

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**MODELO CONCEITUAL DE AQUÍFERO FRATURADO COM BASE EM
PARÂMETROS HIDRÁULICOS, ARRANJO ESPACIAL E CONECTIVIDADE DE
FRATURAS**

SAULO GOBBO MENEZES

Orientadora: Profa. Dra. Amélia João Fernandes

Coorientador: Prof. Dr. Reginaldo Antônio Bertolo

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO

2022

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Modelo conceitual de aquífero fraturado com base em parâmetros hidráulicos,
arranjo espacial e conectividade de fraturas**

SAULO GOBBO MENEZES

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de concentração: Hidrogeologia e Meio Ambiente

Orientadora: Profa. Dra. Amélia João Fernandes

Coorientador: Prof. Dr. Reginaldo Antônio Bertolo

SÃO PAULO

2022

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**MODELO CONCEITUAL DE AQUÍFERO FRATURADO COM BASE EM
PARÂMETROS HIDRÁULICOS, ARRANJO ESPACIAL E
CONECTIVIDADE DE FRATURAS**

SAULO GOBBO MENEZES

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Amélia João Fernandes

Dissertação de Mestrado

Nº 883

COMISSÃO JULGADORA

Dr^a. Amélia João Fernandes

Dr. Marcos Bolognini Barbosa

Dr. Ginaldo Ademar da Cruz Campanha

SÃO PAULO
2022

AGRADECIMENTOS

Este trabalho nasceu da ideia de aproveitar os dados produzidos pela indústria para colaborar com o avanço científico e aprimoramento pessoal. Esta empreitada me revelou uma poderosa rede de apoio e que, sem ela, não seria possível a conclusão deste trabalho.

Tive a felicidade de contar com a orientação, ensinamento e parceria dos meus orientadores: Profa. Dra. Amélia João Fernandes e Prof. Dr. Reginaldo Antonio Bertolo, que me abriram as portas para o aprendizado de um tema tão fascinante e necessário para os desafios futuros da sociedade.

Para a aquisição dos dados, tive a sorte de contar com o apoio dos companheiros tuneleiros Erich Motta e Lúcio Rosa, além dos grandes amigos Fábio Gouveia, Gabriel Soares e Átila Pessoa, que sempre me ajudaram nesta jornada, e de todos os irmãos do C.R. Santandréia.

Apesar de toda felicidade e sorte que tive, meu agradecimento especial é para a minha família, especialmente para o Seu Martinho e a Dona Maria, que são a minha fonte de inspiração, e a Bazinha, meu alicerce e amor.

Por fim, agradeço à CAPES, fundamental para a ciência e formação de profissionais capacitados no país, por toda ajuda financeira durante este período, crucial para a evolução deste trabalho.

RESUMO

Menezes, S.G., 2022, Modelo conceitual de aquífero fraturado com base em parâmetros hidráulicos, arranjo espacial e conectividade de fraturas [Dissertação de Mestrado], São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 113 p.

Modelos conceituais, para representação da rede de fraturas e caminhos preferenciais de fluxo em aquíferos fraturados, tem sido utilizado em estudos de contaminação de aquíferos fraturados e de potencial para aproveitamento hídrico. Tais modelos buscam representar a organização das fraturas no espaço e suas propriedades hidráulicas, no entanto, mostram limitações importantes com relação à estimativa da conectividade da rede de fraturas e, em geral, carecem de dados de testes hidráulicos. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é desenvolver o modelo conceitual de um aquífero fraturado, localizado no granito Cantareira, na zona norte de São Paulo – SP, utilizando métodos e dados que permitam avançar na superação das limitações mencionadas. Para amostragem das fraturas, utilizou-se tanto scanlines lineares em afloramentos rochosos e furos de sondagem verticais e inclinados, como scanlines circulares e amostragem por área, utilizando ortofotos obtidas a partir de imagens de drone. Já para a caracterização dos parâmetros hidráulicos das fraturas, foram utilizados dados de ensaios com obturador duplo do tipo *Lugeon test*. Foram reconhecidos 9 grupos de fraturas, formado em campos de esforços de regimes tectônicos compressivos (G1 - esforço principal máximo σ_1 de direção NE; G8 e G9 - σ_1 WNW), regime tectônico extensional (G2 e G3 com extensão N-S, G4 e G5 relacionados a uma extensão com direção NE-SW e G5 e G7, com extensão E-W). Apenas o grupo 6, de direção N-S, possui arranjo de fraturas não clusterizado e com distribuição de fraturas aleatória. Além disso, este grupo pode apresentar preenchimento na fratura e os menores valores de transmissividade e abertura hidráulica. Já as fraturas dos grupos 1, 2, 4, 5 e 9, apresentam arranjo espacial com formação de clusters, sendo que os grupos 1, 4 e 5 apresentam distribuição fractal, enquanto os grupos 2 e 9 formam corredores de fraturas simples.

Os grupos 1 e 9 são os que apresentam os maiores valores de transmissividade e abertura hidráulica, enquanto os grupos 2 e 3, e 4 e 5 apresentam valores intermediários. A análise da topologia da rede de fraturas em taludes de direção E-W e NW-SE, indica conectividade hidráulica com parâmetro $f = 0,4$ e proporção de nós do tipo I, X e Y semelhantes. No entanto, quando removidos os grupos 6 e 7, devido aos baixos valores de transmissividade, observa-se ausência de conectividade hidráulica na direção E-W e menor influência destes grupos na direção NW-SE. A partir destes resultados, desenvolveu-se o modelo conceitual em bloco diagrama 3D, com representação da rede geométrica de fraturas de forma mais realista e com a indicação dos prováveis caminhos preferenciais de fluxo do aquífero, resultante da elevada transmissividade dos grupos G1 e G9, especialmente nos 5-10 metros mais rasos do aquífero, sugerindo ocorrência de anisotropia de fluxo horizontal, devido seus baixos ângulos de mergulho. Já os grupos G2/G3 e G4/G5, constituem caminhos preferenciais secundários, mas devido seu mergulho subvertical, podem ser importantes para a recarga do sistema.

Palavras-Chave: aquífero fraturado, conectividade, ensaio de lugeon, granito cantareira

ABSTRACT

Menezes, S.G., 2022, Conceptual model of a fractured aquifer based on hydraulic parameters, fracture arrangement and connectivity of fractures [Master's Thesis], São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 113 p.

Conceptual models, designed to represent the fracture network and preferential flow paths in fractured aquifers, have been used in studies of contamination of fractured aquifers and of the potential for water exploitation. Such models seek to represent the organization of fractures in space and their hydraulic properties, however, they show important limitations regarding the estimation of the type of spacing distribution and fracture network connectivity. Besides, they usually lack data from hydraulic tests. In this context, the objective of this work was to develop the conceptual model of a portion of a fractured aquifer, composed of the Cantareira granite, in the north of São Paulo – SP, using methods and data that allow progress in overcoming the mentioned limitations. For sampling the fractures, straight scanlines on rock exposures and on vertical and inclined boreholes were used, as well as circular scanlines and area sampling, using orthophotos obtained from drone images. As for the characterization of the hydraulic parameters of the fractures, data from Lugeon tests, with double packers, were used. Nine fracture sets were identified; they were formed in stress fields of compressive tectonic regimes (G1 - maximum principal stress σ_1 NE direction; G8 and G9 - σ_1 WNW), and of extensional tectonic regimes (G2 and G3 with minimum principal stress σ_3 of NS direction; G4 and G5 with σ_3 of NE-SW direction; G5 and G7, with σ_3 of EW direction). Only group 6, of N-S direction, has a random distribution with no fracture clusters. In addition, the fractures of this group are infilled and have the lowest values of transmissivity and hydraulic aperture. The fracture sets 1, 2, 4, 5 and 9 present a spatial arrangement with the formation of clusters, with groups 1, 4 and 5 presenting fractal distribution, while groups 2 and 9 form simple fracture corridors. Sets 1 and 9 have the highest values of transmissivity and hydraulic aperture, while groups 2 and 3, and 4 and 5 have intermediate values.

The analysis of the fracture network topology, on walls of direction E-W and NW-SE, indicates hydraulic connectivity with parameter $f = 0.4$, as well as a similar proportion of nodes of I, X and Y types. However, when sets 6 and 7 are removed, because of their low transmissivity values, there is no hydraulic connectivity in the E-W direction and less influence of these sets in the NW-SE direction. Based on these results, a conceptual 3D model was developed, with the representation of the fracture geometric network and with the indication of the probable preferential aquifer flow paths. These correspond to sets G1 and G9, with higher transmissivity, especially in the 5-10 meters shallow aquifer, suggesting the occurrence of horizontal flow anisotropy, due to the low dips of these sets. Groups G2/G3 and G4/G5, on the other hand, constitute secondary preferential flow paths, however, due to their high dips, they may be important for aquifer recharge.

Keywords: fractured aquifer, connectivity, lugeon test, cantareira granite

ÍNDICE

RESUMO.....	3
ABSTRACT	7
1. INTRODUÇÃO	12
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1 Amostragem de Fraturas	14
2.1.1 Scanline linear.....	16
2.1.2 Scanline circular	18
2.1.3 Amostragem por área.....	19
2.2 Análise da Distribuição Espacial das Fraturas.....	19
2.2.1 Análise da distribuição espacial de fraturas em scanlines lineares	20
2.2.2 Análise da topologia da rede de fraturas.....	25
2.3 Parâmetros Hidráulicos em Rochas Fraturadas	29
3. MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 Levantamento de Dados Estruturais em Scanlines de Afloramentos	33
3.2 Levantamento de Dados Estruturais em Poços - Perfilagem Ótica (OTV).....	35
3.3 Levantamento de Dados Estruturais em 2 Dimensões.....	36
3.4 Processamento dos Dados Estruturais Levantados em 1D e 2D	39
3.5 Ensaio Hidráulico com Obturador Duplo: Ensaio de Lugeon	41
3.6 Processamento dos Dados de Ensaios Hidráulicos	45
4. CONTEXTO GEOLÓGICO.....	48
4.1 Geologia Regional	48
4.2 Geologia Local.....	50

5. RESULTADOS	52
5.1 Caracterização dos Grupos de Fraturas	52
5.2 Distribuição Espacial das Fraturas	60
5.3 Topologia e Grau de Conectividade da Rede de Fraturas.....	71
5.4 Parâmetros Hidráulicos.....	77
6. DISCUSSÃO	81
6.1 Estimativa dos Parâmetros Hidráulicos dos Grupos de Fraturas.....	81
6.2 Influência dos Grupos G6 e G7 Sobre a Conectividade da Rede de Fraturas.....	85
6.3 Modelo Conceitual	89
7. CONCLUSÕES	91
REFERÊNCIAS.....	93
ANEXO I - Dados Estruturais	98
ANEXO II - Dados de Ensaios Hidráulicos	112

LISTA DE PARÂMETROS

P_{10}, P_{20}, P_{30}	Frequência de fraturas para 1D, 2D e 3D, respectivamente
P_{10}, P_{21}, P_{32}	Intensidade de fraturas para 1D, 2D e 3D, respectivamente
P_{11}, P_{22}, P_{33}	Intensidade adimensional para 1D, 2D e 3D, respectivamente
Ab	Abundância de fraturas
d	Espaçamento real
d'	Espaçamento aparente
m	Terminações de fraturas no interior da scanline circular
n	Fraturas interceptadas pela scanline circular
Lc	Comprimento médio de fraturas
C_v	Coefficiente de variação dos espaçamentos reais
V	Grau de heterogeneidade da distribuição (Kuiper's V)
V^*	Teste de hipótese para o grau de heterogeneidade da distribuição
D_c	Dimensão de correlação
I, X, Y	Terminações de fraturas do tipo: cega, cruzada e confinada, respectivamente
I-I, I-C, C-C	Segmentos de fraturas do tipo: isolado, parcialmente conectado e duplamente conectado, respectivamente
C_b	Grau de conectividade da rede de fraturas
f	Conectividade hidráulica da rede de fraturas
K	Condutividade hidráulica
T	Transmissividade
b	Abertura hidráulica
Q	Vazão
H	Carga hidráulica
LU	Valor de Lugeon
JRC	Coefficiente de rugosidade de fraturas

1. INTRODUÇÃO

Os aquíferos fraturados podem ocorrer em rochas cristalinas ou sedimentares de baixa permeabilidade primária, em que o fluxo e armazenamento de água se dão, essencialmente, nas fraturas. Aquíferos constituídos de rochas cristalinas correspondem a cerca de 70% da área da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) (CEPAS, 2017), e são uma importante fonte de recursos hídricos para a região (p.ex. Fernandes et al., 2007; Conicelli, 2014).

Para o estudo de aquíferos fraturados, são levantadas informações sobre as propriedades geométricas dos grupos de fraturas (termo utilizado aqui para denominar fraturas de orientação semelhante, ver item 3.2) presentes no maciço. Tais propriedades são: orientação (atitude), comprimento, espaçamento, rugosidade, abertura, tipo de preenchimento e indícios de fluxo. Também é fundamental obter informações sobre as propriedades hidráulicas das fraturas, tais como a transmissividade e abertura hidráulica. Os dados obtidos são, geralmente, sintetizados em modelos conceituais da rede de fraturas, sob a forma de seções 2D ou em blocos diagrama 3D (p.ex. Fernandes et al., 2016; Fiume, 2013).

Tais representações podem guardar um elevado grau de incerteza tanto com relação ao padrão de distribuição de fraturas de um mesmo grupo (Terzaghi, 1965; Priest, 1993), como em relação à interação entre fraturas, característica que determina a conectividade (Laubach et al., 2018).

A distribuição de fraturas é, frequentemente, analisada quanto ao espaçamento real das fraturas, utilizando histogramas ou gráficos de agulhas ou “*stick-plot*”. No entanto, tais análises podem ocultar a existência de clusters de fraturas, o que se trata de importante limitação para os modelos, pois a presença destes pode exercer influência significativa sobre os caminhos preferenciais de fluxo (Laubach et al., 2018).

A conectividade das fraturas e permeabilidade do aquífero é, em grande medida, decorrente da interação entre diferentes grupos de fraturas (Singhal & Gupta, 2010; Odling et al., 1999). A conectividade pode ser avaliada de forma qualitativa, a partir dos

espaçamentos e da orientação e quantidade de grupos de fraturas (Manda et al., 2008), ou de forma quantitativa, a partir de modelos matemáticos (Surrete & Allen, 2008). A conectividade pode ainda ser estimada usando a topologia, como proposto por Sanderson & Nixon (2015). É este o método aqui utilizado e suas vantagens e técnicas serão discutidos no item 2.2.2.

Assim, este trabalho pretende contribuir para a superação das limitações presentes nos modelos com relação à caracterização da distribuição espacial e conectividade da rede de fraturas. Para isso foram utilizados métodos, ainda não empregados no país, de análise do arranjo espacial e grau de conectividade da rede de fraturas. Estes foram aplicados à área da pedreira desativada Morro Grande, localizada na zona norte de São Paulo - SP, onde aflora o granito Cantareira (Figura 1). Os dados de fraturas foram obtidos a partir de scanlines lineares em afloramentos e sondagens, e de amostragem de fraturas em scanlines circulares e por área, a partir de ortofotos, de afloramentos de rocha. Os objetivos foram caracterizar as propriedades geométricas das fraturas de um modo geral e, em particular, seu arranjo espacial e conectividade (Sanderson & Peacock, 2019; Nixon, 2013; Sanderson & Nixon, 2015). Além disso, dados de ensaios hidráulicos com obturadores foram utilizados para caracterizar as fraturas quanto à sua transmissividade.



Figura 1. Localização da pedreira Morro grande, área de estudo deste trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O estudo de aquíferos fraturados deve-se basear tanto em conhecimentos da Geologia Estrutural quanto da Hidrogeologia. Através da geologia estrutural, busca-se caracterizar a geometria da rede de fraturas, por onde o fluxo de água ocorre, enquanto a hidrogeologia é o campo responsável pela caracterização dos parâmetros hidráulicos das fraturas.

Neste capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os métodos de amostragem de fraturas, os principais parâmetros analisados, e de caracterização do arranjo espacial das fraturas. Também são abordados os principais parâmetros hidráulicos que, geralmente, são obtidos.

2.1 Amostragem de Fraturas

Os principais métodos de amostragem de fraturas em rochas são em 1 dimensão, através de scanline linear (Terzaghi, 1965; Priest, 1993), ou em 2 dimensões, através de scanline circular (Mauldon et al., 2001; Rorhbaugh et al., 2002; Watkins et al., 2015) e de amostragem por área de exposição ou círculo (Wu and Pollard, 1995; Rorhbaugh et al., 2002) (Figura 2).

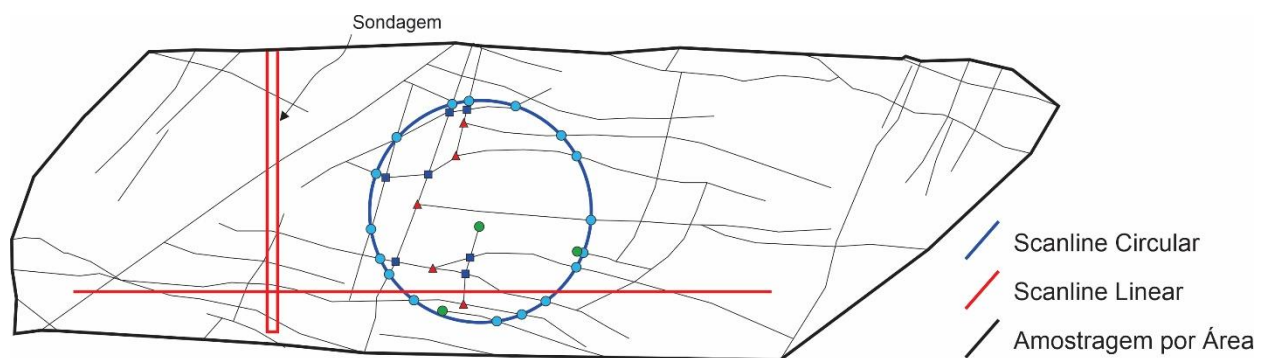


Figura 2. Métodos de amostragem de fraturas em rocha. Scanline Circular (Azul): Círculos azuis são intersecções da scanline com as fraturas, os círculos verdes são terminações de fraturas no interior do círculo, o triângulo vermelho são terminações em outra fratura e os quadrados azuis são cruzamento de fraturas. Scanline Linear (Vermelho): amostragem de fraturas tanto em sondagens como em afloramentos de rocha. Amostragem por Área (Preto): amostragem de fraturas em área com formato irregular.

Tais estratégias de amostragem visam a obtenção de dados referentes às propriedades geométricas, abundância e arranjo espacial das fraturas. Para cada estratégia utilizada, há pelo menos um tipo de viés de amostragem que tornam o levantamento menos representativo. Pino et al. (2019) destaca os principais tipos de enviesamentos descritos na literatura, sendo:

- i. de **orientação**: afeta a amostragem de fraturas que interceptam a linha de levantamento em ângulo oblíquo, de modo que quanto menor o ângulo menos fraturas de um dado grupo são amostradas; este tipo de viés está presente em todas as técnicas de amostragem de fraturas em 1D e 2D;
- ii. de **truncamento**: devido ao fator humano e contraste entre a rocha e a fratura;
- iii. de **censura**: devido ao tamanho do afloramento, acesso e cobertura vegetal;
- iv. de **tamanho**: a probabilidade de uma estrutura ser interceptada por uma linha de levantamento é diretamente proporcional ao seu tamanho.

Dependendo da estratégia de amostragem utilizada, as fraturas podem ser expressas na forma de: frequência de fraturas (ou número de fraturas) em relação ao comprimento da linha de amostragem (número de fraturas/m), comprimento da soma dos traços de fraturas em relação à área de um plano de amostragem (m/m^2), ou pela soma das áreas de superfícies de fraturas em relação ao volume de rocha amostrado (m^2/m^3).

Dershowitz & Herda (1992) definem as medidas de abundância de fraturas pela representação de P_{yx} , onde y é a dimensão da amostragem (1D, 2D ou 3D) e x , a dimensão da estrutura que está sendo medida, dada pelo número de fraturas (N), o comprimento (L), a área (A) ou o volume (V) da fratura.

A Figura 3 apresenta três medidas de abundância de fraturas: frequência, intensidade de fraturas e intensidade adimensional. A frequência de fraturas é caracterizada pela quantidade de fraturas na dimensão de amostragem, sendo $x = 0$. A intensidade de fraturas é dada pela dimensão da fratura dividida pela dimensão da amostragem, sendo no caso da scanline linear, igual à frequência. Por exemplo, para uma superfície 2D (p.ex. afloramento rochoso), as fraturas são representadas por linhas (1D), portanto a

intensidade de fraturas será $P_{21} = L(m)/A(m^2)$, onde L é o comprimento da fratura e A a área da superfície 2D amostrada.

		Dimensão da fratura			
		0 Número	1 Comprimento	2 Área	3 Volume
Dimensão da Amostragem	1 Comprimento	P_{10} 1D frequência = intensidade de fraturas	P_{11} Intensidade Adimensional		
	2 Área	P_{20} frequência 2D	P_{21} Intensidade de fraturas	P_{22} Intensidade Adimensional	
	3 Volume	P_{30} frequência 3D		P_{32} Intensidade de fraturas	P_{33} Intensidade Adimensional

Figura 3. Termos utilizados para o sistema de notação P_{yx} . As colunas mostram a dimensão da estrutura medida e as linhas a dimensão da amostragem utilizada. A intensidade adimensional é obtida multiplicando cada linha pelo comprimento médio da fratura (Sanderson & Nixon, 2015).

A intensidade adimensional (P_{22} , P_{33}) é igual à intensidade de fraturas (P_{21} , P_{32}) multiplicada pelo comprimento médio de fraturas dentro da dimensão de amostragem. Para 3 dimensões, multiplicando a intensidade de fraturas (P_{32}) pela abertura média das fraturas (E), obtém-se a porosidade secundária do aquífero (Sanderson & Nixon, 2015).

2.1.1 Scanline linear

O método da scanline linear consiste no levantamento de estruturas que interceptam uma linha posicionada na parede de amostragem ou testemunho/parede de furos de sondagem em rocha (Figura 4). Visando maior representatividade da amostragem, o comprimento da scanline deve ser tão maior quanto mais espaçadas são as fraturas, no entanto ele depende do tamanho das exposições de rocha, e das condições de acessibilidade (Priest, 1993).

Este é um método amplamente utilizado para amostragem de fraturas em rochas, dada a versatilidade, facilidade de execução e possibilidade de observação direta de muitas

características, tais como: posição da fratura na scanline, orientação, espaçamento, comprimento, forma, rugosidade, alteração e preenchimento da fratura, além do tipo de terminação e indicadores cinemáticos.

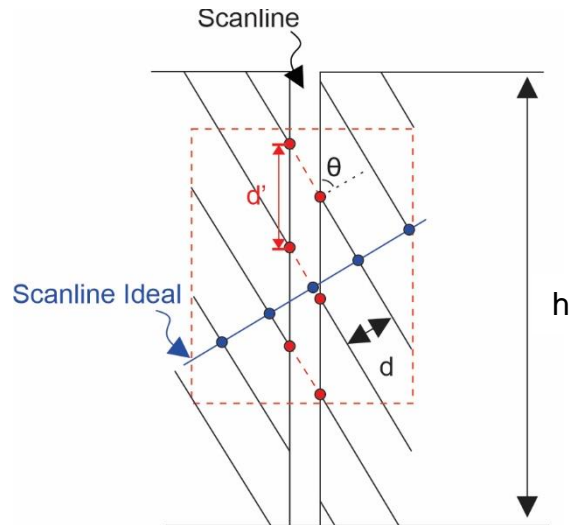


Figura 4. Diagrama esquemático com um grupo de fraturas oblíquas à scanline, formando ângulo θ entre o polo da fratura e a scanline, e a representação do que seria a scanline ideal, orientada de forma perpendicular ao grupo de fraturas.

Scanlines lineares podem apresentar forte viés de orientação, censura ou truncamento, (Terzaghi, 1965; Priest, 1993; Watkins et al., 2015; Pino et al., 2019). Para correção do viés de orientação, resultando no parâmetro de abundância de fraturas (Ab), e cálculo do espaçamento real (d) de fraturas com mesma orientação, Terzaghi (1965) propôs a aplicação das Equações (1) e (2), a seguir:

$$d = d' * \cos\theta \quad \text{Eq. (1)}$$

$$Ab = \frac{1}{\cos\theta}, \text{ para } \theta > 0 \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde d' é o espaçamento aparente e θ o ângulo formado entre a scanline e o polo da fratura (Figura 4). Terzaghi (1965) não recomenda a utilização desta correção para fraturas com ângulo θ maior que 70 graus, visto que há possibilidade de sobrestimar o número de fraturas, tornando a estimativa irreal.

A partir do espaçamento real médio e da abundância de fraturas, pode-se estimar a intensidade de fraturas P_{10} (Dershowitz & Herda (1992)), parâmetro muito utilizado para quantificar a abundância de fraturas e para calibrar modelos DFN (*Discrete Fracture Network*), onde $P_{10} = \frac{1}{h} \sum Ab$, onde h é o comprimento da scanline

Sanderson & Nixon (2015) demonstram que a utilização da correção de Terzaghi (1965) para o cálculo da intensidade de fraturas é uma metodologia robusta e adimensional, podendo ser calculado de forma direta para cada grupo de fraturas interceptadas por furos de sondagem, com validade para 1D, 2D ou 3D: $P_{10}, P_{21}, P_{32} = \frac{N}{(h \cdot \cos\theta)}$.

2.1.2 Scanline circular

Consiste em um método de levantamento de fraturas interceptadas por uma linha da scanline circular ou por fraturas no interior do círculo, em dimensão de amostragem 2D (Mauldon et al., 2001; Watkins et al., 2015) (Figura 2).

Utilizando o número de terminações no interior do círculo (m) e fraturas interceptadas pela scanline circular (n), é possível realizar a estimativa, de forma representativa, da frequência (P_{10}), intensidade (P_{21}) e comprimento médio (L_c) das fraturas em função do raio do círculo (r) (Mauldon et al., 2001; Rohrbaugh et al., 2002):

$$P_{10} = \frac{m}{2\pi r^2} \quad P_{21} = \frac{n}{4r} \quad L_c = \left(\frac{\pi r}{2}\right) \left(\frac{n}{m}\right) \quad \text{Eq. (3, 4 e 5)}$$

Neste caso, o tamanho do círculo é essencial para a redução dos vieses por tamanho e censura do comprimento das fraturas, parâmetro importante para estimativa da intensidade de fraturas em 2D. O círculo deve apresentar dimensão grande o bastante para possuir, pelo menos, 20 a 30 intersecções de fraturas com a linha da scanline (n) (Rohrbaugh et al., 2002; Procter & Sanderson, 2018). O levantamento de fraturas pela área de scanlines circulares possibilita também, a caracterização da topologia da rede de fraturas e grau de conectividade, através da contabilização dos tipos de nós e segmentos da rede (Manzocchi, 2002; Sanderson & Nixon, 2015; Procter & Sanderson, 2018). Este assunto é abordado com maior detalhe no item 2.2.2.

2.1.3 Amostragem por área

A amostragem por área consiste no levantamento de fraturas em superfícies 2D através de mapas de traços de fraturas (Figura 2), podendo ser realizado tanto em imagens aéreas como em fotografias retificadas de afloramentos rochosos (Wu & Pollard, 1995; Gosh & Mitra, 2009; Watkins et al., 2015).

Este método pode ser muito eficiente para coleta de grandes quantidades de dados, no entanto, a amostragem por área é altamente dependente da resolução da imagem utilizada, podendo apresentar viés por truncamento, já que em baixa resolução, fraturas menores poderão ser subamostradas (Watkins et al., 2015).

As informações obtidas através desta metodologia são o azimute de traços de fraturas, frequência (P_{10}) e intensidade (P_{21}). A partir disto, calcula-se P_{10} e P_{21} para cada grupo de fraturas (p.ex., Gosh & Mitra, 2009), sendo:

$$P_{10} = N/A \qquad P_{21} = \sum L/A \qquad \text{Eq. (6 e 7)}$$

Onde N, L e A são, respectivamente, a quantidade de fraturas do mesmo grupo, o comprimento total das fraturas, e a área total mapeada. Para o cálculo da área e comprimento dos traços mapeados, é comum a realização da retificação e georreferenciamento das imagens para utilização em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica) (p.ex. Gosh & Mitra, 2009; Procter & Sanderson, 2018), tornando o cálculo de comprimentos e áreas mais simples.

Este método também possibilita a análise da formação de clusters de fraturas, a partir do espaçamento real das fraturas de cada grupo, através do coeficiente de variação (C_v) (Odling et al., 1999), cuja definição é apresentada no item 2.2.1.1.

2.2 Análise da Distribuição Espacial das Fraturas

O termo “distribuição” ou “arranjo” espacial (*spatial arrangement*), refere-se aos padrões de organização espacial das fraturas, ao longo de um vetor (*scanline*) ou matriz (área ou

volume) (Laubach et al., 2018). Portanto, utiliza-se para sua caracterização não apenas o espaçamento real de fraturas, mas também a posição de cada uma no espaço e o seu tipo de terminação.

2.2.1 Análise da distribuição espacial de fraturas em scanlines lineares

Em maciços rochosos, as fraturas podem apresentar distribuição uniforme, aleatória, corredor simples ou fractal clusterizada (Marret et al., 2018; Sanderson & Peacock, 2019) (Figura 5).

De forma geral, os espaçamentos de fraturas distribuídas uniformemente no espaço se aproximam da distribuição estatística uniforme (Figura 5-A). Fraturas com espaçamentos distribuídos aleatoriamente, apresentam distribuição estatística exponencial negativa a lognormal (Rives et al., 1992) (Figura 5-B), podendo apresentar baixo grau de clusterização (Marret et al., 2018). Fraturas com distribuição dos espaçamentos do tipo fractal clusterizada apresentam distribuição estatística lei de potência e são invariantes com relação à escala (Sanderson & Peacock, 2019) (Figura 5-D).

O termo “corredor de fraturas” e “zona de fraturas” são importantes para o fluxo e referem-se a regiões com adensamento de fraturas (aumento de intensidade, Figura 5-C), quando comparadas com regiões vizinhas. Sanderson & Peacock (2019) afirmam que “zona de fratura” é um termo que pode ser utilizado de forma mais geral, para qualquer tipo de fratura, e usam o termo corredor para se referir a juntas sub-paralelas. Esses autores ainda destacam que os corredores ou zonas apresentam distribuição aleatória e o aumento localizado de sua intensidade configura um cluster de fraturas (Figura 5-C).

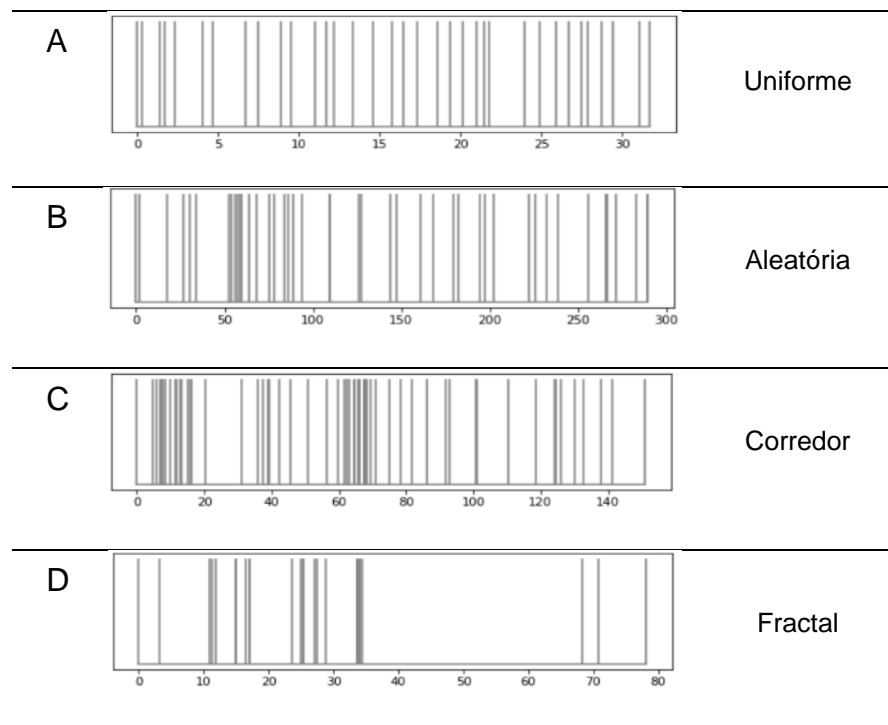


Figura 5. Exemplo dos tipos de distribuição de fraturas no espaço, ao longo de uma scanline perpendicular ao grupo de fraturas analisado. Dados simulados, neste trabalho, a partir das distribuições de probabilidades para cada tipo, sendo A – uniforme, B – exponencial negativa, C – exponencial negativa com aumento da intensidade localizada e D – lei de potência.

Muitos são os métodos utilizados para identificação e classificação do tipo de distribuição de fraturas (Laubach et al., 2018). Sanderson & Peacock (2019) apresentam método para caracterização do tipo de distribuição e identificação de corredores de fraturas, utilizando scanlines lineares, através da análise de gráficos de agulhas (Figura 5), cálculo do coeficiente de variação (C_v) dos espaçamentos reais, cálculo do valor 'V' pelo método de Kuiper (Kuiper, 1980) e pelo cálculo da correlação da soma para estimativa da dimensão de correlação ou “correlation dimension” (D_c) (Grassberger & Procaccia, 1983). Estes cálculos são explicados a seguir.

2.2.1.1 Coeficiente de Variação (C_v)

O cálculo do coeficiente de variação de espaçamentos de fraturas (C_v) é o método mais simples para avaliação do grau de clusterização das fraturas, sendo utilizado em diversos trabalhos (p. ex. Gillespie et al., 1993; Odling et al., 1999; Manzochi, 2002). Este método

define as seguintes classes: $C_v = 1.0$, distribuição aleatória ou uniformemente clusterizada; $C_v \ll 1.0$, distribuição uniforme ou anti-clusterizada; $C_v > 1.0$, fraturas com arranjo mais clusterizado que o esperado para uma distribuição aleatória (Manzochi, 2002).

$$C_v = \sigma/\mu \quad \text{Eq. (8)}$$

Entretanto, apenas o C_v pode não representar com confiança estatística, o tipo de distribuição espacial das fraturas, uma vez que fraturas com espaçamentos aleatórios podem ser rearranjados em clusters de fraturas, mantendo a distribuição estatística dos espaçamentos, e apresentando o mesmo valor de C_v (Sanderson & Peacock, 2019).

2.2.1.2 Método de Kuiper

A utilização do método de Kuiper (Kuiper, 1980) possibilita analisar e quantificar, com confiança estatística, quão heterogênea é a distribuição em relação ao esperado para uma distribuição uniforme. A aplicação se dá a partir do gráfico de frequência acumulada *versus* a posição da fratura na scanline, ambos normalizados em porcentagem (Figura 6 – A a D). A reta de coeficiente angular igual a 1 representa fraturas com distribuição homogênea e uniforme ou anti-cluster (Marret et al., 2018) e quanto maior o desvio dos dados em relação a ela, maior será a heterogeneidade da distribuição, sendo definido pelo parâmetro V , calculado pela soma em módulo dos valores máximos de desvios em relação à distribuição uniforme, dados por D^+ e D^- (Figura 6), ou seja, $V = |D^+| + |D^-|$.

O parâmetro V pode variar entre 0 e 1 sendo, para $V = 0$, a distribuição é homogênea (uniformemente distribuída) e para $V = 1$, a distribuição é extremamente heterogênea (Sanderson & Peacock, 2019).

Este método tem a vantagem de utilizar testes de hipótese para quantificar, com grau de confiança estatística, se uma dada distribuição apresenta desvio significativo da homogeneidade. Para tanto, Stephens (1970) utiliza o parâmetro V^* , onde:

$$V^* = V[\sqrt{N} + 0.155 + 0.24/\sqrt{N}] \quad \text{Eq. (9)}$$

Para valores de $V^* > 1.75, 2.0$ e 2.3 , rejeita-se a hipótese nula de homogeneidade da distribuição com 95%, 99% e 99,9% de confiança estatística, respectivamente, sendo aplicável para valores de N (número de amostras) > 6 .

Segundo Sanderson & Peacock (2019), na distribuição aleatória, apesar de haver clusters de fraturas, não há significância estatística para caracterizar a distribuição das fraturas como heterogênea, diferente de quando há ocorrência de corredores de fraturas (Figura 6-C).

2.2.1.3 Correlação da Soma (D_c)

O último método utilizado no fluxo de trabalho proposto por Sanderson & Peacock (2019), consiste na análise da dimensão fractal da distribuição de fraturas, através da aplicação da técnica da correlação da soma normalizada, conforme proposto por Grassberger & Procaccia (1983). Para N fraturas que interceptem uma scanline de tamanho L , são contados o número de pares de fraturas (não apenas espaçamentos entre fraturas vizinhas) separados pela distância $d = |d_i - d_j|$, onde $i = 1, 2, \dots, N$, que são menores que valor qualquer de ε . O parâmetro ε é usado da seguinte forma: para ε igual, por exemplo, a 1 metro serão considerados todos os pares de fraturas cujo distância é menor que 1 metro, e com isso se obtém um valor de correlação da soma (pela equação abaixo). Isso é feito para ε igual e 2 metros e assim por diante. Para o cálculo da correlação da soma utiliza-se a equação:

$$C(\varepsilon) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \Phi[\varepsilon - |d_i - d_j|] \quad \text{Eq. (10)}$$

Sendo $\Phi[\dots]$ a função Heaviside que assume valor 1 para valores de $d < \varepsilon$ e 0 para $d > \varepsilon$. Todos os resultados são plotados em um gráfico ε/L versus $C(\varepsilon)/L$ para estimar a dimensão fractal (Figura 6-E a H). Caso os dados sejam ajustados por regressão linear, o coeficiente da reta de regressão dará o valor da dimensão de correlação (D_c), onde amostras aleatórias de fraturas com distribuição aleatória ou uniforme apresentarão valor de $D_c \sim 1$, enquanto amostras com distribuição fractal apresentarão valor de $D_c < 1$, devido à sua independência de escala (Figura 6-H).

