

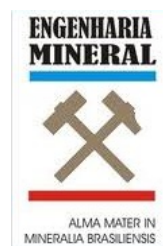


MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO

Universidade Federal de Ouro Preto

Departamento de Engenharia de Minas

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral



Syro Gusthavo Lacerda

Estimativa do Comprimento Médio de Traços de Descontinuidades em Maciços Rochosos Utilizando Métodos Estatísticos e Fotogrametria Digital Terrestre

Dissertação de Mestrado

Ouro Preto

2018

Syro Gusthavo Lacerda

Estimativa do Comprimento Médio de Traços de Descontinuidades em Maciços Rochosos Utilizando Métodos Estatísticos e Fotogrametria Digital Terrestre

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de concentração: Lavra de Minas.

Orientadora: Milene Sabino Lana.

Co-orientador: Pedro Manuel Alameda Hernández.

Ouro Preto

2018

L131e

Lacerda, Syro Gustavo.

Estimativa do comprimento médio de traços de descontinuidades em maciços rochosos utilizando métodos estatísticos e fotogrametria digital terrestre [manuscrito] / Syro Gustavo Lacerda. - 2018.

83f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Milene Sabino Lana.

Coorientador: Prof. Dr. Pedro Manuel Alameda-Hernández.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral.

Área de Concentração: Engenharia Mineral.

1. Mecânica de rochas. 2. Mecânica do solo. 3. Taludes (Mecânica do solo). I. Lana, Milene Sabino. II. Alameda-Hernández, Pedro Manuel. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 624.137

**“ESTIMATIVA DE COMPRIMENTO MÉDIO DE TRAÇOS DE
DESCONTINUIDADES EM MACIÇOS ROCHOSOS UTILIZANDO
MÉTODOS ESTATÍSTICOS E FOTOGRAMETRIA DIGITAL
TERRESTRE”**

AUTOR: SYRO GUSTHAVO LACERDA

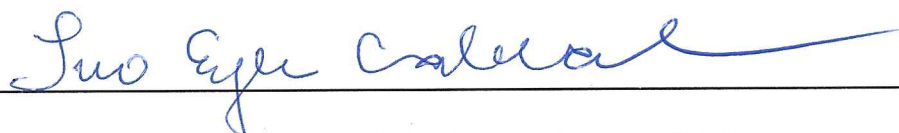
Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 28 de novembro de 2018, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. Dr. Pedro Manuel Alameda Hernández (Co-orientador) – UFOP



Dr. Gian Franco Napa Garcia (Membro) – ITV



Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral (Membro) – UFOP

AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda minha família, em especial ao meu pai Ednaldo, à minha mãe Nilcineia e à minha irmã Luana, pelo apoio incondicional, incentivos e confiança para que pudesse concluir este trabalho da melhor maneira possível. Amo vocês!

À Universidade Federal de Ouro Preto, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral (PPGEM) e ao Departamento de Engenharia de Minas, pelo ensino de qualidade, estruturas e tecnologia de ponta para realização de pesquisas.

Ao Pedro Alameda, pela oportunidade e parceria de pesquisa, pelos ensinamentos, incentivos, colaborações e dedicação para confecção deste trabalho. Pelas palavras de força e garra para que terminássemos este trabalho da melhor maneira. Ao Otávio e a Maria pelo auxílio nas atividades de campo e de laboratório.

A Sociedade Excursionista e Espeleológica e aos frequentadores da entidade pelo suporte nas horas mais precisas, pelo desempenho das atividades que me motivaram a realizar este trabalho.

Aos amigos da República Penitenciária que me acolheram durante muito tempo em um ambiente familiar e agradável e que sempre auxiliaram em todos meus projetos e planos.

À Mari e ao Isaac, amigos que, de forma ou outra, contribuíram para a concretização deste trabalho e de tantos outros que ainda estão por vir.

RESUMO

O maciço rochoso é material de trabalho para muitas obras de engenharia, tais como taludes rodoviários e de mineração, escavações subterrâneas de túneis e galerias mineração. O comportamento mecânico e as propriedades hidráulicas deste maciço são fortemente influenciados pela presença das descontinuidades que o divide em porções de rocha intacta. A caracterização quantitativa dos parâmetros geomecânicos das descontinuidades é uma tarefa muito complicada e demorada. O tamanho, ou persistência, das descontinuidades, é um dos parâmetros mais importantes para esta caracterização, mas é também o mais difícil de se avaliar. Ao longo dos anos, foram desenvolvidos métodos de amostragem areal para se estimar o comprimento médio das descontinuidades. No entanto, os métodos de amostragem carregam vieses, principalmente de censura e de tamanho que perturbam as estimativas. Para reduzir estes vieses, algumas considerações podem ser feitas em relação à forma e distribuição espacial dos centróides de descontinuidades no maciço rochoso. A partir disso, os métodos de amostragem podem definir, ou não, funções de distribuição para se estimar a média e o desvio padrão do comprimento de traços a partir de interpretações estereológicas. Os métodos de amostragem utilizando janelas circulares não assumem nenhuma função de distribuição de probabilidade específica para o tamanho ou a orientação das descontinuidades. Mais recentemente, o uso de métodos de fotogrametria tem ganhado relevância para o mapeamento geomecânico devido à facilidade e agilidade dos procedimentos, mas também a bons resultados representativos. Este estudo utiliza métodos de fotogrametria e mapeamento geomecânico para estimar a média e o desvio padrão do diâmetro das descontinuidades. Esse comprimento médio de traço é medido diretamente, obtendo um valor numérico e é comparado com o valor obtido por meio de métodos de amostragem utilizando janelas circulares. As exposições de rochas mostram uma distribuição Log-Normal dos discos de descontinuidades. No entanto, o comprimento médio dos traços de descontinuidade obtido por janelas de amostragem é decididamente menor do que o comprimento médio dos traços medido diretamente com o auxílio da fotogrametria.

