=0;
for (int j=0; j<=drains.size()-1;++j){
    drains[j].head=drainshead;
}
}

```

```

for (int j=0; j<=drains.size()-1;++j){
    for (int i=0;i<= discontinuities.size()-1;++i){
        Vector2r intersection=Vector2r::Zero();
        if
        (line2DLine2DIntersection(discontinuities[i].line,drains[j].line,intersection
        )){
            Node node(0,intersection(0),intersection(1),drainshead);
            //nodes.emplace(nodes.begin()+i+1,node);
            for(int k=0;k<=nodes.size()-1;++k){
                if(discontinuities[i].pointA.node_id==nodes[k].node_id){
                    nodes.emplace(nodes.begin()+k+1,node);
                }
            }
            drains[j].cross_node_id.push_back(node.node_id);

            Discontinuity discontinuity2(node, discontinuities[i].pointB,
            discontinuities[i].aperture,discontinuities[i].large);
            discontinuity2.discontinuity_id=discontinuities[i].discontinuity_id;
            discontinuity2.discontinuity_set=discontinuities[i].discontinuity_set;
            discontinuities.emplace(discontinuities.begin()+i+1, discontinuity2);

            Discontinuity discontinuity1(discontinuities[i].pointA,node,
            discontinuities[i].aperture,discontinuities[i].large);
            discontinuity1.discontinuity_id=discontinuities[i].discontinuity_id;
            discontinuity1.discontinuity_set=discontinuities[i].discontinuity_set;
            discontinuities.emplace(discontinuities.begin()+i+1, discontinuity1);

            discontinuities.erase(discontinuities.begin()+i);
            ++i;
        }
    }
}

Node::total_nodes=0;
Discontinuity::total_discontinuities=0;
}

void analysis(){
    boost::mt19937 gen;
    gen.seed(time(NULL));
    double mean=0.0005;
    double stddev=0.0005; // = 0.0 para abertura constante
    boost::lognormal_distribution<double> lognormalDist(mean, stddev);
    double prob=0;
    double Transm=0;

    for (auto& D: discontinuities){
        D.aperture=lognormalDist(gen);
        //D.aperture=pow(D.length,0.5)*0.0018; -> abertura e persistencia correlacionados
        D.Conductance=(D.g*pow(D.aperture,3)*D.large)/(12.0*D.visc_cin*D.length);
    }

    int numberofnodes = 0;
    int i=0;
    for (auto& Node: nodes){
        numberofnodes += 1;
    }

    vector<double> triplet_v;
    vector<vector<double>> tripletlist_v;
    VectorXd Sum_C(numberofnodes);
    for (int i=0; i != numberofnodes-1; i++){
        Sum_C[i] = 0;
    }
}

```

```

for (int k=0;k<=discontinuities.size()-1;k++){
double i=discontinuities[k].pointA.node_id-1;
double j=discontinuities[k].pointB.node_id-1;
double v=discontinuities[k].Conductance;
triplet_v={i,j,v};
tripletlist_v.push_back(triplet_v);
triplet_v={j,i,v};
tripletlist_v.push_back(triplet_v);
};

for (int i=0; i <= tripletlist_v.size()-1; i++){
Sum_C[tripletlist_v[i][0]]=Sum_C[tripletlist_v[i][0]]+tripletlist_v[i][2];
};

VectorXd b(numberofnodes);
for (int i=0; i <= numberofnodes-1; i++){
b[i] = 0;
}

int initial_position=0;
for (int k=0;k<=discontinuities.size()-1;k++){
int count=1;
for (int i=0; i <= tripletlist_v.size()-1; i++){
i=initial_position;
if(count==1){
if(discontinuities[k].pointB.internalnode==1){
tripletlist_v[i][2]=tripletlist_v[i][2];
}else{
b[tripletlist_v[i][0]]=b[tripletlist_v[i][0]]-tripletlist_v[i][2]*discontinuities[k].pointB.head;
tripletlist_v[i][2]=0;
}
}
if(count==2){
if(discontinuities[k].pointA.internalnode==1){
tripletlist_v[i][2]=tripletlist_v[i][2];
}else{
b[tripletlist_v[i][0]]=b[tripletlist_v[i][0]]-(tripletlist_v[i][2]*discontinuities[k].pointA.head);
tripletlist_v[i][2]=0;
}
}
}
initial_position=i+1;
if(count==2){break;}count+=1;
}
}

for (double i=0; i <= numberofnodes-1; i++){
triplet_v={i,i,-Sum_C[i]};
tripletlist_v.push_back(triplet_v);
}

typedef Eigen::Triplet<double> T;
vector<T> tripletlist;
tripletlist.reserve(tripletlist_v.size());
for (int k=0; k <= tripletlist_v.size()-1; k++){
double i=tripletlist_v[k][0];
double j=tripletlist_v[k][1];
double v=tripletlist_v[k][2];
tripletlist.push_back(T(i,j,v));
};
SparseMatrix<double>A(numberofnodes,numberofnodes);

A.setFromTriplets(tripletlist.begin(),tripletlist.end());
//}
ConjugateGradient<SparseMatrix<double>,Lower|Upper>cg;
cg.compute(A);

```

```

VectorXd x(numberofnodes);
x.Constant(numberofnodes,0);
x=cg.solve(b);
for(int i=0; i != numberofnodes; i++){
    if(nodes[i].internalnode==1){
        nodes[i].head = x[nodes[i].node_id-1];
    };
    nodes[i].pressureHead = nodes[i].head - nodes[i].Point(1);
}

for (auto& N: nodes){
    for (auto& D: discontinuities){
        if(N.node_id==D.pointA.node_id){
            D.pointA.head=N.head;
        }
        if(N.node_id==D.pointB.node_id){
            D.pointB.head=N.head;
        }
    };
}

for (auto& D: discontinuities){
    D.flow = D.Conductance *( D.pointA.head-D.pointB.head);
}

if(drains.size()>0){
    for (int j=0; j<=drains.size()-1;++j){
        if(drains[j].cross_node_id.size()>0){
            for (int k=0; k<=drains[j].cross_node_id.size()-1;++k){
                for(int i=0;i<= discontinuities.size()-1;++i){
                    if((drains[j].cross_node_id[k]==discontinuities[i].pointA.node_id)or(
drains[j].cross_node_id[k]==discontinuities[i].pointB.node_id)){