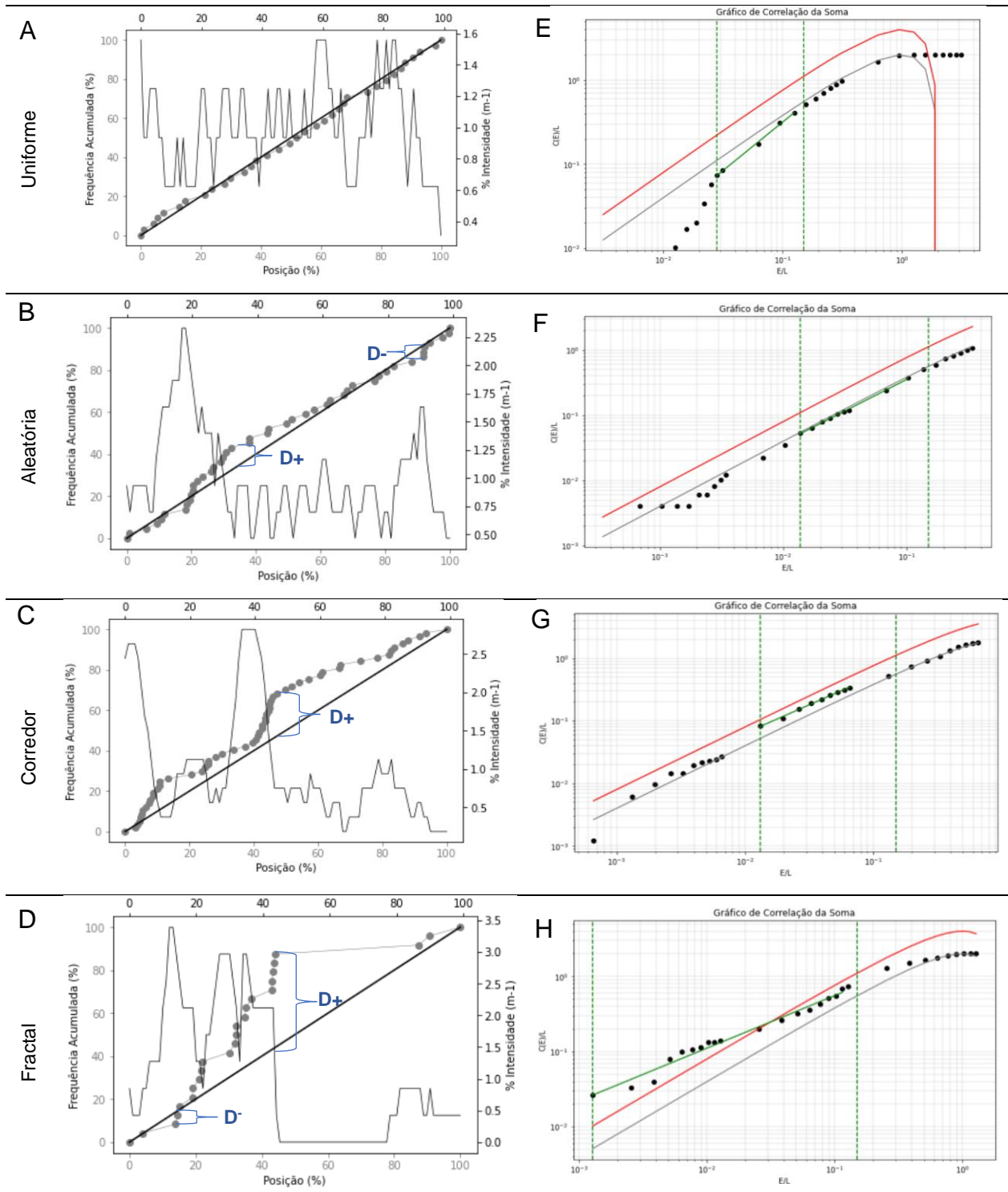


Figura 6. (A-D) Gráficos de frequência acumulada vs. posição normalizados em porcentagem com desvios ($D+$ e $D-$) em relação à distribuição uniforme (reta de cor preta). (E-H) Gráficos de correlação da soma vs. ϵ normalizados para o comprimento da scanline L , onde as linhas tracejadas de cor verde são os intervalos utilizados para a regressão linear, dado pelo limite inferior (valor de ϵ/L em que a soma do total de pares de fraturas menores que ϵ é igual ao número de amostra N) e superior ($\epsilon/L=0.15$). Gráficos produzidos a partir das distribuições sintéticas apresentadas na Figura 5.

Por fim, no coligir dos parâmetros obtidos a partir do gráfico de agulhas (Figura 5), coeficiente de variação dos espaçamentos reais (C_v), cálculo do valor de V e V^* , e de D_c (Figura 6), pode-se classificar o tipo de arranjo a partir da (Figura 7-A). Sanderson & Peacock (2019) também recomendam a utilização do gráfico que relaciona o valor de V de Kuiper e D_c para classificação do tipo de distribuição (Figura 7-B).

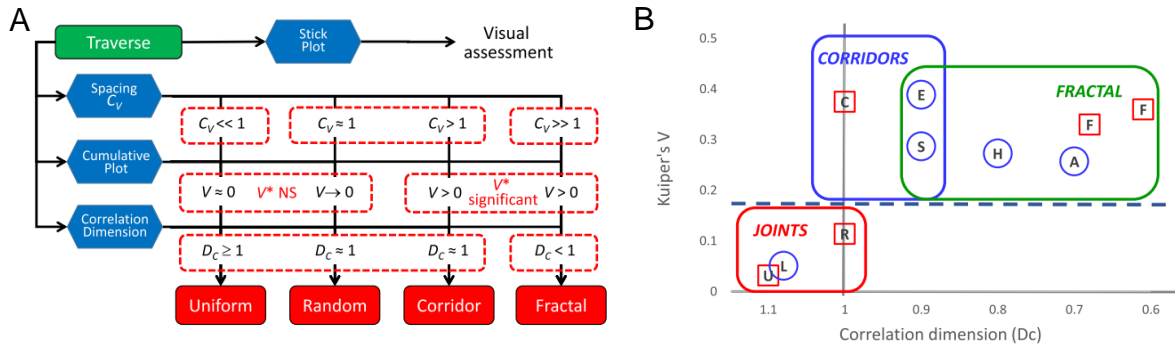


Figura 7. Classificação do tipo de distribuição de fraturas a partir dos parâmetros C_v , V e D_c . Retirado de Sanderson & Peacock (2019). A – Fluxograma com intervalos de valores esperados para cada parâmetro e respectiva distribuição. B – Proposta para classificação do tipo de distribuição de Sanderson & Peacock (2019), a partir dos parâmetros V e D_c . Valores em vermelho são referentes ao tipo de distribuição das fraturas, sendo U: Uniforme, R: Aleatório, C: Corredor e F: Fractal, enquanto os valores em azul são referentes à classificação de dados reais em L: Lilstock, E: Ebbesvikvatnet, S: Steinsvikvegen, H: Hop e A: Algrøyna.

2.2.2 Análise da topologia da rede de fraturas

A topologia é a área da matemática utilizada para descrição e caracterização de redes complexas. As redes complexas, tais como redes de fraturas em maciços rochosos, contém elementos como nós ou vértices conectados (Barabási & Albert, 1999).

Em duas dimensões, uma rede de fraturas consiste em um sistema de ramos (segmentos) e nós (terminações) que podem ser usados para definir tanto feições geométricas (por exemplo, comprimento e orientação), como a relação entre os elementos da rede, ou seja, a topologia (Sanderson & Nixon, 2015). Os autores argumentam que fazer um levantamento dos comprimentos dos segmentos é mais vantajoso do que dos comprimentos dos traços de fraturas, pois eles são menos afetados pelo viés de censura e são mais agrupados em torno de um valor médio. Eles acrescentam que muitas propriedades importantes de redes estão mais relacionadas à topologia do que à geometria; isto será demonstrado mais abaixo.

Há apenas três tipos possíveis de terminações de fraturas: terminação cega (I), quando a fratura termina na própria rocha, terminação confinada (Y), quando a fratura termina em outra fratura, e a terminação cruzada (X), quando a fratura cruza outra fratura (Figura 8-A). Todo segmento de fratura apresenta duas terminações, sendo representado pela letra (I), quando pelo menos uma das terminações é cega e (C) quando pelo menos uma das terminações é conectada a outra fratura, podendo ser do tipo: I-I (segmento isolado), I-C (parcialmente conectado) ou C-C (duplamente conectado) (Manzochi, 2002; Nixon, 2013; Sanderson & Nixon, 2015) (Figura 8-A).

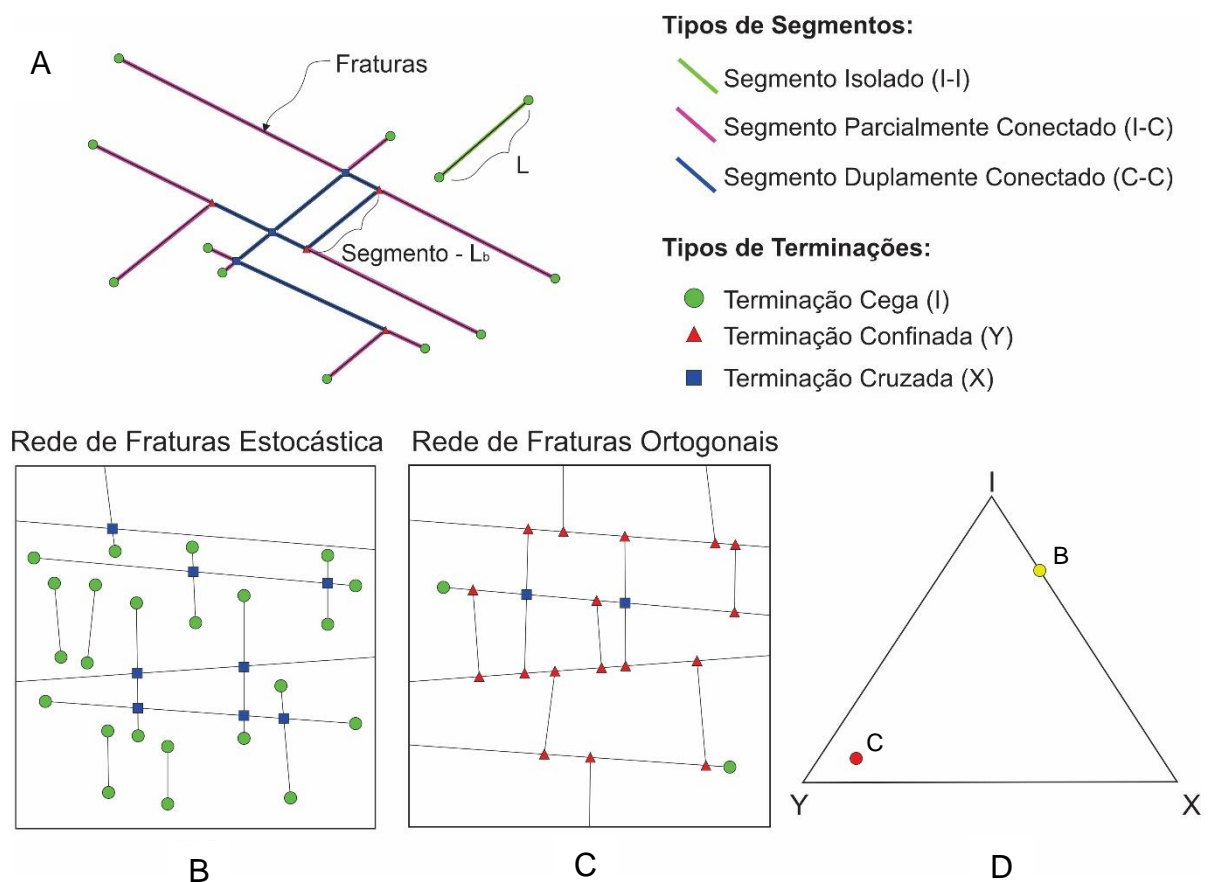


Figura 8. Topologia de redes de fraturas. A – Representação de rede de fraturas com três tipos de terminações diferentes, sendo: I – Terminação Cega, Y – Terminação Confinada e X – Terminação Cruzada; três tipos de segmentos: Isolado (I-I), Parcialmente Conectado (I-C) e Duplamente Conectado (C-C) e os comprimentos de segmento (L_b) e da fratura (L). B – Rede de fraturas produzidas a partir de simulação estocástica. C – Rearranjo das fraturas em B, mantendo as propriedades geométricas de intensidade, comprimento médio e orientação das fraturas, mas produzindo maior conectividade. D – Diagrama ternário dos tipos de terminação I, Y e X para as redes de fraturas em B e C, mostrando que para redes com mesmos parâmetros geométricos, pode-se obter resultados de topologia completamente diferente. Imagens retiradas ou modificadas de Sanderson & Nixon (2015).

A análise da topologia da rede de fraturas é realizada contabilizando os tipos de terminações e segmentos que compõem a rede de fraturas em uma superfície, que pode ser um afloramento rochoso, modelo digital de terreno ou amostras de mão (p.ex. Procter & Sanderson, 2018; Primaleon et al., 2020; Kania & Szczech, 2020). A interpretação é realizada a partir de diagramas ternários que relacionam as proporções dos tipos de terminação ou de segmentos (Figura 8-D).

Enquanto a proporção e quantidades de cada tipo de nó é importante para a caracterização tanto de parâmetros geométricos como de conectividade (p.ex. Cb e f, ver Tabela 1), a proporção dos tipos de segmentos possibilita caracterizar a rede de fraturas como: fraturas isoladas (*Isolated Branches*), quando há o predomínio de segmentos do tipo I-I, clusters isolados (*Isolated Clusters*), quando há o predomínio de segmentos do tipo I-C e cluster abrangente (*Spanning Clusters*), quando há o predomínio de segmentos do tipo C-C (Figura 9). O cluster abrangente ocorre quando há formação de uma espinha dorsal (*backbone*) que interliga diferentes clusters, atravessando todo o domínio considerado (Figura 9).

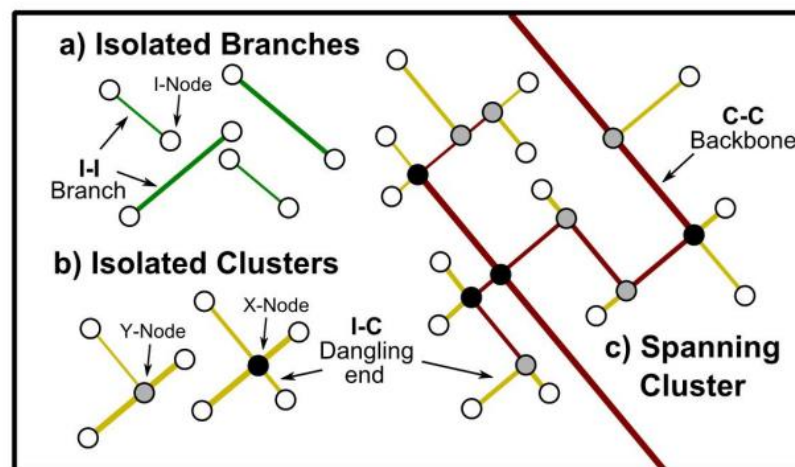


Figura 9. Diagrama esquemático ilustrando diferentes topologias de diferentes arranjos e clusters (Nixon, 2013). Dangling Ends: Segmentos de fraturas pendentes. Backbone: Espinha dorsal formada pela conexão de diversos clusters.

É importante destacar que o termo “*cluster*”, utilizado na análise de redes complexas tem um significado diferente do mesmo termo utilizado para análise da distribuição espacial

de fraturas de um mesmo grupo, como discutido no item 2.2.1. Na análise de redes de fraturas, o termo cluster remete a agrupamentos de segmentos de fraturas conectados.

As Figuras 8-B e C, mostram a importância da caracterização da topologia aplicada às redes de fraturas. Redes de fraturas produzidas a partir de simulação estocástica (Figura 8-B), onde predominam os tipos de terminação I e X, podem ser rearranjadas em redes de fraturas com predomínio dos tipos de terminações Y e X (Figura 8-C e D), apresentando maior grau de conectividade, embora os parâmetros geométricos (p.ex. orientação, intensidade e comprimento médio das fraturas), permaneçam os mesmos.

A Tabela 1 abaixo, resume alguns dos parâmetros obtidos através da contabilização dos tipos de nós da rede e suas notações, sendo N_I , N_Y e N_X o número de nós para cada tipo, N_N o total de nós da rede, N_L o total de linhas e N_B o total de segmentos da rede, $\sum B$ o comprimento total de segmentos, C_B a conexão média por segmento e f a conectividade hidráulica.

Tabela 1. Resumo de parâmetros obtidos a partir da contabilização dos tipos de nós de redes de fraturas. 1 Retirado de Sanderson & Nixon (2015) e 2 de Saevik & Nixon (2017).

Parâmetro	Notação	Equação
Número de Nós	N_I, N_Y e N_X	-
Total de Nós ¹	N_N	$N_N = N_I + N_Y + N_X$
Total de linhas ¹	N_L	$N_L = (N_I + N_Y) / 2$
Total de Segmentos ¹	N_B	$N_B = (N_I + 3N_Y + 4N_X) / 2$
Comprimento Total de Segmentos	$\sum B$	L_B
Conexão média/Segmento ¹	C_B	$C_B = (3N_Y + 4N_X) / N_B$
Conectividade Hidráulica ²	f	$f = \max \left(0, \frac{2.94 (4N_X + 2N_Y)}{4N_X + 2N_Y + N_I} - 2.13 \right)$

O grau de conectividade de redes de fraturas pode ser calculado pelo parâmetro de conexão média por segmento da rede (C_B), que é a relação entre a quantidade de nós do tipo Y e X, e o número de segmentos da rede (N_B) (Tabela 1).

A conectividade hidráulica (f) é definida por Saevik & Nixon (2017) para o cálculo da permeabilidade efetiva de redes de fraturas a partir da quantidade de nós de cada tipo em 2 dimensões (Tabela 1). Este parâmetro pode ser entendido como um ponderador para a equação analítica de estimativa da permeabilidade efetiva de rochas fraturadas,

proposta por Oda *et al.* (1985), conforme proposto por Saevik & Nixon (2017). O valor de f pode variar entre 0 e 1, sendo que para $f = 0$, a rede de fraturas é considerada totalmente desconectada e, portanto, a permeabilidade efetiva é igual a 0, enquanto para valores de $f > 0$, a rede é conectada e acima do limiar de percolação, ou seja, há conectividade das fraturas suficiente para ocorrência de fluxo através de todo o domínio considerado (Cluster de Abrangência) e para $f = 1$, a rede de fraturas é considerada totalmente conectada.

2.3 Parâmetros Hidráulicos em Rochas Fraturadas

As propriedades geométricas das descontinuidades controlam as suas propriedades hidráulicas, ou seja, condutividade hidráulica (K), transmissividade (T) e abertura hidráulica (b), que podem ser obtidas através de ensaios em poços com obturadores ou em laboratório.

A Figura 10 mostra como a condutividade hidráulica pode variar em função da frequência (fraturas por metro) e da abertura de fraturas. Para a variação de uma ordem de grandeza na frequência de fraturas, observa-se o aumento de uma ordem de grandeza na condutividade hidráulica, enquanto para o mesmo aumento na abertura, observa-se o aumento de três ordens de grandeza na condutividade hidráulica. Esta relação é denominada de lei cúbica (Snow 1968).

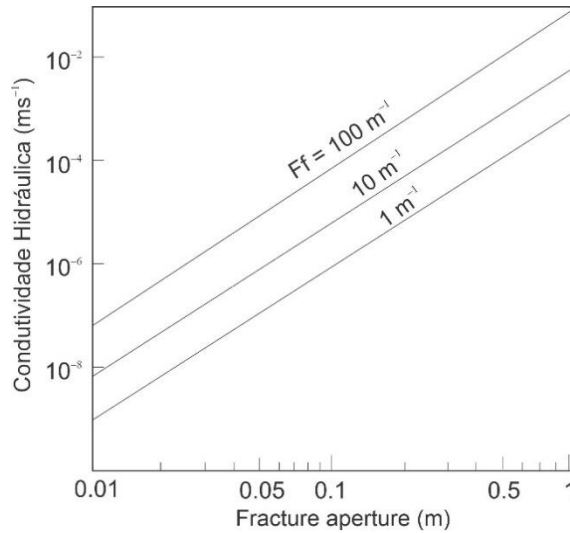


Figura 10. Variação da condutividade hidráulica em função do espaçamento de fraturas e abertura (Lee & Farmer, 1993).

Os resultados de ensaios hidráulicos em poços com obturadores duplos, fornecem informações sobre a transmissividade (T) do conjunto de fraturas do trecho ensaiado, conforme Equação (11) de Thiem:

$$T = Ke = \frac{Q \ln\left(\frac{R_0}{R}\right)}{2\pi dH} \quad \text{Eq.(11)}$$

onde K é a condutividade hidráulica, e a espessura do aquífero (comprimento do intervalo ensaiado), Q a vazão medida no teste, R_0 o raio de influência do teste, R o raio do poço e dH a variação da carga hidráulica.

Utilizando a Lei Cúbica (Snow, 1968) e o resultado de T através da Equação (11), pode-se estimar a abertura hidráulica, conforme Equação (12) abaixo:

$$b = \left(\frac{T12\mu}{n\rho g}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Eq.(12)}$$

onde n é a quantidade de fraturas no trecho ensaiado, μ e ρ a viscosidade dinâmica e densidade do fluido, respectivamente, e g a gravidade.

Estas propriedades são estimadas pela lei de Darcy, quando o fluxo é laminar ou linear, ou seja, a relação entre a vazão (Q) e a pressão ou carga hidráulica (H) é linear. O oposto ao fluxo linear é o fluxo não linear, que é observado quando a relação entre a vazão (Q) e a carga hidráulica (H) não é linear (Figura 11).

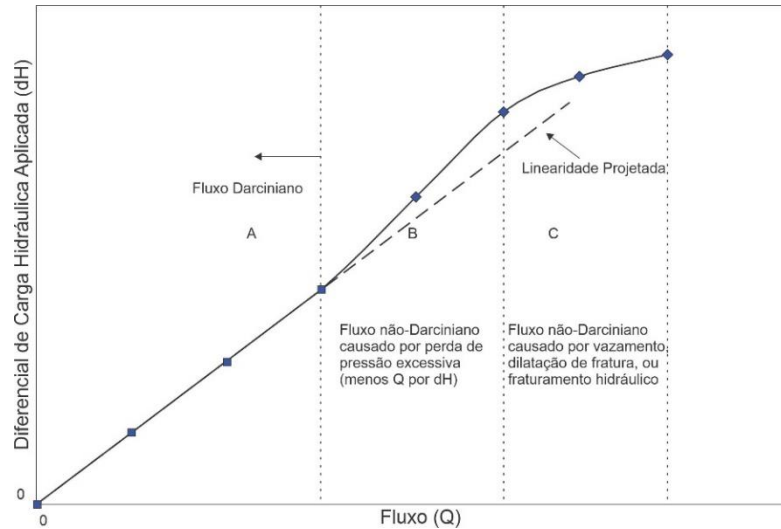


Figura 11. Gráfico de Carga Hidráulica vs. Fluxo mostrando a transição de fluxo laminar/linear para turbulento/não-linear. Modificado de Quinn et al. (2011).

A não-linearidade pode ser decorrente de vários fatores. Konzuk & Kueper (2004) observaram a ocorrência de fluxo turbulento em baixa vazão em fraturas de dolomitos. Tal comportamento foi atribuído à rugosidade das fraturas, variação da abertura e obstruções do fluxo. Entretanto, Quinn et al. (2011) atribui este comportamento a ensaios com pressões e vazões mais elevadas e a fatores diversos que atuam em conjunto, p.ex., variações na abertura, rugosidade e ocorrência de fraturas com comprimentos variados no mesmo intervalo de ensaio.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho pode ser dividido em duas partes, uma de caracterização de fraturas e outra de estimativa de parâmetros hidráulicos a partir de ensaios hidráulicos *in situ* do tipo Lugeon.

Os dados de fraturas utilizados neste trabalho são provenientes de levantamento estrutural realizado nos taludes da pedra Morro Grande, através de scanlines e de imagens obtidas por drone, bem como de perfilagem ótica de 5 sondagens, localizadas nas proximidades da mesma pedra (Figura 12 e Tabela 2). Nestas mesmas sondagens foram realizados 56 ensaios hidráulicos do tipo Lugeon em intervalos isolados por obturadores. Os dados estruturais obtidos em perfilagens e ensaios hidráulicos foram selecionados do projeto executivo da linha 6 – Laranja do metrô de São Paulo.

As planilhas com todos os dados utilizados encontram-se no Anexo deste trabalho.

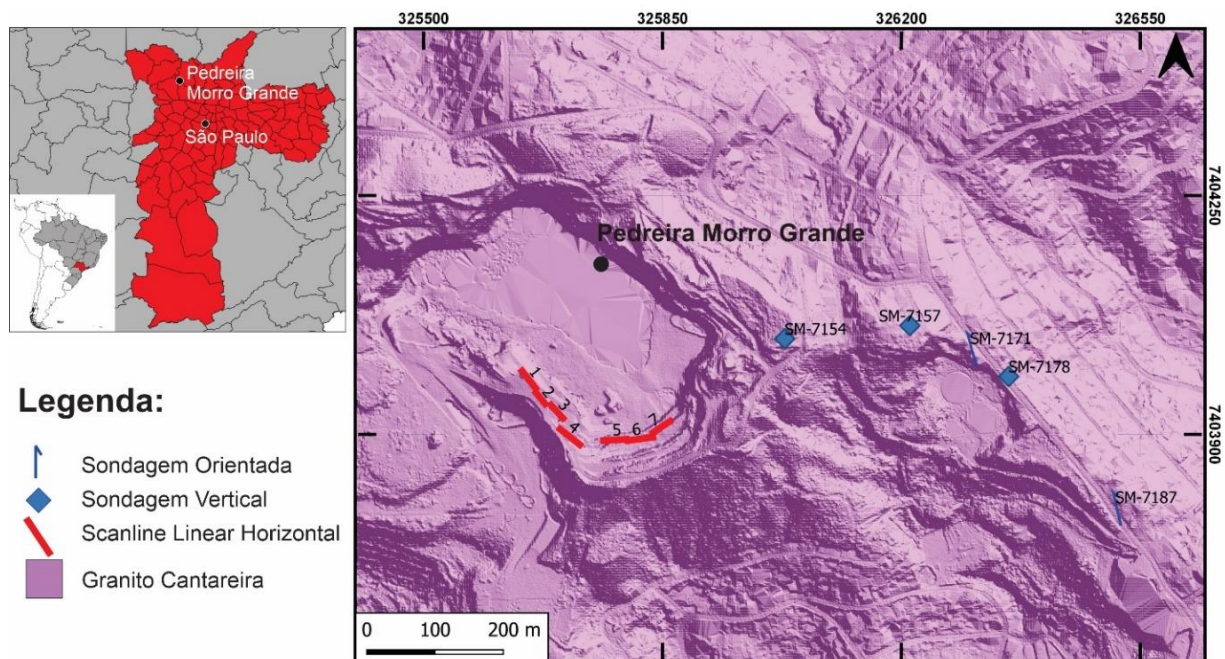


Figura 12. Localização da área de estudo com as scanlines realizadas na Pedreira Morro Grande e as sondagens selecionadas do projeto executivo da linha 6 – Laranja do metrô de São Paulo. O modelo digital do terreno provém de dados de levantamento topográfico por escaneamento a laser realizado e disponibilizado pela prefeitura de São Paulo na base de dados geosampa (<http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br>).

Tabela 2. Resumo das orientações e comprimentos das scanlines utilizadas.

Scanline	Direção	Mergulho	Comprimento (m)
SM-7154	0	90	57.26
SM-7157	0	90	57.09
SM-7178	0	90	56.35
SM-7187	322	70	23
SM-7171	299	60	54.74
SL01	135	6	39.6
SL02	130	8	23
SL03	150	3	21
SL04	130	0	35
SL05	90	0	32
SL06	260	0	24.8
SL07	54	0	34

3.1 Levantamento de Dados Estruturais em Scanlines de Afloramentos

O levantamento de dados estruturais em afloramentos de rocha foi realizado utilizando a metodologia de scanlines lineares, conforme apresentado no item 2.1.1, na pedreira Morro Grande, localizada dentro do domínio do granito Cantareira. No total, foram coletados 144 dados de estruturas em 7 *scanlines* horizontais de direção NW-SE, E-W e ENE (Figura 12).

O local das scanlines foi definido em função do acesso aos taludes, já que grande parte da pedreira se encontrava alagada na data do levantamento, e da condição de regularidade e limpeza da parede, conforme recomendado por Priest (1993). As scanlines apresentam comprimentos limitados pelo tamanho da trena utilizada (~40m). No caso das scanlines 1 a 3 e 5 a 7, o levantamento foi realizado de forma contínua e, no processamento dos dados, estas são tratadas como SL 1 a 3 e SL 5 a 7.

Definidos o local e o comprimento da linha, foi registrada a identificação da scanline (ex.: SL1, SL2,... SLn), seu comprimento, direção, coordenadas geográficas do início e fim, e foto panorâmica e/ou conjunto de fotos de detalhe dos pontos amostrados.

Para cada estrutura amostrada ao longo da scanline, foram coletadas informações em fichas de campo sobre sua orientação e posição na *scanline*, rugosidade, alteração e

forma da fratura, presença de indicador cinemático, ocorrência de indícios de fluxo e tipo de preenchimento ou revestimento.

A medição da orientação das estruturas foi feita com bússola Clar, ou seja, todas as medidas de planos são de rumo do mergulho e mergulho, já a posição de cada estrutura corresponde ao seu ponto de intersecção na trena, posicionada paralelamente à face do talude.

Para cada fratura, o parâmetro de rugosidade foi estimado a partir do coeficiente de rugosidade de fraturas JRC (*Joint Roughness Coefficient*, Barton & Choubey (1977)). A alteração foi classificada em sã, descolorida ou alterada, e a forma da fratura, em plana, ondulada ou irregular.

Foram coletadas informações sobre o tipo de preenchimento, podendo ser uma precipitação química por sulfetos, óxidos e carbonatos, deposição de partículas como areia, silte ou argila, ou preenchimento de juntas por veios e diques. Já os revestimentos podem ocorrer como películas muito finas sobre os planos das fraturas, sendo classificados por sua cor (filme escuro, filme esverdeado ou filme branco) ou por sua composição química (película carbonática, sulfetos e óxidos).

Os indícios de fluxo de água ao longo de uma dada fratura podem ocorrer na forma de vegetação, vertência de água constante, gotejamento ou umidade, além do grau de alteração intempérica da fratura ou da rocha a ela adjacente.

Os indicadores cinemáticos de falhas, quando possível, foram observados com base na classificação de Petit (1987), sendo coletadas amostras e informações sobre orientação da direção e sentido do movimento.

Neste trabalho o termo fratura serve para designar qualquer estrutura rúptil, que pode ser uma falha (fratura de cisalhamento), quando há estrias de atrito, ou moagem e estiramento mineral ou outros indicadores de deslocamento por cisalhamento. O termo junta foi utilizado quando não há indicações de movimento, embora muitos autores o utilizem para denominar fraturas extensionais geradas por abertura perpendicular à superfície da fratura. Fraturas de cisalhamento também podem ser reconhecidas pelo padrão de fraturas conjugadas.

3.2 Levantamento de Dados Estruturais em Poços - Perfilagem Ótica (OTV)

O levantamento estrutural em perfilagens óticas foi realizado em 2 sondagens inclinadas e três verticais, com diâmetro do furo variando de 2" a 3", totalizando cerca de 250 metros de perfilagem. As imagens obtidas foram interpretadas pela empresa fornecedora do levantamento, sendo observados no total, 378 estruturas. Estas foram utilizadas nas análises apresentadas neste trabalho.

A perfilagem ótica consiste na geração de imagens orientadas e contínuas em 360° das paredes de furos de sondagem ou poços (Williams & Johnson, 2004), possibilitando a identificação de variações litológicas e obtenção da profundidade e orientação de estruturas planares ao longo do furo (Figura 13).

O sistema OTV é composto por um anel de luzes para iluminar as paredes do furo, uma câmera CCD (*Charge-Coupled Device*, dispositivo de carga acoplada e sensor de captação de imagens), a qual mede a intensidade de cores nos espectros do vermelho, azul e verde e um refletor cônico ou hiperbólico.

A centralização e a precisão na determinação da posição do conjunto em relação às paredes do furo e sua profundidade, são determinantes para a qualidade e interpretação das imagens. A centralização é obtida através da utilização de centralizadores acoplados ao equipamento. Já a precisão da posição do conjunto ao longo do furo é garantida pela presença de magnetômetros e acelerômetros instalados no conjunto.

Comumente, as imagens apresentam resolução vertical de 0.5, 1 ou 2 mm e horizontal de 180, 360 e 720 pixels por linha (Williams & Johnson, 2004). A velocidade de aquisição das imagens depende da resolução vertical e horizontal que se necessita, porém para a maioria dos casos é de 1m/min, sendo realizado, normalmente, do fundo do furo para o topo, podendo ser realizado tanto em poços secos como em presença de água, desde que esta esteja límpida. Poços com água turva ou rochas muito escuras podem dificultar o reconhecimento de estruturas da rocha.

As imagens geradas são processadas em softwares como WellCAD e RgDip para a obtenção de informações sobre atitudes e tipos de estruturas, frequência, abertura e tipo

de preenchimento, caso ocorra. Tais informações são posteriormente, sumarizadas em tabelas e as atitudes plotadas em estereogramas.

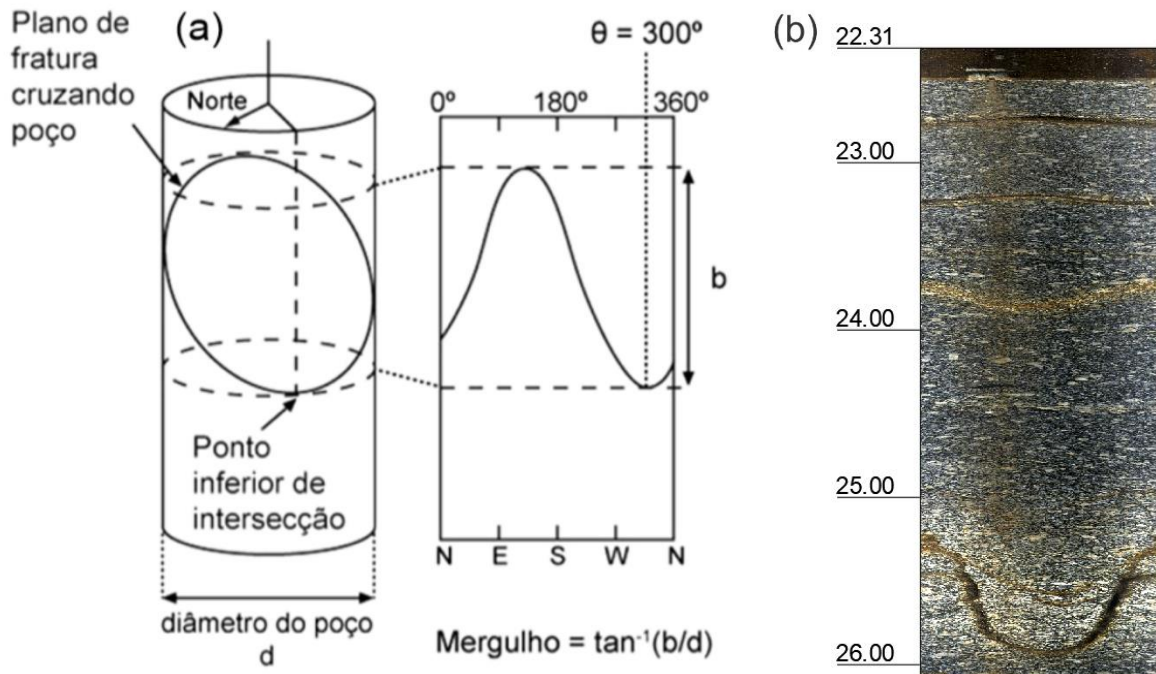


Figura 13. Exemplo de imagem plana (360°). (a) Representação de fratura que intercepta o poço e sua representação em imagem plana. Retirado de Fiume (2013). (b) Interpretação de estruturas e variação litológica em imagem plana (360 °). Esta imagem é de uma perfilagem óptica de um furo de sondagem da área de estudo.

A presença de minerais ferro-magnesianos na rocha ou a proximidade com revestimentos metálicos podem causar distúrbios no magnetômetro. Nestes casos, Williams & Johnson (2004) sugerem o reprocessamento das imagens com o magnetômetro desligado.

3.3 Levantamento de Dados Estruturais em 2 Dimensões

O levantamento das estruturas em superfície foi realizado em paredes de rocha com direção NW-SE e E-W, utilizando amostragem por área irregular e circular, respectivamente. Os traços de fraturas foram identificados através de ortofotos produzidas com imagens de drone, através do software QGIS.

A ortofoto ou ortomosaico é uma imagem plana, em escala e livre de distorções, sendo possível manipulá-las em ambiente de Sistema de Informações Geográficas – SIG. A resolução das ortofotos tendem a ser maior quanto maior for a proximidade com o objeto; a resolução da câmera; a quantidade de fotografias. Ortofotos de exposições de rochas com alta resolução são importantes para identificação de fraturas, podendo minimizar o viés de truncamento, comum em levantamentos realizados em fotos de grandes exposições de rocha. Além disso, a compatibilidade com ambiente SIG é uma vantagem para o levantamento de redes de fraturas, pois possibilita o cálculo de parâmetros geométricos que envolvam a quantificação do comprimento e quantidade de fraturas, a área de amostragem e a topologia da rede.

As imagens das paredes foram obtidas utilizando um drone Phantom 4 *Advanced* da empresa DJI equipado com câmera fotográfica com resolução de 20 megapixels e sistema de geolocalização embutido (GPS/GLONASS), possibilitando registrar a posição e orientação das fotos no espaço. As imagens foram obtidas com distância variável em relação a parede (10-30 metros) (Figura 14-A), devido à irregularidade da superfície, disposição em bermas e ocorrência de obstáculos (p.ex. árvore, arbustos e placas). Para este trabalho, não foram utilizados pontos de controle com coordenadas obtidas através de equipamentos mais precisos que o GPS do drone, comum em aerolevantamentos.

Para a produção do modelo 3D e ortofotos das paredes, utilizou-se o software Agisoft PhotoScan 1.4.5. Após o carregamento e alinhamento das imagens obtidas em campo, seguiu-se o fluxo de trabalho disponível no software, com a produção da nuvem de pontos, modelo 3D e ortofoto.

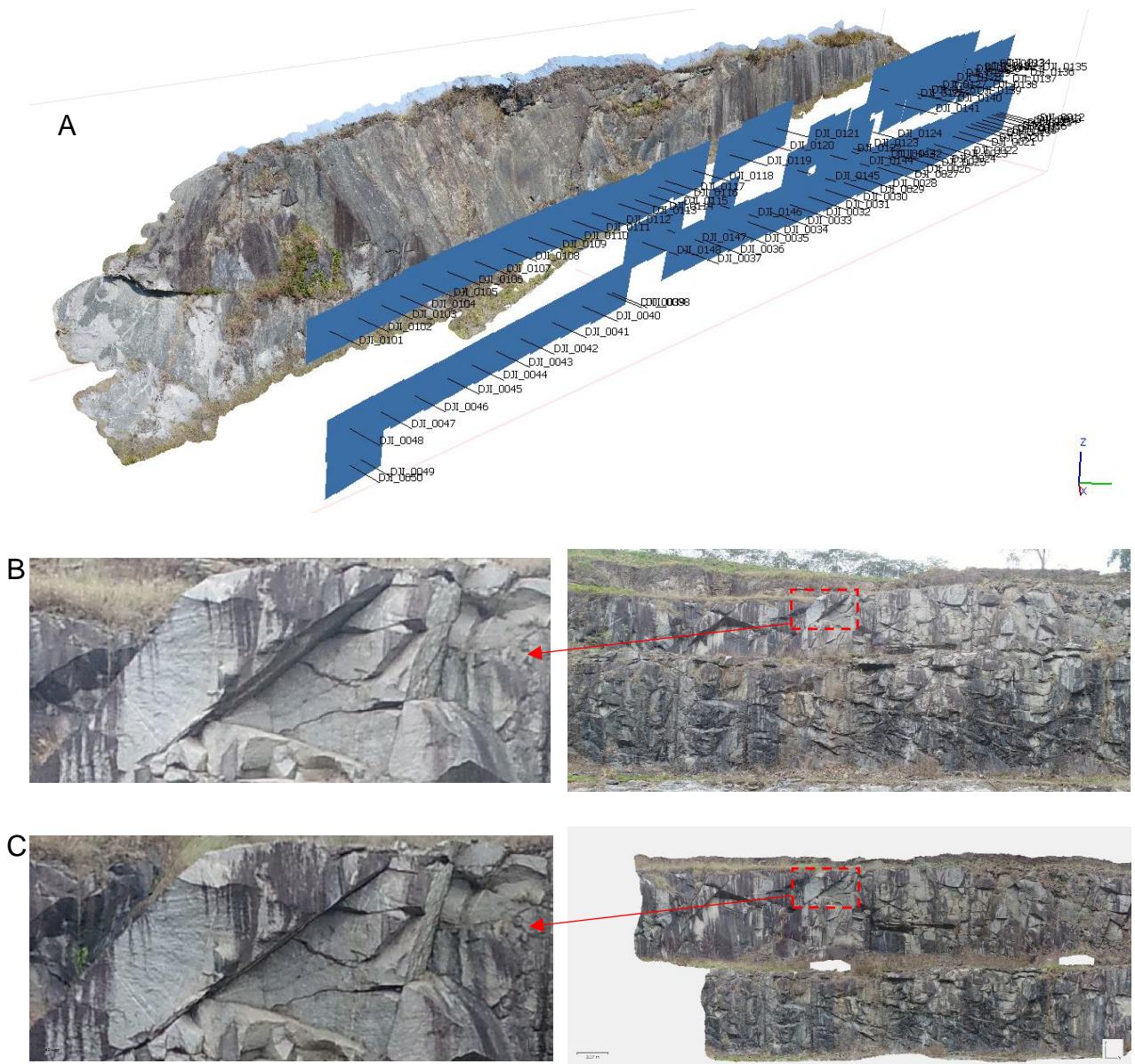


Figura 14. A – Modelo 3D da parede com direção NW-SE e posições das imagens obtidas com drone. B – Fotografia da parede com direção E-W e aproximação da região destacada. C – Ortofoto produzida da parede com direção E-W e aproximação da região destacada.