Palavras-chave: Descontinuidade em maciços rochosos, Comprimento médio de traços de descontinuidades, Distribuição de probabilidade, Janelas circulares de amostragem.

ABSTRACT

Rock mass is the environment for many engineering works, such as road and mining slopes or underground tunnel and mining excavations. The mechanical behavior and hydraulic characteristics of rock mass are strongly influenced by the discontinuities that divide it into intact rock portions. The quantitative characterization of the geomechanical parameters of discontinuities is a very complicated and time-consuming task. The size, or persistence, of discontinuities, is one of the most critical parameters for this characterization, but it is also the most difficult to evaluate. Over the years, areal sampling methods are developed to estimate the mean trace length of discontinuities. However, areal sampling methods carry on a bias, mainly of censorship and the size that disturb this estimation. For diminishing this bias, some assumptions can be made regarding the shape and spatial distribution of centroids of discontinuities in the rock mass. From this, the sampling methods could define, or not, distribution functions to estimate the average and standard deviation of trace length from stereological interpretations. Sampling methods using circular windows do not assume the size or orientation of discontinuities to follow an specific probability density function. More recently, the use of photogrammetry methods has been gaining relevance for geomechanical mapping due to the ease and agility of the procedures, but also to good representative results. This study uses photogrammetry and geomechanical mapping methods to estimate the mean and standard deviation of the diameter of the discontinuities. This mean trace length is directly measured obtaining a numeric value and is compared with the value obtained through sampling methods using circular windows. Rock exposures show a Log-Normal distribution of the disc of discontinuities. However, the mean trace length obtained by sampling windows are decidedly smaller than the mean trace length directly measured with the aid of photogrammetry.

Key-words: Rock mass discontinuities, Mean trace length of discontinuities, Distribution forms, Areal sampling methods.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Objetivos	4
3. Justificativas	5
4. Revisão Bibliográfica	6
4.1. Caracterização de descontinuidades segundo o comprimento médio dos traços	6
4.2. Estimativa do comprimento médio de traços de descontinuidades utilizando janelas circulares de amostragem	10
4.2.1. Considerações e hipóteses	13
4.2.2. Limitações e vieses	13
4.2.3. Estimativa do comprimento médio de traços de descontinuidades	14
4.3. Estimativa do comprimento médio de traços de descontinuidades utilizando análises estatísticas	22
4.4. Fotogrametria aplicada à geomecânica	26
4.4.1. Princípios de fotogrametria	26
4.4.2. Técnicas de captura de imagens	28
4.4.3. Vantagens, limitações e boas práticas em trabalhos de campo	30
4.4.4. Mapeamento geomecânico e aplicação da fotogrametria	31
5. Materiais e Métodos	33
5.1. Atividade de Campo: identificação e captura de imagens digitais	33
5.2. Fotogrametria e mapeamento geomecânico	36
5.3. Análise estatística de dados e avaliação da estimativa de métodos de amostragem	39
6. Caracterização da Área de Estudo	42
7. Resultados e Discussões	49
7.1. Mapeamento Geomecânico Utilizando o Sirovision	49
7.2. Análise Estatística dos Dados Coletados	55
7.3. Avaliação do Método de Janelas Circulares de MAULDON et al. (2001) ...	60
8. Conclusões	65
9. Referências Bibliográficas	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Propriedades geométricas de descontinuidades (Adaptado de HUDSON 1989).	7
Figura 2: Esboços e blocos diagrama para classificar a persistência relativa de famílias de descontinuidades. Modelos bidimensionais: (a) Muito persistente; (b) Persistente; (c) Medianamente persistente; (d) Pouco persistente. Modelos tridimensionais: (c) Pouco persistente (d) Muito persistente (Adaptado de ISRM 1978).	8
Figura 3: Traços de descontinuidades que interceptam uma janela circular de amostragem de diferentes maneiras.	14
Figura 4: Traços de descontinuidades que interceptam uma janela circular de amostragem (ZHANG & EINSTEIN 1998).	15
Figura 5: Traços de descontinuidades tipo (a) que interceptam a janela de amostragem circular ((ZHANG & EINSTEIN 1998).	17
Figura 6: Traços de descontinuidades tipo (a) que interceptam a janela de amostragem circular ((ZHANG & EINSTEIN 1998).	18
Figura 7: Traços de descontinuidades tipo (c) que interceptam a janela de amostragem circular ((ZHANG & EINSTEIN 1998).	20
Figura 8: Conjunto de traços de descontinuidades com janela circular de amostragem e parâmetros de Mauldon (2001). Em (a) parâmetro (n); (b) parâmetro (m). (ROHRBAUGH JR et al. 2002).	21
Figura 9: Determinação da imagem tridimensional em um único ponto através de dois raios projetados do sistema de lentes e sensores localizados em diferentes locais (BIRCH 2006).	27
Figura 10: Métodos de captura de imagens (a) independente, convergente; (b) em fatias e (c) leque de imagens (BIRCH 2006).	29
Figura 11: Diferença na posição da iluminação solar na exposição rochosa amostrada. Na imagem da esquerda, a imagem foi capturada momentos antes que na imagem da direita.	31
Figura 12: Captura de imagens utilizando tripé, câmera acoplada e escala de fita métrica.	33
Figura 13: Método de Mapeamento e análise geomecânica realizada no Sirovision.	38
Figura 14: Amostragem de traços de descontinuidades utilizado o AutoCAD.	41
Figura 15: Localização e litologia dos pontos amostrados.	42
Figura 16: Maciço rochoso do ponto de amostragem Tripuí (trena comprimento de 1m).	44
Figura 17: Maciço rochoso do ponto de amostragem Maracujá.	45
Figura 18: Maciço rochoso do ponto de amostragem Itabirito (trena comprimento de 1m).	45
Figura 19: Maciço rochoso do ponto de amostragem Ponte de Trem.	46
Figura 20: Maciço rochoso do ponto de amostragem Rodrigo Silva.	47