                        if(discontinuities[i].flow>0){
                            drains[j].flow+=discontinuities[i].flow;}
                        if(discontinuities[i].flow<0){
                            drains[j].flow+=discontinuities[i].flow*(-1);}
                    }
                }
            }
        }
    }
}

}

for(int i=0; i<=discontinuities.size()-1;++i){
    if((abs(discontinuities[i].flow)>=0.0000000001)){
        discontinuities[i].backbone_discontinuity=true;
    }
}

double boundary_fracture=0;
double flow_dominant_fracture;

for(int i=0; i<=discontinuities.size()-1;++i){
    if((discontinuities[i].pointA.Point(1)<=0.001)or(discontinuities[i].pointB.Point(1)<
=0.001)){
        if(discontinuities[i].backbone_discontinuity){
            ++boundary_fracture;

            double angle=abs(discontinuities[i].orientation);
            total_flow+=abs(discontinuities[i].flow)*sin(angle*PI/180);
        }
    }
}

```

```

    }
    if((discontinuities[i].pointA.Point(1)>=max(1)-0.001)or(discontinuities[i].pointB.Poi
nt(1)>=max(1)-0.001)){
        if(discontinuities[i].backbone_discontinuity){
            ++boundary_fracture;
        }
    }
}

flow_dominant_fracture=total_flow*2/boundary_fracture;

for(int i=0; i<=discontinuities.size()-1;++i){
    if((discontinuities[i].flow>=flow_dominant_fracture)or(discontinuities[i].flow<=flo
w_dominant_fracture*(-1))){
        discontinuities[i].dominant_discontinuity=true;
    }
}

};

void scan_discontinuities_scene(double x,double y,double scanline_orientation,double
increment){

    string type="all";
    Scanline scanline(x,y,scanline_orientation);
    scanline.scan_discontinuities(discontinuities, type,increment, max(0));
    scanlines.push_back(scanline);

};

void scan_backbone_discontinuities_scene(double x,double y,double scanline_orientation,double
increment){

    string type="backbone";
    Scanline scanline(x,y,scanline_orientation);
    scanline.scan_discontinuities(discontinuities, type,increment, max(0));
    scanlines.push_back(scanline);

};

void scan_dominant_discontinuities_scene(double x,double y,double scanline_orientation,double
increment){

    string type="dominant";
    Scanline scanline(x,y,scanline_orientation);
    scanline.scan_discontinuities(discontinuities, type,increment, max(0));
    scanlines.push_back(scanline);

};

void exhibit_Nodesinformation(){
    cout << "Nodes information :" << endl;
    for (auto& IndividualNode: nodes){
        IndividualNode.exhibit_Information();
    }
    cout << endl;
};

void exhibit_Discontinuitiesinformation(){
    cout << "Discontinuities information:" << endl;
    for (auto& IndividualD: discontinuities){
        IndividualD.exhibit_Information();
    }
};

```

```

void export_Nodesinformation(){
    string File=(file+"_nodes_information.txt");
    ofstream outFile(File);
    if(outFile.fail()){
        outFile << "Not possible to open the file"<<endl;
        exit(1);
    }
    if(outFile.is_open()){
        outFile << "Nodes information :" << endl;
        for (auto& IndividualNode: nodes){
            outFile << "Node : \t" << IndividualNode.node_id<< "\tposition : (\t"<<
                IndividualNode.Point(0) << "\t; \t"<< IndividualNode.Point(1) << "\t), head: \t" <<
                IndividualNode.head<< endl;
        }
    }
}

void export_Discontinuitiesinformation(){
    string File=(file+"_discontinuities_information.txt");
    ofstream outFile(File);
    if(outFile.fail()){
        outFile << "Not possible to open the file"<<endl;
        exit(1);
    }
    outFile << "Discontinuities information:" << endl;
    for (auto& IndividualD: discontinuities){
        outFile<< "Descontinuity: \t"<<IndividualD.discontinuity_id<< "\t from node \t"<<
            IndividualD.pointA.node_id<< "\t to node: \t"<< IndividualD.pointB.node_id << "\t
            length: \t"
        << IndividualD.length << "\t Aperture : \t" << IndividualD.aperture << "\t Conductance:
        \t" << IndividualD.Conductance<< "\t flow : \t" << IndividualD.flow<< "\t orientation:
        \t"<<IndividualD.orientation<< "\t backbone discontinuity :
        \t"<<IndividualD.backbone_discontinuity<< "\t dominant discontinuity :
        \t"<<IndividualD.dominant_discontinuity<< "\t"<<IndividualD.discontinuity_set<<endl;
    }
};

void export_nodes_vtk(){
    string File=(file+"_Export_nodes_vtk.vtk");
    ofstream outFile(File);
    if(outFile.fail()){
        cout << "Not possible to open the file"<<endl;
        exit(1);
    }
    if(outFile.is_open()){
        outFile<< "# vtk DataFile Version 4.2\n";
        outFile<< "Nodes information\n";
        outFile<< "ASCII\n";
        outFile<< "DATASET POLYDATA\n";
        outFile<< "POINTS "<<nodes.size()<< " double\n";
    }
}

```