A nuvem de pontos pode ser dividida entre nuvem esparsa e nuvem densa. Primeiro é produzida a nuvem de pontos esparsa, através da técnica *Structure-from-Motion (SfM)*, que consiste na identificação de pontos homólogos entre duas ou mais imagens com sobreposição (60-80%), obtidas por um sensor em movimento. Os pontos identificados formam a nuvem de pontos esparsa, com informação sobre a coordenada relativa para

cada ponto, sendo calculado, a partir destes, a nuvem de pontos densa. A partir da nuvem de pontos densa, foi produzido o modelo de superfície 3D texturizado.

A ortofoto foi gerada a partir da superfície das paredes do modelo 3D utilizando a projeção planar. Este passo é importante uma vez que as paredes são superfícies verticais que variam em relação ao eixo de coordenadas Z, além dos eixos X e Y, enquanto a interpretação das fraturas é realizada em ambiente SIG (2D).

Foram coletadas ao todo, 79 fotografias para o talude com direção NW-SE, cobrindo o trecho entre as scanlines SL 1 a 3 (Figura 14-A) e 63 fotografias para o talude com direção E-W, cobrindo o trecho entre as scanlines SL5 a 7.

Para o talude com direção NW-SE, foram identificados no total, 46.488 pontos homólogos, sendo produzida uma nuvem de pontos densa com 17.433.077 pontos, um modelo de superfície com 3.486.615 faces e uma ortofoto com resolução de 4,46mm/pixel. Já para o talude com direção E-W, foram identificados no total, 107.882 pontos homólogos, sendo produzida uma nuvem de pontos densa com 27.719.256 pontos, um modelo de superfície com 825.839 faces e uma ortofoto com resolução de 9,82mm/pixel.

As Figuras 14-B e C mostram uma comparação qualitativa da resolução da ortofoto produzida para a parede E-W e uma fotografia da mesma parede. Nesta é possível verificar uma melhoria na resolução da imagem da ortofoto em relação à uma fotografia da mesma área de comparação.

3.4 Processamento dos Dados Estruturais Levantados em 1D e 2D

O processamento dos dados estruturais para os levantamentos em 1D e 2D seguiram fluxos de trabalho e objetivos diferentes.

Para a amostragem de fraturas em 1D, o fluxo de trabalho segue com a plotagem das estruturas identificadas em estereograma e identificação dos grupos de fraturas; aplicação da correção de Terzaghi para obtenção dos espaçamentos reais e abundância de fraturas; análise dos parâmetros geométricos de cada grupo; análise cinemática a

partir dos indicadores cinemáticos identificados; caracterização do arranjo espacial das fraturas.

Para a identificação dos grupos de fraturas em estereograma, utilizou-se o *software Dips 7.0* da empresa *Rocscience*. Este *software* foi também utilizado para a interpretação dos possíveis eventos tectônicos geradores das fraturas através da análise dos indicadores cinemáticos e das atitudes das fraturas. Para a caracterização dos parâmetros geométricos observados para cada grupo, utilizou-se gráficos de barras produzido no *software Excel*.

A correção de Terzaghi e a caracterização do arranjo espacial das fraturas, utilizando os métodos apresentados no item 2.2.1, foi realizada através de um *script*, desenvolvido em linguagem computacional Python para este trabalho. Foram utilizadas as bibliotecas Pandas, para manipulação de arquivos em tabelas, Numpy, para realização de operações matemáticas e simulação de dados, Matplotlib para plotagem em gráficos e Scipy, para regressão linear dos dados de correlação da soma e cálculo de Dc.

Este script utiliza como dados de entrada apenas a direção e mergulho da scanline, o rumo do mergulho e o mergulho de cada estrutura e a posição da estrutura na scanline. Para o cálculo da abundância de fraturas, limitou-se o ângulo formado entre o polo da estrutura e a scanline (θ) em $\theta < 70^\circ$, ou seja, para toda fratura com ângulo $\theta > 70^\circ$ é aplicado o fator de correção para $\theta = 70^\circ$.

Para a amostragem dos dados estruturais em superfície, utilizou-se o software QGIS para a identificação dos traços e terminações de fraturas aproximadamente ortogonais ao plano de amostragem das ortofotos produzidas. Para cada fratura identificada, é traçada uma polilinha até que todas as fraturas que ocorrem na parede mapeada estejam representadas por polilinhas, conforme a Figura 15. Este conjunto de elementos devem ser salvos em um arquivo *shapefile*. Em seguida, é decidido o tipo de amostragem (circular ou área) que deve ser um polígono fechado salvo como arquivo *shapefile*. O dimensionamento do círculo da amostragem por scanline circular é função da quantidade de intersecções de fraturas com o círculo, conforme discutido no item 2.1.2.

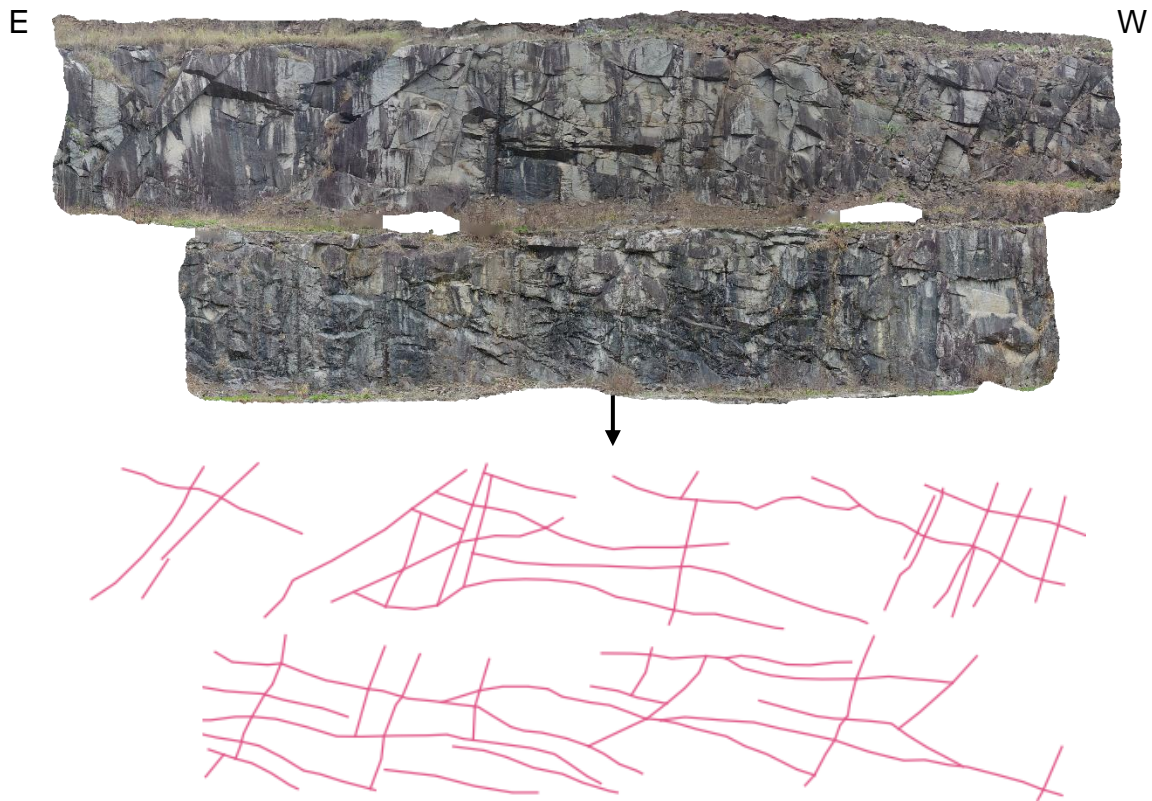


Figura 15. Exemplo de interpretação da rede de fraturas na ortofoto da parede com direção E-W.

A partir dos traços de fraturas, foi realizada a análise da topologia da rede de fraturas e a quantificação de parâmetros geométricos utilizando o *plugin* para QGIS, *NetworkGT* (Nyberg *et al.* 2018). Neste, utiliza-se como dados de entrada, a rede de fraturas identificadas, um polígono de amostragem e outro de contorno de toda a área da ortofoto. Dentre os principais parâmetros calculados por este *plugin*, destacam-se: a quantidade de cada tipo de nó e segmento da rede de fraturas; a quantidade de linhas e segmentos; o comprimento médio de linhas e segmentos; o número de conexões por segmento; e os parâmetros P_{20} , P_{21} e B_{22} .

3.5 Ensaio Hidráulico com Obturador Duplo: Ensaio de Lugeon

O ensaio de Lugeon é um dos testes para caracterização da permeabilidade de maciços rochosos mais empregados na indústria, sendo comum em projetos de barragens, e mais

recentemente para túneis. É importante para o dimensionamento de injeções de calda de cimento para colmatação de fraturas condutivas com o objetivo de melhorar as condições geomecânicas do maciço e reduzir sua permeabilidade.

O ensaio de Lugeon é definido como um teste de permeabilidade in situ, executado em intervalos isolados por obturadores e pressão constante à cada estágio (Vaskou et al., 2019).

É importante ressaltar que os resultados do ensaio de Lugeon fornecem uma medida da capacidade de absorção de água e estimativa do valor de permeabilidade/conductividade hidráulica para um meio equivalente isotrópico (Vaskou et al., 2019), possibilitando a identificação do comportamento hidráulico sob aumento e redução da pressão.

O teste consiste na injeção de água dentro do intervalo confinado pelos obturadores no poço, através de um tubo de injeção perfurado e com pressão constante, sendo registrados os valores de vazão a cada minuto durante 10 minutos ou até atingir a condição de equilíbrio estacionário. Este procedimento é repetido em outros 4 estágios (Houlsby (1976) e Quiñones-Rozo (2010)) ou em outros 9 estágios (Vaskou et al., 2019) aumentando a pressão à cada estágio e posteriormente reduzindo-a, conforme mostra a Tabela 3, onde $P_3 > P_2 > P_1$.

O medidor de vazão fica instalado na superfície, assim como um manômetro, o reservatório de água, a bomba de injeção, e os cilindros de nitrogênio ou oxigênio utilizados para inflar os obturadores. Dentro do poço são posicionados os obturadores no trecho de interesse, enquanto um transdutor para medição da pressão é instalado tanto no centro do trecho obturado, como fora dele, sendo utilizado para o acompanhamento de possíveis vazamentos entre os obturados ou curto-circuito através de fraturas conectadas no maciço (Figura 16).

Tabela 3. Mostra os estágios de ensaios em um mesmo intervalo, onde $P1 < P2 < P3$ (Houlsby, 1976), Quiñones-Rozo, 2010)).

Estágio	Pressão	Vazão Média
E1	P1	Q1
E2	P2	Q2
E3	P3	Q3
E4	P2	Q4
E5	P1	Q5

Outra forma de se medir a pressão, caso não haja transdutores de pressão, é através do manômetro instalado na superfície. Neste caso, deve-se considerar o nível do lençol freático, profundidade do intervalo testado, possíveis perdas de cargas através do atrito com as tubulações e altura da bomba de injeção em relação ao solo, devendo-se aplicar as equações abaixo, para cada caso:

$$P_{ef} = P + H + L/2 - FL \quad \text{Para ensaios realizados acima do nível de água;}$$

$$P_{ef} = P + H_1 + H_2 - FL \quad \text{Para ensaios realizados abaixo do nível de água;}$$

onde P_{ef} é expresso em MPa, P é a pressão lida no manômetro, H o comprimento entre a saída da bomba de injeção e o topo do conjunto de obturadores, H_1 a altura da saída da bomba de injeção, H_2 a profundidade do nível de água, L o comprimento do intervalo de teste e FL a perda de carga devido ao atrito com a tubulação (Figura 16).

O nível de água deve ser medido antes do início dos testes, tanto para o cálculo da pressão efetiva do teste, como para a detecção de possíveis vazamentos durante o ensaio. Informações referentes ao diâmetro da tubulação utilizada para o ensaio, o intervalo ensaiado, o diâmetro e inclinação do furo, altura do manômetro, estágio de carga do ensaio e sua vazão média também são necessários.

A definição dos valores de pressão de cada estágio depende de fatores técnicos, práticos e empíricos, incluindo a densidade da rocha, a profundidade do intervalo ensaiado e a prática empírica para uma determinada região (Vaskou et al., 2019).

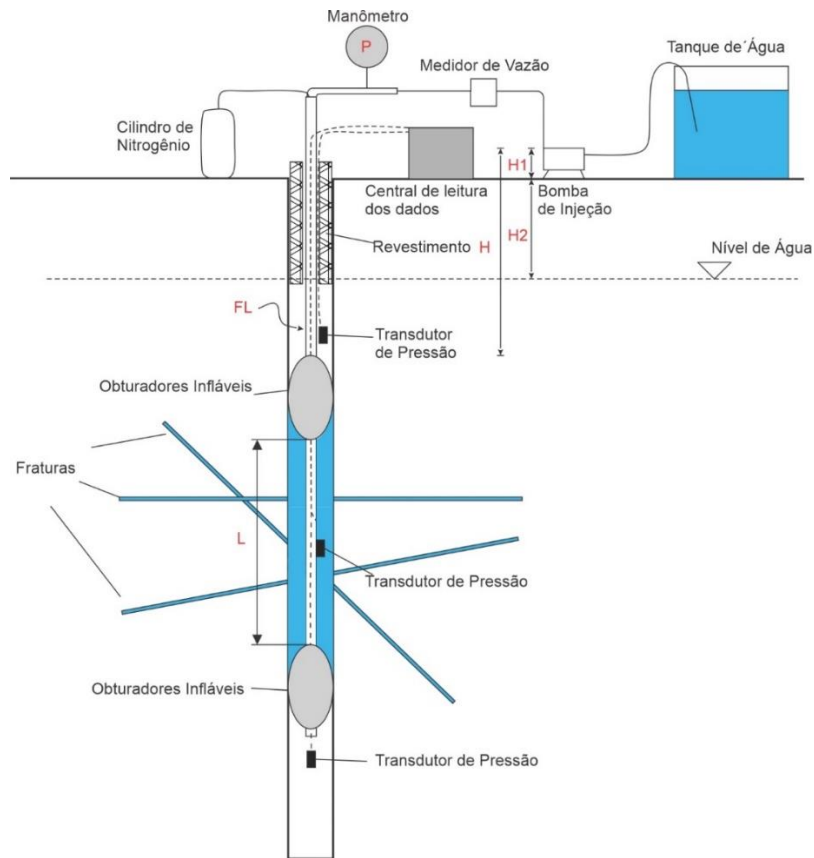


Figura 16. Desenho esquemático da composição de equipamentos para a execução do ensaio de Lugeon. A siglas em vermelho representam parâmetros necessários para o cálculo da pressão efetiva P_{ef} . Modificado de Vaskou et al. (2019).

Quiñones-Rozo (2010) recomenda que a pressão máxima não exceda a pressão confinante da rocha (σ_3), evitando o seu fraturamento hidráulico, e que a pressão aumente com o aumento de H a cada teste, podendo ser calculado através da fórmula:

$$P_{M\acute{a}x} = H * 2306,6 \text{ Kgf / m} \quad \text{Eq. (13)}$$

A partir da definição da pressão máxima, é definida a pressão intermediária (P_2) como 75% da pressão máxima. Já a pressão mínima efetiva é calculada como 50% da pressão máxima (Quiñones-Rozo, 2010) ou 10% a 40% $P_{M\acute{a}x}$ (Vaskou et al., 2019).

Os dados disponíveis de ensaios hidráulicos neste trabalho foram adquiridos com leitura da pressão com manômetros na superfície. Já a pressão mínima foi fixada em 0,1 Kgf/cm² para todos os ensaios.

3.6 Processamento dos Dados de Ensaios Hidráulicos

Neste capítulo são descritas as etapas utilizadas para interpretação dos ensaios hidráulicos realizados nos 5 furos de sondagem próximos à pedreira (Tabela 2). Foram utilizados no total 56 ensaios tipo Lugeon, executados durante os estudos do projeto executivo da linha 6 do metrô, sem o envolvimento por parte do autor.

Com base nos resultados dos ensaios de Lugeon, expressos em valores de vazão e pressão observados em cada estágio e para cada intervalo ensaiado, é calculado o valor de Lugeon para cada estágio, sendo 1 lugeon equivalente à perda de 1 litro de água por minuto por metro de intervalo ensaiado, a uma pressão de injeção de 1MPa (Vaskou et al. 2019):

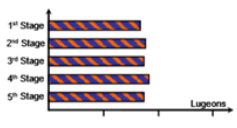
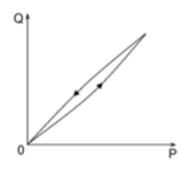
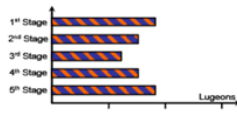
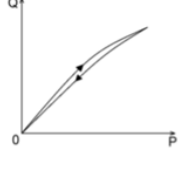
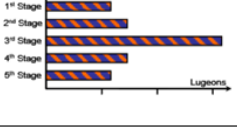
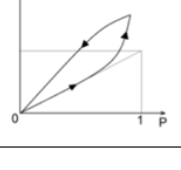
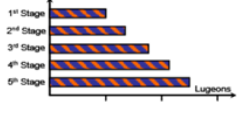
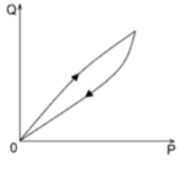
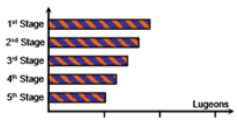
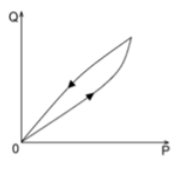
$$LU = \frac{Q}{L}, \text{ já para pressões diferentes de 1MPa, } LU = \frac{Q}{L} \times \frac{1 \text{ MPa}}{P_{ef}} \quad \text{Eq. (14)}$$

Onde Q é a vazão registrada no estágio, L o comprimento do intervalo, e P_{ef} a pressão efetiva calculada ou observada com transdutores de pressão dentro do intervalo.

Com base nos valores de lugeon calculados e nos dados de vazão e pressão observados em cada estágio, foi realizada a interpretação dos ensaios obtidos, através dos gráficos apresentados na Tabela 4. Esta interpretação fornece informações sobre o comportamento hidráulico do maciço durante o ensaio e orientação para escolha do valor de lugeon representativo, dentre todos calculados para cada estágio.

De forma geral, há cinco tipos de comportamento de fluxo observados nos ensaios, sendo: laminar, turbulento, dilatação, lavagem e preenchimento (Tabela 4).

Tabela 4. Interpretação gráfica dos resultados em relação aos valores de Lugeon e Vazão vs. Pef. Modificado de Houlby (1976), Quiñones-Rozo (2010) e Vaskou et al. (2019).

	Lugeon	Q vs. P _{ef}	Descrição	Interpretação
Laminar			Gráfico linear. A absorção de água pelo maciço é aproximadamente igual em todos os estágios. Valores de lugeon permanecem aproximadamente iguais em todos os estágios.	Tanto lugeon como K podem ser estimados pela média dos valores dos estágios.
Turbulento			A vazão decresce em função do aumento da pressão. Na pressão máxima é registrado o menor valor de lugeon	Valor de lugeon em alta pressão apresenta fluxo turbulento. Estimativa de K deve ser realizada com valores de estágios intermediários ou iniciais.
Dilatação			A vazão máxima é atingida no estágio de pressão máxima devido à abertura da fratura ao atingir pressões superiores à tensão normal da fratura.	Utilizar valores referentes aos estágios inicial e intermediário da fase de aumento da pressão para valor de lugeon e estimativa de K
Lavagem			Aumento da vazão com aumento não linear da pressão. Valores de lugeon crescentes independente da pressão. Preenchimentos das fraturas são lavados.	Os valores observados no estágio inicial devem ser utilizado para estimar K. Já para colmatção de fraturas, utilizar o último estágio.
Preenchimento			Vazão diminui junto com os valores de lugeon independente da pressão. Fraturas pouco persistentes ou rede de fraturas não conectadas ao aquífero são progressivamente preenchidas por água.	Os valores observados no estágio inicial deve ser utilizado para estimar K. Já para colmatção de fraturas, utilizar o último estágio.

Com exceção do regime de fluxo laminar, todos os outros tipos de comportamentos são considerados não lineares, seja pela relação vazão/pressão efetiva do ensaio favorecer o fluxo turbulento (Quinn et al., 2011), ou devido às condições impostas pelo meio como no caso da dilatação, lavagem e preenchimento.

Para estimar o valor de condutividade hidráulica, utilizam-se os valores de vazão e pressão de estágios iniciais a intermediários (Vaskou et al., 2019), de acordo com o tipo de comportamento apresentado durante o ensaio, aplicando a equação de Dupuit que relaciona a vazão Q e pressão ($H = \frac{P_{ef}}{g\rho}$), observadas para cada estágio, com o comprimento do intervalo de teste L , a área de influência do teste R_o e o raio do furo R , para o cálculo da condutividade hidráulica (K) do intervalo:

$$K = \frac{Q \ln\left(\frac{R_o}{R}\right)}{2\pi LH}, \text{ para } \frac{L}{R} > 10. \quad \text{Eq. (15)}$$

O raio da área de influência (R_o) dos ensaios de Lugeon pode ser bem restrito, variando entre o comprimento do intervalo do teste (L) a 10 metros (Vaskou et al., 2019).

Vaskou et al. (2019) recomenda, para o cálculo da condutividade hidráulica, a utilização da equação de Babouchkine (1965), a qual relaciona a vazão Q e pressão H , com o comprimento do teste L e o raio do furo R , possuindo a vantagem de não depender do raio de influência do teste:

$$K = \frac{Q \ln\left(\frac{0.66L}{R}\right)}{2\pi LH} \quad \text{Eq. (16)}$$

Foram utilizadas ambas as equações para estimar os valores de condutividade hidráulica dos ensaios, apresentando um desvio de 10-11% entre os resultados. Posto isto, optou-se neste trabalho, pela utilização da equação de Babouchkine para fins de correlação com estruturas geológicas.

Já para o cálculo da transmissividade e abertura hidráulica, foram utilizadas as equações (11) e (12), respectivamente.

4. CONTEXTO GEOLÓGICO

A seguir será descrita a geologia regional, com ênfase na evolução estrutural, em que está inserida a área de estudo; após isso é descrita a geologia local da área de estudo, com ênfase ao granito Cantareira.

4.1 Geologia Regional

A área de estudo está inserida na Região Metropolitana de São Paulo – RMSP, a qual contém três principais compartimentos geológicos: (1) embasamento pré-cambriano, (2) sedimentos paleógenos da bacia de São Paulo e (3) coberturas sedimentares do Quaternário (Figura 17-A).

O embasamento pré-cambriano da RMSP faz parte da Província Mantiqueira (Almeida et al., 1977) a qual engloba os cinturões orogênicos Araçuaí, Ribeira, Brasília Meridional, Dom Feliciano e São Miguel (Heilbron et al., 2004) formados durante o ciclo Brasileiro de idade neoproterozóica (Hasui, 2010). Este período foi marcado por intensa atividade tectônica responsável pela formação de importantes estruturas da região, tais como zonas de cisalhamento dúctil-rúptil.

O Sistema de Falhamento de Cubatão ou Megafalha de Cubatão (Sadowski, 1991), importante representante da deformação dúctil-rúptil, apresenta mais de 2000 km de extensão e direção principal NE-SW com predominância de falhas transcorrentes. A Megafalha de Cubatão é dividida em três segmentos: Segmento Lancinha, Segmento Além-Paraíba e Segmento Cubatão.

A falha de Taxaquara, que passa pela porção sul da área de interesse, pertence ao segmento Cubatão e apresenta direção ENE-WSW a E-W. Foi inicialmente descrita por Hennies et al. (1967) como falha transcorrente composta por milonitos com espessura de aproximadamente 1 km. Ribeiro et al. (2019) classificam-na como falha de regime transcorrente dextral e transpressivo.

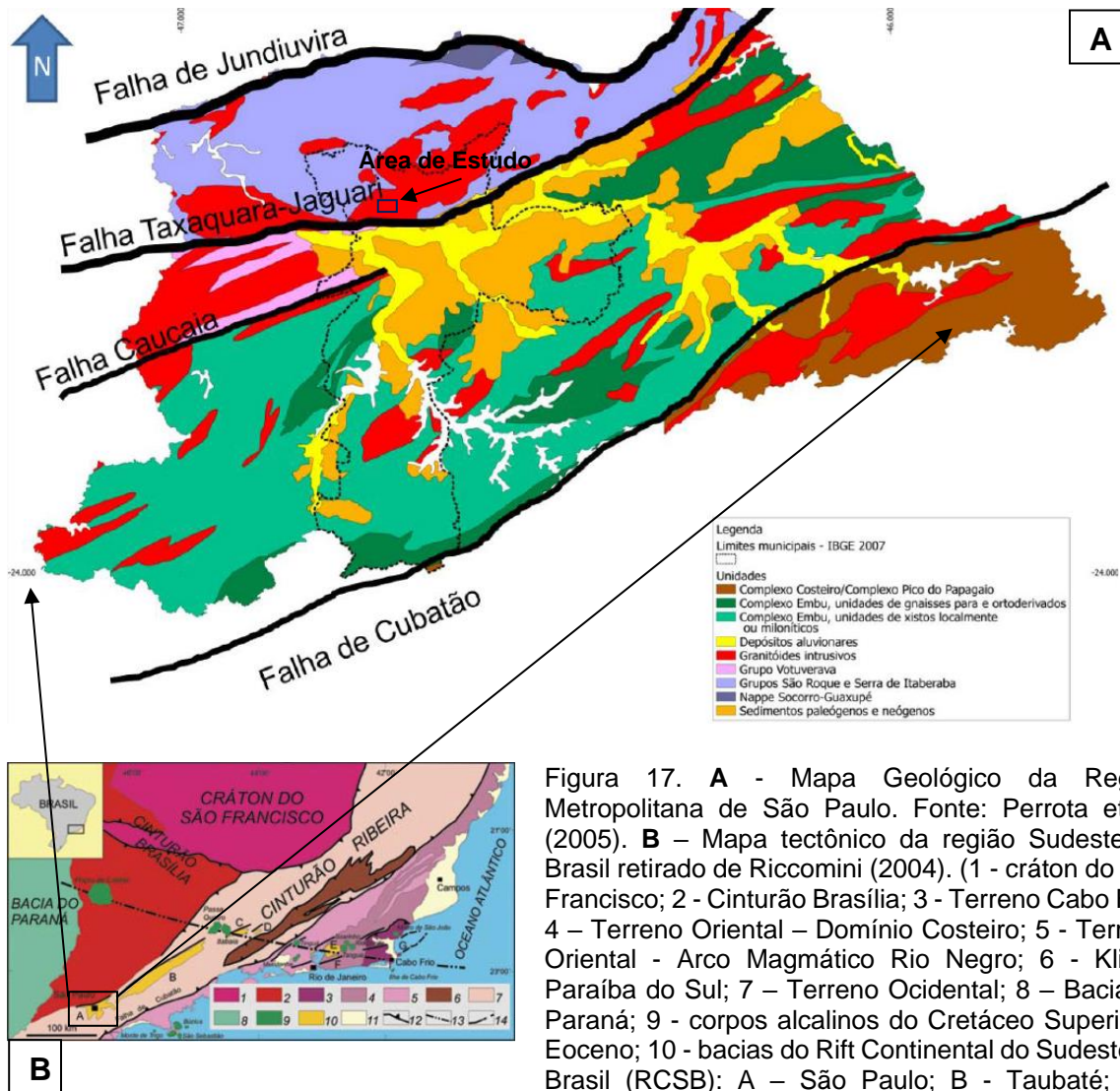


Figura 17. **A** - Mapa Geológico da Região Metropolitana de São Paulo. Fonte: Perrota et al. (2005). **B** – Mapa tectônico da região Sudeste do Brasil retirado de Riccomini (2004). (1 - cráton do São Francisco; 2 - Cinturão Brasília; 3 - Terreno Cabo Frio; 4 – Terreno Oriental – Domínio Costeiro; 5 - Terreno Oriental - Arco Magmático Rio Negro; 6 - Klippe Paraíba do Sul; 7 – Terreno Ocidental; 8 – Bacia do Paraná; 9 - corpos alcalinos do Cretáceo Superior a Eoceno; 10 - bacias do Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB): A – São Paulo; B - Taubaté; C - Resende; D - Volta Redonda; E - Macacu; F - Itaboraí; G – Barra de São João; 11 - sedimentos cenozóicos indiferenciados; 12 - falhas reversas, nappes; 13 - Alinhamento Magmático de Cabo Frio; 14 - limites de grábens do RCSB).

A falha de Taxaquara separa os domínios do grupo São Roque, onde se situa a área de estudo, e do Complexo Embu (Figura 17-A), ambos constituídos por sequências metassedimentares, intrusivo de corpos graníticos sin-tardi e pós-tectônicos. A falha formou-se durante a era neoproterozóica, sendo reativada por sucessivas deformações intraplaca (Riccomini et al., 2004; Peyrerl et al., 2018).

A reativação tectônica de falhas pré-cambrianas durante o paleógeno, culminou na formação das bacias tafrogênicas, inicialmente nomeadas como Sistema de Rifts da Serra do Mar (Almeida, 1976). Riccomini (1989), utilizou, posteriormente, o termo Rift Continental do Sudeste do Brasil – RCSB para tais bacias, utilizando o termo Rift no sentido geomorfológico (Riccomini et al., 2004).

O RCSB ocorre como uma depressão alongada com pouco mais de 900 Km de comprimento, sendo delimitada a norte por falhas normais, em parte reativando estruturas pré-cambrianas. É subdividido em três segmentos principais: Ocidental, Central e Oriental; as bacias sedimentares de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda estão instaladas no Segmento Central (Riccomini et al., 2000a).

A julgar pelo seu formato e distribuição de fácies sedimentares, pode-se considerar que a bacia de São Paulo era originalmente um hemi-gráben controlado por falhas normais, que se superpuseram a zonas de cisalhamento, tais como Taxaquara e Jaguari (Riccomini, 2004). Durante o Neógeno e Quaternário ocorreram os seguintes eventos tectônicos: regime transcorrente sinistral (contração NE-SW) e dextral (contração NW-SE) durante o Neógeno; extensão ENE-WNW, durante o Pleistoceno; e, por fim, contração com direção E-W no Holoceno (Riccomini, 2004).

Já em trabalho de compilação de dados de tensões atuais, a partir de dados *in situ* e de mecanismo focal de sismos, Assumpção et al. (2016) indica eixo de contração orientado a N68E, de regime transcorrente, na área do segmento central do RCSB

A área de estudo localiza-se no maciço Cantareira (Figura 17), posicionado imediatamente a norte da bacia de São Paulo, contém rochas classificadas como granodioritos a monzogranitos considerados sin a tardi-tectônicos (Dantas, 1990), com idades em torno de 650Ma (Tassinari et al., 1987 *apud* Dantas, 1990).

4.2 Geologia Local

A rocha que compõe o maciço no local estudado é um granito, que varia de monzogranito a granodiorito, e contém minerais acessórios como titanita, apatita, alanita, turmalina,

zircão, titano-magnetita, ilmenita e sulfetos Dantas (1990). Apresenta estrutura maciça, textura porfirítica com fenocristais de feldspato. A matriz fanerítica pode mostrar orientação de biotita, e granulometria média a grossa. Apresenta coloração cinza clara sendo leucocrática.

O granito, tanto na pedreira Morro Grande como nas sondagens, é cortado por grande quantidade de veios e contém enclaves máficos.

Em geral, os veios são de pegmatitos, compostos por feldspato, quartzo e biotita, de aplitos quartzo-feldspáticos e de quartzo, apresentam coloração cinza-branca e rosa, e espessura de 1 a 3 cm, podendo chegar à 30 cm em alguns casos. Apresentam orientação muito variada, sendo por ordem de maior frequência, E-W, NE-SW, NW-SE e N-S.

Os enclaves máficos apresentam forma arredondada a alongada, textura inequigranular fina e estrutura maciça, composição mineralógica dada por feldspato, quartzo e biotita, correspondendo à quartzo-diorito, tonalito, granodiorito e quartzo-monzonito (Dantas, 1990).

5. RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados do levantamento estrutural realizado, além da análise do arranjo espacial das fraturas e de seus parâmetros hidráulicos.

5.1 Caracterização dos Grupos de Fraturas

Os dados levantados na pedreira Morro Grande, através das scanlines em afloramentos rochosos (Figura 19), e o seu tratamento permitiram identificar 9 grupos de fraturas, nomeados de G1 a G9, com as seguintes direções médias e atitudes com notação do tipo Clar (rumo do mergulho/mergulho): G1-N40W = 050/30, G2-N75E = 165/60, G3-N70E = 160 ou 345/80, G4-N50W = 040/65, G5-N70W = 200/70, G6-N = 090/60, G7-N10E = 280/70, G8-N30E = 120/40 e G9-N15E = 295/25 (Figura 18-A).

Os grupos de fraturas levantados através das perfilagens óticas dos furos de sondagem (Figura 18-B) tem um bom ajuste com aqueles medidos na pedreira. No entanto, cabe ressaltar que, os dados das perfilagens, mostram fraturas com direção NE-SW distribuídas de forma mais difusa no estereograma, principalmente, por possuírem mergulhos variáveis, com predomínio dos baixos a médios. Apesar de não ter sido possível caracterizar seus parâmetros geométricos e topológicos, nem a sua distribuição espacial, pois não foram observadas nas scanlines realizadas na pedreira, como os outros 9 grupos, é importante considerar, ainda que de forma qualitativa, a sua existência no modelo conceitual.

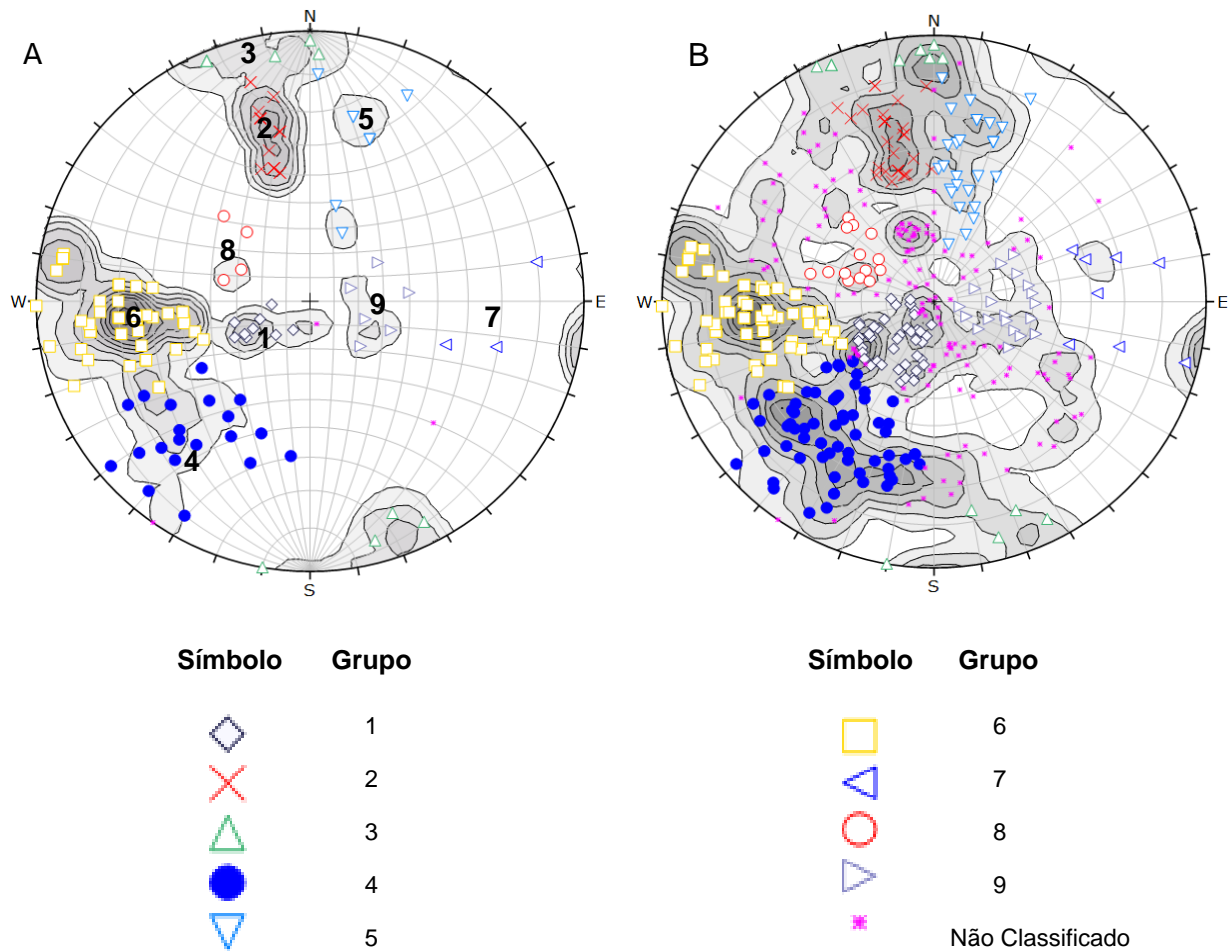


Figura 18. Estereogramas (Hemisfério Inferior) com os dados estruturais levantados. Para ambos, as curvas de densidade, que variam de cinza claro (menor densidade) a cinza escuro (maior densidade), representam a densidade de estruturas levantadas e corrigidas, conforme Terzaghi (1965). A – Dados estruturais levantados através de scanlines nos taludes da pedra. B – Dados estruturais levantados através de scanlines em taludes da pedra e dados de perfilagem ótica das paredes de sondagens.