Figura 21: Maciço rochoso do ponto amostrado Rodrigo Silva. Detalhe para os planos subverticais das descontinuidades (trena comprimento 1m).....	47
Figura 22: Estereograma do tipo densidade de pólos de descontinuidades para o ponto amostrado Itabirito.	50
Figura 23: Estereograma do tipo densidade de pólos de descontinuidades para o ponto amostrado Maracujá.....	51
Figura 24: Estereograma do tipo densidade de pólos de descontinuidades para o ponto amostrado Ponte de Trem.....	52
Figura 25: Estereograma do tipo densidade de pólos de descontinuidades para o ponto amostrado Rodrigo Silva.	53
Figura 26: Estereograma do tipo densidade de pólos de descontinuidades para o ponto amostrado Tripuí.	54
Figura 27: Histograma de frequência absoluta para persistência de descontinuidades para o ponto Itabirito.	56
Figura 28: Histograma de frequência absoluta para persistência de descontinuidades para o ponto Maracujá.....	57
Figura 29: Histograma de frequência absoluta para persistência de descontinuidades para o ponto Ponte de Trem.....	57
Figura 30: Histograma de frequência absoluta para persistência de descontinuidades para o ponto Rodrigo Silva.	58
Figura 31: Histograma de frequência absoluta para persistência de descontinuidades para o ponto Tripuí.	58
Figura 32: Estimativa de comprimento médio de traços de descontinuidades a partir de janelas circulares de amostragem no ponto Itabirito.	62
Figura 33: Estimativa de comprimento médio de traços de descontinuidades a partir de janelas circulares de amostragem no ponto Maracujá.....	62
Figura 34: Estimativa de comprimento médio de traços de descontinuidades a partir de janelas circulares de amostragem no ponto Ponte de Trem.	63
Figura 35: Estimativa de comprimento médio de traços de descontinuidades a partir de janelas circulares de amostragem no ponto Rodrigo Silva.	63
Figura 36: Estimativa de comprimento médio de traços de descontinuidades a partir de janelas circulares de amostragem no ponto Tripuí.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação da persistência de descontinuidades.	9
Tabela 2: Distribuições de probabilidade para traços de descontinuidades segundo autores conhecidos	23
Tabela 3: Especificações da câmera NIKON D7200	35
Tabela 4: Especificações da lente NIKKOR 50mm f/1.8 D	35
Tabela 6: Atitude das famílias de descontinuidades identificadas no ponto Itabirito. Concentração de densidade de Fisher 0,34%.	50
Tabela 7: Atitude das famílias de descontinuidades identificadas no ponto Maracujá. Concentração de densidade de Fisher 5,62%.	51
Tabela 8: Atitude das famílias de descontinuidades identificadas no ponto Ponte de Trem. Concentração de densidade de Fisher 17,75%.	52
Tabela 9: Atitude das famílias de descontinuidades identificadas Rodrigo Silva. Concentração de densidade de Fisher 14,61%.	53
Tabela 10: Atitude das famílias de descontinuidades identificadas no ponto Tripuí. Concentração de densidade de Fisher 16,18%.	54
Tabela 11: Estimativa de média e desvio-padrão para as distribuições de probabilidade ajustadas dos pontos amostrados	59