```

    for (auto& IndividualNode: nodes){
        outFile<<IndividualNode.Point(0)<<" "<<IndividualNode.Point(1)<<" 0.0"<<endl;
    }
    outFile<<endl;
    outFile<<"POINT DATA "<<nodes.size()<<endl;
    outFile<<"SCALARS nodesIdentification int 1\n";
    outFile<<"LOOKUP TABLE default\n";
    for (auto& IndividualNode: nodes){
        outFile<<IndividualNode.node_id<<endl;
    }

    outFile<<"SCALARS nodesHead double 1\n";
    outFile<<"LOOKUP TABLE default\n";
    for (auto& IndividualNode: nodes){
        outFile<<IndividualNode.head<<endl;
    }

    outFile.close();
}
}

```

```

void export_discontinuities_vtk(){
    string File=(file+"_Export_discontinuities_vtk.vtk");
    ofstream outFile(File);
    if(outFile.fail()){
        cout << "Not possible to open the file"<<endl;
        exit(1);
    }
    if(outFile.is_open()){
        outFile<<"# vtk DataFile Version 4.2\n";
        outFile<<"Discontinuities information\n";
        outFile<<"ASCII\n";
        outFile<<"DATASET POLYDATA\n";
        outFile<<"POINTS "<<nodes.size()<<" double\n";

        for (auto& IndividualNode: nodes){
            outFile<<IndividualNode.Point(0)<<" "<<IndividualNode.Point(1)<<" 0.0"<<endl;
        }

        vector<int> numberofnodesdisc;
        int count;
        int count_connectivities(0);
        numberofnodesdisc.push_back(2);
        for (int i=1; i!=discontinuities.size();++i){
            if(discontinuities[i].discontinuity_id==discontinuities[i-1].discontinuity_id){
                numberofnodesdisc.back()+=1;
            }else{
                numberofnodesdisc.push_back(2);
            }
        }
        for (int i=0; i<=numberofnodesdisc.size()-1;++i){
            count_connectivities+=numberofnodesdisc[i];
        }

        outFile<<"LINES "<<discontinuities.size()<<" "<<3*discontinuities.size()<<"\n";
        count=0;
        for (int i=0; i<=discontinuities.size()-1;++i){
            outFile<<"2 ";
            for(int k=0;k<=nodes.size()-1;++k){
                if(discontinuities[i].pointA.node_id==nodes[k].node_id){
                    outFile<<k;
                }
            }
        }
    }
}

```

```

    }
    for(int k=0;k<=nodes.size()-1;++k){
        if(discontinuities[i].pointB.node_id==nodes[k].node_id){
            outFile<<" "<<k;
        }
    }
    outFile<<"\n";
}

outFile<<endl;
outFile<<"CELL DATA "<<discontinuities.size()<<endl;
outFile<<"SCALARS Discontinuities_properties double 9\n";
outFile<<"LOOKUP TABLE default\n";
for (auto& D: discontinuities){
    outFile<<D.discontinuity_id<<" "<<D.length<<" "<<D.aperture<<"
    "<<D.Conductance<<" "<<D.flow<<" "<<D.orientation<<"
    "<<D.backbone_discontinuity<<" "<<D.dominant_discontinuity<<"
    "<<D.discontinuity_set<<"\n";
}

outFile<<"POINT DATA "<<nodes.size()<<endl;
outFile<<"SCALARS nodesIdentification int 1\n";
outFile<<"LOOKUP TABLE default\n";
for (auto& IndividualNode: nodes){
    outFile<<IndividualNode.node_id<<endl;
}

outFile<<"SCALARS nodesHead double 1\n";
outFile<<"LOOKUP TABLE default\n";
for (auto& IndividualNode: nodes){
    outFile<<IndividualNode.head<<endl;
}

outFile<<"SCALARS nodetype int 1\n";
outFile<<"LOOKUP TABLE default\n";
for (auto& IndividualNode: nodes){
    outFile<<IndividualNode.internalnode<<endl;
}

outFile.close();
}
}

void export_tunnel_vtk(){
    if(not(withtunnel)){
        return;
    }

    string File=(file+"_Export_tunnel_vtk.vtk");
    ofstream outFile(File);

    if(outFile.fail()){
        cout << "Not possible to open the file"<<endl;
        exit(1);
    }

    if(outFile.is_open()){
        outFile<<"# vtk DataFile Version 4.2\n";
        outFile<<"Tunnel surface\n";
        outFile<<"ASCII\n";
        outFile<<"DATASET POLYDATA\n";
        outFile<<"POINTS "<<tunnel.size()+1<<" double\n";
    }
}

```

```

        for (int i=0; i<=tunnel.size()-1;++i){
            outFile<<tunnel[i].pointA(0)<<" "<<tunnel[i].pointA(1)<<" 0.0"<<endl;
        }
        outFile<<tunnel[tunnel.size()-1].pointB(0)<<"
        "<<tunnel[tunnel.size()-1].pointB(1)<<" 0.0"<<endl;

        outFile<<"LINES " <<tunnel.size()+1<<" " <<3*(tunnel.size()+1)<<"\n";

        for (int i=0; i<=tunnel.size()-1;++i){
            outFile<<"2 "<<i<<" "<<i+1<<endl;
        }
        outFile<<"2 "<<tunnel.size()<<" "<<0<<endl;

        outFile.close();
    }
}
void export_drains_vtk(){
    if(drains.size()<=0){
        return;
    }

    string File=(file+"_Export_drains_vtk.vtk");
    ofstream outFile(File);

    if(outFile.fail()){
        cout << "Not possible to open the file"<<endl;
        exit(1);
    }

    if(outFile.is_open()){
        outFile<<"# vtk DataFile Version 4.2\n";
        outFile<<"Drains nodes\n";
        outFile<<"ASCII\n";
        outFile<<"DATASET POLYDATA\n";
        outFile<<"POINTS " <<2*drains.size()<<" double\n";