A Tabela 5 e a Figura 20, sintetizam os dados estruturais levantados para cada grupo de fraturas, como tipo de estrutura, espaçamento real, forma, comprimento, rugosidade, alteração e tipo de revestimento.

A presença ou a ausência de indicadores cinemáticos que indiquem cisalhamento do plano da fratura foi utilizado como critério para classificação das estruturas mapeadas como falhas ou juntas, respectivamente. Desta forma, os grupos 2, 3, 8 e 9 são classificados como juntas, enquanto os grupos 1, 4, 5, 6 e 7 são classificados como

falhas, já que mais de 60% das fraturas destes últimos grupos apresentam indicadores cinemáticos de cisalhamento (Figura 18-C).

Os espaçamentos das fraturas são variáveis e, de forma geral, apresentam distribuição estatística dos espaçamentos com assimetria positiva (ANEXO I). Em média, as fraturas apresentam espaçamentos superiores à 1,9 metros. Quando comparados os grupos em relação à mediana dos espaçamentos, que representa melhor a distribuição dos dados devido à sua assimetria, observa-se uma variação mais expressiva entre estes, sendo o grupo G1 e G7 os que apresentam menor e maior mediana dos espaçamentos (0,05m e 8,8m, respectivamente), os grupos G2, G4 e G5 apresentam mediana dos espaçamentos inferior a 1 metro e os grupos G3, G6, G8 e G9, apresentam mediana dos espaçamentos entre 1,9 e 3,1 metros.

Tabela 5. Síntese das informações levantadas para cada grupo de fraturas. Fa – Falha, Jt – Junta, Ds – Descolorida, Ox – Oxidada, Fv – Filme verde, Fe – Filme escuro.

Família	Direção	R.Merg.	Merg.	Tipo	Descrição					
					Espaçamento (m)	Forma	Comprimento (m)	Preen./Revest.	Rugosidade (JRC)	Alteração
1	NNW-SSE	30-85	14-48	Fa	0.01 a 21.56	Ondulada/Plana	>20	Brecha	2 a 3	Ds/Sã
2	ENE-WSW	160-170	52-75	Jt	0.20 a 14.43	Plana/Ondulada	1.5 a 20	Sem/Ox/Fv	2 a 8	Sã/Ds
3	ENE-WSW	157-345	65-88	Jt	0.07 a 6.76	Plana/Ondulada	1.5 a 10	Sem/Fv	2 a 8	Sã/Ds
4	NW-SE	60-7	48-85	Fa/Jt	0.01 a 16.11	Plana/Ondulada	1 a 39	Fv/Sem	2 a 8	Sã/Ds
5	WNW-ESE	10-205	65-90	Fa/Jt	0,01 a 17.01	Plana/Ondulada	2 a 15	Sem/Ox/Fv	2 a 3/6 a 8	Ds/Sã
6	N-S	60-101	45-86	Fa/Jt	0.01 a 14.22	Plana/Ondulada	1 a 15	Fv/Sem/Fe/Fc/Ox	2 a 8	Sã/Ds
7	N-S	80-288	55-90	Fa	2.56 a 12.02	Plana	1 a 10	Fv/Sem	2 a 3	Sã
8	NE-SW	104-138	31-48	Jt	1.33 a 19.93	Plana	1.5 a 3.0	Sem/Fv	2 a 3/ 6 a 8	Sã
9	N-S	195-344	10 a 40	Jt	0.04 a 22.29	Ondulada/Plana	2 a 10	Fv	4 a 8	Sã

O G7 e G8 apresentam forma plana, enquanto os grupos G1, G2, G3, G4, G5, G6 e G9 podem apresentar tanto forma ondulada como plana (Tabela 5), no entanto, apenas os grupos G1 e G9 apresentam predominância de forma ondulada, ocorrendo em 78% e 80% das amostras, respectivamente, enquanto os grupos G2, G3, G4, G5 e G6 apresentam predominância da forma plana, ocorrendo em 95%, 90%, 67%, 57% e 87% das amostras, respectivamente (Figura 20).

O comprimento das fraturas apresenta dimensão variada, ocorrendo com comprimentos desde 1 a 3 metros até mais de 20 metros, exceto o grupo G8, que apresenta comprimento máximo de 3 metros (Tabela 5).

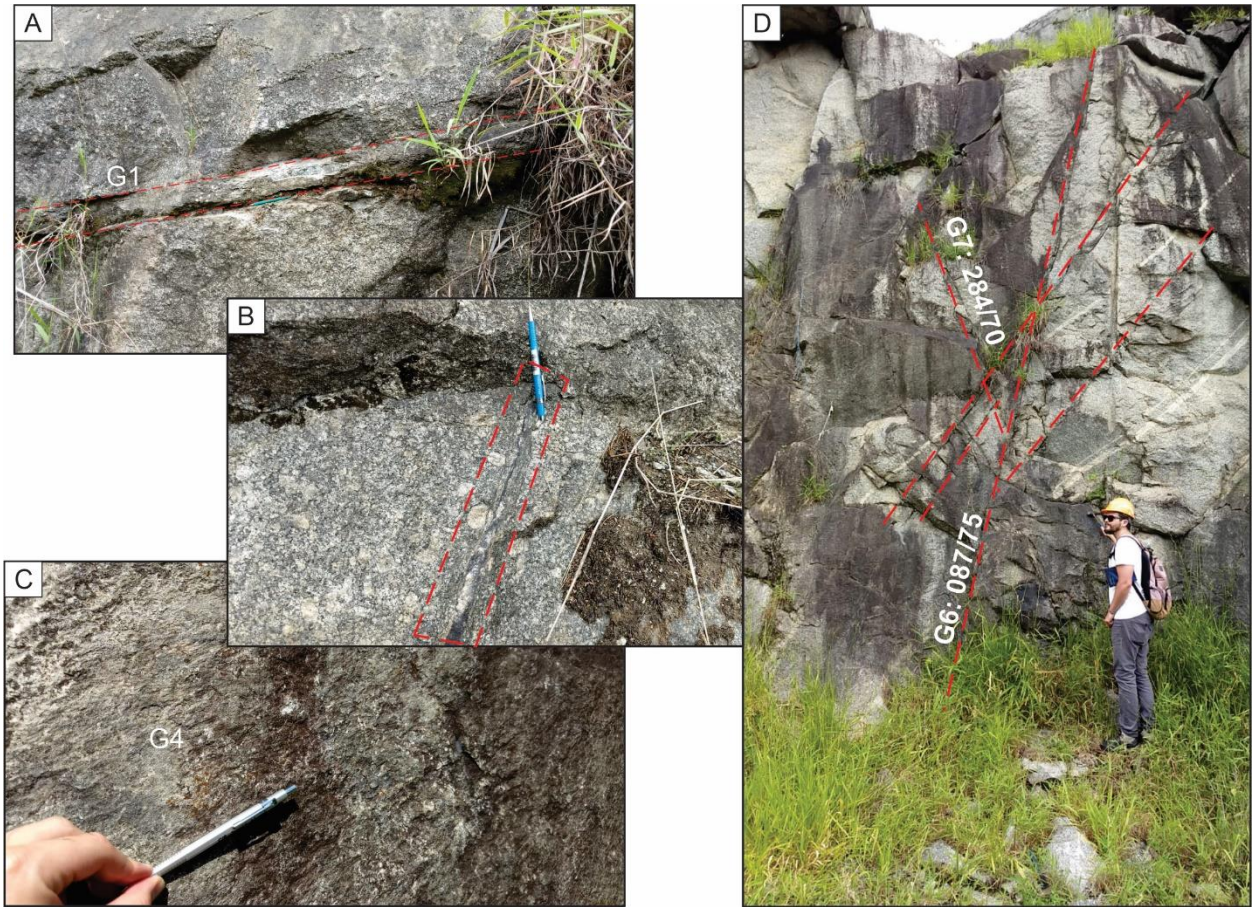


Figura 19. Fotografias de alguns dos grupos de fraturas da Pedreira Morro Grande. A – Grupo 1 com destaque para ocorrência de cluster de fraturas. B – Preenchimento escuro e duro no grupo G6. C – Estrias com formação de degrau, mostrando movimento sinistral no plano de falha do grupo G4. D – Conjugado de fraturas formado entre os grupos G6 e G7.

Para além dos grupos G1 e G9, que não apresentam preenchimento das fraturas, todos os outros grupos apresentam algum tipo de preenchimento em alguma proporção, ocorrendo filme verde ou esverdeado nos grupos G2, G3, G4, G5, G6, G7 e G8 em 9%, 46%, 55%, 12,5%, 51%, 66% e 25% das amostras, respectivamente, oxidação nos grupos G2, G5 e G6, representando 4%, 25% e 5%, respectivamente, filme branco e escuro no grupo G6 em 23% das amostras (Figura 20).

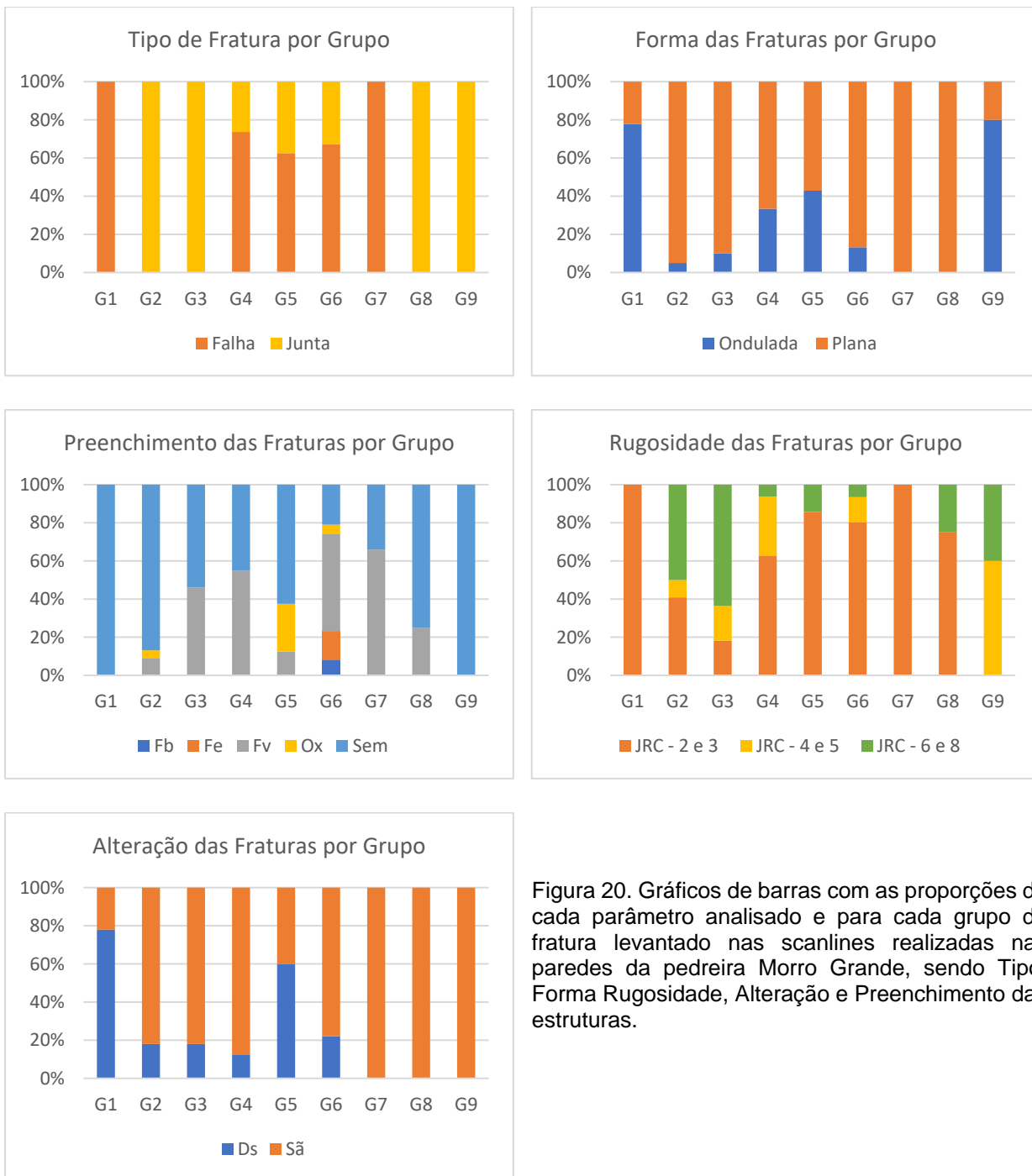


Figura 20. Gráficos de barras com as proporções de cada parâmetro analisado e para cada grupo de fratura levantado nas scanlines realizadas nas paredes da pedreira Morro Grande, sendo Tipo, Forma Rugosidade, Alteração e Preenchimento das estruturas.

Tais preenchimentos ocorrem como filme ou película com espessura, na maioria dos casos, <1mm, podendo ou não, selar por completo a fratura. A Figura 19-D apresenta, ocorrência de preenchimento escuro e duro encontrado em cerca de 10% das fraturas do grupo G6 amostrados, sendo um exemplo de selo completo da fratura.

De forma geral, as fraturas apresentam JRC entre 2 e 8 (Tabela 5), variando entre lisa a rugosa. Em ordem dos grupos de fraturas menos para o mais rugoso tem-se: G1 e G7, G5, G6, G8, G4, G3, G2 e G9, onde apenas os três últimos apresentam JRC > 2 em mais de 50% das amostras (Figura 20).

A alteração intempérica dos planos das fraturas foi observada na forma de descoloração da cor natural da rocha em um número reduzido de fraturas (Figura 20). Apenas os grupos de fraturas G1 e G5 apresentaram mais que 50% das fraturas com alteração (78% e 60%, respectivamente), enquanto os grupos G2, G3, G4 e G6 apresentaram alteração em apenas 18%, 18%, 13% e 22%, respectivamente, e os grupos G7, G8 e G9 não apresentaram alteração intempérica.

Além da utilização para classificação das estruturas como falhas ou juntas, os indicadores cinemáticos também foram utilizados para avaliação de possíveis eventos deformacionais que deram origem a um ou mais grupos de fraturas, de acordo com o modelo Andersoniano.

O estereograma da Figura 21 mostra as fraturas nas quais foram medidas estrias; na sua maioria também foram identificados indicadores de sentido de movimento, sendo que pequenos degraus transversais às estrias são os mais comuns (Petit, 1987; Angelier, 1994). A análise conjunta dos estereogramas das Figuras 18 e 21 levou a identificação de cinco eventos geradores de fraturas (três eventos de regime extensional e dois de regime compressivo) bem como de eventos (não se sabe quantos), provavelmente transcorrentes, que reativaram tais fraturas. Os eventos são descritos a seguir:

1. O grupo G1, constituído de falhas de direção média N40W deve ter sido gerado em evento de regime tectônico compressivo, com esforço horizontal máximo σ_1 de direção NE, pois os seus mergulhos são baixos ($\sim 30^\circ$) e as estrias orientam-se aproximadamente no rumo do mergulho dessas fraturas. Apesar de não terem sido observados indicadores de sentido do movimento associados às estrias, todas as outras características são compatíveis com um regime tectônico compressivo.
2. Os grupos G4 e G5 apresentam direção similar (média de N50W e N70W, respectivamente) e mergulhos médios em torno de 60° para NE e SW, respectivamente,

ou seja, em sentidos opostos. Estas atitudes sugerem que tenham sido formados em um mesmo evento extensional, com esforço principal mínimo σ_3 de direção NE. No entanto, ambos possuem estrias de mergulho baixo a oblíquo, indicando que foram reativados possivelmente por um ou mais eventos transcorrentes.

3. Os grupos G6 e G7 apresentam direção similar ao redor de NS e mergulhos ao redor de 70° em sentidos opostos, sugerindo que ambos tenham sido formados em evento de regime extensional com σ_3 de direção EW. Existe evidência de reativação de fraturas do grupo G6, pois estas podem apresentar estrias sub-horizontais com indicação de movimentação dextral, sugerindo evento de reativação com σ_1 de direção NE;

4. Os grupos G8 e G9 apresentam direção média semelhante (N30E e N15E, respectivamente) e mergulhos baixos em sentidos opostos (40° para SE e 25° para NW), sugerindo que possam ter se formado em evento compressivo com σ_1 de direção WNW.

5. Por fim, o mergulho médio e a pequena variação da direção das fraturas do grupo G2, sugerem que tenham sido geradas em um evento extensional com σ_3 de direção NS a NNW. As fraturas do grupo G3, devido a serem subparalelas a G2, mas possuírem mergulhos subverticais podem ser fraturas extensionais geradas no mesmo evento que G2. Este evento tectônico é possivelmente correlacionável à tectônica extensional que gerou a Bacia São Paulo, pois as falhas que delimitam a porção norte da Bacia são de mesma direção e estão muito próximas da área de estudo.

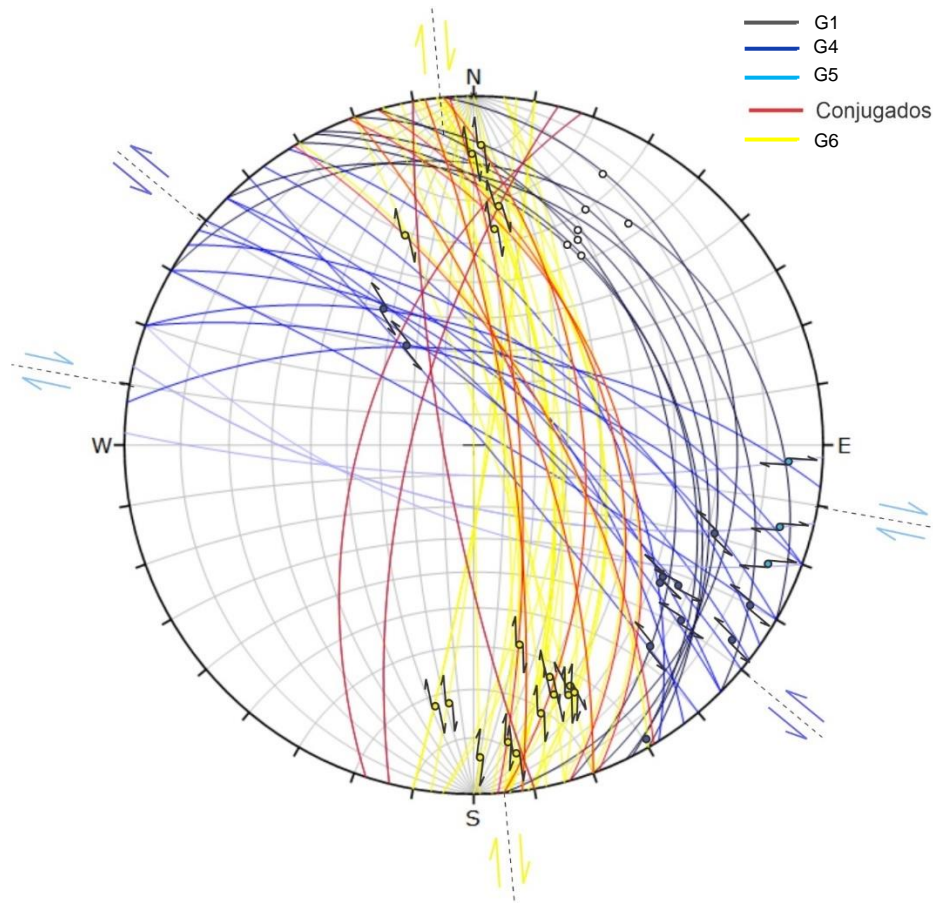


Figura 21. Estereograma (Hemisfério Inferior) com planos de estruturas que apresentam indicadores cinemáticos e sua indicação de movimento.

O padrão de estruturas da área de estudo, com fraturas geradas em eventos extensionais e compressivos, distingue-se do padrão regional, pois de um modo geral são comuns e abundantes fraturas caracterizadas por mergulhos subverticais e estrias sub-horizontais e, portanto, geradas em eventos transcorrentes. Fiume (2013) e Christoffolletti (2020) fizeram levantamento de fraturas em pedreiras de granitos e identificaram padrões, cada um em uma pedreira de granito, também muito distintos do regional. Aparentemente esta é uma situação que pode ser esperada em granitos, possivelmente causada pela sua história de colocação e resfriamento, como já discutido por Fernandes et al. (no prelo, livro do GWProject).

5.2 Distribuição Espacial das Fraturas

Neste item são apresentados os resultados da análise da distribuição espacial ou arranjo das fraturas para cada grupo, utilizando a metodologia proposta por Sanderson & Peacock (2019) e descrita no item 2.2. A análise é realizada através de gráficos de agulhas, valor do coeficiente de variação dos espaçamentos reais (C_v), dos valores de V e V^* de Kuiper e da dimensão fractal ou dimensão de correlação (D_c) da distribuição. Os limites de valores para cada um destes parâmetros são apresentados na Figura 7 e um resumo sobre cada parâmetro na Tabela 6.

Tabela 6. Resumo dos parâmetros utilizados para a análise do tipo de distribuição espacial dos grupos de fraturas observados.

Método	Resumo
<i>Gráfico de Agulhas</i>	* Permite avaliar, de forma qualitativa, a distribuição de fraturas e a formação de clusters; * É recomendado para fraturas aproximadamente ortogonais à direção da scanline ou com posição das fraturas corrigida, em caso de scanlines com direção oblíqua à fratura
C_v	* O coeficiente de variação é a razão entre o desvio padrão e a média dos espaçamentos reais * Para $C_v \ll 1$, a distribuição é considerada uniforme ou anti-clusterizada * Para $C_v \sim 1$, a distribuição é considerada aleatória * Para $C_v > 1$, a distribuição é considerada mais clusterizada que o esperado para uma distribuição aleatória
V	* Permite quantificar o grau de heterogeneidade da distribuição de fraturas ao longo da scanline através de gráfico de frequência acumulada, com os eixo x e y normalizados para 100% * O valor V é definido como a soma em módulo das distâncias máxima e mínima de desvio dos dados em relação ao esperado para uma distribuição homogênea de fraturas * O parâmetro V pode variar entre 0 e 1 sendo, para $V = 0$, a distribuição é homogênea (uniformemente distribuída) e para $V = 1$, a distribuição é extremamente heterogênea
V^*	* Teste de hipótese em função de V e o número de amostras (N) * Permite analisar com grau de confiança estatística acima de 95% ($V^* > 1.75$), se uma dada distribuição apresenta desvio significativo da homogeneidade
D_c	* Permite calcular a dimensão fractal de uma distribuição de fraturas e diferenciar a ocorrência de clusters com distribuição fractal da ocorrência de corredores simples * Valores de $D_c < 1$, a distribuição de fraturas é considerada fractal, com ocorrência de clusters de fraturas * Valores de $D_c \sim 1$, a distribuição de fraturas é aleatória ou uniforme ou com ocorrência de corredores simples

Foi selecionado para análise da distribuição espacial pelo menos um grupo representativo de cada evento deformacional observado no item 5.1. Os grupos

selecionados são G1, G2, G4, G5, G6 e G9, nas scanlines com maior número possível de amostras de cada grupo, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7. Resumo dos resultados obtidos pela análise da distribuição espacial de cada grupo de fraturas. N = Número de fraturas amostradas, N* = Número de fraturas corrigidas (Terzaghi), Intensidade = Intensidade de fraturas (N*/m), Espaçamento = Espaçamento real (com correção) e σ o desvio padrão dos espaçamentos, Cv = Coeficiente de variação dos espaçamentos, V = Valor de Kuiper e V* = Valor do teste de hipótese, Dc = Dimensão de Correlação e Class. = Classificação do tipo de distribuição espacial.

Grupo	Scanline	N	N*	Comprimento (m)	Intensidade (m-1)	Espaçamento (m)			Cv	V	V*	Dc	Class.
						Mediana	Média	σ					
1	7178	32	36	56.35	0.63	0.02	1.61	4.20	2.6	0.72	4.21*	0.41	Fractal
2	SL1 a 3	19	24	79.6	0.30	0.73	2.02	3.22	1.59	0.32	1.48	0.88	Corredor
4	7157	27	57	58.10	0.97	0.22	0.96	1.31	1.35	0.24	1.3	0.40	Fractal
5	7154	12	27	57.30	0.46	0.08	0.65	1.15	1.75	0.43	1.61	0.48	Fractal
6	SL5 a 7	24	26	90.3	0.28	1.81	2.66	2.47	0.93	0.17	0.88	1.04	Aleatória
9	7157	9	11	58.10	0.18	0.89	5.23	7.69	1.47	0.56	1.81*	0.92	Corredor

Grupo G1

A scanline SM-7178, foi a escolhida para a caracterização da distribuição espacial do grupo G1 (Tabela 7). Foram amostradas 32 fraturas deste grupo ao longo de 56,35 metros de comprimento. A intensidade de fraturas deste grupo é $0,63 \text{ m}^{-1}$, apresentando média de espaçamentos de 1,61m, mediana de 0,02m e desvio padrão de 4,20m, resultando em um coeficiente de variação de 2,6, sendo $Cv \gg 1$.

As Figura 22-A e B apresentam, respectivamente, o gráfico de agulhas e o gráfico de frequência acumulada da scanline SM-7178 para o grupo G1. Enquanto o primeiro sugere, de forma qualitativa, a formação de cluster de fraturas nos níveis mais rasos do furo, o segundo permite comparar com o esperado para uma distribuição uniforme e homogênea (linha preta no gráfico da Figura 20B), resultando em um elevado desvio do valor esperado, apresentando valores de V e V* de 0,72 e 4,21, respectivamente, confirmando, com confiança estatística de 99,9%, que a distribuição é heterogênea e não uniforme.

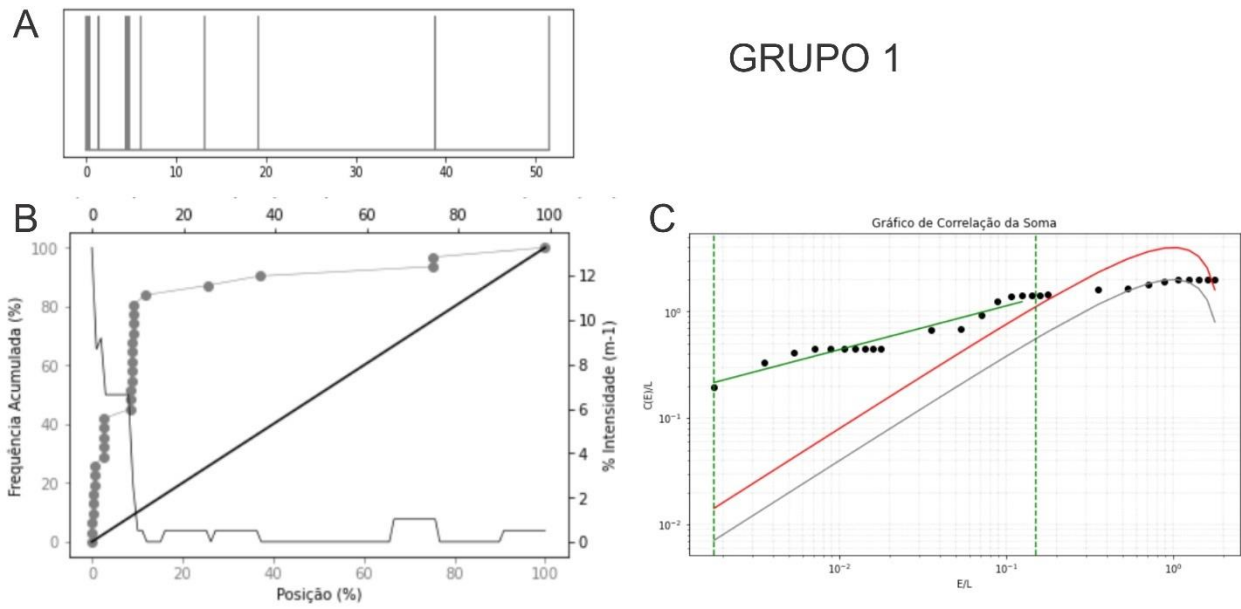


Figura 22. Gráficos para análise do arranjo espacial de fraturas do grupo G1. A – Gráfico de agulhas com a representação das fraturas (linhas) e sua posição em uma scanline perpendicular “ideal”. B – Gráfico de frequência acumulada normalizado em porcentagem tanto no eixo de frequência como da posição na scanline. A linha diagonal e de cor preta representa a frequência acumulada esperada para uma distribuição uniforme. A intensidade de fraturas é calculada em percentual para um intervalo equivalente a 10% do comprimento da scanline e a cada avanço com comprimento de 1% do comprimento da scanline. C – Gráfico de $C(e/L)$ vs. e/L em escala logarítmica para ambos os eixos. A linha contínua cinza representa o esperado para uma distribuição aleatória, a linha contínua vermelha a mistura de intervalos com intensidade diferente e as linhas tracejadas de cor verde são os intervalos utilizados para regressão linear, dado pelo limite inferior (valor de e/L em que a soma do total de pares de fraturas menores que ϵ é igual ao número de amostra N) e superior ($e/L=0.15$).

Já no gráfico de correlação da soma pelo ϵ/L (Figura 22-C), observa-se que, para distâncias curtas, há uma correlação alta, pois a reta de regressão dos dados é menos inclinada que o esperado para uma distribuição aleatória. A dimensão de correlação, ao longo de 2 ordens de grandeza de escala, é $D_c = 0,41$ o que indica forte independência de escala observa-se que, para distâncias curtas, há uma correlação alta, pois a reta de regressão dos dados é menos inclinada que o esperado para uma distribuição aleatória. A dimensão de correlação, ao longo de 2 ordens de grandeza de escala, é $D_c = 0,41$ o que indica forte invariância de escala.

Todas estas características indicam que as fraturas do grupo G1 apresentam arranjo espacial mais clusterizado que o esperado para uma distribuição uniforme ou aleatória, e uma forte correlação com a distribuição fractal (Tabela 7).

Grupo G2

A scanline SL1 a 3, foi a escolhida para a caracterização do arranjo espacial do grupo G2 (Tabela 7). Foram amostradas 19 fraturas deste grupo ao longo de 79,6 metros de comprimento. A intensidade de fraturas deste grupo é $0,30 \text{ m}^{-1}$, apresentando média de espaçamentos de 2,0 metros, mediana de 0,73 metros e desvio padrão de 3,22 metros, resultando em um coeficiente de variação de 1,59, sendo $Cv > 1$.

Pelo gráfico de agulhas apresentado na Figura 23-A, observa-se a formação de pelo menos dois clusters de fraturas do grupo G2, um deles entre 0-5 metros e outro entre 20-25 metros. No Gráfico de frequência acumulada (Figura 23-B), observa-se que nestas regiões há aumento da intensidade e do desvio da frequência acumulada em relação ao esperado para uma distribuição uniforme, com valores de V e V^* de 0,32 e 1,48, respectivamente.

No gráfico de correlação da soma por ϵ/L (Figura 23-C), observa-se que para distâncias medianas há uma correlação semelhante ao esperado para uma distribuição aleatória multiplicado por 2 (linha vermelha), resultando em uma dimensão de correlação de 0,88, mostrando pouca ou nenhuma independência de escala.

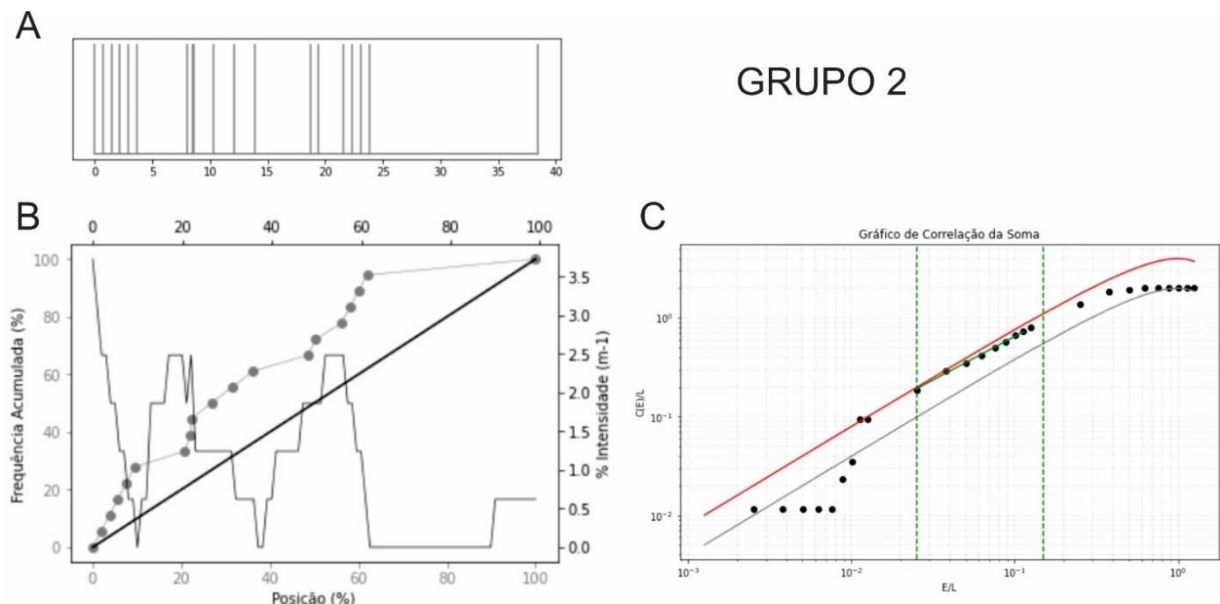


Figura 23. Gráficos para análise do arranjo espacial de fraturas do grupo G2. Assim como na Figura 22 anterior, A – Gráfico de agulhas com a representação das fraturas (linha) e sua posição em uma scanline perpendicular “ideal”. B – Gráfico de frequência acumulada normalizado em porcentagem tanto no eixo de frequência como da posição na scanline. C – Gráfico de $C(E/L)$ vs. E/L em escala logarítmica para ambos os eixos.

Apesar do teste de hipótese de Kuiper não ter rejeitado a hipótese nula com pelo menos 95% de confiança estatística, o valor do coeficiente de variação maior que 1, o valor de V maior que 0 e o valor de $D_c = 0,88$, mostram que o arranjo das fraturas do grupo G2 é mais heterogêneo que o esperado para um arranjo uniforme, porém, dependente de escala, sendo classificado como um corredor de fraturas.

Grupo G4

A scanline SM-7157, foi a escolhida para a caracterização do arranjo espacial do grupo G4 (Tabela 7). Foram amostradas 27 fraturas deste grupo ao longo de 58,10 metros de comprimento. A intensidade de fraturas deste grupo é $0,97 \text{ m}^{-1}$, apresentando média de espaçamentos de 0,96 m, mediana de 0,22 metros e desvio padrão de 1,31 metros, resultando em um coeficiente de variação de 1,35, sendo $C_v > 1$.

Pelo gráfico de agulhas apresentado na Figura 24-A, observa-se a formação de três clusters de fraturas do grupo G4 nos intervalos de 0-1 metro, 5-7 metros e 20-21 metros. No gráfico de frequência acumulada (Figura 24-B), observa-se que nestas regiões há o aumento da intensidade e desvio da frequência acumulada em relação ao esperado para uma distribuição uniforme, resultando em valores de V e V^* de 0,24 e 1,30, respectivamente.

No gráfico de correlação da soma por ε/L (Figura 24-C), observa-se que para distâncias curtas há uma correlação alta, fazendo com que a reta de regressão dos dados seja menos inclinada que o esperado para uma distribuição aleatória, resultando em uma dimensão de correlação de $D_c = 0,40$, o que indica forte independência de escala.

Todas estas características indicam que as fraturas do grupo G4 apresentam arranjo espacial mais clusterizado que o esperado para uma distribuição uniforme ou aleatória, e uma forte correlação com a distribuição fractal (Tabela 7).

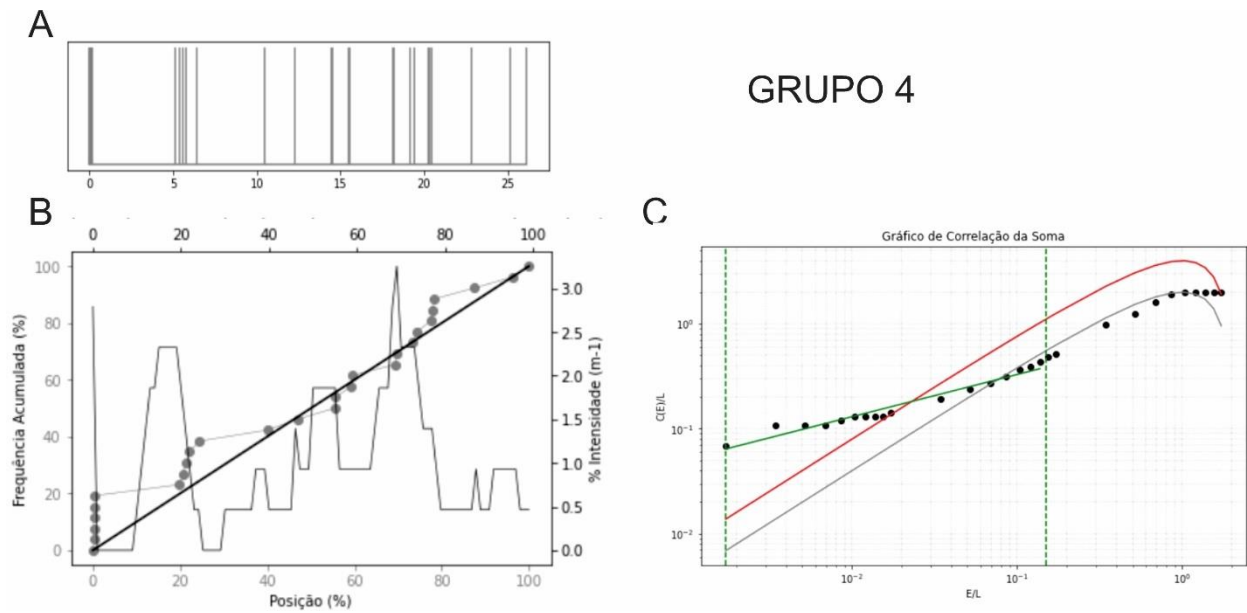


Figura 24. Gráficos para análise do arranjo espacial de fraturas do grupo G4. Assim como na Figura 22 anterior, A – Gráfico de agulhas com a representação das fraturas (linha) e sua posição em uma scanline perpendicular “ideal”. B – Gráfico de frequência acumulada normalizado em porcentagem tanto no eixo de frequência como da posição na scanline. C – Gráfico de $C(E/L)$ vs. E/L em escala logarítmica para ambos os eixos.

Grupo G5

A scanline SM-7154, foi a escolhida para a caracterização do arranjo espacial do grupo G5 (Tabela 7). Foram amostradas 12 fraturas deste grupo ao longo de 57,30 metros de comprimento. A intensidade de fraturas deste grupo é $0,46 \text{ m}^{-1}$, apresentando média de espaçamentos de 0,65m, mediana de 0,08m e desvio padrão de 1,15m, resultando em um coeficiente de variação de 1,75, ou seja, $C_v > 1$.

Pelo gráfico de agulhas apresentado na Figura 25-A, observa-se a formação de um cluster de fraturas do grupo G5 entre 0-1 metro. No Gráfico de frequência acumulada (Figura 25-B), observa-se que nesta região há o aumento da intensidade e do desvio da frequência acumulada em relação ao esperado para uma distribuição uniforme, com valores de V e V^* de 0,43 e 1,61, respectivamente.

No gráfico de correlação da soma por ϵ/L (Figura 25-C), como observado nos grupos G1 e G4, para distâncias curtas há uma correlação alta, com dimensão de correlação $D_c =$

0,48, e a reta de regressão dos dados é menos inclinada que o esperado para uma distribuição aleatória, o que indica forte independência da escala.