LISTA DE SÍMBOLOS

b	Distância relativa entre as duas localizações da câmera
d	Distância entre a câmera e a exposição
D	Diâmetro dos discos de descontinuidades
$f(l)$	Função densidade de probabilidade para os traços de descontinuidades
$g(D)$	Função densidade de probabilidade para o diâmetro dos discos de descontinuidades
l	Comprimento do traço de descontinuidade
N	Número total de traços de descontinuidades observados em uma janela circular de amostragem
n	Número total de traços de descontinuidades esperados em uma janela circular de amostragem
N_0	Número de traços de descontinuidades transectados em uma janela circular de amostragem
n_0	Número de traços de descontinuidades transectados esperados em uma janela circular de amostragem
n_{01}	Número de traços de descontinuidades transectados com $l \geq 2r$ esperado em uma janela circular de amostragem
n_{02}	Número de traços de descontinuidades transectados com $l < 2r$ esperado em uma janela circular de amostragem
N_1	Número de traços de descontinuidades unicamente censurados em uma janela circular de amostragem
N_2	Número de traços de descontinuidades contidos em uma janela circular de amostragem
r	Raio da janela circular de amostragem
θ	Direção do traço de descontinuidade
μ ou μ_l	Comprimento médio dos traços de descontinuidade
μ_D	Diâmetro médio dos discos de descontinuidades
ρ	Densidade de traços de descontinuidade
σ_D	Desvio-padrão do diâmetro dos discos de descontinuidades
φ	Mergulho do traço de descontinuidade

1. Introdução

Os maciços rochosos são alvo dos estudos que envolvem a mecânica de rochas que, devido sua aplicabilidade em obras de engenharia, vem sendo amplamente estimulada enquanto ciência, ao passo em que são desenvolvidas pesquisas de caracterização e classificação cada vez mais apropriadas e seguras para cada tipo de trabalho.

Este material de estudo, genericamente, pode ser dividido em em dois componentes, devido aos seus diferentes comportamentos mecânicos: a rocha intacta e as descontinuidades. Estes dois componentes conferem ao maciço rochoso um carácter descontínuo e as descontinuidades podem determinar amplamente seu comportamento mecânico (ISRM 1978).

Descontinuidade é um termo genérico para qualquer separação mecânica no maciço rochoso, dividindo-o em blocos de rocha intacta, que possui baixa ou nenhuma resistência à tração. É uma definição mais ampla dos termos juntas, falhas, fraturas, planos de acamamento ou xistosidade. Podem ser caracterizadas de acordo com dez parâmetros principais definidos pela ISRM (1978), são eles: (i) orientação, (ii) espaçamento, (iii) persistência, (iv) rugosidade, (v) resistência das paredes, (vi) abertura, (vii) preenchimento, (viii) condições hídricas (ix) número de famílias e (x) tamanho de blocos.

A ISRM (*International Society for Rock Mechanics*), fundada em 1962, conta com a colaboração de diversos países para a promoção, divulgação e incentivo desta ciência, mas também estabelece normas e pareceres técnicos de como devem ser realizados trabalhos nesta área e de como devem ser investigados os parâmetros que caracterizam o maciço rochoso.

A persistência de uma descontinuidade é definida como o comprimento do traço que esta descontinuidade faz com o afloramento rochoso exposto. O traço de descontinuidade, portanto, tem geometria bidimensional e é definido pela interseção entre o plano da superfície da descontinuidade e o plano da rocha aflorante, seja ele um talude ou uma escavação subterrânea (PRIEST & HUDSON 1981).

Devido à dificuldade de observação de superfícies de descontinuidades em três dimensões, o comprimento do traço pode estimar grosseiramente a extensão em área ou o comprimento de penetração de uma descontinuidade. É notório que quando uma

descontinuidade encontra porções de rocha intacta ou truncam com outras descontinuidades, sua persistência é reduzida (ISRM 1978).

Em obras de Geotecnia, seja um talude de rocha ou uma fundação de uma barragem, o grau de persistência de descontinuidades orientadas favorável ou desfavoravelmente à sua estabilidade é o fator mais importante para um dimensionamento mais seguro. Além do mais, a persistência das descontinuidades possui um papel importante no desenvolvimento de trincas de tração nas cristas de taludes (PRIEST 2012).

Em escavações subterrâneas, os comprimentos das descontinuidades delimitam blocos de tamanhos variados. A medida em que se tem o conhecimento dos comprimentos dos traços de descontinuidades, pode-se estimar com mais confiança o tamanho e a posição dos blocos formados dentro daquela galeria ou túnel (SONG et al. 2001).

As superfícies de descontinuidades ainda são capazes de armazenar fluidos como água, hidrocarbonetos e outros gases. Além disso, para extração destes fluidos, estas descontinuidades devem formar redes interconectadas que facilitem o caminho até a superfície. Portanto, quanto maiores as superfícies das descontinuidades, maior a chance delas se truncarem e maior a transmissividade daquele maciço. O comprimento dos traços serve como uma importante ferramenta para a estimativa destas superfícies e do potencial para exploração destes bens naturais (ODLING et al. 1999).

A estimativa do comprimento médio para um conjunto de traços de descontinuidades é realizada a partir de amostragens em diferentes porções do afloramento rochoso, evitando assim subestimar ou sobrestimar os valores destes parâmetros investigados principalmente em maciços rochosos heterogêneos (KULATILAKE & WU 1984).