        for (int i=0; i<=drains.size()-1;++i){
            outFile<<drains[i].line.pointA(0)<<" "<<drains[i].line.pointA(1)<<" 0.0"<<endl;
            outFile<<drains[i].line.pointB(0)<<" "<<drains[i].line.pointB(1)<<" 0.0"<<endl;
        }

        outFile<<"LINES " <<drains.size()<<" " <<3*(drains.size())<<"\n";

        for (int i=0; i<=drains.size()-1;++i){
            outFile<<"2 " <<2*i<<" " <<2*i+1<<endl;
        }

        outFile<<"CELL DATA " <<drains.size()<<endl;
        outFile<<"SCALARS Drains_flow double 1\n";
        outFile<<"LOOKUP TABLE default\n";
        for (auto& Individualdrain: drains){
            outFile<<Individualdrain.flow<<endl;
        }
        outFile.close();
    }
}
};

#endif

```

A.6 – CLASSE DOS CENÁRIOS

//This program is free software: you can redistribute it and/or modify it under the terms of the
//GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either version 3
//of the License, or any later version.

//This program is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY
//WARRANTY; without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS
//FOR A PARTICULAR PURPOSE.

//See the GNU General Public License for more details.

//You should have received a copy of the GNU General Public License along with this program.

//If not, see <<https://www.gnu.org/licenses/>>.

```
#ifndef SCENES_H
#define SCENES_H

#include <iostream>
#include <Eigen/Geometry>
#include <vector>
#include <math.h>
#include "Data.hpp"
#include "Scene.hpp"

using namespace std;
using namespace Eigen;

template<typename Scalar> using Vector2 = Eigen::Matrix<Scalar,2,1>;
using Vector2r = Vector2<double>;

class Scenes{
public:
    Vector2r max;
    Vector2r min;
    vector<Scene> scenes;

    vector<vector<double>> r_total_scenes;
    vector<double> r_95;
    vector<int> r_95_position;
    vector<double> r_5;
    vector<int> r_5_position;

    Scenes ()
    : max (100.0,100.0), min (0.0,0.0)
    {};
    Scenes (Vector2r _max,Vector2r _min)
    : max (_max), min (_min)
    {};

    void create_scenesrs2(string filename){

        Data data(filename);

        data.read_rs2file();

        for(int i=0; i<=data.files.size()-1;++i){
            Scene scene(max,min,data.files[i],data);
            scenes.push_back(scene);
        }
    }
}
```

```

void create_scenesvtk(string filename,int n){
    for(int i=1; i<=n;++i){
        string j=to_string(i);
        string file=filename+"_"+j+".vtk";
        Data data(file);
        data.read_vtkfile();
        Scene scene(max,min,data.File,data);
        scenes.push_back(scene);
        cout<<"Scene " << i<<" created"<<endl;
    }
}

void scenes_get_vtkdata(){
    for(int i=0; i<=scenes.size()-1;++i){
        scenes[i].get_vtkdata();
        cout<<"Scene " << i<<" got data"<<endl;
    }
}

void scenes_get_rs2data(){
    for(int i=0; i<=scenes.size()-1;++i){
        scenes[i].get_rs2data();
    }
}

void create_scenes_discontinuities(){
    for(int i=0; i<=scenes.size()-1;++i){
        scenes[i].create_discontinuities();
        cout<<"Scene " << i<<" discontinuities created"<<endl;
    }
}

void create_drains(double x1,double y1,double x2, double y2){
    for(int i=0; i<=scenes.size()-1;++i){
        Vector2r point1 (x1,y1);
        Vector2r point2 (x2,y2);
        Drain drain(point1,point2);
        scenes[i].drains.push_back(drain);
        cout<<"Scene " << i<<" drain created"<<endl;
    }
}

void scenes_analysis(){
    for(int i=0; i<=scenes.size()-1;++i){
        scenes[i].analysis();
        cout<<"Scene " << i<<" analysed"<<endl;
    }
}

void scenes_exhibit_Nodesinformation(){
    for(int i=0; i<=scenes.size()-1;++i){
        scenes[i].exhibit_Nodesinformation();
    }
}

void scenes_exhibit_Discontinuitiesinformation(){
    for(int i=0; i<=scenes.size()-1;++i){
        scenes[i].exhibit_Discontinuitiesinformation();
    }
}

```

```

void scenes_export_Nodesinformation(){
    for(int i=0; i<=scenes.size()-1;++i){
        scenes[i].export_Nodesinformation();
    }
}

void scenes_export_Discontinuitiesinformation(){
    for(int i=0; i<=scenes.size()-1;++i){
        scenes[i].export_Discontinuitiesinformation();
    }
}

void scenes_export_nodes_vtk(){
    for(int i=0; i<=scenes.size()-1;++i){
        scenes[i].export_nodes_vtk();
    }
}

void scenes_export_discontinuities_vtk(){
    for(int i=0; i<=scenes.size()-1;++i){
        scenes[i].export_discontinuities_vtk();
    }
}

void scenes_export_tunnel_vtk(){
    for(int i=0; i<=scenes.size()-1;++i){
        scenes[i].export_tunnel_vtk();
    }
}

void scenes_export_drains_vtk(){
    scenes[0].export_drains_vtk();
    for(int i=0; i<=scenes.size()-1;++i){
        scenes[i].export_drains_vtk();
    }
}

void scenes_scan_discontinuities(double x,double y,double scanline_orientation,double
increment){
    for(int i=0; i<=scenes.size()-1;++i){
        scenes[i].scan_discontinuities_scene(x,y,scanline_orientation,increment);
    }
}

void scenes_scan_backbone_discontinuities(double x,double y,double
scanline_orientation,double increment){
    for(int i=0; i<=scenes.size()-1;++i){
        scenes[i].scan_backbone_discontinuities_scene(x,y,scanline_orientation,increment);
    }
}

void scenes_scan_dominant_discontinuities(double x,double y,double
scanline_orientation,double increment){
    for(int i=0; i<=scenes.size()-1;++i){
        scenes[i].scan_dominant_discontinuities_scene(x,y,scanline_orientation,increment);
    }
}

```