Todas estas características indicam que as fraturas do grupo G5 apresentam arranjo espacial mais clusterizado que o esperado para uma distribuição uniforme ou aleatória, e uma forte correlação com a distribuição fractal (Tabela 7).

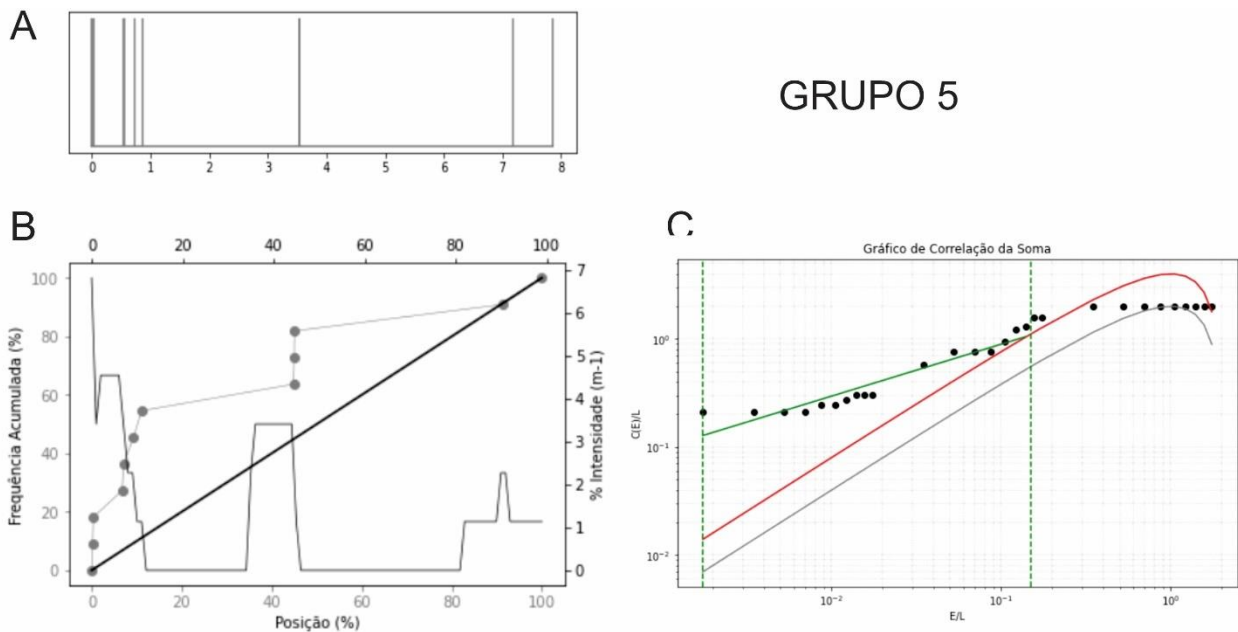


Figura 25. Gráficos para análise do arranjo espacial de fraturas do grupo G5. Assim como na Figura 22 anterior, A – Gráfico de agulhas com a representação das fraturas (linha) e sua posição em uma scanline perpendicular “ideal”. B – Gráfico de frequência acumulada normalizado em porcentagem tanto no eixo de frequência como da posição na scanline. C – Gráfico de $C(E/L)$ vs. E/L em escala logarítmica para ambos os eixos.

Grupo G6

A scanline SL5 a 7, foi a escolhida para a caracterização do arranjo espacial do grupo G6 (Tabela 7). Foram amostradas 24 fraturas deste grupo ao longo de 90,30 metros de comprimento. A intensidade de fraturas deste grupo é $0,28 \text{ m}^{-1}$, apresentando média de espaçamentos de 2,66m, mediana de 1,81m e desvio padrão de 2,47m, resultando em um coeficiente de variação de 0,93, ou seja, $C_v \sim 1$.

Pelo gráfico de agulhas apresentado na Figura 26-A, há, aparentemente, a formação de um cluster de fraturas entre 19 e 21 metros. No Gráfico de frequência acumulada (Figura 26-B), observa-se a formação de muitos picos de intensidade de fraturas, distribuídos mais uniformemente ao longo da scanline e a ocorrência de um vale entre 30 e 38 metros, dado pela ausência de fraturas nesta região. A distribuição da frequência acumulada dos dados em relação ao esperado para uma distribuição uniforme (linha preta), apresenta apenas pequenos desvios, resultando em valores de V e V^* de 0,17 e 0,88, respectivamente.

No gráfico de correlação da soma por ϵ/L (Figura 26-C), para distâncias curtas, observa-se baixa correlação, porém, apresentando comportamento similar ao esperado para uma distribuição aleatória à medida que ϵ/L aumenta, fazendo com que a reta de regressão dos dados fique sobre a reta cinza, resultando em uma dimensão de correlação de $D_c = 1.04$, semelhante ao esperado para uma distribuição aleatória ($D_c \sim 1$).

Todas estas características indicam que as fraturas do grupo G6 apresentam arranjo espacial semelhante ao esperado para uma distribuição aleatória de fraturas (Tabela 7), o que é condizente com a ocorrência de pequenos clusters de fraturas, como os observados nas Figuras 26-A e B (Sanderson & Peacock, 2019).

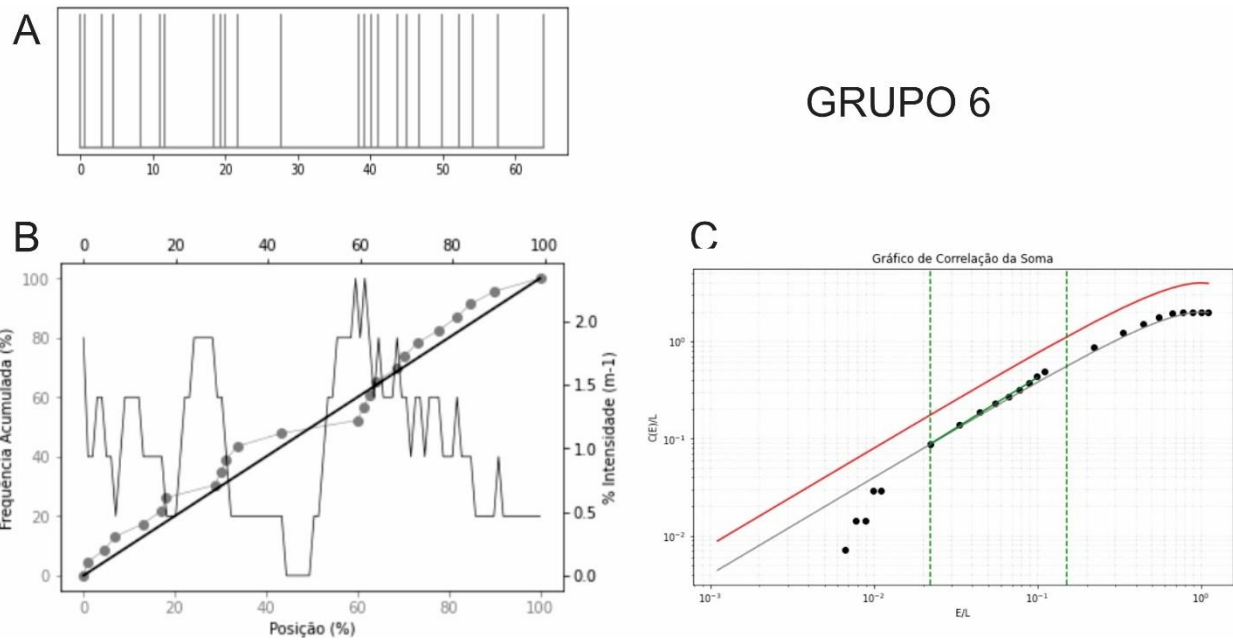


Figura 26. Gráficos para análise do arranjo espacial de fraturas do grupo G6. Assim como na Figura 22 anterior, A – Gráfico de agulhas com a representação das fraturas (linha) e sua posição em uma scanline perpendicular “ideal”. B – Gráfico de frequência acumulada normalizado em porcentagem tanto no eixo de frequência como da posição na scanline. C – Gráfico de $C(E/L)$ vs. E/L em escala logarítmica para ambos os eixos.

Grupo G9

A scanline 7157, foi a escolhida para a caracterização do arranjo espacial do grupo G9 (Tabela 7). Foram amostradas 9 fraturas deste grupo ao longo de 58,10 metros de comprimento. A intensidade de fraturas deste grupo é $0,18 \text{ m}^{-1}$, apresentando média de espaçamentos de 5,23m, mediana de 0,89m e desvio padrão de 7,69m, resultando em um coeficiente de variação de 1,47, ou seja, $Cv > 1$.

O gráfico de agulhas, apresentado na Figura 27-A, mostra um cluster de fraturas no final da scanline. No gráfico de frequência acumulada (Figura 27-B), observa-se um aumento da intensidade de fraturas e do desvio da frequência acumulada em relação ao esperado para uma distribuição uniforme a partir dos 38 metros, resultando em valores de V e V^* de 0,56 e 1,81, respectivamente, confirmando, com confiança estatística de 95%, que a distribuição é heterogênea e não uniforme.

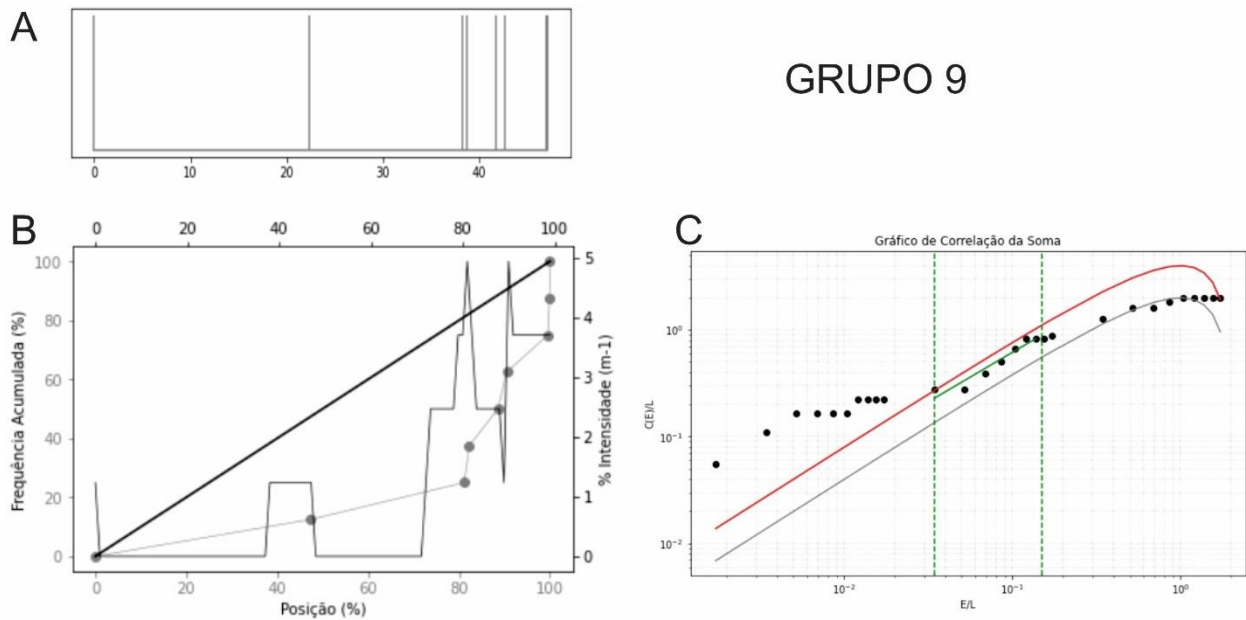


Figura 27. Gráficos para análise do arranjo espacial de fraturas do grupo G9. Assim como na Figura 22 anterior, A – Gráfico de agulhas com a representação das fraturas (linha) e sua posição em uma scanline perpendicular “ideal”. B – Gráfico de frequência acumulada normalizado em porcentagem tanto no eixo de frequência como da posição na scanline. C – Gráfico de $C(E/L)$ vs. E/L em escala logarítmica para ambos os eixos.

No gráfico de correlação da soma pelo ϵ/L (Figura 27-C), observa-se que para distâncias médias há uma correlação semelhante ao esperado para uma distribuição aleatória multiplicado por 2 (linha vermelha), resultando em uma dimensão de correlação de 0,92, mostrando pouca ou nenhuma independência de escala.

Todas estas características indicam que as fraturas do grupo G9 apresentam arranjo espacial com ocorrência de corredor de fraturas (Tabela 7). No entanto, cabe ressaltar que o baixo número de amostras ($N = 9$) pode guardar certa incerteza sobre a representatividade deste resultado, especialmente para diferenciação entre os arranjos clusterizados como fractal e corredor de fraturas.

A Figura 28 apresenta o gráfico que relaciona os valores de V de Kuiper e a dimensão de correlação (D_c). Neste, foram plotados tanto os dados simulados no item 2.2.1 e os dados dos grupos de fraturas do granito Cantareira analisados, como os dados simulados e utilizados por Sanderson & Peacock (2019). Para os dados simulados no item 2.2.1 são semelhantes aos simulados por esses autores.

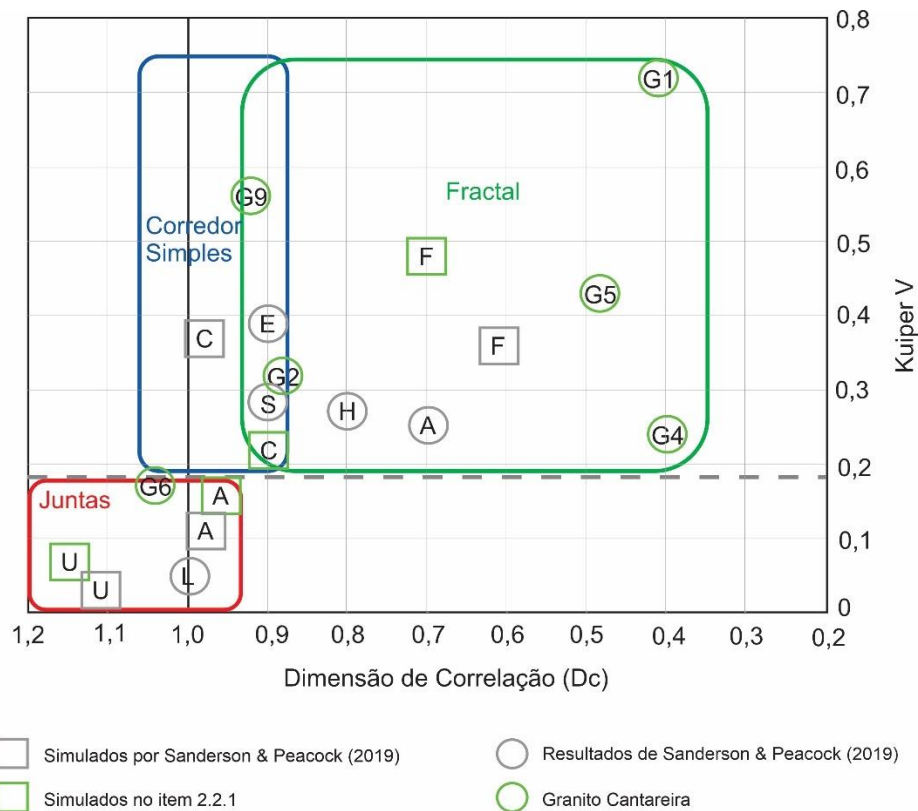


Figura 28. Gráfico da Dimensão de Correlação vs. Kuiper V para os dados simulados no item 2.2.1 e por Sanderson & Peacock (2019), para os grupos de fraturas do granito Cantareira e para os resultados obtidos por tais autores. A: Aleatória, U: Uniforme, C: Corredor, F: Fractal, A: Algroyna, L: Listock, H: Hop, E: Ebbesvikvatnet e S: Steinsvikvegen.

Nota-se que os grupos G1, G4 e G5 possuem forte invariância de escala e apresentam valores de Dc diferentes daqueles obtidos por Sanderson & Peacock (2019) para os clusters com distribuição fractal (H: Hop e A: Algroyna) (Figura 28). Os grupos G9 e G2 ocorrem no campo relacionado ao corredor simples, assim como os corredores de E (Ebbesvikvatnet) e S (Steinsvikvegen), sendo o grupo G2 muito similar ao corredor de fraturas de S, em relação aos valores de Dc e V. Os grupos G9 e G1 desviam, com confiança estatística de pelo menos 95%, da distribuição uniforme, e apresentam os maiores valores de V, muito superiores aos resultados obtidos pelos autores citados. Já o grupo G6 é o único que ocorre no campo relacionado às juntas, estando muito próximo das fraturas simuladas para distribuição aleatória, o que sugere que a distribuição aleatória pode não ser relacionável com fraturas extensionais ou juntas, uma vez que o

grupo G6 forma conjugado de fraturas com o grupo G7, conforme observado no item 5.1, sendo fraturas de cisalhamento.

5.3 Topologia e Grau de Conectividade da Rede de Fraturas

Neste item são apresentados os resultados da análise topológica da rede de fraturas do granito Cantareira na pedreira Morro Grande. Esta análise é realizada em dois taludes com direção E-W e NW-SE (Figuras 29 e 30), a partir de ortofotos produzidas através de imagens obtidas com drone. Os elementos de topologia analisados são tipos de terminações de fraturas, tipos de segmentos de fraturas e seus comprimentos. Quando a terminação se encontra encoberta por vegetação ou fora da parede, é classificada como nó do tipo indefinido (U), não sendo contabilizada na caracterização da topologia.

Na direção E-W, a amostragem das terminações foi realizada na área e no perímetro de 5 círculos, cada um de raio de 8,93 metros e área de $\sim 250 \text{ m}^2$, regularmente espaçados e com sobreposição entre si ao longo da parede (Figura 29). A parede é composta por duas bancadas de ~ 10 metros de altura. Tais dimensões garantem que cada círculo apresente tamanho grande o bastante para satisfazer o número mínimo de intersecções de fraturas com o perímetro do círculo (n ou E), entre 20 e 30, (Rohrbaugh et al., 2002; Procter & Sanderson, 2018) e a representatividade da amostragem.

Na direção NW-SE, a amostragem da topologia foi realizada através de uma janela com dimensão irregular, com 63 metros de comprimento, totalizando $\sim 553 \text{ m}^2$ de área (Figura 30). A parede é composta por uma bancada, com altura variando entre 5 e 14 metros.

A Tabela 8 resume os parâmetros da rede de fraturas obtido para cada círculo de amostragem da parede E-W. Nesta, as redes de fraturas amostradas apresentam, em média, 31 fraturas, 87 nós (E, I, X, Y e U) e 113 segmentos de fraturas. A média do comprimento médio das fraturas é de 6,96 m, enquanto dos segmentos de fraturas é de 1,90 m. Já os valores médios de abundância de fraturas, medida pela frequência (P_{20}), intensidade (P_{21}) e intensidade adimensional calculada a partir dos segmentos (B_{22}), são de 0,12 frat./ m^2 , $0,85\text{m}^{-1}$ e 1,61, respectivamente.

Tabela 8. Resumo dos parâmetros calculados a partir da análise da topologia para os taludes com direção E-W e NW-SE. AC: Área Circular, E: Nós de interseção com a janela de amostragem, I: Nós com terminação cega ou na própria rocha, U: Nós indefinidos, X: Nós de interseção de fraturas, Y: Nós de confinamento de uma fratura em outra fratura, C-C: Segmento conectado em ambas as terminações, C-I: Segmento conectado em apenas uma terminação, C-U: Segmento com uma terminação conectada e outra indefinida, I-I: Segmento com ambas as terminações cegas e I-U: Segmento com uma terminação cega e outra indefinida. Para a definição de P20, P21 e B22, ver Figura 3.

Direção	E-W					NW-SE
Amostragem	AC - 1	AC - 2	AC - 3	AC - 4	AC - 5	Janela
Raio (m)	8.93	8.93	8.93	8.93	8.93	-
Área (m²)	250.30	250.30	250.30	250.30	250.30	553.74
E	27	31	29	31	29	12
I	27	31	32	35	25	12
U	4	4	4	12	15	2
X	20	27	23	28	27	11
Y	21	32	35	42	29	20
Número de Nós	68	90	90	105	81	43
Número de Segmentos	85	117.5	114.5	136.5	110	58
Número de Linhas	24	31.5	33.5	38.5	27	16
Número de Conexões	41	59	58	70	56	31
Conexões/Linha	3.42	3.75	3.46	3.64	4.15	3.87
Comprimen. Méd. de Linhas (m)	7.54	7.00	6.83	6.23	7.18	11.81
Comprimen. Méd. de Segmentos (m)	2.13	1.88	2.00	1.76	1.76	3.26
Conexões/Segmentos	1.68	1.74	1.72	1.74	1.77	1.79
Conectividade Hidráulica (f)	0.28	0.36	0.33	0.36	0.43	0.44
Frequência de Segmentos	0.34	0.47	0.46	0.55	0.44	0.1
Frequência de Linhas	0.10	0.13	0.13	0.15	0.11	0.02
P20	0.10	0.13	0.13	0.15	0.11	0.03
P21 (m-1)	0.72	0.88	0.91	0.96	0.77	0.34
B22	1.54	1.65	1.83	1.68	1.36	1.11
C-C	51	71.5	63.5	81.5	70	35
C-I	21.5	28.5	30.5	34.5	24.5	12
C-U	5	4	6.5	12	13.5	8
I-I	1	0	0.5	1	0.5	0
I-U	0.5	0.5	0.5	0.5	1	0
U	0	0	0	0	0	0
Comprimento Total de Fraturas (m)	180.86	220.62	228.94	239.93	193.79	189.08

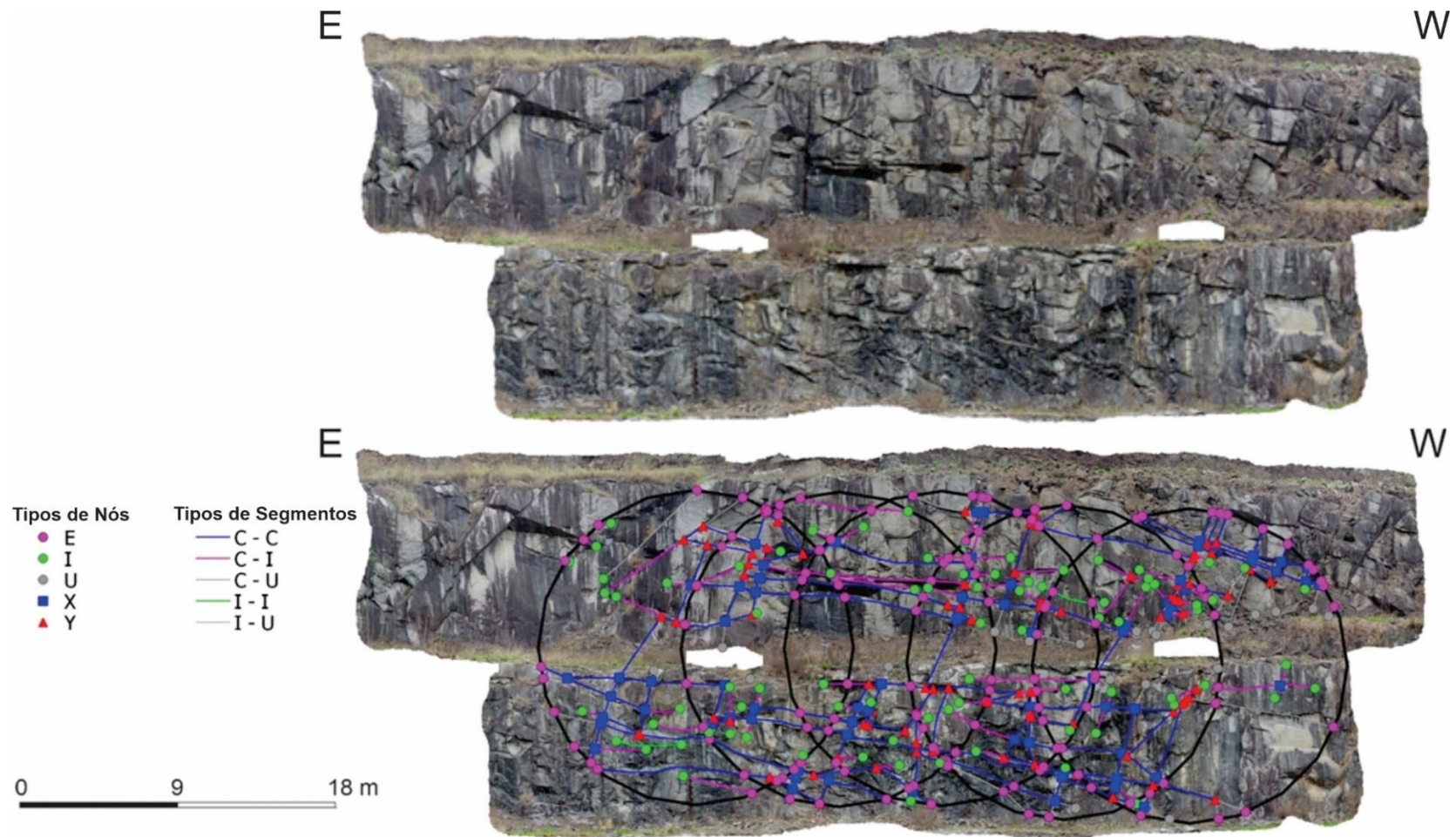


Figura 29. Ortofotos produzidas do talude de direção leste-oeste a partir de imagens de drone ortogonais à parede. A imagem inferior contém os círculos em que a topologia da rede de fraturas foi coletada e analisada. E: Nós de intersecção com o perímetro do círculo, I: Nós com terminação cega ou na própria rocha, U: Nós indefinidos, X: Nós de intersecção de fraturas, Y: Nós de confinamento de uma fratura em outra fratura, C-C: Segmento conectado em ambas as terminações, C-I: Segmento conectado em apenas uma terminação, C-U: Segmento com uma terminação conectada e outra indefinida, I-I: Segmento com ambas as terminações cegas e I-U: Segmento com uma terminação cega e outra indefinida. Ver também Figura 8.

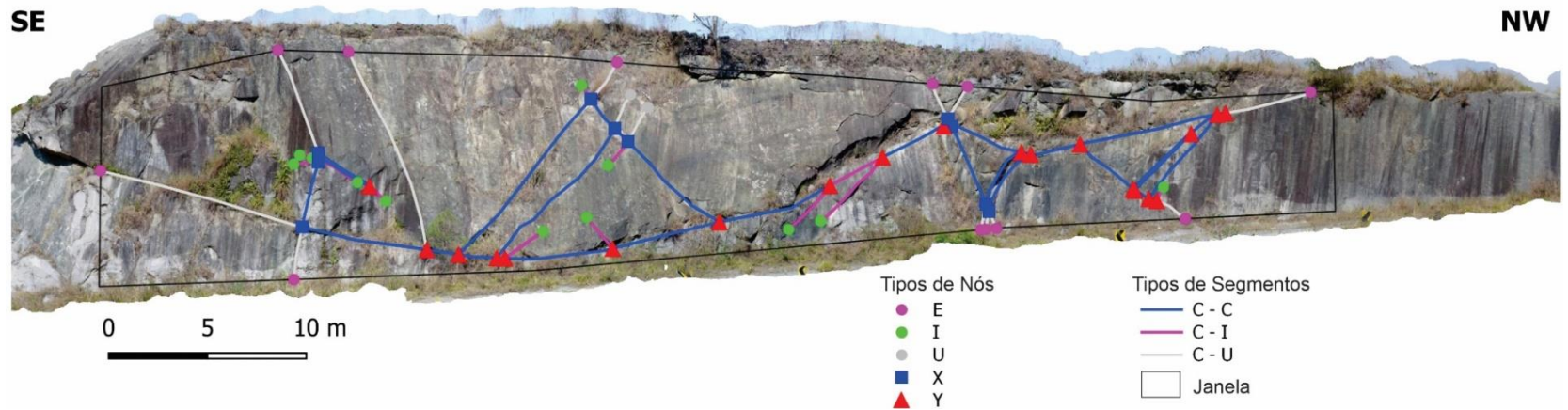


Figura 30. Ortofotos produzidas com imagens de drone ortogonais à parede com direção noroeste-sudeste. A imagem inferior mostra os elementos da topologia da rede de fraturas. E: Nós de interseção com a janela de amostragem, I: Nós com terminação cega ou na própria rocha, U: Nós indefinidos, X: Nós de intersecção de fraturas, Y: Nós de confinamento de uma fratura em outra fratura, C-C: Segmento conectado em ambas as terminações, C-I: Segmento conectado em apenas uma terminação, C-U: Segmento com uma terminação conectada e outra indefinida. Ver também figura 8.

A Tabela 8 resume os parâmetros da rede de fraturas obtido para a parede NW-SE. Foram amostradas no total, 16 fraturas, 43 nós (E, I, X, Y e U) e 58 segmentos de fraturas. O comprimento médio das fraturas é de 11,81 metros, enquanto dos segmentos de fraturas é de 3,26 metros. Já a frequência (P_{20}), intensidade (P_{21}) e intensidade adimensional calculada a partir dos segmentos (B_{22}), apresentam valores 0,03 frat./m², 0,34m⁻¹ e 1,11, respectivamente.

Quando comparado à direção de amostragem E-W, a parede com direção NW-SE apresenta abundância de fraturas e quantidade de nós reduzidos, ao mesmo tempo que o comprimento médio das fraturas e segmentos são maiores (Tabela 8). No primeiro caso, isto pode ser explicado pelo viés de orientação e sub amostragem de fraturas do grupo G4, que apresenta direção paralela ao plano de amostragem, e é o grupo com maior intensidade (Tabela 8). No segundo caso, esta diferença pode ocorrer devido à presença de uma fratura do grupo G1 (sub-horizontal) com elevada persistência, ocorrendo em toda a extensão da parede.

Em contrapartida, quando analisados os dados de proporções de tipos de nós e segmentos, e os parâmetros grau de conectividade (C_b) e conectividade hidráulica (f), observa-se resultados semelhantes para ambas as direções, conforme ilustrado nos gráficos da Figura 31.

As Figuras 31-A e B apresentam os diagramas ternários de proporção dos tipos de nós com grau de conectividade (C_b) e conectividade hidráulica (f), respectivamente. Observa-se que os resultados da amostragem circular realizada na parede com direção E-W, apresenta proporções dos tipos de nós muito semelhantes, com valores de C_b variando entre 1,68 e 1,77, e de f variando entre 0,28 e 0,43 (Tabela 8). Resultados semelhantes são observados para a parede com direção NW-SE, apesar da proporção de nós do tipo Y ser levemente maior que na direção E-W, apresentando valores de C_b e f de 1,79 e 0,44, respectivamente.

A Figura 31-C apresenta o diagrama ternário de proporção dos tipos de segmentos observados na rede de fraturas. Semelhante ao observado pelas proporções dos tipos de nós, para ambas as direções se observa forte semelhança nos resultados, com predominância de segmentos conectados em ambas as terminações (Tipo C-C).

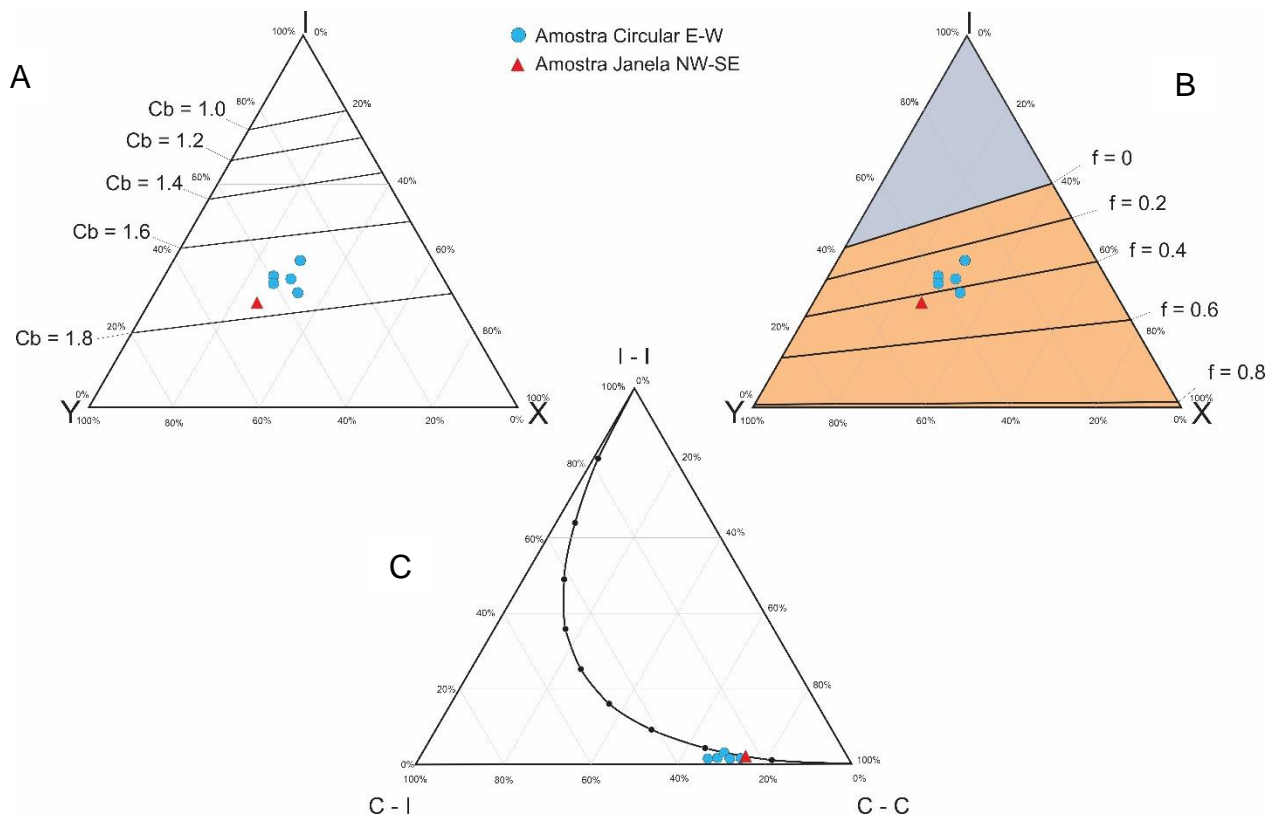


Figura 31. Diagramas ternários dos tipos de terminação e segmentos observados nas amostras da rede de fraturas do granito Cantareira. A - Diagrama ternário relacionando a proporção dos tipos de nós e o parâmetro C_b (Número de conexões por segmento). B - Diagrama ternário relacionando a proporção dos tipos de nós e o parâmetro f (Conectividade hidráulica). C - Diagrama ternário relacionando os tipos de segmentos de fraturas.

Para as duas direções há um leve predomínio de nós do tipo Y (Tabela 8), semelhante ao esperado para redes de fraturas naturais (Sanderson & Nixon, 2015). Este tipo de nó é importante para definição da tortuosidade da rede de fraturas, uma vez que quanto maior a proporção de nós Y, maior será a tortuosidade e, portanto, maior a trajetória de fluxo de um ponto A para o ponto B, considerando que todas as fraturas tenham a mesma abertura (Saevik & Nixon, 2019).

Tais resultados mostram que a rede de fraturas do granito Cantareira apresenta, não apenas boa conectividade ($C_b \gg 1$ e $f > 0$), como a predominância de segmentos do tipo C-C (Figura 31), que indica a formação de uma espinha dorsal (*backbone*) atravessando, pelo menos, a área de amostragem (Nixon, 2013).

5.4 Parâmetros Hidráulicos

Neste item são analisados os dados de ensaios hidráulicos disponíveis nas proximidades da pedreira Morro Grande.

Do total de ensaios, 23 não apresentaram vazão de injeção significativa, sendo considerados como impermeáveis. Dos 33 ensaios restantes, apenas 39% apresentaram comportamento de fluxo laminar. Em contrapartida, 61% dos ensaios apresentaram comportamento não-linear. A dilatação das fraturas durante a execução dos ensaios, devido à elevada pressão máxima utilizada, foi o comportamento mais frequente (39% dos ensaios), seguida pela lavagem de preenchimentos dos planos das fraturas (15% dos ensaios) e pelo preenchimento de fraturas abertas não conectadas (6% dos ensaios) (Figura 32). Em nenhum dos ensaios foi observada a ocorrência de fluxo turbulento.

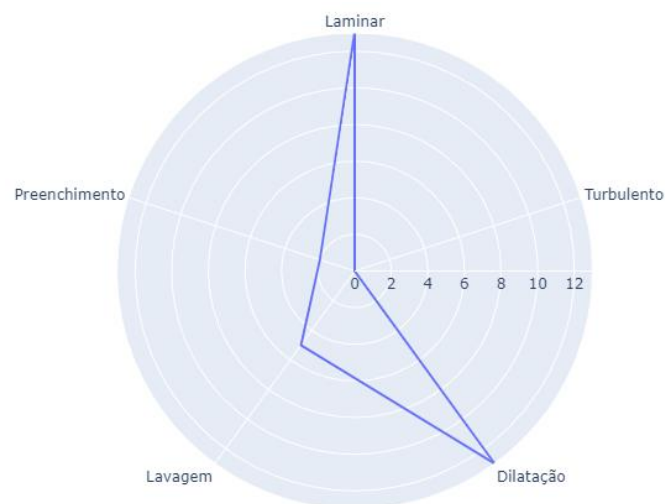


Figura 32. Gráfico de radar mostrando as quantidades e proporções dos tipos de comportamentos de fluxo observados nos ensaios de Lugeon realizados.

As Figuras 33 e 34 apresentam os resultados resumidos em gráfico de violino e de dispersão unidimensional, para os parâmetros: Lugeon, abertura hidráulica, condutividade hidráulica e transmissividade, considerando tanto a totalidade dos ensaios, como apenas aqueles em que houve fluxo.

Apesar do conjunto de dados totais representar melhor a probabilidade de ocorrência dos valores de cada parâmetro hidráulico amostrado no aquífero, o conjunto de dados com ausência das zonas impermeáveis permite avaliar as estatísticas dos parâmetros

hidráulicos da rede de fraturas que, efetivamente, contribui para o fluxo de água no aquífero.