Estas amostragens podem ser unidimensionais (*scanlines*), bidimensionais (janelas de amostragem) ou tridimensionais (janela topográfica). As janelas de amostragem permitem uma estimativa da persistência das descontinuidades em duas dimensões, no entanto, apresentam vieses geométricos e espaciais que podem dificultar esta estimativa. Muitas vezes, são feitas considerações adversas e são assumidas hipóteses que minimizam estas distorções.

Uma amostragem mais detalhada do maciço rochoso estudado, ou seja quanto mais janelas de amostragem dispersas sob a superfície do talude ou parede de escavação, melhor será a estimativa. No entanto, maiores serão as dificuldades para acessar porções do maciço

para amostragem, como encostas muito íngremes ou maciços de considerável altura. Para isso, são utilizados recursos de fotogrametria que auxiliam neste processo de amostragem.

A fotogrametria consiste no método de montagem de superfícies tridimensionais a partir de um conjunto de fotografias bidimensionais. Quanto mais detalhada for a captura de imagens, ou seja, quanto mais fotografias de um mesmo ponto a partir de diferentes pontos, a superfície tridimensional montada melhor representará o alvo amostrado (BIRCH 2006).

O programa *Sirovision* (desenvolvido pela *CSIRO Mining and Exploration Division* em Brisbane, Austrália) permite, além da construção de modelos tridimensionais espacialmente georreferenciados a partir da captura remota de imagens, o reconhecimento e a delimitação de estruturas geológicas, como as superfícies de descontinuidades, evitando assim interrupções dispendiosas nas atividades de campo (SIROVISION 2010).

O reconhecimento e a delimitação destas superfícies de descontinuidades é realizado utilizando ferramentas do próprio programa que fornece individualmente parâmetros que as caracterizam como sua posição e orientação espacial, persistência, frequência, intensidade, entre outros. O *Sirovision* ainda fornece demais ferramentas para análise de rompimentos de taludes e detecção de queda de blocos, identificando assim situações de risco à segurança. Este procedimento, aliado com o conhecimento litológico do maciço, é conhecido como Mapeamento Geomecânico.

A coleta e o conhecimento detalhado destes parâmetros geomecânicos ainda podem servir para a verificação ou mesmo para o aprimoramento dos métodos de amostragem, como as janelas de amostragem, que, como já conhecido, apresentam vieses e distorções. Uma forma de aprimoramento dos métodos de amostragem é analisar de maneira probabilística os dados coletados e estudar se seguem distribuições probabilísticas conhecidas, como a distribuição Normal, Log-Normal, Exponencial Negativa, Gama, entre outras.

Este trabalho consiste em investigar e aprimorar as estimativas do comprimento médio dos traços de descontinuidades a partir de métodos de amostragem bidimensionais (janelas de amostragem), aliados a recursos de fotogrametria que facilitam o acesso para uma amostragem mais detalhada. A acurácia desta metodologia é feita a partir da análise probabilística, utilizando o INPUT ANALYSER (ARENA), dos valores coletados em programas específicos, como o *Sirovision*, admitindo ser este o valor real, e comparando aos valores de comprimento médio dos traços de descontinuidades obtidos nas amostragens.

2. Objetivos

Aplicar e melhorar o método de amostragem do comprimento médio de traços de descontinuidades utilizando para isto superfícies, como as janelas circulares de amostragem.

Aplicar métodos de fotogrametria em afloramentos rochosos para uma amostragem mais detalhada de parâmetros que caracterizam o maciço rochoso, em especial o comprimento médio dos traços de descontinuidades.

Identificar a função densidade de probabilidade que melhor representa um conjunto de dados de parâmetros que caracterizam o maciço rochoso, neste trabalho a persistência das descontinuidades, e aplicar os valores de média e desvio-padrão deste conjunto em equações de estimativas conhecidas.

3. Justificativas

Os parâmetros que caracterizam o maciço rochoso devem ser minuciosamente investigados para que assim, seja analisado seu comportamento diante de obras de engenharia, como superfícies de taludes rodoviários ou de mineração, escavações subterrâneas em túneis e galerias de mineração, assim como poços de perfuração para exploração de água e hidrocarbonetos.

A persistência das discontinuidades é um parâmetro geomecânico amplamente estudado e o comprimento médio dos traços em exposições de afloramentos de rocha é um bom estimador para este parâmetro. As superfícies das discontinuidades são muitas vezes maiores que as exposições de afloramentos rochosos, portanto, muitas vezes, seu comprimento máximo não pode ser medido. Por isso este parâmetro é de difícil estimativa e métodos de amostragens utilizadas vêm sofrendo mudanças constantes na perspectiva de minimizar os vieses.

Os recursos de fotogrametria e mapeamento geológico utilizando *software* adequados devem ser explorados para identificar vantagens, facilidades e ganho de tempo, bem como para reportar dificuldades, limitações e eventuais problemas.

O estudo das distribuições de probabilidade aplicado às estimativas de parâmetros geológicos, como as discontinuidades, vêm sendo desenvolvidos ao longo dos anos. Uma investigação quanto ao comportamento probabilístico de um certo conjunto de medidas de comprimento de traços de discontinuidades pode tornar as estimativas de amostragens mais eficazes e seguras.

4. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão abordadas definições, considerações e discussões a respeito dos temas que envolvem o objetivo principal deste trabalho, que é a estimativa do comprimento médio das descontinuidades. Para isso, este capítulo subdivide-se nas seções: (a) Caracterização de descontinuidades segundo o comprimento médio dos traços; (b) Estimativa do comprimento médio de traços de descontinuidades utilizando janelas circulares de amostragem; (c) Análise estatística aplicada à Geomecânica e (d) Fotogrametria aplicada a Geomecânica.

4.1. Caracterização de descontinuidades segundo o comprimento médio dos traços

O comportamento mecânico do maciço rochoso é fortemente influenciado pela presença de superfícies de descontinuidades que o separa em blocos de rocha intacta de diferentes formas e tamanhos, tornando-o um meio descontínuo. Além disso, a presença de planos de acamamento, falhas, juntas e dobras confere ao maciço rochoso um comportamento heterogêneo e anisotrópico durante obras de engenharia (BRADY & BROWN 2013).

A caracterização das descontinuidades abrange importantes propriedades geomecânicas como a orientação, espaçamento, persistência, rugosidade, abertura e preenchimento (BANDIS 1990) (Figura 1).

A persistência é a extensão em área ou o tamanho que uma descontinuidade faz com um plano. Este parâmetro pode ser grosseiramente quantificado através da observação do comprimento de traços em superfícies de exposição. É um dos parâmetros mais importantes para o comportamento mecânico do maciço rochoso, no entanto é um dos mais difíceis de se quantificar (ISRM 1978).

A persistência das descontinuidades implica uma grande influência na resistência ao cisalhamento desenvolvido através de um plano, assim como nas características de fragmentação (*cavability* e porosidade) do maciço rochoso (BRADY & BROWN 2013).

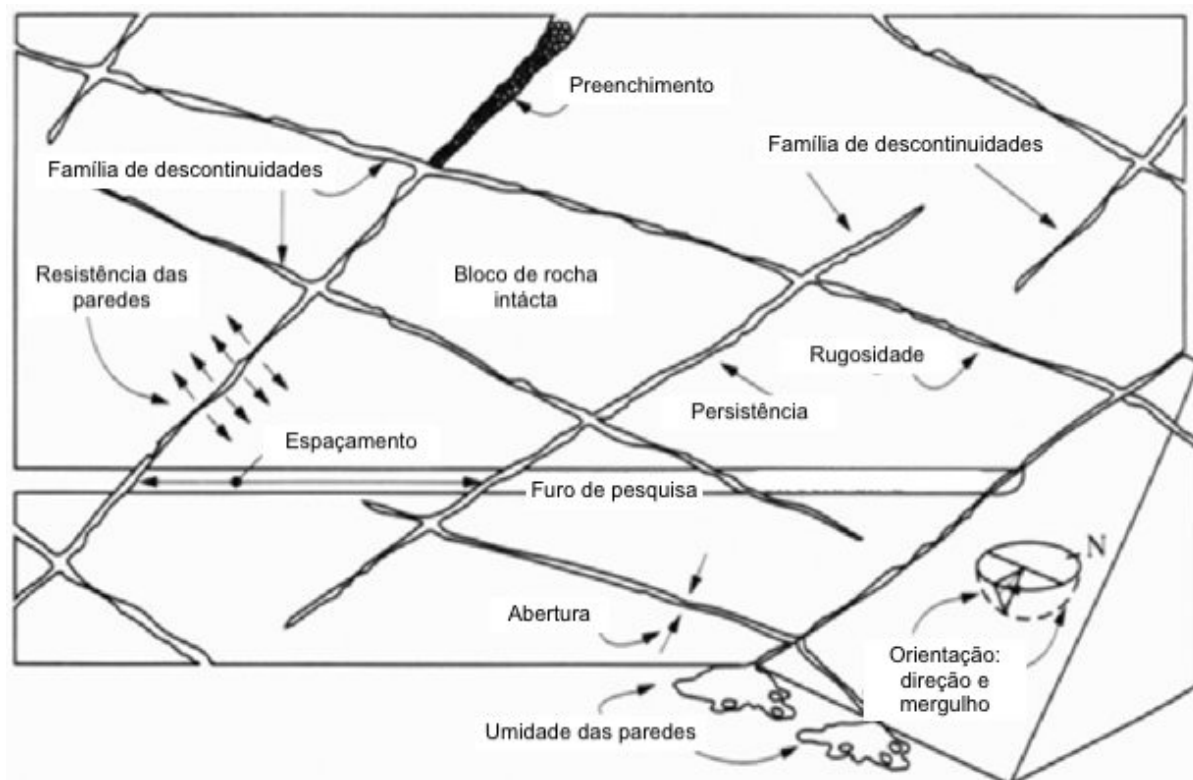


Figura 1: Propriedades geométricas de descontinuidades (Adaptado de HUDSON 1989).