```

void export_all_scanlinepoints_medium_r(string file){
    string File=(file+"_all_scanline_points_medium_r.txt");
    ofstream outFile(File);
    if(outFile.fail()){
        outFile << "Not possible to open the file"<<endl;
        exit(1);
    }
    outFile << "Scanline all discontinuities medium r:"<<endl<<endl;
    outFile<<"Mean"<<endl;
    outFile<<"95%"<<endl;
    outFile<<"5%"<<endl<<endl;
    outFile<<" "<<"\t";
    for (int i =0;i<=scenes[0].scanlines[0].orientations.size()-1;++i){
        outFile<<scenes[0].scanlines[0].orientations[i]<<"\t";
    }
    outFile<<endl;
    for (int i =0;i<=scenes.size()-1;++i){
        outFile<<"Scene "<<i+1<<":"<<"\t";
        for (int j =0;j<=scenes[i].scanlines[0].medium_r.size()-1;++j){
            outFile <<scenes[i].scanlines[0].medium_r[j]<<"\t";
        }
        outFile<<endl;
    }
}

void export_all_backbone_scanlinepoints_medium_r(string file){
    string File=(file+"_all_backbone_scanline_points_medium_r.txt");
    ofstream outFile(File);
    if(outFile.fail()){
        outFile << "Not possible to open the file"<<endl;
        exit(1);
    }
    outFile << "Scanline all backbone discontinuities medium r:" << endl<<endl;
    outFile<<"Mean"<<endl;
    outFile<<"95%"<<endl;
    outFile<<"5%"<<endl<<endl;
    outFile<<" "<<"\t";
    for (int i =0;i<=scenes[0].scanlines[1].orientations.size()-1;++i){
        outFile<<scenes[0].scanlines[1].orientations[i]<<"\t";
    }
    outFile<<endl;
    for (int i =0;i<=scenes.size()-1;++i){
        outFile<<"Scene "<<i+1<<":"<<"\t";
        for (int j =0;j<=scenes[i].scanlines[1].medium_r.size()-1;++j){
            outFile <<scenes[i].scanlines[1].medium_r[j]<<"\t";
        }
        outFile<<endl;
    }
}

```

```

}

void export_all_dominant_scanlinepoints_medium_r(string file){
    string File=(file+"_all_dominant_scanline_points_medium_r.txt");
    ofstream outFile(File);
    if(outFile.fail()){
        outFile << "Not possible to open the file"<<endl;
        exit(1);
    }
    outFile << "Scanline all dominant discontinuities medium r:" << endl<<endl;
    outFile<<"Mean"<<endl;
    outFile<<"95%"<<endl;
    outFile<<"5%"<<endl<<endl;
    outFile<<" "<<"\t";

    for (int i =0;i<=scenes[0].scanlines[2].orientations.size()-1;++i){
        outFile<<scenes[0].scanlines[2].orientations[i]<<"\t";
    }
    outFile<<endl;
    for (int i =0;i<=scenes.size()-1;++i){
        outFile<<"Scene "<<i+1<<":"<<"\t";
        for (int j =0;j<=scenes[i].scanlines[2].medium_r.size()-1;++j){
            outFile <<scenes[i].scanlines[2].medium_r[j]<<"\t";
        }
        outFile<<endl;
    }
}

void export_all_discontinuities_flux(string file){
    string File=(file+"_all_discontinuities_flux.txt");
    ofstream outFile(File);
    if(outFile.fail()){
        outFile << "Not possible to open the file"<<endl;
        exit(1);
    }
    outFile << "All discontinuities flux:"<<endl<<endl;
    for (int i =0;i<=scenes.size()-1;++i){
        outFile<<"Scene "<<i+1<<":"<<"\t"<<"Total flow: "<<"\t"<<scenes[i].total_flow<<"\t";
        for (int j =0;j<=scenes[i].discontinuities.size()-1;++j){
            outFile <<scenes[i].discontinuities[j].flow<<"\t";
        }
        outFile<<endl;
    }
}
}

```

```

void export_all_discontinuities_lengths(string file){
    string File=(file+"_all_discontinuities_lengths.txt");
    ofstream outFile(File);
    if(outFile.fail()){
        outFile << "Not possible to open the file"<<endl;
        exit(1);
    }
    outFile << "All discontinuities lengths:"<<endl<<endl;
    for (int i =0;i<=scenes.size()-1;++i){
        outFile<<"Scene "<<i+1<<": "<<"\t"<<"SUM"<<"\t"<<"-"<<"\t"<<"P21"<<"\t"<<"-"<<"\t";
        for (int j =0;j<=scenes[i].discontinuities.size()-1;++j){

            outFile <<scenes[i].discontinuities[j].length<<"\t";
        }
        outFile<<endl;
    }
}

void export_all_discontinuities_sets(string file){
    string File=(file+"_all_discontinuities_sets.txt");
    ofstream outFile(File);
    if(outFile.fail()){
        outFile << "Not possible to open the file"<<endl;
        exit(1);
    }
    outFile << "All discontinuities sets:"<<endl<<endl;
    for (int i =0;i<=scenes.size()-1;++i){
        outFile<<"Scene "<<i
+1<<": "<<"\t"<<scenes[i].discontinuities.size()<<"\t"<<scenes[i].discontinuities.back
().discontinuity_id<<"\t";
        for (int j =0;j<=scenes[i].discontinuities.size()-1;++j){
            outFile <<scenes[i].discontinuities[j].discontinuity_set<<"\t";
        }
        outFile<<endl;
    }
}

void export_all_discontinuities_properties(string file){
    string File=(file+"_all_discontinuities_properties.txt");
    ofstream outFile(File);
    if(outFile.fail()){

```