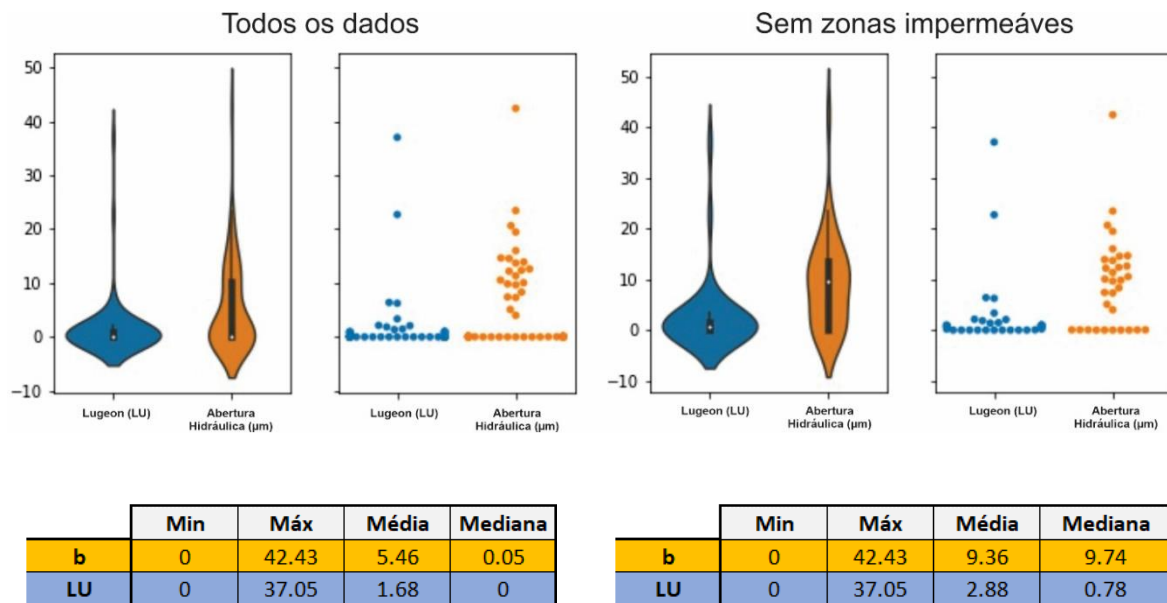


Figura 33. Gráficos violino e de dispersão unidimensional para os valores de Lugeon ($LU = 1 \text{ l/min/m}$) e Abertura Hidráulica ($b = \mu\text{m}$), avaliando os cenários para todos os dados e com a exclusão de ensaios que não apresentaram fluxo (porções impermeáveis).

Considerando a totalidade dos dados, os valores de Lugeon apresentam valor mínimo e máximo de 0 e 37 LU, respectivamente, e média e mediana de 1,68 e 0 LU, respectivamente. Já quando considerados apenas os valores de ensaios que apresentaram fluxo, os valores de Lugeon apresentam média e mediana de 2,88 e 0,77 LU, respectivamente (Figura 33).

A abertura hidráulica das fraturas, para a totalidade dos dados, possui valores mínimos e máximos de 0 e 42,43 μm , respectivamente, e média e mediana de 5,46 e 0,05 μm , aumentando para 9,36 e 9,74 μm , respectivamente, quando analisados os dados sem as zonas impermeáveis.

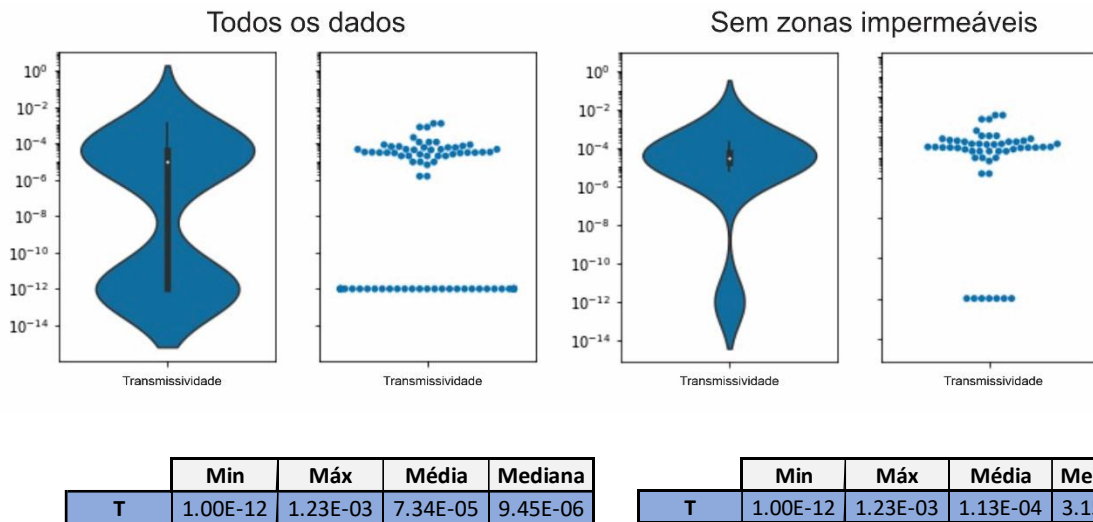


Figura 34. Gráficos violino e de dispersão unidimensional para os valores de Transmissividade ($T = \text{cm}^2/\text{s}$) em escala logarítmica, considerando todos os dados e com a exclusão de ensaios que não apresentaram fluxo (porções impermeáveis).

Uma vez que a transmissividade é representada através da escala logarítmica, o valor de $10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$ foi adotado para representar valores iguais ou muito próximos a zero (Figura 34).

Considerando a totalidade dos dados, a transmissividade apresenta valores mínimos e máximos de 1×10^{-12} e $1,23 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, média de $7,34 \times 10^{-5}$ e mediana de $9,45 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$, enquanto para os dados sem as zonas impermeáveis, a transmissividade do aquífero apresenta média e mediana de $1,13 \times 10^{-4}$ e $3,15 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$, respectivamente (Figura 34).

Analisando os dados de abertura hidráulica *versus* a profundidade do aquífero, a partir do contato solo/rocha, observa-se que a abertura hidráulica tende a apresentar valores maiores nos 5-10 metros mais rasos do aquífero (Figura 35). Este aumento pode estar associado a processos intempéricos nas fraturas destas porções (Singhal & Gupta, 2010).

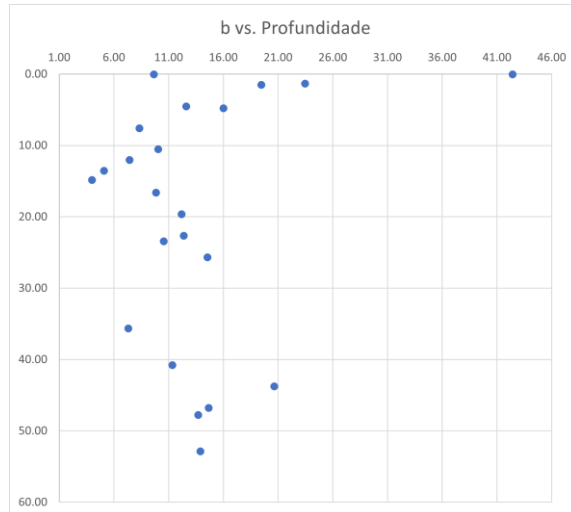


Figura 35. Abertura hidráulica (b) em μm , em função da profundidade, a partir do contato solo/rocha (o valor zero representa o contato solo-rocha).

Os resultados indicam que o aquífero fraturado apresenta, em média, baixa transmissividade (da ordem de $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$). Alguns ensaios apresentaram transmissividade da ordem de $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, ou seja, cerca de 100 vezes superior à média do aquífero. Isto mostra que de fato há ocorrência de caminhos preferenciais de fluxo no aquífero.

Destaca-se também que a grande quantidade de ensaios que apresentaram comportamento de fluxo não-linear (61% dos ensaios), dificulta a caracterização dos parâmetros hidráulicos do aquífero, uma vez que podem estar subdimensionados devido à não-linearidade (Quinn et al., 2011).

6. DISCUSSÃO

Neste capítulo são discutidos os resultados com maior profundidade em relação à estimativa dos intervalos de valores possíveis dos parâmetros hidráulicos para os grupos de fraturas (item 6.1), a influência dos grupos G6 e G7 na conectividade da rede de fraturas (item 6.2) e, por fim, o modelo conceitual do aquífero fraturado (item 6.3).

6.1 Estimativa dos Parâmetros Hidráulicos dos Grupos de Fraturas

Um dos principais objetivos no desenvolvimento de modelos conceituais de aquíferos fraturados, está na identificação dos possíveis caminhos preferenciais de fluxo para a água subterrânea.

Esta identificação pode ser realizada através da determinação dos grupos de fraturas mais transmissivos, seja de forma qualitativa, através de observações de indícios de fluxo em fraturas de afloramentos rochosos ou através de dados de perfilagens geofísica e *flowmeter* (p.ex. Fiume et al., 2020; Fernandes et al., 2016; Lo et al., 2014), ou de forma quantitativa, conjugando dados estruturais e de perfilagens geofísicas, com ensaios hidráulicos com obturador duplo e ensaio *cross-hole*, (p.ex. Wang et al., 2015; Zhan et al., 2016), bem como através de ensaios com traçadores.

A identificação da ocorrência de clusters de grupos de fraturas tem sido utilizado em diversos trabalhos para a identificação de caminhos preferenciais de fluxo em meios fraturados (p.ex. Sanderson & Peacock, 2019; Miranda et al., 2018; Laubach et al., 2018). No entanto, esta abordagem não leva em consideração, necessariamente, a abertura das fraturas, que tende a influenciar mais no fluxo (lei cúbica) (Figura 10).

A quantificação dos parâmetros hidráulicos de grupos de fraturas, por outro lado, pode ser um grande desafio, uma vez que é comum haver fraturas de mais de um grupo em um único intervalo de teste. Além disso, a abertura das fraturas de um mesmo grupo pode variar significativamente e, da mesma forma, as transmissividades, não sendo possível atribuir um único valor de abertura para cada grupo, mas sim um intervalo de valores prováveis, havendo necessidade de mais de um ensaio por grupo de fraturas.

Neste contexto, o aquífero fraturado localizado na pedreira Morro Grande oferece uma boa oportunidade para a caracterização dos intervalos de valores possíveis de transmissividade e abertura hidráulica para os grupos de fraturas identificados, dada a quantidade de ensaios realizados, tanto em furos verticais como inclinados. Isto aumenta a representatividade da amostragem de fraturas inclinadas e verticais. Além disso, devido ao espaçamento médio das fraturas ser alto (~2,0 metros), há maior probabilidade de ocorrência de fraturas de um único grupo dentro do intervalo de teste, que apresenta comprimento médio de 3,0 metros.

Isto posto, os grupos de fraturas originados por um mesmo evento deformacional, como descrito no item 5.1, tiveram seus parâmetros hidráulicos caracterizados em conjunto. A premissa de que fraturas geradas em um mesmo evento possuem aberturas semelhantes é respaldada por possuírem preenchimento e rugosidade semelhantes, os quais influenciam diretamente a abertura das fraturas de cada grupo (Figura 20). Além disso, a reativação de planos de fraturas rugosas, seja devido ao histórico de deformações a que foi submetido ou às tensões atuais, tendem a aumentar a sua abertura (Barton et al., 1985), o que reforça a utilização de tal premissa devido à similaridade de direções e mergulhos destes grupos.

A Figura 36 apresenta um gráfico de bolhas relacionando a transmissividade e a abertura hidráulica média calculadas a partir dos ensaios realizados. O tamanho da bolha representa a proporção de um determinado grupo de fraturas no total de fraturas que ocorrem em um mesmo intervalo de ensaio. Os intervalos de valores de transmissividade e abertura hidráulica para cada grupo de fraturas foi definido a partir dos ensaios com maior proporção de cada grupo de fraturas, conforme área hachurada com a cor de cada grupo (Figura 36).

Desta forma, observa-se que os grupos G1 e G8/G9 apresentam valores de transmissividade de até uma ordem de grandeza maior que o restante, variando entre 10^{-5} e 10^{-4} cm²/s, os grupos G2/G3 e G4/G5 apresentam intervalos dentro da média observada para o aquífero, em torno de 10^{-5} cm²/s e o grupo G6/G7 apresenta os menores valores, em torno de 10^{-6} cm²/s. Para a abertura hidráulica média, os grupos G8/G9, G1 e G2/G3, apresentam, respectivamente, os intervalos com os maiores valores, sendo de 14 a 25µm, 10 a 20µm, e 10 a 15µm, respectivamente, enquanto

os grupos G4/G5 e G6/G7 apresentam os menores valores, variando entre 5 e 12 μm e 4 e 10 μm , respectivamente (Figura 36).

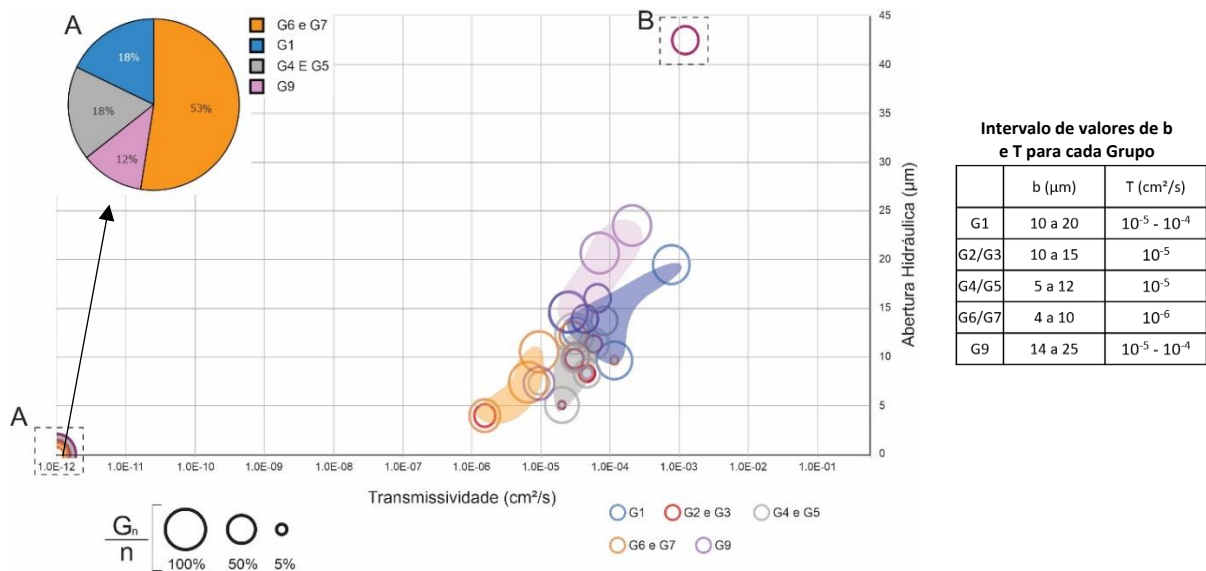


Figura 36. Mostra o gráfico de bolhas relacionando a transmissividade medida nos ensaios tipo Lugeon. A abertura hidráulica foi calculada a partir da transmissividade, e quando havia mais que uma fratura no intervalo testado, considerava-se que as fraturas tinham a mesma abertura. As cores das bolhas representam os grupos de fraturas e seu tamanho, a proporção de fraturas de cada grupo em cada ensaio, sendo G_n o número de fraturas de um mesmo grupo e n o total de fraturas no intervalo do teste. O gráfico pizza “A” mostra a proporção de ensaios com 100% de fraturas de um mesmo grupo e que não apresentou fluxo significativo, enquanto o ensaio “outlier” destacado em B trata-se de um ensaio em intersecção entre duas fraturas dos grupos G2 e G9 nos primeiros 5 metros de profundidade do aquífero fraturado. Já a tabela ao lado sintetiza os intervalos de valores de transmissividade e abertura hidráulica para cada grupo.

Apesar dos intervalos de valores obtidos para os grupos G1 e G8/G9 serem semelhantes, a causa para tal parece ser diferente. Os ensaios, que apresentaram maior proporção de fraturas do grupo G1 no intervalo ensaiado e maior transmissividade, foram realizados em níveis rasos do aquífero, onde foi observada alteração intempérica nestas fraturas. Nesses intervalos há dois clusters de fraturas do grupo G1, identificados pelos gráficos de agulhas e de frequência acumulada da sondagem SM-7178 (Figura 22).

Enquanto o grupo G1 apresenta plano de fratura com baixos valores de JRC (entre 2 e 3), o grupo G9 apresenta os maiores valores de JRC, variando entre 4 e 8. Uma vez que não foram realizados ensaios no corredor de fraturas identificado para o grupo G8/G9 e a ocorrência de valores elevados de transmissividade ser observada em diferentes níveis do aquífero investigado, a rugosidade associada à reativação por

cisalhamento sugerem ser as causas para os elevados valores observados para este grupo.

Na Figura 36 observa-se também uma concentração de baixas transmissividades junto à origem do gráfico (A) e um ensaio com transmissividade e abertura hidráulica muito elevadas (B).

No primeiro caso, tal concentração é referente aos ensaios que não apresentaram fluxo significativo, com o gráfico pizza mostrando a proporção de ensaios com 100% de fraturas de um mesmo grupo dentro desta concentração. Observa-se que o grupo de fraturas G6/G7 apresenta a maior proporção, sendo de 53%, seguido pelos grupos G1 e G4/G5 com 18% e o grupo G8/G9 em 12% dos casos. Não foram observados ensaios com 100% de fraturas do grupo G2/G3. O predomínio do grupo G6/G7 neste conjunto de resultados e os valores baixos de transmissividade e abertura hidráulica média são coerentes com a ocorrência de preenchimento observado na maior parte das fraturas amostradas (Figura 19-B).

No segundo caso, o resultado destoante (Figura 36-B) foi obtido em intervalo localizado nos 5 metros mais rasos do aquífero, sendo uma intersecção de fraturas do grupo G2 e G9.

Portanto, os resultados indicam que há caminhos preferenciais associados aos grupos G1 e G9, de direção NS e mergulhos baixos. Esse fluxo, nos ensaios realizados, pode ocorrer nas porções mais rasas do aquífero (5-10m de profundidade). Em profundidades maiores (Até ~60 metros) em relação ao contato solo-rocha também há fluxo preferencial, associado, principalmente, ao grupo G9. Isto indica anisotropia de fluxo aproximadamente subhorizontal, pois G1 e G9 são de baixo mergulho. Os grupos G4 e G5, de direção ~N60W e mergulhos médios (~60°) em sentidos opostos, bem como G2 e G3, de direção ~N70E e mergulhos médios (~60°) em sentidos opostos, também podem constituir caminhos de fluxo, mas não tão importantes quanto G1 e G9. É importante mencionar que próximo à superfície do terreno, como é o caso dos intervalos ensaiados (profundidades menores que 60 m), existe uma tendência de fraturas de mergulho baixo serem importantes para o fluxo de água subterrânea (Morin & Savage, 2003)

6.2 Influência dos Grupos G6 e G7 Sobre a Conectividade da Rede de Fraturas

Dentre as principais utilizações da topologia de redes complexas no estudo de aquíferos fraturados pode-se destacar: (1) caracterização da conectividade da rede de fraturas; (2) fornecimento de parâmetros quantitativos para calibração de modelos matemáticos; e (3) verificação da ocorrência de clusters de abrangência na rede de fraturas real, ou seja, se há conectividade entre fraturas suficiente para interligar diferentes clusters de fraturas formando uma espinha dorsal que atravessa todo o domínio considerado (Figura 9).

Entretanto, a caracterização da topologia da rede de fraturas, conforme proposto por Sanderson & Nixon (2015), leva em consideração apenas os tipos e proporções de nós e segmentos de fraturas que compõem a rede. Características importantes para o fluxo como, por exemplo, a abertura das fraturas, não é considerada. Conforme discutido no item 6.1, os grupos de fraturas G6 e G7 tendem a apresentar menor relevância para o fluxo que os demais grupos, possivelmente devido à ocorrência de preenchimento em grande parte de suas fraturas ou à sua orientação em relação às tensões atuais.

Posto isto, para investigação da influência que tais grupos apresentam para a conectividade da rede de fraturas, foi realizada nova análise da topologia da rede de fraturas nas paredes com direção E-W e NW-SE, utilizando janela e áreas circulares com as mesmas dimensões e posições que as utilizadas no item 5.3, mas desta vez, removendo-se os grupos G6 e G7.

As Tabelas 8 e 9 apresentam os parâmetros obtidos para cada parede analisada, comparando os cenários com e sem os grupos G6 e G7. Para a parede com direção E-W, observa-se na Tabela 9, uma redução expressiva do número de nós (em média -50%) e segmentos (em média -72%) da rede de fraturas quando retirados os grupos G6 e G7, enquanto o comprimento médio das linhas não apresentou variações significativas, mas o comprimento médio dos segmentos de fraturas aumentou em média 152%.

Tabela 9. Resumo dos parâmetros obtidos através da análise da topologia da rede de fraturas da parede com direção E-W considerando os cenários com e sem os grupos G6 e G7. E: Nós de interseção com a janela de amostragem, I: Nós com terminação cega ou na própria rocha, U: Nós indefinidos, X: Nós de interseção de fraturas, Y: Nós de confinamento de uma fratura em outra fratura, C-C: Segmento conectado em ambas as terminações, C-I: Segmento conectado em apenas uma terminação, C-U: Segmento com uma terminação conectada e outra indefinida, I-I: Segmento com ambas as terminações cegas e I-U: Segmento com uma terminação cega e outra indefinida

Amostragem	Sem N-S					Com N-S				
	AC - 1	AC - 2	AC - 3	AC - 4	AC - 5	AC - 1	AC - 2	AC - 3	AC - 4	AC - 5
Raio (m)	8.93	8.93	8.93	8.93	8.93	8.93	8.93	8.93	8.93	8.93
Área (m2)	250.30	250.30	250.30	250.30	250.30	250.30	250.30	250.30	250.30	250.30
E	20	24	22	21	17	27	31	29	31	29
I	29	36	38	40	30	27	31	32	35	25
U	1	1	2	1	0	4	4	4	12	15
X	3	8	10	14	7	20	27	23	28	27
Y	0	0	0	0	0	21	32	35	42	29
Número de Nós	33	45	50	55	37	68	90	90	105	81
Número de Segmentos	21	32	38	43	25.5	85	117.5	114.5	136.5	110
Número de Linhas	16	22	24	27	18.5	24	31.5	33.5	38.5	27
Número de Conexões	4	9	12	15	7	41	59	58	70	56
Conexões/Linha	0.50	0.82	1.00	1.11	0.76	3.42	3.75	3.46	3.64	4.15
Comprimen. Méd. de Linhas (m)	7.73	7.51	7.25	6.03	6.43	7.54	7.00	6.83	6.23	7.18
Comprimen. Méd. de Segmentos (m)	5.89	5.16	4.58	3.79	4.67	2.13	1.88	2.00	1.76	1.76
Conexões/Segmentos	0.62	0.88	1.00	1.07	0.82	1.68	1.74	1.72	1.74	1.77
Frequência de Segmentos	0.08	0.13	0.15	0.17	0.10	0.34	0.47	0.46	0.55	0.44
Frequência de Linhas	0.06	0.09	0.10	0.11	0.07	0.10	0.13	0.13	0.15	0.11
P20	0.06	0.09	0.10	0.11	0.07	0.10	0.13	0.13	0.15	0.11
P21 (m-1)	0.49	0.66	0.70	0.65	0.48	0.72	0.88	0.91	0.96	0.77
B22	2.91	3.41	3.19	2.47	2.22	1.54	1.65	1.83	1.68	1.36
C-C	0.50	5.50	8.00	11.00	5.00	51	71.5	63.5	81.5	70
C-I	13	17.5	19.5	22	11	21.5	28.5	30.5	34.5	24.5
C-U	0.5	0	0	0	0	5	4	6.5	12	13.5
I-I	7	9	10.5	10	9	1	0	0.5	1	0.5
I-U	1	2	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1
U	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Comprimento Total de Fraturas (m)	123.6911	165.2368	174.1919	163.0011	119.0905	180.86	220.62	228.94	239.93	193.79

Já para a parede com direção NW-SE, considerando o cenário sem os grupos G6 e G7, observa-se na Tabela 9 uma redução do número de nós (-30%) e segmentos (-3%) da rede de fraturas, muito menores que os observados para a parede com direção E-W, enquanto o comprimento médio das linhas apresentou uma redução de 14% e o comprimento médio dos segmentos de fraturas um aumento de 20%, também muito menor que o observado para a parede com direção E-W.

Tabela 10. Resumo dos parâmetros obtidos através da análise da topologia da rede de fraturas da parede com direção NW-SE considerando os cenários com e sem os grupos G6 e G7. E: Nós de interseção com a janela de amostragem, I: Nós com terminação cega ou na própria rocha, U: Nós indefinidos, X: Nós de interseção de fraturas, Y: Nós de confinamento de uma fratura em outra fratura, C-C: Segmento conectado em ambas as terminações, C-I: Segmento conectado em apenas uma terminação, C-U: Segmento com uma terminação conectada e outra indefinida, I-I: Segmento com ambas as terminações cegas e I-U: Segmento com uma terminação cega e outra indefinida.

	Com G6-G7		Sem G6-G7	
	Janela		Janela	
Amostragem	Janela		Janela	
Área (m²)	553.74		553.74	
E	12		7	
I	12		12	
U	2		2	
X	11		3	
Y	20		19	
Número de Nós	43		34	
Número de Segmentos	58		40.5	
Número de Linhas	16		15.5	
Número de Conexões	31		22	
Conexões/Linha	3.87		2.83	
Comprimen. Méd. de Linhas (m)	11.81		10.21	
Comprimen. Méd. de Segmentos (m)	3.26		3.90	
Conexões/Segmentos	1.79		1.70	
Frequência de Segmentos	0.10		0.07	
Frequência de Linhas	0.02		0.02	
P20	0.03		0.03	
P21 (m-1)	0.34		0.28	
B22	1.11		1.11	
C-C	35		22.00	
C-I	12		10	
C-U	8		5.5	
I-I	0		1	
I-U	0		0	
U	0		0	
Comprimento Total de Fraturas (m)	189.08		158.32	

A Figura 37 apresenta os diagramas ternários de proporção dos tipos de nós e conectividade (C_b) / conectividade hidráulica (f), e proporção dos tipos de segmentos de fraturas, considerando os cenários com e sem os grupos de fraturas G6 e G7 para ambas as paredes.

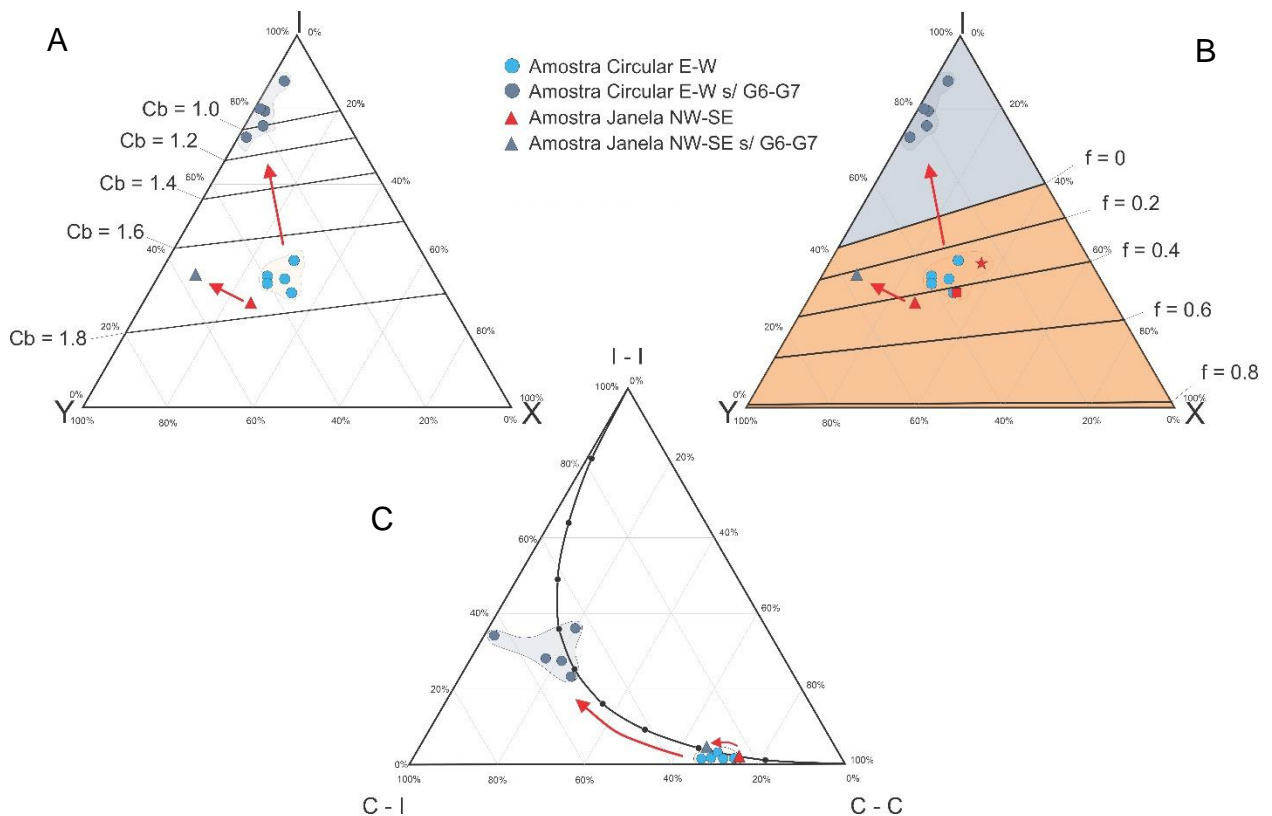


Figura 37. Diagramas ternários dos tipos de terminação e segmentos observados nas amostras da rede de fraturas do granito Cantareira, considerando os cenários com e sem os grupos G6 e G7. A - Diagrama ternário relacionando a proporção dos tipos de nós e o parâmetro C_b (Número de conexões por segmento). B - Diagrama ternário relacionando a proporção dos tipos de nós e o parâmetro f (Conectividade hidráulica). C - Diagrama ternário relacionando os tipos de segmentos de fraturas.

De forma geral, observa-se que para ambas as direções, há um aumento da proporção de nós do tipo I e redução de nós do tipo X. Conseqüentemente, há também um aumento da proporção de segmentos do tipo I-I e redução da conectividade (C_b e f), para ambos os casos. No entanto, tais variações são mais expressivas para o talude com direção E-W, passando de um grau de conectividade médio de $C_b = 1,73$ para $C_b = 0,88$ e conectividade hidráulica de $f \sim 0,35$ para $f = 0$, o que mostra que a rede de fraturas é desconectada e não apresenta a formação de cluster de abrangência, mas sim fraturas ou clusters isolados (Figura 9), dada a alta proporção de segmentos do tipo I-I. Por outro lado, para a direção NW-SE, o grau de conectividade passou de 1,79 para 1,70 e a conectividade hidráulica de $\sim 0,4$ para $\sim 0,2$, enquanto a proporção de segmentos do tipo I-C apresentou um ligeiro aumento, mostrando que, apesar da redução da conectividade do aquífero, a remoção dos grupos G6 e G7 apresenta pouca influência para a conectividade e para a formação de clusters de abrangência na direção NW-SE.

Estas diferenças são resultado do viés de orientação, uma vez que os grupos G6 e G7 apresentam direção N-S, sendo observados com maior frequência na parede com direção E-W do que na parede com direção NW-SE. Uma vez que a conectividade das fraturas influencia diretamente a permeabilidade do aquífero (Saevik & Nixon, 2019), tais observações sugerem que a baixa permeabilidade dos grupos G6 e G7 influi diretamente na conectividade da rede de fraturas e na anisotropia de fluxo para o aquífero.

6.3 Modelo Conceitual

Modelos Conceituais (MC), nas geociências, podem ser definidos como a síntese do conhecimento de uma determinada área ou fenômeno natural, adquirido a partir de dados de campo ou laboratório, podendo ser representado através de blocos diagrama ou em seções geológicas. Os MC são, em geral, predecessores à modelagem matemática de fluxo em rochas fraturadas, sendo comumente aplicados nas áreas de petróleo e gás (p.ex. Cavero et al. (2016), Miranda et al. (2018)), energia geotermal (p.ex. Vidal et al. (2019)), áreas contaminadas (p.ex. Parker et al. (2019), Hart et al. (2007) e (2021)) e hidrogeologia (p.ex. White (1999), Fernandes et al. (2016)).

Para o MC do Granito Cantareira na pedreira Morro Grande, foram selecionadas informações sobre os grupos de fraturas levantados, arranjo espacial e topologia da rede de fraturas e dos parâmetros hidráulicos obtidos em ensaios com obturador duplo.

A Figura 38 apresenta o processo de elaboração do MC em blocos diagramas. Destaca-se que tais modelos não apresentam uma escala definida. A inclusão das fraturas de cada grupo no bloco diagrama foi realizada separadamente, com o objetivo de representar o tipo de arranjo espacial observado para cada grupo. Após a inclusão de todos os grupos de fraturas, foi utilizado o *plugin NetworkGT* de Nyberg et al. (2017), para o programa QGIS, que possibilitou a representação da topologia observada na Figura 38. Desta forma, a representação da rede de fraturas em bloco diagrama incorpora todas as características do arranjo espacial das fraturas para o aquífero estudado.

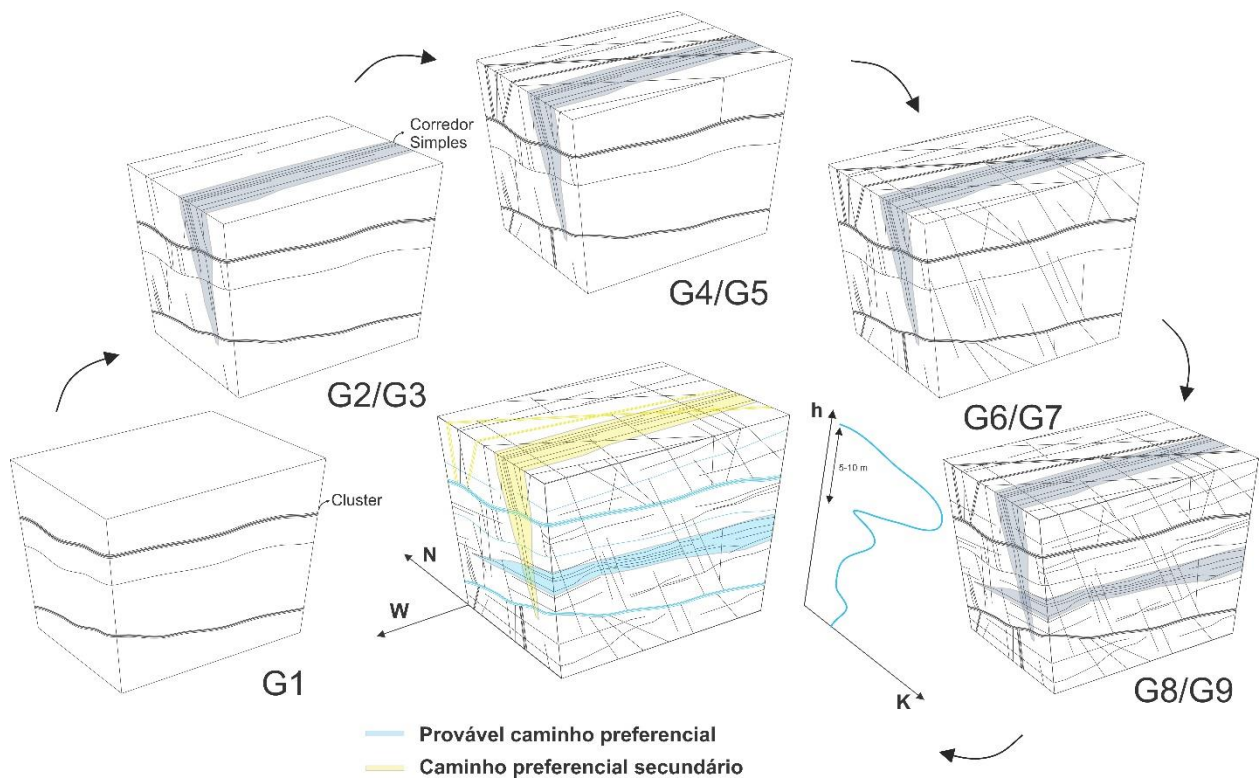


Figura 38. Representação em bloco diagrama do modelo conceitual do aquífero Cantareira na pedra Morro Grande.

Por último, incorporou-se ao bloco diagrama, as informações referentes aos parâmetros hidráulicos observados para o aquífero, destacando-se os caminhos preferenciais de fluxo mais ou menos prováveis, com base nos grupos de fraturas com maior transmissividade (G1 e G9) ou com transmissividade intermediária (G2/G3 e G4/G5) e com formação de clusters de fraturas (Figura 38). Destacou-se também, a relação da permeabilidade e sua anisotropia com relação à profundidade, conforme observado nos resultados dos ensaios hidráulicos (Figura 38), que mostram maior condutividade e abertura hidráulica nos 5-10 metros mais rasos do aquífero

Tais resultados sugerem a existência de fluxo no aquífero, especialmente para os 10 metros mais rasos, com predomínio de fluxo horizontal (Grupos G1 e G9), e de forma reduzida, para as profundidades observadas de até 60m. Além disso, destaca-se que os caminhos preferenciais secundários (Grupos G2/G3 e G4/G5), destacados na Figura 38, são importantes para o armazenamento de água, dada sua transmissividade e aberturas intermediárias e, provavelmente, para a recarga do aquífero.

7. CONCLUSÕES

Na área de estudo, localizada no domínio do granito Cantareira, na cidade de São Paulo, foram reconhecidos 9 grupos de fraturas, formados em campos de esforços de regimes tectônicos compressivos (G1 - esforço principal máximo σ_1 de direção NE; G8 e G9 - σ_1 WNW), e regimes tectônicos extensionais (G2 e G3 com extensão N-S, G4 e G5 relacionados a uma extensão com direção NE-SW e G5 e G7, com extensão E-W).

A caracterização do arranjo espacial de fraturas foi realizada em pelo menos um grupo de fraturas para cada evento deformacional reconhecido. Nenhum destes apresentou arranjo espacial uniforme. Os grupos 1, 4 e 5, apresentaram arranjo espacial das fraturas com formação de clusters e distribuição fractal, enquanto os grupos 2 e 9, apresentam arranjo espacial com formação de corredor de fraturas. Apenas o grupo 6 não apresentou arranjo espacial de fraturas em clusters, mas sim, distribuição aleatória. Os grupos G3, G7 e G8 não tiveram sua distribuição analisada devido ao baixo número de fraturas amostradas em uma mesma scanline.

A caracterização da topologia da rede fraturas foi realizada em ortofotos de alta resolução produzidas a partir de imagens de drone. Para ambas as direções, as proporções de terminações I, X e Y são similares, com $C_b \sim 1,70$ e $f \sim 0,4$, mostrando que a rede de fraturas apresenta boa conectividade, com formação de cluster de abrangência. No entanto, quando removidos os grupos 6 e 7, devido aos seus baixos valores de transmissividade, observa-se uma queda expressiva na conectividade hidráulica das fraturas para a direção E-W ($f = 0$), onde estes grupos ocorrem com maior frequência, e menor influência para a direção NW-SE ($f \sim 0,35$). Tal comportamento mostra a importância da caracterização da topologia da rede de fraturas em planos com diferentes direções, e da consideração de parâmetros hidráulicos obtidos para grupos de fraturas, como transmissividade e abertura hidráulica, para avaliação da conectividade de aquíferos fraturados.

Os resultados dos ensaios hidráulicos mostram que nos primeiros 10 metros de profundidade a partir do contato solo-rocha, há ocorrência de fraturas com maior transmissividade e abertura hidráulica. Os grupos de fraturas sub-horizontais G1 e G9, apresentam maior transmissividade ($10^{-5} - 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$) e abertura hidráulica ($\sim 15-$

20 μ m) enquanto os grupos 2, 3, 4 e 5 apresentam transmissividade ao redor de 10^{-5} cm²/s, e abertura hidráulica variando entre 5 - 15 μ m. Já os grupos 6 e 7 possuem os menores valores de transmissividade (10^{-6} cm²/s) e abertura hidráulica (4-10 μ m). Além disso, também são o grupo em que uma maior porcentagem de fraturas se mostrou sem fluxo.