O procedimento para se obter a medida do comprimento do traço, ou persistência, de uma certa descontinuidade apresenta muitas vezes dificuldades e limitações quanto procedimento, além de incertezas nos resultados. Frequentemente, os afloramentos rochosos são menores comparados à superfície ou traço das descontinuidades e, assim, a persistência real apenas pode ser estimada utilizando teorias de probabilidade (ISRM 1978).

A Comissão de normalização de ensaios laboratoriais e de campo da ISRM (1978) organiza procedimentos para mensurar e classificar este parâmetro além de reunir notas sobre análises de diversos autores sobre sua estimativa utilizando métodos analíticos e estatísticos. Ainda neste documento, a ISRM sugere como estes dados devem ser apresentados de forma sistemática e concisa.

Primeiramente, deve-se fazer o reconhecimento da superfície de amostragem. Para maiores exposições, em que o maciço rochoso apresenta porções com diferentes características geomecânicas, é recomendado que subdivida-o em diferentes domínios de exposições individuais. Estas exposições devem ser descritas de acordo com a persistência relativa das famílias ou *sets* de descontinuidades.

Estes *sets* então são assim avaliados qualitativamente como: (a) persistentes; (b) sub-persistentes e (c) não-persistentes. Esta avaliação pode ser feita utilizando esboços e representações em blocos diagrama como auxílio (Figura 2).

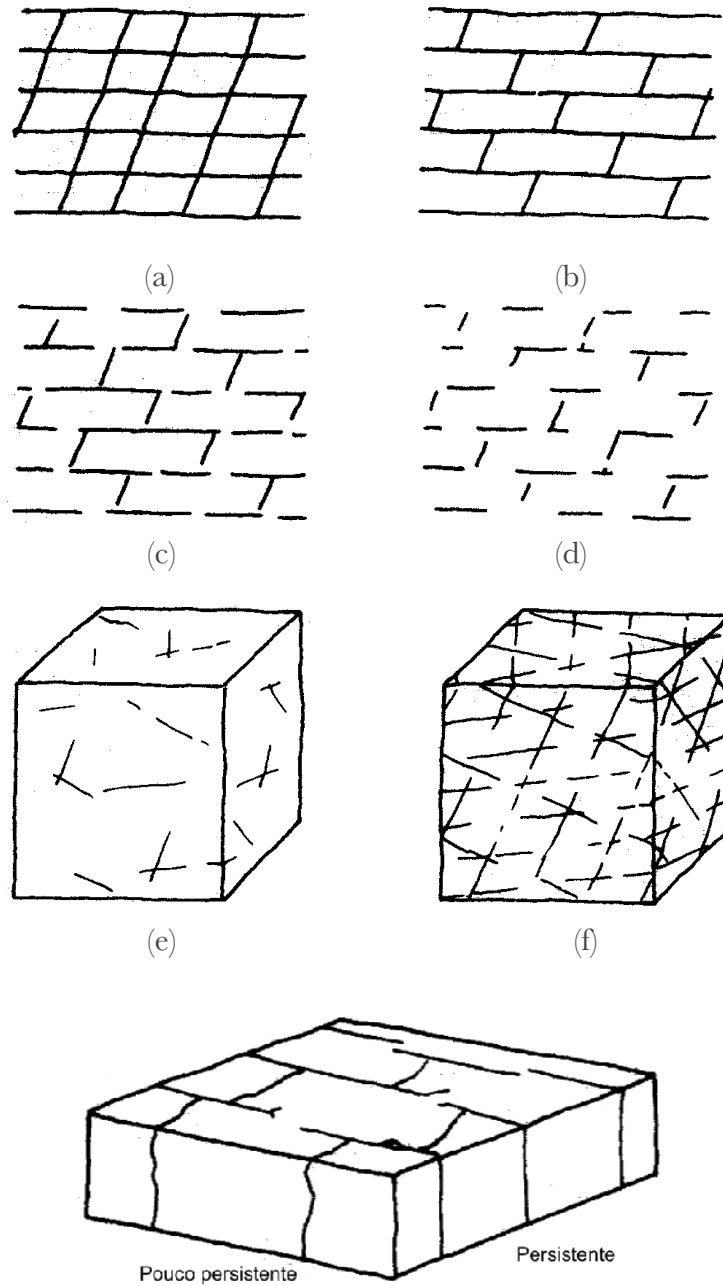


Figura 2: Esboços e blocos diagrama para classificar a persistência relativa de famílias de discontinuidades. Modelos bidimensionais: (a) Muito persistente; (b) Persistente; (c) Medianamente persistente; (d) Pouco persistente. Modelos tridimensionais: (c) Pouco persistente (d) Muito persistente (Adaptado de ISRM 1978).

Para se mensurar a persistência média de uma família de descontinuidades, é desejável fazer a medida na direção do plano horizontal ou do plano de máximo mergulho, para que a medida seja a mais próxima da dimensão real em uma superfície de exposição. No entanto, esta medida pode ser impossível diante de pequenas exposições que limitam as superfícies de descontinuidade ou de perspectivas do plano de exposição e o plano da descontinuidade, que apresentam um aspecto oblíquo e reduzem seu tamanho (BANDIS 1990).