```

    outFile << "Not possible to open the file"<<endl;
    exit(1);
}

outFile << "All discontinuities properties:"<<endl<<endl;
outFile<<"Mean"<<endl;
outFile<<"Standard Deviation"<<endl;

outFile <<"-"<<"\t"<<"sum of all the lengths"<<"\t"<<"P21 total"<<"\t"<<"sum of the
backbone lengths"<<"\t"<<"P21 backbone"<<"\t"<<"sum of the dominant lengths"<<"\t"<<"P21
dominant"<<"\t"<<"total flow"<<"\t"<<"number of discontinuities"<<"\t"<<"number of pieces
of discontinuities"<<"\t"<<"number of backbone discontinuities"<<"\t"<<"number of
dominant discontinuities"<<endl;

for (int i =0;i<=scenes.size()-1;++i){
    outFile<<"Scene " <<i+1<<": "<<"\t";

    double sum_lengths=0;
    double sum_backbone_lengths=0;
    int total_backbone_discontinuities=0;
    double sum_dominant_lengths=0;
    int total_dominant_discontinuities=0;

    for (int j =0;j<=scenes[i].discontinuities.size()-1;++j){

        sum_lengths+=scenes[i].discontinuities[j].length;
        if(scenes[i].discontinuities[j].backbone_discontinuity){
            sum_backbone_lengths+=scenes[i].discontinuities[j].length;
            ++total_backbone_discontinuities;
        }
        if(scenes[i].discontinuities[j].dominant_discontinuity){
            sum_dominant_lengths+=scenes[i].discontinuities[j].length;
            ++total_dominant_discontinuities;
        }
    }

    outFile<<sum_lengths<<"\t"<<sum_lengths/
(max(0)*max(1))<<"\t"<<sum_backbone_lengths<<"\t"<<sum_backbone_lengths/
(max(0)*max(1))<<"\t"<<sum_dominant_lengths<<"\t"<<sum_dominant_lengths/
(max(0)*max(1))<<"\t"<<scenes[i].total_flow<<"\t"<<scenes[i].discontinuities.size()<<
"\t"<<scenes[i].discontinuities.back().discontinuity_id<<"\t"<<total_backbone_discont
inuties<<"\t"<<total_dominant_discontinuities<<endl;

}

    outFile<<endl;

}
};
#endif

```

A.7 – FUNÇÃO LEITURA DE ARQUIVOS VTK

//This program is free software: you can redistribute it and/or modify it under the terms of the
//GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either version 3
//of the License, or any later version.

//This program is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY
//WARRANTY; without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS
//FOR A PARTICULAR PURPOSE.

//See the GNU General Public License for more details.

//You should have received a copy of the GNU General Public License along with this program.

//If not, see <<https://www.gnu.org/licenses/>>.

```
#ifndef GET_VTKDATA_H
#define GET_VTKDATA_H

#include "Scene.hpp"

void Scene::get_vtkdata(){
    bool x=true;
    bool y=false;
    string xcoord;
    string ycoord;
    for(int i=0;i<=data.text_line_vtkpoints.size()-1;++i){
        for(int j=0;j<=data.text_line_vtkpoints[i].size()-1;++j){

            if(data.text_line_vtkpoints[i][j]==' '){
                if(x){
                    v_xcoord.push_back(xcoord);
                    xcoord="";
                    x=false;
                    y=true;
                    continue;
                }
                if(y){
                    v_ycoord.push_back(ycoord);
                    ycoord="";
                    y=false;
                    continue;
                }
            }
            if(x){xcoord.push_back(data.text_line_vtkpoints[i][j]);};
            if(y){ycoord.push_back(data.text_line_vtkpoints[i][j]);};
        }
        x=true;
        ++i;
    }
    x=true;
    y=false;
    for(int i=1;i<=data.text_line_vtkpoints.size()-1;++i){
        for(int j=0;j<=data.text_line_vtkpoints[i].size()-1;++j){

            if(data.text_line_vtkpoints[i][j]==' '){
                if(x){
                    v_fxcoord.push_back(xcoord);
                    xcoord="";
                    x=false;
                    y=true;
                    continue;
                }
            }
            if(y){
                v_fycoord.push_back(ycoord);
                ycoord="";
                y=false;
                continue;
            }
        }
    }
}
```

```
        }
    }
    if(x){xcoord.push_back(data.text_line_vtkpoints[i][j]);};
    if(y){ycoord.push_back(data.text_line_vtkpoints[i][j]);};
}
x=true;
++i;
}
for(int i=0;i<=data.text_line_vtksets.size()-1;++i){
    v_set.push_back(data.text_line_vtksets[i]);
}
}
#endif
```

A.8 – CLASSE LINHA DE VARREDURA

//This program is free software: you can redistribute it and/or modify it under the terms of the
//GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either version 3
//of the License, or any later version.

//This program is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY
//WARRANTY; without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS
//FOR A PARTICULAR PURPOSE.

//See the GNU General Public License for more details.

//You should have received a copy of the GNU General Public License along with this program.

//If not, see <<https://www.gnu.org/licenses/>>.