O aprofundamento na análise dos dados coletados em afloramentos, com utilização de métodos inéditos para analisar a distribuição de espaçamentos e a conectividade, através do uso da topologia, permitiu uma representação mais realista do modelo conceitual 3D da rede de fraturas na área de estudo. Além disso, são indicados os possíveis caminhos de fluxo preferenciais e secundários, com base em dados de transmissividade de ensaios hidráulicos em sondagens. Tais caminhos ocorrem principalmente ao longo de fraturas de baixo mergulho, que apresentam maior transmissividade (grupos G1 e G9), e são mais notáveis em níveis mais rasos (até 10m de profundidade a partir do contato solo-rocha). Por outro lado, os grupos G2/G3 e G4/G5, são representados como caminhos preferenciais secundários, podendo ser importantes para a recarga do aquífero, devido aos seus mergulhos médios a altos.

REFERÊNCIAS

- Almeida, F.F.M., 1976, The System of Continental Rifts Bordering the Santos Basin, Brazil, *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 48, p. 15-26.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., 1977, As províncias estruturais brasileiras. In: *Sociedade Brasileira de Geologia, Simpósio de Geologia do Nordeste*, v. 8, Atas, p. 363-391.
- Assumpção, M., Dias, F.L., Zevallos, I., Naliboff, J.B., 2016, Intraplate stress field in South America from earthquake focal mechanisms. *Journal of South American Earth Sciences* v. 71, p. 278-295.
- Barabási, A.L., Albert, R., 1999, Emergence of scaling in random networks. *Science*, v. 286 p. 509-512.
- Barton, N., Choubey, V., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanical*, v. 12: 1-54.
- Barton, N., Quadros, E., 2014, Anisotropy is Everywhere, to See, to Measure, and to Model. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 48, p. 1323–1339.
- Barton, N., Bandis, S., Bakhtar, K., 1985, Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics*, v. 22, no. 3, p. 121-140.
- CEPAS-USP, 2016, Estudo hidrogeológico para o diagnóstico da disponibilidade hídrica subterrânea para abastecimento de água na Região Metropolitana de São Paulo. SABESP: Relatório Técnico (circulação restrita).
- Conicelli, B., 2014, Gestão das Águas Subterrâneas na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (SP). [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, p. 163.
- Dantas A.S.L. 1990. Geologia da Faixa São Roque e Intrusivas Associadas na Região entre São Paulo e Mairiporã, norte de São Paulo-SP. [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, p. 247.
- Dershowitz, W.S., Herda, H.H., 1992, Interpretation of fracture spacing and intensity, In Tillerson, J.R., Wawersik, W.R., (Eds.), *Proceedings of the 33rd U.S. Symposium on Rock Mechanics*, Balkema, Rotterdam, Sante Fe, New Mexico, p. 757-766.
- Fernandes, A.J., Perrotta, M.M., Salvador, E.D., Azevedo, S.G., Filho, A.G., Paulon, N., 2005, Potencial dos Aquíferos Fraturados do Estado de São Paulo: Condicionantes Geológicos, *Águas Subterrâneas*, v. 21 no. 1, p. 65-84.
- Fernandes, J.A., Fiume, B., Bertolo, R., Hirata, R.C.A., 2016, Modelo Geométrico de Fraturas e Análise da Tectônica Rúptil Aplicados ao Estudo do Fluxo do Aquífero Cristalino, São Paulo (SP), *Revista do Instituto de Geociências – USP*, v. 16, no. 3, p. 71-88.
- Fernandes, J.A., Fiume, B., Bertolo, R., Hirata, R.C.A., 2016, Modelo Geométrico de Fraturas e Análise da Tectônica Rúptil Aplicados ao Estudo do Fluxo do Aquífero

- Cristalino, São Paulo (SP), Revista do Instituto de Geociências – USP, v. 16, no. 3, p. 71-88.
- Fiume, B., 2013, Geologia Estrutural de Detalhe para Elaboração de Modelo Conceitual de Circulação de Água Subterrânea: Estudo de caso em Jurubatuba, SP. [Dissertação de Mestrado], São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, p. 167.
- Fiume, B., Fernandes, A.J., Barbosa, M.B., Hirata, R., Bertolo, R.A., 2020, Integrated application of geophysical loggings and fracture survey on rock exposures for identifying transmissive fractures in crystalline aquifer: a case study in the city of São Paulo. *Brazilian Journal of Geology*, v. 50 no. 1, p. 1-17.
- Gillespie, P., Howard, C.B., Walsh, J.J., Watterson, J., 1993, Measurement and characterization of spatial distributions of fracture. *Tectonophysics*, v. 226, p. 116-141.
- Grassberger, P., Procaccia, I., 1983, Measuring the strangeness of strange attractors. *Physica*, v. 9 p. 189-208.
- Hart, S.T., Sciulli, B.E., Cho, J., Alves, F.M., 2007, Conceptual Model of Tropically Weathered and Fractured Crystalline Bedrock and its Implications for In Situ Chemical Oxidation. In: NGWA Fractured Rock Conference. Proceedings, p. 357-369.
- Hasui, Y., 2010, A grande colisão pré-cambriana do sudeste brasileiro e a estruturação regional, *Geociências UNESP*, v. 29 no. 2, p. 141-169.
- Heilbron, M., Pedrosa-Soares, A.C., Carlos, L., Allard, R., Trouw, J., 2004, Província Mantiqueira. In: Mantesso-Neto, V, Bartorelli, A, Carneiro, C.D.R, Brito Neves, B.B. *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca, p. 203-234.
- Hennies, W.T., Hasui, Y., Penalva, F., 1967, O Falhamento Transcorrente de Taxaquara. In: Congresso Brasileiro de Geologia, n. 21, Curitiba. *Anais Curitiba, SBG* p. 159-168.
- Houlsby, A., 1976, Routine Interpretation of the Lugeon Water-Test. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, v. 9, p. 303-313.
- Kania, M., Szczech, M., 2020, Geometry and topology of tectonolineaments in the Gorce Mts. (Outer Carpathians) in Poland. *Journal of Structural Geology*, v. 141, p. 104-186.
- Konzuk, J.S., Kueper, B.H., 2004, Evaluation of cubic law-based models describing single-phase flow through a rough-walled fracture, *Water Resources Research*, v. 40, no. 2, p. 1–17.
- Kuiper, N.H., 1960, Tests concerning random points on a circle. *Mathematical Statistics*, v. 63, p. 38-47.
- Laubach, S.E., Lamarche, J., Gauthier, B.D.M., Dunne, W.M., Sanderson, D.J., 2018, Spatial arrangement of faults and opening-mode fractures. *Journal of Structural Geology*, v. 108, p. 2-15.

- Lee, C.H., Farmer, I., 1993, Fluid flow in discontinuous rock. London, Glasgow, New York, Tokyo, Melbourne, Madras: Chapman & Hall, p. 178.
- Lo, H.C., Chen, P.J., Chou, P.Y., Hsu, S.M., 2014, The combined use of heat-pulse flowmeter logging and packer testing for transmissive fracture recognition. *Journal of Applied Geophysics*, v. 105, p. 248–258.
- Manda, A.K., Mabee, S.B., Wise, D.U., 2008, Influence of rock fabric on fracture attribute distribution and implications for groundwater flow in the Nashoba Terrane, eastern Massachusetts. *Journal of Structural Geology*, v. 30 p. 464-477.
- Manzocchi, T., 2002, The connectivity of two-dimensional networks of spatially correlated fractures. *Water Resources Research*, v. 38, no. 9, p. 1162.
- Marret, R., Gale, J.F.W., Gómez, L.A., Laubach, A.E., 2018, Correlation analysis of fracture arrangement in space. *Journal of Structural Geology*, v. 108 p. 16-33.
- Mauldon, M., Dunne, W.M., Rohrbaugh, M.B., 2001, Circular scanlines and circular windows: new tools for characterizing the geometry of fracture traces. *Journal of Structural Geology*, v. 23, p. 247-258.
- Miranda, T.S., Santos, R.F., 2018, Quantifying aperture, spacing and fracture intensity in a carbonate reservoir analogue: Crato Formation, NE Brazil. *Marine & Petroleum Geology*, v. 97, p. 556–567.
- Morin, R.H., Savage, W.Z., 2003, Effects of crustal stresses on fluid transport in fractured rock: case studies from northeastern and southwestern USA. *Hydrogeology Journal*, v.11, no. 1, p. 100-112.
- Nixon, C.W., 2013, Analysis of fault networks and conjugate systems. [PhD Thesis], Southampton, University of Southampton, Ocean and Earth sciences, p. 251.
- Oda, M., 1985, Permeability tensor for discontinuous rock masses. *Géotechnique*, v. 35, no. 4, p. 483-495.
- Odling, N.E., Gillespie, P., Bourgine, B., Castaing, C., Chiles, J.P., Christensen, N.P., Fillion, E., Genter, A., Olsen, C., Thrane, L., Trice, R., Aarseth, E., Walsh, J.J., Watterson, J., 1999, Variations in fracture system geometry and their implications for fluid flow in fractures hydrocarbon reservoirs. *Petroleum Geoscience*, v. 5, p. 373-384.
- Perrota, M.M., 2005, Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:750.000. São Paulo, CPRM (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil).
- Petit, J.P., 1987, Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. *Journal of Structural Geology*, v. 9, no, 5, p. 597-608.
- Peyerl, W.R.L., Salamuni, E., Sanches, E., Nascimento, E.R., Santos, J.M., Gimenez, V.B., Silva, C.L., Farias, T.F.S., 2018, Reactivation of Taxaquara Fault and its morphotectonic influence on the evolution of Jordão River catchment, Paraná, Brasil. *Brazilian Journal of Geology*, v. 48, no. 3, p. 553-573.
- Pino, D.S., Roy, D.W., Rouleau, A., Fernandes, A.J., Bertolo, R.A., 2019, Linhas de Levantamento Estrutural: Correção do viés de orientação a partir de planilhas eletrônicas. *Revista do Instituto Geológico*, v. 40, no. 3, p. 40-74.

- Priest, S.D., 1993, Discontinuity analysis for rock engineering, London: Chapman & Hall, p. 473.
- Primaleon, L.P., McCaffrey, K.J.W., Holdsworth, R.E., 2020, Fracture attribute and topology characteristics of a geothermal reservoir: Southern Negros, Philippines. *Journal of the Geological Society*, v. 177, p. 1092-1106.
- Procter, A., Sanderson, D.J., 2018, Spatial and layer-controlled variability in fracture networks. *Journal of Structural Geology*, v. 108, p. 52-65.
- Quinn, P.M., Cherry, J.A., Parker, B.L., 2011, Quantification of non-Darcian flow observed during packer testing in fractured sedimentary rock. *Water Resources Research*, v. 47, p. 1- 15.
- Quiñones-Rozo, C.P.E., 2010, Lugeon Test Interpretation, Revisited. In: *Colaborative Management of Integrated Watershed 30th Annual USSD Conference*. Sacramento, p. 405-414.
- Ribeiro, B.V., Faleiros, F.M., Campanha, G.A.C., Lagoeiro, L., Weinberg, R.F., Hunter, N.J.R., 2019, Kinematics, nature of deformation and tectonic setting of the Taxaquara Shear Zone, a major transpressional zone of the Ribeira Belt (SE Brazil). *Tectonophysics* v. 751, p. 83–108.
- Riccomini, C., 1989, O Rift Continental do Sudeste do Brasil. [Tese de Doutorado], São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, p. 256.
- Riccomini, C., Modenesi-Gauttieri, M., Ferrari, A.L., Hiruma, S.T., Sant'anna, L.G., 2000, Origin and evolution of the continental rift of Southeastern Brazil. In: *IUGS, International Geological Congress, Rio de Janeiro, Post-Congress Field Trip Guides*, p. 37.
- Riccomini, C., Sant'anna, L.G., Ferrari, A.L., 2004, Evolução Geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: *Mantesso-Neto, V, Bartorelli, A, Carneiro, C.D.R, Brito Neves, B.B. Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca, p. 383-405.
- Rives, T., Razack, M., Petit, J.P., Rawsley, K.D., 1992, Joint spacing: analogue and numerical simulations. *Journal of Structural Geology*, v. 14, no. 8/9, p. 925–937.
- Rohrbaugh, M.B., Dunne, W.M., Mauldon, M., 2002, Estimating fracture trace intensity, density, and mean length using circular scan lines and windows. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 86, no. 12, p. 2089-2104.
- Sadowski, G.R., 1991, A megafalha de Cubatão no sudeste Brasileiro, São Paulo, *Boletim do Instituto de Geociências–USP*, v. 22, p. 15-28.
- Saevik, P.N., Nixon, C.W., 2017, Inclusion of topological measurements into analytic estimates of effective permeability in fractured media. *Water Resources Research*, v. 53, p. 9424–9443.
- Sanderson, D.J., Nixon, C.W., 2015, The use of topology in fracture network characterization. *Journal of Structural Geology*, v. 72, p. 55-66.
- Sanderson, D.J., Peacock, D.C.P., 2019, Line sampling of fracture swarms and corridors. *Journal of Structural Geology*. V. 122, p. 27–37.

- Singhal, B.B.S., Gupta, R.P., 2010, Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. 2 Ed., New York, Springer, p.429.
- Snow, D.T., 1968, Rock fracture spacings, openings and porosities. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, v. 94, p. 73-91.
- Stephens, M.A., 1970, Use of the Kolmogorov-Smirnov, Cramér-Von Mises and Related Statistics Without Extensive Tables. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, v. 32, no. 1, p. 115-122.
- Surette, M., Allen, D.M., Journeay, M., 2007, Regional evaluation of hydraulic properties in variably fractured rock using a hydrostructural domain approach. *Hydrogeology Journal*, v. 16, p. 11–30.
- Terzaghi, R.D., 1965, Sources of error in joint surveys. *Géotechnique*, v. 15, no. 3, p. 287-304.
- Vaskou, P., Quadros, E.F., Kanji, M.A. Johnson, T., Ekmekci, M., 2019, ISRM Suggested Method for the Lugeon Test. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 52, p. 4155-4174.
- Wang, T.T., Zhan, S.S., Huang, T.H., 2015, Determining transmissivity of fracture sets with statistical significance using single-borehole hydraulic tests: Methodology and implementation at Heshe well site in central Taiwan. *Journal of Engineering Geology*, v. 198, p. 1–15.
- Watkins, H., Bond, C.E., Healy, D., Butler, R.W.H., 2015, Appraisal of fracture sampling methods and a new workflow to characterize heterogeneous fracture networks at outcrop. *Journal of Structural Geology*, v. 72, p. 67-82.
- White, W.B., 1999, Conceptual models for karstic aquifers, in Palmer, A.N., Palmer, M.V., and Sasowsky, I.D., eds., *Karst Modeling*. Karst Waters Institute Special Publication, Charles Town, West Virginia, no. 5, p. 11–16.
- Williams, J.H. Johnson, C.D., 2004, Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies. *Journal of Applied Geophysics*, v. 55, p. 151-159.
- Wu, H., Pollard, D.D., 1995, An experimental study of the relationship between joint spacing and layer thickness. *Journal of Structural Geology*, v. 17, p.887-905.
- Zhan, S.S., Wang, T.T., Huang, T.H., 2016, Variations of hydraulic conductivity of fracture sets and fractured rock mass with test scale: Case study at Heshe well site in Central Taiwan. *Journal of Engineering Geology*, v. 206, p. 94–106.

ANEXO I - Dados Estruturais

Tabela 11. Ficha de mapeamento utilizada para a scanline 1. N: Número da amostra, P0: Posição ao longo da scanline. Rmerg: Rumo do mergulho, Merg: Mergulho, MergEs: Mergulho da estria, CaiEs: Caimento da estria, Tipo: Tipo de estrutura, Zona(Esp, N): Zona de fraturas com espessura (Esp) e quantidade de fraturas (N), Comp.: Comprimento da fratura, Forma: Forma do plano da fratura, Rug: Rugosidade (JRC), Alt: Alteração do plano, Preenchimento: Preenchimento da fratura, Água: Surgência ou não de água, Vegetação: Ocorrência ou não de vegetação, Obs: Observação.

Ficha de Mapeamento											Coordenadas									
Local:	Pedreira Morro Grande		Autor:	Saulo Gobbo Menezes			Data:	11/09/2019		Direção Talude:	N135/06		Geográfica		UTM (23K)					
SL:	1 (39m)		Litologia:	Biotita Granito de cor cinza e estrutura maciça, localmente com foliação protomilonítica, textura média/grossa e cristais euédricos, composto por feldspato, quartzo, biotita, anfibólio/piroxênio? e óxidos.							Início	Geográfica		UTM (23K)		Final	Geográfica		UTM (23K)	
N	P0 (m)	Rmerg	Merg	MergEs	CaiEs	Tipo	Zona (Esp, N)		Comp.	Forma	Rug	Alt	Preen.	Água	Vegetação	Obs				
1	Paralela	53	65	27	130	Fa	-	-	39	Pl	5	Sã	-	N	N					
2	29.7	165	70	-	-	ZF	4.3	6	1.5-5.0	Pl	6	Sã	-	N	N					
3	30.4	165	70	-	-	ZF			1.5-5.0	Pl	6	Sã	-	N	N					
4	31.1	165	70	-	-	ZF			1.5-5.0	Pl	6	Sã	-	N	N					
5	31.9	165	70	-	-	ZF			1.5-5.0	Pl	6	Sã	-	N	N					
6	32.6	165	70	-	-	ZF			1.5-5.0	Pl	6	Sã	-	N	N					
7	34	165	70	-	-	ZF			1.5-5.0	Pl	6	Sã	-	N	N					
8	35.5	100	85	-	-	ZF	3	5	>6	Pl	4	Sã	-	N	N					
9	36.1	100	85	-	-	ZF			>6	Pl	4	Sã	-	N	N					
10	36.7	100	85	-	-	ZF			>6	Pl	4	Sã	-	N	N					
11	37.3	100	85	-	-	ZF			>6	Pl	4	Sã	-	N	N					
12	38.5	100	85	-	-	ZF			>6	Pl	4	Sã	-	N	N					
13	37	138	38	-	-	Ft	-	-	1.5	Pl	3	Sã	-	N	N					
14	39	165	80	-	-	ZF	0.6	2	3	Pl	6	Sã	-	N	N					
15	39.6	165	80	-	-	ZF			3	Pl	6	Sã	-	N	N					

Tabela 12. Ficha de mapeamento utilizada para a scanline 2. N: Número da amostra, P0: Posição ao longo da scanline. Rmerg: Rumo do mergulho, Merg: Mergulho, MergEs: Mergulho da estria, CaiEs: Caimento da estria, Tipo: Tipo de estrutura, Zona(Esp, N): Zona de fraturas com espessura (Esp) e quantidade de fraturas (N), Comp.: Comprimento da fratura, Forma: Forma do plano da fratura, Rug: Rugosidade (JRC), Alt: Alteração do plano, Preenchimento: Preenchimento da fratura, Água: Surgência ou não de água, Vegetação: Ocorrência ou não de vegetação, Obs: Observação.

Ficha de Mapeamento										Coordenadas da Scanline								
Local:	Pedreira Morro Grande		Autor:	Saulo Gobbo Menezes			Data:	11/09/2019		Direção Talude:	N130/8		Início	Geográfica	UTM (23K)	Final	Geográfica	UTM (23K)
SL:	2 (23m)		Litologia:	Biotita Granito de cor cinza e estrutura maciça, localmente com foliação protomilonítica, textura média/grossa e cristais euédricos, composto por feldspato, quartzo, biotita, anfibólio/piroxênio? e óxidos.						Início	Latitude	-23.465066 325665		Final	Latitude	-23.465215 325678		
N	P0 (m)	Rmerg	Merg	MergEs	CaiEs	Tipo	Zona (Esp, N)		Comp.	Forma	Rug	Alt	Preen.	Água	Vegetação	Obs		
1	23	64	26	-	-	Fa	-	-	<20	On	3	Sã	-	N	S			
2	0	170	65	-	-	ZFt	7.3	4	3	Pl	3	Sã	-	-	-			
3	1.8	170	65	-	-	ZFt			3	Pl	3	Sã	-	-	-			
4	3.7	170	65	-	-	ZFt			3	Pl	3	Sã	-	-	-			
5	7.3	170	65	-	-	ZFt			3	Pl	3	Sã	-	-	-			
6	14	45	55	-	-	Ft	-	-	10	On	3	Sã	-	-	-			
7	14	167	52	-	-	Ft	-	-	1.5	Pl	8	Sã	-	-	-			
8	15	167	52	-	-	Ft	-	-	1.5	Pl	8	Sã	-	-	-			
9	18	165	54	-	-	ZFt	3	4	2.5	Pl	3	Ds	-	-	S			
10	18.8	165	54	-	-	ZFt			2.5	Pl	3	Ds	-	-	S			
11	19.5	165	54	-	-	ZFt			2.5	Pl	3	Ds	-	-	S			
12	21	165	54	-	-	Ft			2.5	Pl	3	Ds	-	-	S			
13	19	60	30	-	-	Fa	-	-	40	On	3	Ds	-	-	S			

Tabela 13. Ficha de mapeamento utilizada para a scanline 3. N: Número da amostra, P0: Posição ao longo da scanline. Rmeg: Rumo do mergulho, Merg: Mergulho, MergEs: Mergulho da estria, CaiEs: Caimento da estria, Tipo: Tipo de estrutura, Zona(Esp, N): Zona de fraturas com espessura (Esp) e quantidade de fraturas (N), Comp.: Comprimento da fratura, Forma: Forma do plano da fratura, Rug: Rugosidade (JRC), Alt: Alteração do plano, Preenchimento: Preenchimento da fratura, Água: Surgência ou não de água, Vegetação: Ocorrência ou não de vegetação, Obs: Observação.

Ficha de Mapeamento										Coordenadas								
Local:	Pedreira Morro Grande		Autor:	Saulo Gobbo Menezes			Data:	11/09/2019		Direção Talude:	N150/3		Início	Geográfica	UTM (23K)	Final	Geográfica	UTM (23K)
SL:	3 (22m)		Litologia:	Biotita Granito de cor cinza e estrutura maciça, localmente com foliação protomilonítica, textura média/grossa e cristais euédricos, composto por feldspato, quartzo, biotita, anfibólio/piroxênio? e óxidos.						Início	Latitude	-23.465211 325690		Final	Latitude	-23.465388 325708		
N	P0 (m)	Rmerg	Merg	MergEs	CaiEs	Tipo	Zona (Esp, N)		Comp.	Forma	Rug	Alt	Preen.	Água	Vegetação	Obs		
Longitude	-46.706616 7403946		Longitude	-46.706442 7403926														
1	2	30	14	24	35	ZFa	-	-	>20	PI	2	Ds	-	-	S			
2	1	90	75	5	0	Fa	-	-	>10	PI	2	Sã	-	-	S			
3	8	101	85	-	-	Fa	-	-	>10	PI	2	Sã	-	-	-			
4	8	115	31	-	-	Ft	-	-	2	PI	2	Sã	-	-	S			
5	8	85	50	-	-	Ft	-	-	1	PI	2	Sã	-	-	-			
6	11	60	70	-	-	Ft	-	-	5	PI	2	Sã	-	-	-			
7	20	80	65	19	350	Fa	-	-	>8	On	3	Sã	Fv	-	-			
8	21	104	36	-	-	Ft	-	-	3	PI	3	Sã	-	-	-			
9	19	165	60	-	-	Ft	-	-	4	On	3	Sã	Ox	-	S			

Tabela 14. Ficha de mapeamento utilizada para a scanline 4. N: Número da amostra, P0: Posição ao longo da scanline. Rmeg: Rumo do mergulho, Merg: Mergulho, MergEs: Mergulho da estria, CaiEs: Caimento da estria, Tipo: Tipo de estrutura, Zona(Esp, N): Zona de fraturas com espessura (Esp) e quantidade de fraturas (N), Comp.: Comprimento da fratura, Forma: Forma do plano da fratura, Rug: Rugosidade (JRC), Alt: Alteração do plano, Preenchimento: Preenchimento da fratura, Água: Surgência ou não de água, Vegetação: Ocorrência ou não de vegetação, Obs: Observação.

Ficha de Mapeamento										Coordenadas								
Local:	Pedreira Morro Grande		Autor:	Saulo Gobbo Menezes			Data:	12/09/2019		Direção Talude:	N130/00		Início	Geográfica	UTM (23K)	Final	Geográfica	UTM (23K)
SL:	4 (35m)		Litologia:	Biotita Granito de cor cinza e estrutura maciça, localmente com foliação protomilonítica, textura média/grossa e cristais euédricos, composto por feldspato, quartzo, biotita, anfibólio/piroxênio? e óxidos.						Início	Latitude	-23.465553 325700		Final	Latitude	-23.465763 325729		
N	P0 (m)	Rmerg	Merg	MergEs	CaiEs	Tipo	Zona (Esp, N)		Comp.	Forma	Rug	Alt	Preen.	Água	Vegetação	Obs		
Longitude	-46.706529 7403908		Longitude	-46.706241 7403885														
1	1	70	55	-	-	Ft	-	-	>15	PI	2	Sã	Fv	-	S			
2	3	193	70	25	110	Fa	-	-	>15	PI	3	Ds	Ox	-	-			
3	5	84	65	25	0	ZFa	5	5	>15	PI	2	Sã	Fv	-	-			
4	6	84	65	25	0	ZFa	-	-	>15	PI	2	Sã	Fv	-	-			
5	7	84	65	25	0	ZFa	-	-	>15	PI	2	Sã	Fv	-	-			
6	8	84	65	25	0	ZFa	-	-	>15	PI	2	Sã	Fv	-	-			
7	9	84	65	25	0	ZFa	-	-	>15	PI	2	Sã	Fv	-	-			
8	10	84	65	25	0	Fa	-	-	>15	PI	2	Sã	Fv	-	-			
9	15	135	48	-	-	Ft	-	-	1.5	PI	6	Sã	Fv	-	-			
10	16	157	88	-	-	ZFt	5.4	4	>10	PI	6	Sã	Fv	-	S			
11	17.35	157	88	-	-	ZFt	-	-	>10	PI	6	Sã	Fv	-	-			
12	18.7	157	88	-	-	ZFt	-	-	>10	PI	6	Sã	Fv	-	-			
13	21.4	157	88	-	-	ZFt	-	-	>10	PI	6	Sã	Fv	-	-			
14	18.5	81	50	18	155	ZFa	5.5	3	>15	PI	2	Sã	Fv	-	S			
15	20	81	50	18	155	ZFa	-	-	>15	PI	2	Sã	Fv	-	-			
16	23	81	50	18	155	ZFa	-	-	>15	PI	2	Sã	Fv	-	-			
17	22	205	31	-	-	Ft	-	-	2	On	6	Sã	-	-	S			
18	24	165	72	-	-	Ft	-	-	2	PI	4	Sã	Fv	-	-			
19	29.5	80	50	25	10	Fa	-	-	>15	PI	2	Sã	Fv	-	S			
20	31	180	88	-	-	Ft	-	-	>10	PI	6	Sã	-	-	-			
21	35	80	88	-	-	Ft	0.3	10	5	PI	-	Ox	-	-	-			

Tabela 15. Ficha de mapeamento utilizada para a scanline 5. N: Número da amostra, P0: Posição ao longo da scanline. Rmerg: Rumo do mergulho, Merg: Mergulho, MergEs: Mergulho da estria, CaiEs: Caimento da estria, Tipo: Tipo de estrutura, Zona(Esp, N): Zona de fraturas com espessura (Esp) e quantidade de fraturas (N), Comp.: Comprimento da fratura, Forma: Forma do plano da fratura, Rug: Rugosidade (JRC), Alt: Alteração do plano, Preenchimento: Preenchimento da fratura, Água: Surgência ou não de água, Vegetação: Ocorrência ou não de vegetação, Obs: Observação.

Ficha de Mapeamento										Coordenadas											
Local:	Pedreira Morro Grande		Autor:	Saulo Gobbo Menezes			Data:	12/09/2019		Direção Talude:	N090/00		Geográfica		UTM (23K)						
SL:	5 (33m)		Litologia:	Biotita Granito de cor cinza e estrutura maciça, localmente com foliação protomilonítica, textura média/grossa e cristais euédricos, composto por feldspato, quartzo, biotita, anfibólio/piroxênio? e óxidos.						Início	Latitude	-23.465715		325764		Final	Latitude	-23.465699		325797	
N	P0 (m)	Rmerg	Merg	MergEs	CaiEs	Tipo	Zona (Esp, N)		Comp.	Forma	Rug	Alt	Preen.	Água	Vegetação	Obs					
Longitude	-46.705902		Longitude	-46.705584		7403891		7403893													
1	0.5	100	85	15	180	ZFa	5	4	6	PI	2	Ds	Fv	-	-						
2	1	100	85	15	180	Fa	-	-	6	PI	2	Ds	Fv	-	-						
3	3.5	100	85	15	180	Fa	-	-	6	PI	2	Ds	Fv	-	-						
4	5	100	85	15	180	Fa	-	-	6	PI	2	Ds	Fv	-	-						
5	5.2	345	85	-	-	Ft	-	-	2	PI	3	Ds	-	-	-						
6	6.3	30	85	17	310	Fa	-	-	2	PI	5	Ds	Fv	-	-						
7	9	82	78	-	-	ZFt	3.3	3	3	PI	3	Sã	Fv	-	-						
8	11.7	82	78	-	-	Ft	-	-	3	PI	3	Sã	Fv	-	-						
9	12.3	82	78	-	-	Ft	-	-	3	PI	3	Sã	Fv	-	-						
10	7	288	55	-	-	Ft	-	-	1	PI	3	Sã	Fv	-	-						
11	15.3	38	68	18	315	Fa	-	-	2	PI	4	Sã	Fv	-	-						
12	17	172	85	-	-	Ft	-	-	2	PI	3	Sã	Fv	-	-						
13	19.6	95	70	-	-	ZFt-Veio	3.4	4	>10	PI	6	Sã	Fv	-	-						
14	20.5	95	70	-	-	Veio	-	-	>10	PI	6	Sã	Fv	-	-						
15	21.3	95	70	-	-	Veio	-	-	>10	PI	6	Sã	Fv	-	-						
16	23	95	70	-	-	Veio	-	-	>10	PI	6	Sã	Fv	-	-						
17	25	205	80	-	-	Ft	-	-	>10	On	3	Ds	Fv	-	-						
18	30	84	60	-	-	ZFt	1.5	3	>10	PI	3	Sã	Fv	-	-						
19	29.3	43	70	-	-	Ft	-	-	1	PI	5	Sã	Fv	-	-						
20	32	333	85	-	-	Ft	-	-	>10	On	6	Ds	-	-	-						

Tabela 16. Ficha de mapeamento utilizada para a scanline 6. N: Número da amostra, P0: Posição ao longo da scanline. Rmerg: Rumo do mergulho, Merg: Mergulho, MergEs: Mergulho da estria, CaiEs: Caimento da estria, Tipo: Tipo de estrutura, Zona(Esp, N): Zona de fraturas com espessura (Esp) e quantidade de fraturas (N), Comp.: Comprimento da fratura, Forma: Forma do plano da fratura, Rug: Rugosidade (JRC), Alt: Alteração do plano, Preenchimento: Preenchimento da fratura, Água: Surgência ou não de água, Vegetação: Ocorrência ou não de vegetação, Obs: Observação.

Ficha de Mapeamento										Coordenadas								
Local:	Pedreira Morro Grande		Autor:	Saulo Gobbo Menezes			Data:	12/09/2019		Direção Talude:	N260/00		Início	Geográfica	UTM (23K)	Final	Geográfica	UTM (23K)
SL:	6 (34m)		Litologia:	Biotita Granito de cor cinza e estrutura maciça, localmente com foliação protomilonítica, textura média/grossa e cristais euédricos, composto por feldspato, quartzo, biotita, anfibólio/piroxênio? e óxidos.						Início	Latitude	-23.465718 325800		Final	Latitude	-23.46567 325636		
N	P0 (m)	Rmerg	Merg	MergEs	CaiEs	Tipo	Zona (Esp, N)		Comp.	Forma	Rug	Alt	Preen.	Água	Vegetação	Obs		
Longitude	-46.705551		Longitude	-46.705198		7403891		7403896										
1	5.7	48	80	-	-	Ft	-	-	>10	On	6	Ds	-	-	S			
2	10	70	65	-	-	Ft	2	3	1.5	Pl	5	Ds	Ox	-	-			
3	10.7	70	65	-	-	Ft	-	-	1.5	Pl	5	Ds	Ox	-	-			
4	12	70	65	-	-	Ft	-	-	1.5	Pl	5	Ds	Ox	-	-			
5	10.5	312	28	-	-	Ft	-	-	>10	Pl	6	Sã	-	-	-			
6	13	85	70	-	-	Ft	9.5	5	>10	Pl	3	Ds	Fb	-	S			
7	16	85	70	-	-	Ft	-	-	>10	Pl	3	Ds	Fb	-	S			
8	17.3	85	70	-	-	Ft	-	-	>10	Pl	3	Ds	Fb	-	S			
9	19.2	85	70	-	-	Ft	-	-	>10	Pl	3	Ds	Fb	-	S			
10	22.5	85	70	-	-	Ft	-	-	>10	Pl	3	Ds	Fb	-	S			
11	17.4	339	80	-	-	Ft	-	-	1.5	Pl	4	Sã	-	-	-			
12	24.8	315	65	-	-	Ft	-	-	4	Pl	6	Sã	Fb	-	-			

Tabela 17. Ficha de mapeamento utilizada para a scanline 7. N: Número da amostra, P0: Posição ao longo da scanline. Rmerg: Rumo do mergulho, Merg: Mergulho, MergEs: Mergulho da estria, CaiEs: Caimento da estria, Tipo: Tipo de estrutura, Zona(Esp, N): Zona de fraturas com espessura (Esp) e quantidade de fraturas (N), Comp.: Comprimento da fratura, Forma: Forma do plano da fratura, Rug: Rugosidade (JRC), Alt: Alteração do plano, Preenchimento: Preenchimento da fratura, Água: Surgência ou não de água, Vegetação: Ocorrência ou não de vegetação, Obs: Observação.

Ficha de Mapeamento										Coordenadas									
Local:	Pedreira Morro Grande		Autor:	Saulo Gobbo Menezes			Data:	13/09/2019		Direção Talude:	N054/00		Geográfica		UTM (23K)				
SL:	7 (36m)		Litologia:	Biotita Granito de cor cinza e estrutura maciça, localmente com foliação protomilonítica, textura média/grossa e cristais euédricos, composto por feldspato, quartzo, biotita, anfibólio/piroxênio? e óxidos.						Início	Geográfica		UTM (23K)		Final	Geográfica		UTM (23K)	
N	P0 (m)	Rmerg	Merg	MergEs	CaiEs	Tipo	Zona (Esp, N)		Comp.	Forma	Rug	Alt	Preen.	Água	Vegetação	Obs			
1	1.7	195	40	-	-	Ft	-	-	<10	On	3	-	-	-	-				
2	0.6	80	70	-	-	ZFt	2.8	2	>10	Pl	3	Sã	Fe	-	-				
3	2.8	80	70	-	-	ZFt	-	-	>10	Pl	3	Sã	Fe	-	-				
4	7	89	90	5	180	Fa	-	-	2	Pl	3	Sã	Fe	-	-				
5	7	344	10	-	-	Ft	-	-	>10	On	5	Ds	-	-	-				
6	9	288	24	-	-	Ft	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
7	14	78	81	12	168	Fa	-	-	>10	Pl	3	Sã	Su?	-	-				
8	13.5	182	85	-	-	Ft	-	-	2	Pl	5	Sã	-	-	-				
9	20	35	48	-	-	Fa	-	-	>10	Pl	4	Sã	-	-	-				
10	20	290	35	-	-	Ft	-	-	>10	On	5	Sã	-	-	-				
11	27	265	40	-	-	Ft	-	-	5	On	5	Sã	-	-	-				
		326	35	Ondulação no mesmo plano															
12	32.8	252	18	-	-	Ft	-	-	2	On	4	Sã	-	-	-				
13	34	64	34	-	-	Fa	-	-	>10	Pl	3	Sã	Su?	-	-				
14	31.7	240	32	-	-	Ft	-	-	>10	On	6	Sã	-	-	-				

Tabela 18. Tabela de dados de perfilagem ótica fornecidos para a sondagem mista SM-7154.

Filmado em: 19/01/2015		FURO 7154		Características	
Nº	PROFUNDIDADE (m)	Inclinação do furo: 0º		ESPESSURA (mm)	PERCOLAÇÃO D'ÁGUA
		AZIMUTE	MERGULHO		
96	22.73	316.89	24.17	0	Oxidação
95	22.75	326.61	23.1	2.58	Oxidação
94	22.76	335.69	25.49	1.61	Oxidação
93	22.77	12.32	15.23	1.16	Oxidação
92	23.21	339.98	20.84	3.12	Oxidação
91	23.23	341.11	21.47	1.09	Oxidação
90	23.24	347.39	22.93	1.08	Oxidação
89	23.53	16.31	17.9	1.12	Ausente
88	23.54	44.77	16.25	1.14	Ausente
87	23.77	205.61	55.08	0	Oxidação
86	23.8	199.2	53.68	0	Oxidação
85	23.82	199.21	53.11	0	Oxidação
84	23.99	191.79	21.57	0	Ausente
83	24.46	280.94	10.93	0	Ausente
82	24.94	342.24	20.12	0	Ausente
81	25.01	147.46	52.69	0	Oxidação
80	25.06	145.18	48.25	0	Oxidação
79	25.21	177.51	77.72	0	Ausente
78	25.26	180.04	76.88	0	Ausente
77	25.45	184.78	71.51	0	Oxidação
76	25.52	180.24	62.92	2.64	Oxidação
75	25.52	196.74	70.02	2.37	Oxidação
74	25.6	178.94	84.59	3.09	Oxidação
73	26.17	352.09	69.41	0.44	Oxidação
72	26.2	189.85	74.98	1.9	Oxidação
71	26.34	221.24	74.89	0.74	Ausente
70	26.6	201.42	70.27	1.74	Ausente
69	27.08	177.29	87.18	2.82	Oxidação
68	27.42	169.5	66.78	0.95	Oxidação
67	28.51	96.44	50.1	0	Oxidação
66	28.84	347.53	57.68	0	Oxidação
65	29.13	34.03	69.39	2.24	Oxidação
64	29.2	37.27	68.31	2.35	Oxidação
63	29.23	273.38	45.9	0	Oxidação
62	29.23	41.67	67.33	2.11	Oxidação
61	29.26	42.76	66.13	1.79	Oxidação
60	29.3	172.45	57.21	0	Oxidação
59	29.33	35.44	71.16	0	Ausente
58	30	49.08	71.3	1.29	Oxidação
57	30.02	51.04	67.23	2.18	Oxidação
56	30.34	24.48	28.53	3.75	Ausente
55	30.36	246.74	45.7	0	Ausente
54	30.42	225.66	48.49	1.37	Ausente
53	30.42	48.86	70.01	16.62	Ausente
52	30.66	116.2	69.72	0.95	Oxidação
51	30.67	130.71	56.41	1.83	Oxidação
50	30.81	58.64	64.13	2.52	Ausente
49	30.86	24.33	52.89	1.34	Ausente
48	30.87	3.96	34.89	1.88	Ausente
47	30.98	51.56	57.77	1.83	Oxidação
46	31.1	55.42	75.64	0.68	Ausente
45	31.16	52.45	66.83	1.77	Ausente
44	31.38	28.92	66.11	0	Ausente
43	31.45	109.85	64.5	0	Oxidação
42	31.61	123.85	54.28	0	Ausente
41	31.81	238.94	38.15	2.39	Oxidação
40	32.08	184.67	61.21	1.62	Oxidação
39	32.1	185.29	61.03	1.63	Oxidação
38	32.11	187.53	62.09	1.58	Oxidação
37	32.72	288.32	43.43	0	Ausente
36	33.31	129.49	54.47	1.88	Ausente
35	34.17	156.06	54.54	2.55	Ausente
34	35.69	15.34	42.19	0	Ausente
33	36.42	292.83	53.39	0	Ausente
32	38.15	181.69	52.8	0	Ausente
31	39.66	188.87	62.69	0	Ausente
30	46.16	22.15	35.77	0	Ausente
29	46.38	334.1	20.33	0	Ausente
28	46.47	157.63	27.67	0	Ausente
27	55.12	153.81	77.82	0	Oxidação
26	55.53	356.82	68.47	0	Oxidação
25	55.69	18.5	38.23	22.15	Oxidação
24	55.87	266.67	62.16	0	Oxidação
23	56.32	94.46	64.28	0	Oxidação
22	56.52	300.06	60.08	0	Oxidação
21	56.66	305.46	50.36	4.08	Oxidação
20	56.7	303.59	52.39	9.41	Oxidação
19	56.72	305.24	53.93	4.11	Oxidação
18	56.89	320.77	70.14	0	Oxidação
17	57.28	260.34	38.84	3.48	Oxidação
16	57.36	296.52	53.24	0	Oxidação
15	57.4	298.7	59.37	5.4	Oxidação
14	57.55	20.3	51.8	24.47	Oxidação
13	57.65	32.57	65.69	3.34	Oxidação
12	58.79	22.23	43.68	8.23	Oxidação
11	59.2	337.46	68.93	0	Oxidação
10	59.54	308.21	68.64	5.03	Oxidação
9	59.62	324.43	66.96	7.35	Oxidação
8	59.84	309.72	67.94	0	Oxidação
7	60.39	288.41	42.77	0	Ausente
6	66.63	295.07	14.84	0	Ausente
5	69.8	39.63	26.36	0	Ausente
4	71.13	280.7	30.25	2.55	Ausente
3	71.72	37.5	56.63	11.15	Ausente
2	75.01	102.51	69.37	0	Ausente
1	80.03	3	72.83	14.52	Ausente

Tabela 19. Tabela de dados de perfilagem ótica fornecidos para a sondagem mista SM-7157.