```
#ifndef SCANLINE_H
#define SCANLINE_H

#include <iostream>
#include <Eigen/Geometry>
#include <vector>
#include "Discontinuities.hpp"
#include <math.h>
#include "LinesIntersection.hpp"
#include <string>

using namespace std;
using namespace Eigen;

template<typename Scalar> using Vector2 = Eigen::Matrix<Scalar,2,1>;
using Vector2r = Vector2<double>;

#define PI 3.14159265

class Scanline{
public:

    Scanline(double _x,double _y,double _orientation)
    : Point (_x,_y), orientation(_orientation)
    {}

    void scan_discontinuities(vector<Discontinuity> discontinuities,string
    discontinuity_type_d,double increment,double max){

        double length;
        Vector2r Point1;
        Vector2r Point2;
        Line2D line(Point,Point2);
        Line2D line2(Point,Point2);
        length = (max-Point(0))*pow(2,0.5);
        vector<Vector2r> points_orientation;
        discontinuity_type=discontinuity type d;

        do{

            Point2(0)=Point(0)+length*cos(orientation*PI/180);
            Point2(1)=Point(0)+length*sin(orientation*PI/180);
            Point1(0)=Point(0)+length*cos((orientation+180)*PI/180);
            Point1(1)=Point(0)+length*sin((orientation+180)*PI/180);

            line.pointA=Point1;
            line.pointB=Point2;
            line2.pointA=Point;
            line2.pointB=Point2;
            Vector2r intersection=Vector2r::Zero();

            for(int i=0;i<=discontinuities.size()-1;++i){
```

```

if(discontinuity_type=="backbone"){
    if (not(discontinuities[i].backbone_discontinuity)){
        continue;
    }
}
if(discontinuity_type=="dominant"){
    if (not(discontinuities[i].dominant_discontinuity)){
        continue;
    }
}

if(line2DLine2DIntersection(line,discontinuities[i].line,intersection)){
    points_orientation.push_back(intersection);
}
}

Vector2r v1(0,0);
Vector2r v2(max,v1(0));
Vector2r v3(max,max);
Vector2r v4(v1(0),max);
Line2D limitline1(v1,v2);
Line2D limitline2(v2,v3);
Line2D limitline3(v3,v4);
Line2D limitline4(v4,v1);
vector<Line2D> limits;
limits.push_back(limitline1);
limits.push_back(limitline2);
limits.push_back(limitline3);
limits.push_back(limitline4);
double length2=0;

for(int i=0; i<=limits.size()-1;++i){
    if(line2DLine2DIntersection(line,limits[i],intersection)){
        double hyp=pow(intersection(0)-Point(0),2)+pow(intersection(1)-Point(1),2);
        length2=pow(hyp,0.5);

        if(points_orientation.size()==0){
            points_orientation.push_back(intersection);
        }
        break;
    }
}

lengths.push_back(2*length2);

points.push_back(points_orientation);
points_orientation.clear();

```

```

        orientations.push_back(orientation);

        orientation+=increment;
    }while(orientation<=360);

    double r=0;
    double sum_r=0;

    for (int i =0;i<=points.size()-1;++i){
        sum_r=0;
        double min_r=max;

        for (int j =0;j<=points[i].size()-1;++j){
            r=(points[i][j]-Point).norm();
            r_orientation.push_back(r);
            sum_r+=r;
            if(min_r>r){min_r=r;}
        }
        medium_r.push_back(sum_r/points[i].size());
        medium_r.push_back(min_r);
        medium_r.push_back(lengths[i]/points[i].size());
        r_total.push_back(r_orientation);
    }
};

void exhibit_points(){
    for(int i=0;i<=points.size()-1;++i){
        cout<<orientations[i]<<"\t"<<lengths[i]<<endl;
        cout<<endl;

        for (int j =0;j<=points[i].size()-1;++j){
            cout<< points[i][j](0)<<"\t";
        }

        cout<<endl;

        for (int j =0;j<=points[i].size()-1;++j){
            cout<< points[i][j](1)<<"\t";
        }

        cout<<endl;
        cout<<endl;
    }
}

void export_scanlinepoints(string file,string type){
    discontinuity_type=type;

    string File=(file+"_scanline_points_"+discontinuity_type+".txt");
    ofstream outFile(File);

    if(outFile.fail()){
        outFile << "Not possible to open the file"<<endl;
        exit(1);
    }

    outFile << "Scanline points:" << endl;

    for (int i =0;i<=points.size()-1;++i){
        outFile <<orientations[i]<<"\t"<<lengths[i]<<endl;
        outFile <<endl;
    }
}

```

```

        for (int j =0;j<=points[i].size()-1;++j){
            outFile << points[i][j](0)<<'\t';
        }
        outFile <<endl;
        for (int j =0;j<=points[i].size()-1;++j){
            outFile << points[i][j](1)<<'\t';
        }
        outFile <<endl;
        outFile <<endl;
    }
}
void export_scanlinepoints_medium_r(string file,string type){
    discontinuity_type=type;
    string File=(file+"_scanline_points_"+discontinuity_type+"_medium_r.txt");
    ofstream outFile(File);
    if(outFile.fail()){
        outFile << "Not possible to open the file"<<endl;
        exit(1);
    }
    outFile << "Scanline medium r:" << endl;
    for (int i =0;i<=points.size()-1;++i){
        outFile <<orientations[i]<<"\t"<<medium_r[i]<<endl;
    }
}
Vector2r Point= Vector2r::Zero();
double orientation = 0.0;
string discontinuity_type;
vector<double> orientations;
vector<double> lengths;
vector<double> medium_r;
vector<vector<Vector2r>> points;
vector<double> r_orientation;
vector<vector<double>> r_total;
};
#endif

```

B – EJEMPLOS DE ROTINAS

B.1 – EJEMPLO DE ROTINA PARA O MÉTODO DE REEVES *ET AL.* (2013)