Filmado em: 27/11/2015		FURO 7157		Características	
		Inclinação do furo: 0°			
Nº	PROFUNDIDADE (m)	AZIMUTE	MERGULHO	ESPESSURA (mm)	PERCOLAÇÃO D'ÁGUA
107	21.89	45.42	52.74	74.18	Oxidação
106	21.97	43.41	49.46	2	Oxidação
105	21.99	44.93	42.33	3.18	Oxidação
104	22.01	43.38	42.75	2.71	Oxidação
103	22.03	55.64	42.06	1.22	Oxidação
102	22.08	46.22	43.16	1.34	Oxidação
101	22.12	56.05	41.42	2.59	Oxidação
100	22.15	68.27	69.59	0.81	Oxidação
99	22.9	64.26	9.19	1.19	Oxidação
98	22.91	51.92	6.95	1.19	Oxidação
97	23.06	111.19	1.95	284.4	Oxidação
96	23.47	222.13	33.05	0	Ausente
95	25.5	346.01	7.12	0	Ausente
94	26.39	302	36.16	0	Ausente
93	29.56	144.99	20.56	0.57	Ausente
92	29.86	178.61	10.8	1.18	Oxidação
91	30.02	81.39	5.18	1.2	Oxidação
90	30.03	159.45	7.88	0.6	Oxidação
89	30.09	180.12	36.64	0.49	Oxidação
88	30.24	341.93	62.03	5.23	Oxidação
87	30.49	289.67	63.06	1.04	Ausente
86	32.4	38.1	60.67	0	Ausente
85	32.46	351.1	60.99	0	Ausente
84	32.61	354.52	71.75	0	Ausente
83	32.73	158.33	56.53	0	Ausente
82	32.82	45.18	53.75	0	Ausente
81	33.36	47.4	69.63	0	Ausente
80	33.93	27.51	67.72	0	Ausente
79	34.5	120.51	71.55	0	Ausente
78	35.24	10.39	62.22	1.08	Ausente
77	36.2	350.16	76.69	4.04	Ausente
76	36.81	3	64.42	2.24	Ausente
75	39.46	86.64	74.32	0	Ausente
74	41.08	37.29	46.07	0.00	Ausente
73	42.33	324.33	40.9	0.00	Ausente
72	42.97	179.08	28.44	0	Ausente
71	43.43	235.58	44.62	0	Ausente
70	46.12	249.43	57.43	0	Ausente
69	46.58	235.92	38.67	0	Ausente
68	47.82	230.48	16.38	0	Ausente
67	48.2	340.23	19.47	1.12	Ausente
66	49.47	295.47	15.33	1.15	Ausente
65	49.57	327.46	3.23	1.19	Ausente
64	49.83	27.34	78.09	0	Ausente
63	49.9	48.55	37.32	11.33	Ausente
62	50.03	72.29	32.35	3.07	Ausente
61	50.17	7.27	74.76	0	Ausente
60	50.18	202.67	42.34	0	Ausente
59	54.03	84.65	45.06	13.53	Ausente
58	54.69	116.07	21.34	1.69	Ausente
57	55.25	15.11	65.86	1.33	Oxidação
56	55.44	14.3	67.54	0	Oxidação
55	56.09	144.12	71.61	3.05	Ausente
54	56.64	184.18	53.93	1.1	Oxidação
53	56.71	178.98	53.09	0.74	Oxidação
52	58	197.09	47.47	1.24	Ausente
51	58.1	12.67	69.02	0.41	Ausente
50	58.18	44.16	65.38	0.74	Ausente
49	58.37	332.83	29.65	0	Ausente
48	59	43.5	35.61	0	Ausente
47	59.04	27.23	31.54	0	Ausente
46	59.97	53.62	37.78	1.89	Ausente
45	60.87	205.43	38.27	0	Ausente
44	62.64	167.87	51.77	1.41	Ausente
43	63.36	6.9	60.26	0.86	Oxidação
42	63.37	355.46	59.88	0.58	Oxidação
41	63.5	5.32	63.4	17.94	Oxidação
40	64.92	55.49	45.88	1.25	Ausente
39	65.34	36.61	57.86	5.57	Ausente
38	66.91	269.59	24.44	0	Ausente
37	67.29	175.14	32.08	0	Ausente
36	67.55	250.78	35.59	0	Ausente
35	67.6	74.3	57.3	4.49	Ausente
34	67.85	133.77	45.24	0	Ausente
33	68.14	73.39	41.57	3.62	Ausente
32	68.21	20.82	71.93	1.2	Ausente
31	68.33	14.03	70.97	0.56	Ausente
30	68.88	148.05	60.16	2.48	Ausente
29	69.09	141.34	61.13	0	Ausente
28	69.29	27.16	82.44	0.82	Ausente
27	69.34	93.99	39.17	2.83	Ausente
26	69.5	179.68	44.53	0	Ausente
25	69.91	189.53	51.14	1.15	Ausente
24	70.17	254.11	60.13	12.3	Ausente
23	70.72	24.11	84.07	0	Ausente
22	70.77	302.11	21.68	0	Ausente
21	71.3	96.43	33.36	0	Ausente
20	71.81	284.62	30.61	1.02	Oxidação
19	72.75	43.15	45.67	0	Ausente
18	73.45	156.17	14.53	0.58	Oxidação
17	73.49	57.07	35.01	1.48	Oxidação
16	73.56	232.9	22.1	0	Oxidação
15	73.62	75.19	82	0.7	Oxidação
14	73.71	12.39	25.12	0	Oxidação
13	75.11	14.8	33.26	0	Ausente
12	75.91	54.1	35.61	3.26	Ausente
11	76.01	55.74	46.06	0	Ausente
10	76.4	187.68	45.87	1.27	Ausente
9	77.33	255.57	68.76	2.44	Ausente
8	77.48	270.58	41.31	0	Ausente
7	77.66	304.61	32.73	0	Ausente
6	77.72	292.45	38.06	0	Ausente
5	77.91	117.22	54.74	1.08	Oxidação
4	78.57	190.7	48	1.22	Oxidação
3	79.12	186.49	83.78	0.33	Oxidação
2	79.67	29.43	74.16	0	Oxidação
1	79.99	238.45	71.37	0	Oxidação

Tabela 20. Tabela de dados de perfilagem ótica fornecidos para a sondagem mista SM-7171.

Filmado em: 22/03/2016		FURO 7171		Características	
		Inclinação do furo: 30º			
NÚMERO	PROFUNDIDADE (m)	AZIMUTE	MERGULHO	ESPESSURA (mm)	PERCOLAÇÃO D'ÁGUA
50	24.84	152	23	3.71	Oxidado
49	24.86	148	25	5.16	Oxidado
48	24.88	128	28	4.85	Oxidado
47	24.91	118	25	4.16	Oxidado
46	24.96	124	16	27.17	Oxidado
45	25.00	124	16	4.37	Oxidado
44	25.02	135	20	6.13	Oxidado
43	25.07	139	22	10.91	Oxidado
42	25.11	139	25	8.8	Oxidado
41	25.14	160	20	10.91	Oxidado
40	25.19	144	26	5.02	Oxidado
39	25.25	129	24	16.37	Oxidado
38	25.28	133	19	5.45	Oxidado
37	25.30	129	20	3.47	Oxidado
36	25.32	136	22	4.99	Oxidado
35	25.35	151	26	2.31	Oxidado
34	25.39	165	27	3.35	Oxidado
33	25.44	154	29	4.26	Oxidado
32	25.48	159	27	3.82	Oxidado
31	25.49	149	23	5.83	Oxidado
30	25.52	139	29	4.72	Oxidado
29	25.56	138	25	5.64	Oxidado
28	25.59	128	26	3.39	Oxidado
27	25.61	139	24	5.97	Oxidado
26	25.66	147	27	5.04	Oxidado
25	25.69	148	25	5.7	Oxidado
24	25.72	158	24	4.11	Oxidado
23	25.74	153	22	3.52	Oxidado
22	28.16	165	80	1.5	Oxidado
21	28.31	260	33	2.22	Oxidado
20	31.33	252	29	17.68	Oxidado
19	31.71	295	27	11.32	Oxidado
18	43.29	83	39	0	Ausente
17	44.98	72	36	0	Ausente
16	45.42	73	38	0	Ausente
15	45.42	71	42	0	Ausente
14	46.04	347	82	3.44	Oxidado
13	49.05	87	57	0	Ausente
12	52.34	281	47	0	Ausente
11	53.96	222	34	12.78	Oxidado
10	61.37	82	45	0	Ausente
9	61.85	149	60	0	Ausente
8	64.91	75	39	0	Ausente
7	66.61	84	40	0	Ausente
6	66.61	88	37	0	Ausente
5	73.75	111	44	0	Ausente
4	73.92	85	40	0	Ausente
3	79.01	213	25	1.74	Oxidado
2	79.01	216	25	0	Oxidado
1	79.58	89	44	0	Ausente

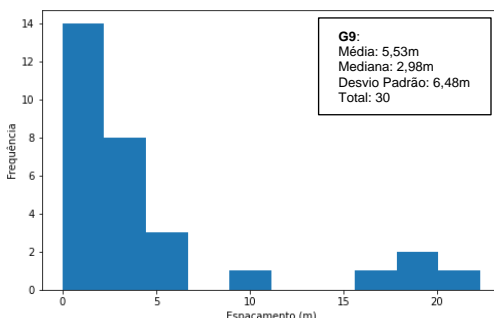
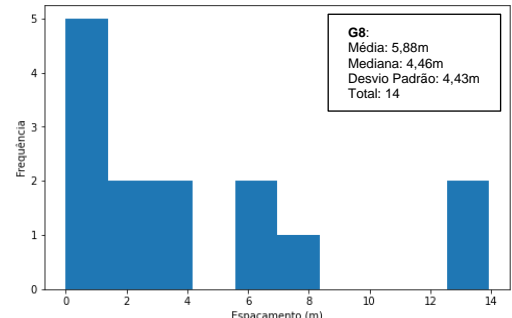
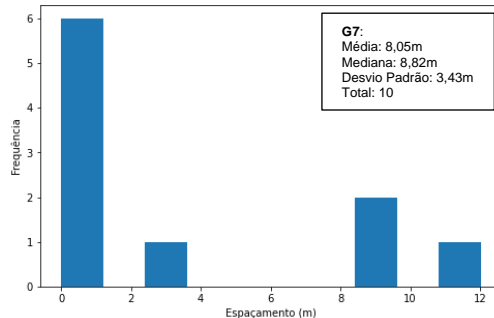
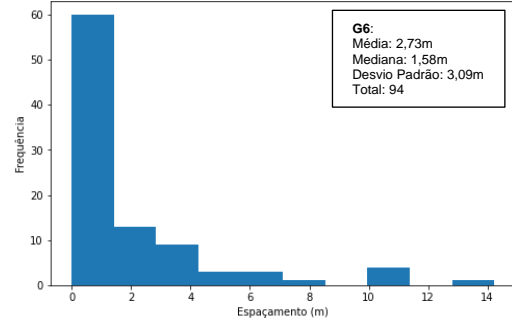
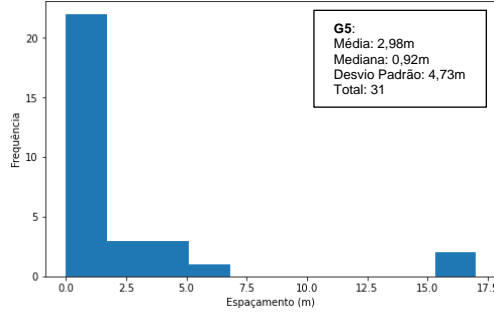
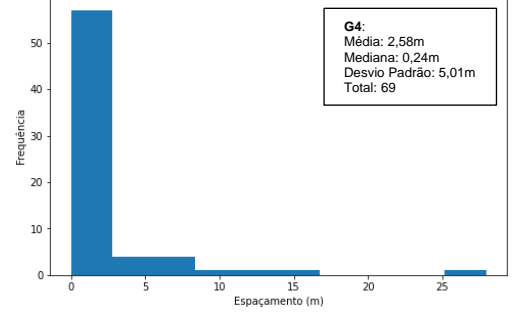
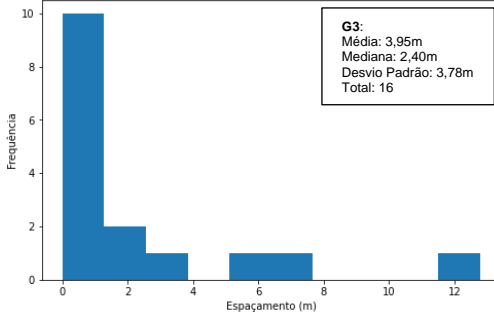
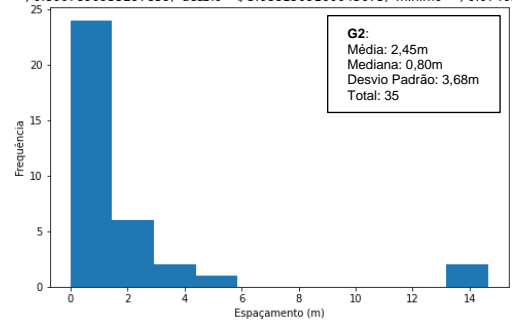
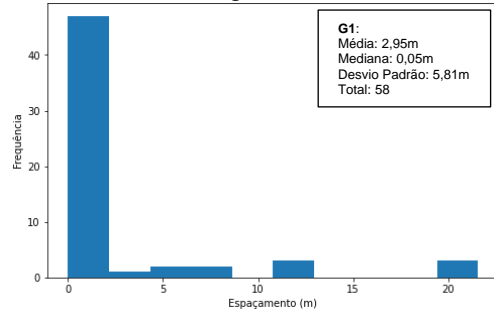
Tabela 21. Tabela de dados de perfilagem ótica fornecidos para a sondagem mista SM-7178.

Filmado em: 19/11/2015		FURO 7178		Características	
Nº	PROFUNDIDADE (m)	Inclinação do furo: 0º		ESPESSURA (mm)	PERCOLAÇÃO D'ÁGUA
		AZIMUTE	MERGULHO		
72	14.11	67	27	2.13	Oxidação
71	14.13	68	31	2.04	Oxidação
70	14.15	62	35	4.22	Oxidação
69	14.18	59	38	1.93	Oxidação
68	14.19	59	38	1.93	Oxidação
67	14.21	65	41	1.87	Oxidação
66	14.24	55	38	1.92	Oxidação
65	14.25	57	38	1.92	Oxidação
64	14.26	53	41	1.86	Oxidação
63	14.28	50	37	4.2	Oxidação
62	14.3	44	37	10.87	Oxidação
61	14.34	47	38	8.5	Oxidação
60	14.37	43	34	3.87	Oxidação
59	14.4	44	22	3.71	Oxidação
58	14.43	37	16	3.8	Oxidação
57	14.46	25	18	2.86	Oxidação
56	14.94	199	2	1.8	Oxidação
55	15.47	24	14	22.44	Oxidação
54	15.49	95	15	5.6	Oxidação
53	15.53	79	16	5.56	Oxidação
52	15.55	36	9	1.77	Oxidação
51	15.56	56	10	3.33	Oxidação
50	15.59	52	8	9.88	Oxidação
49	15.62	57	6	26.82	Oxidação
48	15.65	52	6	2.98	Oxidação
47	18.23	123	36	1.46	Ausente
46	18.74	211	23	0.93	Oxidação
45	18.98	9	27	2.2	Oxidação
44	19	1	27	2.57	Oxidação
43	19.02	3	29	2.08	Oxidação
42	19.04	7	33	8.82	Oxidação
41	19.04	5	25	4.87	Oxidação
40	19.06	8	25	6.46	Oxidação
39	19.08	0	27	1.06	Oxidação
38	19.12	11	31	4.89	Oxidação
37	19.16	11	31	2.87	Oxidação
36	19.18	15	29	6.07	Oxidação
35	19.22	25	31	6.46	Oxidação
34	19.25	22	32	7.89	Oxidação
33	19.28	19	29	8.14	Oxidação
32	19.31	22	31	3.9	Oxidação
31	19.35	20	34	3.76	Oxidação
30	20.98	39	34	4.44	Oxidação
29	22.32	131	46	7.41	Ausente
28	29.09	14	30	0	Ausente
27	30.34	284	87	0	Ausente
26	30.62	108	32	27.49	Ausente
25	35.13	6	10	8.22	Ausente
24	36	219	25	0	Ausente
23	43.96	16	62	3.99	Ausente
22	45.54	87	63	0.55	Ausente
21	45.98	189	45	0	Ausente
20	46.36	31	7	0	Ausente
19	46.55	128	29	0	Ausente
18	48.53	72	58	0	Ausente
17	49.34	106	44	17.22	Ausente
16	49.99	93	54	14.01	Ausente
15	54.14	103	50	14.58	Ausente
14	54.54	23	70	1.09	Oxidação
13	55.17	84	10	1.57	Oxidação
12	55.19	97	24	2.18	Oxidação
11	55.2	95	10	1.77	Oxidação
10	62.34	129	10	0	Ausente
9	62.79	108	38	0	Ausente
8	64.11	127	13	0	Ausente
7	64.3	108	28	0	Ausente
6	64.75	194	25	0	Oxidação
5	65.29	344	38	0	Ausente
4	66.68	121	26	0	Ausente
3	67.65	262	7	0	Ausente
2	69.12	17	24	0	Ausente
1	70.46	161	51	0	Ausente

Tabela 22. Tabela de dados de perfilagem ótica fornecidos para a sondagem mista SM-7187.

Filmado em: 15/04/2016		FURO 7187		Características	
NÚMERO	PROFUNDIDADE (m)	Inclinação do furo: 20º		ESPESSURA (mm)	PERCOLAÇÃO D'ÁGUA
		AZIMUTE	MERGULHO		
53	26.37	41	84	0	Ausente
52	26.69	63	77	0	Ausente
51	27.27	94	18	0	Ausente
50	28.09	121	67	0	Ausente
49	29.10	160	75	0	Ausente
48	30.31	135	63	0	Ausente
47	30.52	127	73	0	Ausente
46	31.56	103	85	0	Ausente
45	31.78	97	76	0	Ausente
44	32.04	130	73	0	Ausente
43	33.21	156	74	0	Ausente
42	33.51	150	72	2.49	Ausente
41	34.85	200	65	0	Ausente
40	35.05	208	71	0	Ausente
39	35.97	98	80	0	Ausente
38	36.24	103	82	0	Ausente
37	37.69	164	64	0	Ausente
36	37.99	154	24	1.59	Oxidação
35	38.01	152	24	1.6	Oxidação
34	38.02	158	24	2.39	Oxidação
33	38.06	162	29	2.36	Oxidação
32	38.07	164	30	2.35	Oxidação
31	38.09	164	29	2.36	Oxidação
30	38.10	168	31	2.33	Oxidação
29	38.11	166	32	2.33	Oxidação
28	38.12	174	29	1.56	Oxidação
27	38.14	180	26	24.46	Oxidação
26	38.17	159	32	1.95	Oxidação
25	38.18	153	32	1.95	Oxidação
24	38.22	163	34	1.93	Oxidação
23	38.23	158	35	2.7	Oxidação
22	38.24	158	35	1.55	Oxidação
21	38.25	157	33	1.95	Oxidação
20	38.25	154	34	2.38	Oxidação
19	38.30	312	41	2.3	Oxidação
18	38.34	154	31	1.57	Oxidação
17	38.49	154	89	0.58	Oxidação
16	39.12	130	78	0	Ausente
15	39.26	146	81	1.56	Oxidação
14	40.10	54	60	0	Ausente
13	40.18	114	82	0	Ausente
12	40.93	89	69	0	Ausente
11	41.29	102	64	0	Ausente
10	41.40	105	62	0	Ausente
9	41.88	101	65	0	Ausente
8	42.07	136	60	0	Ausente
7	42.49	141	72	0	Ausente
6	42.78	143	77	0	Ausente
5	43.09	338	42	0	Ausente
4	46.17	78	45	0	Ausente
3	46.51	280	40	0	Ausente
2	49.07	316	42	0	Ausente
1	49.37	14	34	0	Ausente

Tabela 23. Histogramas de todos os espaçamentos reais de cada grupo de fratura.



1

2

3

4

5

6 **ANEXO II - Dados de Ensaio Hidráulicos**

7

8

9

10

Tabela 25. Dados de ensaios hidráulicos com obturador duplo na sondagem mista SM-7157. As linhas pintadas de amarelo são referentes a ensaios que apresentaram amarelo, mas que não foi observado ocorrência de fraturas na perfilagem ótica no mesmo trecho ensaiado, sugerindo ocorrência de vazamento entre os obturadores. Tais resultados não foram utilizados nas análises.

Scanline	Ensaio Número	Estágio	Início	Final	Dímetro	Incl. C. Vertical	Cosemo	Alt. Fomom. (m)	NA (m)	Estágio de Carga Carga (Kg/cm2)	Vazio médio (m/m)	Trecho (m)	Carga Col. Apus (Kg/cm2)	Perda de carga (kg/cm2)	Vazão Específica (kg/cm2)	Carga Efectiva (kg/cm2)	K (cm/s)	T (cm/2s)	Lugem (LU)	Comportamento	K (cm/s)	T (cm/2s)	Lugem (LU)	Abertura Hidráulica (µm)	n	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	
SM-7157	1	1	24	27.25	0.0992	0	1	0.8	18.05	0	3.25	26.425	0	0.000	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Impermeável															

Tabela 26. Dados de ensaios hidráulicos com obturador duplo na sondagem mista SM-7171. As linhas pintadas de amarelo são referentes à ensaios que apresentaram fluxo, mas que não foi observado ocorrência de fraturas na perfilagem ótica no mesmo trecho ensaiado, sugerindo ocorrência de vazamento entre os obturadores. Tais resultados não foram utilizados nas análises.

Scanline	Ensaio Número	Estágio	Início	Final	Diâmetro	Incl. C. Vertical	Coseno	Alt. Manom (m)	NA. (m)	Estágio de Carga (Kg/cm2)	Vazão m³/min	Trecho (m)	Carga Estática (Kg/cm2)	Perda de carga (kg/cm2)	Vazão Específica (l/min)	Carga Elétrica (Kw)	K (cm/s)	T (cm2/s)	Lugões (LU)	Comportamento	K (cm/s)	T (cm2/s)	Lugões (LU)	Abertura Hidráulica (µm)	n	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9				
SM-7171	1	1	26,70	29,80	0,0992	30	0,8660	0,70	21,00	0,100	33,70	3,10	28,95	0,00	10,881	2,995	3,57E-04	1,23E-03	37,05	Lavagem																		
SM-7171	1	2	26,70	29,80	0,0992	30	0,8660	0,70	21,00	0,100	30,58	14,10	21,70	0,00	11,000	5,228	2,07E-04	7,13E-04	21,46	Lavagem																		
SM-7171	1	3	26,70	29,80	0,0992	30	0,8660	0,70	21,00	0,118	53,10	3,10	21,70	0,01	17,139	8,276	2,04E-04	7,01E-04	21,12	Lavagem																		
SM-7171	1	4	26,70	29,80	0,0992	30	0,8660	0,70	21,00	0,089	38,80	3,10	21,70	0,00	12,532	5,228	3,36E-04	8,12E-04	24,44	Lavagem																		
SM-7171	1	5	26,70	29,80	0,0992	30	0,8660	0,70	21,00	0,100	34,25	3,10	21,70	0,00	11,048	2,270	4,78E-04	1,65E-03	49,63	Lavagem	3,57E-04	1,23E-03	37,05	42	2	1												1
SM-7171	2	1	29,80	32,85	0,0992	30	0,8660	0,70	26,70	0,100	5,370	3,05	27,40	0,03	1,761	2,810	6,13E-05	2,08E-04	6,39	Preenchimento																		
SM-7171	2	2	29,80	32,85	0,0992	30	0,8660	0,70	26,70	0,388	60,070	3,05	27,40	0,04	19,695	6,088	3,17E-04	1,07E-03	32,99	Preenchimento																		
SM-7171	2	3	29,80	32,85	0,0992	30	0,8660	0,70	26,70	6,775	87,900	3,05	27,40	0,16	38,554	9,355	2,99E-04	1,05E-03	23,12	Preenchimento																		
SM-7171	2	4	29,80	32,85	0,0992	30	0,8660	0,70	26,70	3,388	20,780	3,05	27,40	0,06	6,813	6,068	1,10E-04	3,72E-04	13,45	Preenchimento																		
SM-7171	2	5	29,80	32,85	0,0992	30	0,8660	0,70	26,70	0,100	0,000	3,05	27,40	0,03	0,000	0,000	1,00E-12	1,00E-12	0,00	Preenchimento	6,13E-05	2,08E-04	6,39	23	2													2
SM-7171	3	1	32,85	35,85	0,0992	30	0,8660	0,70	26,70	0,100	8,370	3,00	27,40	0,00	2,790	2,840	9,57E-05	3,19E-04	10,02	Dilatação																		
SM-7171	3	2	32,85	35,85	0,0992	30	0,8660	0,70	26,70	3,718	11,210	3,00	27,40	0,00	3,737	6,458	5,64E-05	1,88E-04	5,90	Dilatação																		
SM-7171	3	3	32,85	35,85	0,0992	30	0,8660	0,70	26,70	7,436	16,610	3,00	27,40	0,02	18,677	10,156	1,76E-04	5,58E-04	18,75	Dilatação																		
SM-7171	3	4	32,85	35,85	0,0992	30	0,8660	0,70	26,70	3,718	6,400	3,00	27,40	0,00	2,133	6,458	3,22E-05	1,07E-04	3,37	Dilatação																		
SM-7171	3	5	32,85	35,85	0,0992	30	0,8660	0,70	26,70	0,100	0,000	3,00	27,40	0,00	0,000	0,000	1,00E-12	1,00E-12	0,00	Dilatação	9,57E-05	3,19E-04	10,02	0	0													
SM-7171	4	1	35,85	38,90	0,0992	30	0,8660	0,70	21,70	0,100	0,000	3,05	22,40	0,00	0,000	0,000	1,00E-12	1,00E-12	0,00	Laminar																		
SM-7171	4	2	35,85	38,90	0,0992	30	0,8660	0,70	21,70	0,405	0,000	3,05	22,40	0,00	0,111	6,285	2,04E-04	6,93E-05	0,21	Laminar																		
SM-7171	4	3	35,85	38,90	0,0992	30	0,8660	0,70	21,70	8,089	0,560	3,05	22,40	0,00	0,184	10,329	1,74E-04	5,90E-06	0,18	Laminar																		
SM-7171	4	4	35,85	38,90	0,0992	30	0,8660	0,70	21,70	0,405	0,520	3,05	22,40	0,00	0,170	6,285	2,65E-04	9,00E-06	0,28	Laminar																		
SM-7171	4	5	35,85	38,90	0,0992	30	0,8660	0,70	21,70	0,100	0,000	3,05	22,40	0,00	0,000	0,000	1,00E-12	1,00E-12	0,00	Laminar	1,29E-06	4,37E-06	0,13	0	0													
SM-7171	5	1	38,90	42,30	0,0992	30	0,8660	0,70	23,00	0,100	0,400	3,40	23,70	0,00	0,000	0,000	1,00E-12	1,00E-12	0,00	Anômalo																		
SM-7171	5	2	38,90	42,30	0,0992	30	0,8660	0,70	23,00	4,394	0,460	3,40	23,70	0,00	0,135	6,764	2,01E-04	7,60E-06	0,20	Anômalo																		
SM-7171	5	3	38,90	42,30	0,0992	30	0,8660	0,70	23,00	8,789	0,200	3,40	23,70	0,00	0,059	11,159	5,31E-07	2,00E-06	0,05	Anômalo																		
SM-7171	5	4	38,90	42,30	0,0992	30	0,8660	0,70	23,00	4,394	0,400	3,40	23,70	0,00	0,118	6,764	1,75E-04	6,60E-06	0,18	Anômalo																		
SM-7171	5	5	38,90	42,30	0,0992	30	0,8660	0,70	23,00	0,100	0,000	3,40	23,70	0,00	0,000	0,000	1,00E-12	1,00E-12	0,00	Anômalo																		
SM-7171	6	1	42,30	45,35	0,0992	30	0,8660	0,70	23,00	0,100	0,000	3,05	23,70	0,00	0,000	0,000	1,00E-12	1,00E-12	0,00	Laminar																		
SM-7171	6	2	42,30	45,35	0,0992	30	0,8660	0,70	23,00	4,744	0,520	3,05	23,70	0,00	0,170	7,114	2,34E-04	7,95E-06	0,24	Laminar																		
SM-7171	6	3	42,30	45,35	0,0992	30	0,8660	0,70	23,00	9,488	1,170	3,05	23,70	0,00	0,384	11,858	3,17E-04	1,07E-05	0,33	Laminar																		
SM-7171	6	4	42,30	45,35	0,0992	30	0,8660	0,70	23,00	4,744	0,750	3,05	23,70	0,00	0,246	7,114	3,88E-04	1,15E-05	0,35	Laminar																		
SM-7171	6	5	42,30	45,35	0,0992	30	0,8660	0,70	23,00	0,100	0,000	3,05	23,70	0,00	0,000	0,000	1,00E-12	1,00E-12	0,00	Laminar																		
SM-7171	7	1	45,35	48,40	0,0992	30	0,8660	0,70	22,55	0,100	0,000	3,05	23,05	0,00	0,000	0,405	1,33E-04	4,52E-09	0,00	Laminar	1,93E-06	6,56E-06	0,20	7	2													
SM-7171	7	2	45,35	48,40	0,0992	30	0,8660	0,70	22,55	5,074	0,240	3,05	23,05	0,00	0,079	7,379	1,04E-04	3,54E-06	0,11	Laminar																		
SM-7171	7	3	45,35	48,40	0,0992	30	0,8660	0,70	22,55	10,148	0,480	3,05	23,05	0,00	0,157	12,453	1,34E-04	4,19E-06	0,13	Laminar																		
SM-7171	7	4	45,35	48,40	0,0992	30	0,8660	0,70	22,55	5,074	0,000	3,05	23,05	0,00	0,000	0,000	1,00E-12	1,00E-12	0,00	Laminar																		
SM-7171	8	1	48,40	51,50	0,0992	30	0,8660	0,70	23,00	0,100	0,000	3,10	23,70	0,00	0,000	0,000	1,00E-12	1,00E-12	0,00	Impermevel	4,56E-07	1,55E-06	0,05	4	3	1												
SM-7171	8	2	48,40	51,50	0,0992	30	0,8660	0,70	23,00	5,407	0,000	3,10	23,70	0,00	0,000	0,000	1,00E-12	1,00E-12	0,00	Impermevel																		
SM-7171	8	3	48,40	51,50	0,0992	30	0,8660	0,70	23,00	0,841	1,440	3,10	23,70	0,00	0,465	13,211	3,46E-04	1,19E-05	0,36	Impermevel																		

Tabela 28. Dados de ensaios hidráulicos com obturador duplo na sondagem mista SM-7187.

Scanline	Ensaio Numero	Estágio	Início	Final	Diâmetro	Incl. C. Vertical	Coseno	Alt. Manom. (m)	NA. (m)	Estágio de Carga (kg/cm ²)	Vazão médio (l/min)	Trecho (m)	Carga Col. Água (kg/cm ²)	Perda de carga (kg/cm ²)	Coeficiente Específico	Carga Efetiva (kg/cm ²)	K (cm/s)	T (cm ² /s)	Lugem (LU)	Comportamento	K (cm/s)	T (cm ² /s)	Lugem (LU)	Abertura Hidráulica (µm)	n	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9				
SM-7187	1	1	25.85	30.25	0.0992	20	0.9397	0.7	21.3	0.1	0	4.4	28.75	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Andarado																		
SM-7187	1	2	25.85	30.25	0.0992	20	0.9397	0.7	21.3	3.295	0.34	4.4	22	0	0.077	5.495	1.51E-06	7.33E-06	0.14	Andarado																		
SM-7187	1	3	25.85	30.25	0.0992	20	0.9397	0.7	21.3	6.59	0.16	4.4	22	0	0.036	8.790	4.45E-07	2.16E-06	0.04	Andarado																		
SM-7187	1	4	25.85	30.25	0.0992	20	0.9397	0.7	21.3	3.295	0.36	4.4	22	0	0.082	5.495	1.4E-06	7.76E-06	0.15	Andarado																		
SM-7187	1	5	25.85	30.25	0.0992	20	0.9397	0.7	21.3	0.1	0	4.4	22	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Andarado																		
SM-7187	2	1	30.25	33.3	0.0992	20	0.9397	0.7	21.3	0.1	0	3.05	22	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Impermeável																		
SM-7187	2	2	30.25	33.3	0.0992	20	0.9397	0.7	21.3	3.733	0	3.05	22	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Impermeável																		
SM-7187	2	3	30.25	33.3	0.0992	20	0.9397	0.7	21.3	7.457	0	3.05	22	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Impermeável																		
SM-7187	2	4	30.25	33.3	0.0992	20	0.9397	0.7	21.3	3.733	0	3.05	22	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Impermeável																		
SM-7187	2	5	30.25	33.3	0.0992	20	0.9397	0.7	21.3	0.1	0	3.05	22	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Impermeável	1E-12	1E-12	0.00	0	2									1	1			
SM-7187	3	1	33.3	36.35	0.0992	20	0.9397	0.7	21.65	0.1	0	3.05	22.35	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Impermeável																		
SM-7187	3	2	33.3	36.35	0.0992	20	0.9397	0.7	21.65	4.091	0	3.05	22.35	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Impermeável																		
SM-7187	3	3	33.3	36.35	0.0992	20	0.9397	0.7	21.65	8.183	1.38	3.05	22.35	0	0.452	10.418	4.25E-06	1.44E-05	0.44	Impermeável																		
SM-7187	3	4	33.3	36.35	0.0992	20	0.9397	0.7	21.65	4.091	0	3.05	22.35	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Impermeável																		
SM-7187	3	5	33.3	36.35	0.0992	20	0.9397	0.7	21.65	0.1	0	3.05	22.35	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Impermeável	1E-12	1E-12	0.00	0	1	1												
SM-7187	4	1	36.35	39.35	0.0992	20	0.9397	0.7	19.8	0.1	0	3	20.5	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Dilatação																		
SM-7187	4	2	36.35	39.35	0.0992	20	0.9397	0.7	19.8	4.447	1.47	3	20.5	0	0.490	6.497	7.35E-06	2.45E-05	0.77	Dilatação																		
SM-7187	4	3	36.35	39.35	0.0992	20	0.9397	0.7	19.8	8.894	6.76	3	20.5	0.02	2.253	10.924	2.01E-05	8.71E-05	2.10	Dilatação																		
SM-7187	4	4	36.35	39.35	0.0992	20	0.9397	0.7	19.8	4.447	0	3	20.5	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Dilatação																		
SM-7187	4	5	36.35	39.35	0.0992	20	0.9397	0.7	19.8	0.1	0	3	20.5	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Dilatação	1E-12	1E-12	0.00	0	0													
SM-7187	5	1	39.35	42.35	0.0992	20	0.9397	0.7	19.8	0.1	0	3	20.5	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Dilatação																		
SM-7187	5	2	39.35	42.35	0.0992	20	0.9397	0.7	19.8	4.799	1.39	3	20.5	0	0.463	6.849	6.9E-06	2.2E-05	0.69	Dilatação																		
SM-7187	5	3	39.35	42.35	0.0992	20	0.9397	0.7	19.8	9.599	2.48	3	20.5	0	0.827	11.649	6.91E-06	2.31E-05	0.72	Dilatação																		
SM-7187	5	4	39.35	42.35	0.0992	20	0.9397	0.7	19.8	4.799	0	3	20.5	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Dilatação																		
SM-7187	5	5	39.35	42.35	0.0992	20	0.9397	0.7	19.8	0.1	0	3	20.5	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Dilatação	1E-12	1E-12	0.00	0	0													
SM-7187	6	1	42.35	45.4	0.0992	20	0.9397	0.7	22.4	0.1	0	3.05	23.1	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Impermeável																		
SM-7187	6	2	42.35	45.4	0.0992	20	0.9397	0.7	22.4	5.155	0	3.05	23.1	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Impermeável																		
SM-7187	6	3	42.35	45.4	0.0992	20	0.9397	0.7	22.4	10.31	0	3.05	23.1	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Impermeável																		
SM-7187	6	4	42.35	45.4	0.0992	20	0.9397	0.7	22.4	5.155	0	3.05	23.1	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Impermeável																		
SM-7187	6	5	42.35	45.4	0.0992	20	0.9397	0.7	22.4	0.1	0	3.05	23.1	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Impermeável	1E-12	1E-12	0.00	0	1													
SM-7187	7	1	45.4	48.45	0.0992	20	0.9397	0.7	22.4	0.1	0	3.05	23.1	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Impermeável																		
SM-7187	7	2	45.4	48.45	0.0992	20	0.9397	0.7	22.4	5.513	0	3.05	23.1	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Impermeável																		
SM-7187	7	3	45.4	48.45	0.0992	20	0.9397	0.7	22.4	11.027	0	3.05	23.1	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Impermeável																		
SM-7187	7	4	45.4	48.45	0.0992	20	0.9397	0.7	22.4	5.513	0	3.05	23.1	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Impermeável	1E-12	1E-12	0.00	0	3													
SM-7187	7	5	45.4	48.45	0.0992	20	0.9397	0.7	22.4	0.1	0	3.05	23.1	0	0.000	0.000	1E-12	1E-12	0.00	Impermeável	1E-12	1E-12	0.00	0	3													