```
//This program is free software: you can redistribute it and/or modify it under the terms of the
//GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either version 3
//of the License, or any later version.
//This program is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY
//WARRANTY; without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS
//FOR A PARTICULAR PURPOSE.
//See the GNU General Public License for more details.
//You should have received a copy of the GNU General Public License along with this program.
//If not, see <https://www.gnu.org/licenses/>.
```

```
#include <iostream>
#include "Node.hpp"
#include "Discontinuities.hpp"
#include "Data.hpp"
#include "Scene.hpp"
#include "Scenes.hpp"
#include <Eigen/Dense>
#include <Eigen/Core>
#include <Eigen/Geometry>
#include <Eigen/Eigenvalues>
#include <vector>
#include <array>
#include <memory>
#include "EigenTypes.hpp"
#include "get_rs2data.hpp"
#include "get_vtkdata.hpp"

using namespace std;
using namespace Eigen;

template<typename Scalar> using Vector2 = Eigen::Matrix<Scalar,2,1>;
using Vector2r = Vector2<double>;

int main() {

    Vector2r min(0.0,0.0);
    Vector2r max(30.0,30.0);

    Scenes scenes(max,min);

    scenes.create_scenesvtk("dfn2DElteniente",200);

    scenes.scenes_get_vtkdata();

    scenes.create_scenes_discontinuities();

    scenes.scenes_analysis();

    scenes.scenes_export_discontinuities_vtk();

    scenes.scenes_scan_discontinuities(max(0)/2,max(1)/2,0.0,5.0);
    scenes.scenes_scan_backbone_discontinuities(max(0)/2,max(1)/2,0.0,5.0);
    scenes.scenes_scan_dominant_discontinuities(max(0)/2,max(1)/2,0.0,5.0);
    scenes.export_all_scanlinepoints_medium_r("dfn2DEltenienteLOG");
    scenes.export_all_backbone_scanlinepoints_medium_r("dfn2DEltenienteLOG");
    scenes.export_all_dominant_scanlinepoints_medium_r("dfn2DEltenienteLOG");
    scenes.export_all_discontinuities_properties("dfn2DEltenienteLOG");

    return 0;
}
```

B.2 – EXEMPLO DE ROTINA PARA O ESTUDO DA DRENAGEM

//This program is free software: you can redistribute it and/or modify it under the terms of the
//GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either version 3
//of the License, or any later version.

//This program is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY
//WARRANTY; without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS
//FOR A PARTICULAR PURPOSE.

//See the GNU General Public License for more details.

//You should have received a copy of the GNU General Public License along with this program.

//If not, see <<https://www.gnu.org/licenses/>>.

```
#include <iostream>
#include "Node.hpp"
#include "Discontinuities.hpp"
#include "Data.hpp"
#include "Scene.hpp"
#include "Scenes.hpp"
#include <Eigen/Dense>
#include <Eigen/Core>
#include <Eigen/Geometry>
#include <Eigen/Eigenvalues>
#include <vector>
#include <array>
#include <memory>
#include "EigenTypes.hpp"
#include "get_rs2data.hpp"
#include "get_vtkdata.hpp"

using namespace std;
using namespace Eigen;

template<typename Scalar> using Vector2 = Eigen::Matrix<Scalar,2,1>;
using Vector2r = Vector2<double>;

int main() {

    Vector2r min(0.0,0.0);
    Vector2r max(20.0,20.0);

    Scenes scenes(max,min);

    scenes.create_scenesvtk("dfn2DMS20",50);
    scenes.scenes_get_vtkdata();

    scenes.create_scenes_discontinuities();
    scenes.scenes_analysis();

    scenes.scenes_export_discontinuities_vtk();

    Scenes scenes_drain(max,min);
    scenes_drain.create_scenesvtk("dfn2DMS20",50);
    scenes_drain.scenes_get_vtkdata();
    scenes_drain.create_drains(10,0,10,10);
    scenes_drain.create_scenes_discontinuities();
```

```

scenes_drain.scenes_analysis();

scenes_drain.scenes_export_discontinuities_vtk();

scenes_drain.scenes_export_drains_vtk();

vector<double> sum_of_heads_nodrains;
vector<double> sum_of_heads_withdrains;

cout<<"Angulo"<<endl;
cout<<"Media"<<endl;
cout<<"Cenario"<<"\t"<<"numero de nos"<<"\t"<<"Soma das cargas sem dreno"<<"\t"<<"Soma das
cargas com dreno"<<"\t"<<"Eficiencia"<<"\t"<<"vazao nos drenos"<<endl;

for(int i=0; i<=scenes.scenes.size()-1;++i){
    cout<<i+1<<"\t";

    for(int k=0; k<=scenes.scenes[i].nodes.size()-1;++k){
        if(k==0){
            sum_of_heads_nodrains.push_back(scenes.scenes[i].nodes[k].head);
        }else{
            sum_of_heads_nodrains[i]+=scenes.scenes[i].nodes[k].head;
        }
    }
    cout<<scenes.scenes[i].nodes.size()<<"\t"<<sum_of_heads_nodrains[i]<<"\t";

    for(int k=0; k<=scenes_drain.scenes[i].nodes.size()-1;++k){
        if(k==0){
            sum_of_heads_withdrains.push_back(scenes_drain.scenes[i].nodes[k].head);
        } else{
            sum_of_heads_withdrains[i]+=scenes_drain.scenes[i].nodes[k].head;
        }
    }
    double efficiency;
    efficiency=(sum_of_heads_nodrains[i]-sum_of_heads_withdrains[i])/
scenes.scenes[i].nodes.size();
    cout<<sum_of_heads_withdrains[i]<<"\t"<<efficiency<<"\t";

    for(int k=0; k<=scenes_drain.scenes[i].drains.size()-1;++k){
        cout<<scenes_drain.scenes[i].drains[k].flow<<"\t";
    }
    cout<<endl;
}

return 0;
}

```