A medida real da persistência de uma família de descontinuidades somente é possível ser observada em diferentes planos de exposição ou em largos planos de exposição tridimensionais, como superfícies curvas de taludes rodoviários ou de mineração ou mesmo em túneis e escavações mineiras subterrâneas (ISRM 1978).

Assim, é possível apresentar os valores reais de persistência medidos nestas exposições na forma de histogramas de frequência e classificar, para cada *set* de descontinuidades, este parâmetro como: (a) muito pouco persistente; (b) pouco persistente; (c) medianamente persistente; (d) persistente e (e) muito persistente (Tabela 1).

Tabela 1: Classificação da persistência de descontinuidades.

Classificação	Comprimento médio de traços (m)
Muito pouco persistente	< 1
Pouco persistente	1 - 3
Medianamente persistente	3 - 10
Persistente	10 - 20
Muito persistente	> 20

Além disso, a ISRM (1978) orienta um procedimento para definir o tipo de terminação dos traços das descontinuidades em uma exposição de rocha. Desta forma, traços de descontinuidades com terminações não visíveis no plano de exposição, são definidos como (x) e tem comprimento maior que esta superfície. Os traços de descontinuidades com terminações visíveis são geralmente menores que as tipo (x) e são chamadas de (r) (PITEAU 1973). No entanto, quando descontinuidades terminam truncando outras superfícies de descontinuidades são chamadas de (d). Este tipo de definição não é muito comum e tampouco difundido nos trabalhos que envolvem a quantificação deste parâmetro. No entanto, as

terminações das descontinuidades são parâmetros importantes para definir a amostragem utilizando superfícies bidimensionais (janelas de amostragem), como melhor esclarecido na próxima seção.

As sugestões feitas pela ISRM (1978) ainda trazem análises sobre a forma das superfícies das descontinuidades e de como elas podem influenciar na quantificação de seu tamanho. Muitos autores discutem formatos circulares, retangulares e elipsoidais para as superfícies de descontinuidades diante de observações e medidas do comprimento na direção da horizontal da camada bem como na direção do mergulho (ROBERTSON 1970; BRIDGES 1975; BARTON 1977).

Os métodos de amostragem que estimam o comprimento médio dos traços de descontinuidades foram desenvolvidos na tentativa de garantir uma medida precisa a partir de uma superfície finita ou mesmo de uma linha finita de amostragem (*scanline*) e considerações algébricas. No entanto, esta amostragem pode apresentar vieses quanto à forma e posição destas superfícies. Uma forma de melhorar e simplificar esta estimativa é a análise probabilística e definição da distribuição de probabilidade que melhor se encaixa para aquele conjunto de dados.

4.2. Estimativa do comprimento médio de traços de descontinuidades utilizando janelas circulares de amostragem

A quantificação do tamanho da descontinuidade, ou seja, da superfície em área que ela assume em um bloco volumétrico de maciço rochoso é um trabalho árduo. Estas superfícies, em geral, são visíveis através de traços retilíneos, ou pouco curvilíneos, impressos no plano de exposição.

Os planos de exposição são afloramentos de rocha que estão em superfície devido a eventos naturais (zonas de cisalhamento, escarpas de falhas, diferença de densidade litostática das camadas adjacentes, erosão, entre outros) ou intervenções antrópicas como cortes de taludes rodoviários e de mineração. Também tratam-se de planos de exposição as paredes de cavidades naturais (cavernas), túneis e galerias de mineração subterrânea. Através destas últimas superfícies, é possível visualizar descontinuidades de maneira tridimensional e assim, possibilitar a medida de seus parâmetros geomecânicos de modo mais efetivo.

Os traços de descontinuidades, assim observados em superfícies de exposição, podem ser visualizados de três diferentes maneiras de acordo com a quantidade de terminações visualizadas: (a) traços em que não podem ser visualizadas terminações; (b) traços em que pode ser visualizada apenas uma terminação e (c) traços em que podem ser visualizadas duas terminações.

A medida do comprimento de todos os traços de descontinuidades, sejam eles do tipo (a), (b) ou (c) alimentam um conjunto de dados que fornecem a estimativa de um comprimento médio. De fato, a medida de todos os comprimentos das diversas descontinuidades que cortam o maciço é uma tarefa que exige bastante tempo, além da impossibilidade de acesso para medir todos comprimentos de traços. Para isso foram atribuídos métodos de amostragem que limitam ainda mais a superfície de exposição, mas que utilizam de hipóteses e aproximações geométricas para se estimar com certa confiabilidade o comprimento médio dos traços.

Existem três tipos de amostragem para se apurar os comprimentos de traços de descontinuidades em afloramentos rochosos: (i) amostragem de traços que interceptam uma linha desenhada na exposição de rocha, conhecida como *scanline*; (ii) amostragem de traços que interceptam um círculo desenhado na exposição de rocha, conhecida como amostragem circular; (iii) amostragem de traços dentro de uma área finita (usualmente retangular ou circular) em uma exposição rochosa, mais conhecida como janela de amostragem e (iv) amostragem de descontinuidades dentro de um volume finito (usualmente cilíndrico) em uma exposição rochosa, mais conhecida como janela topográfica (PRIEST & HUDSON 1981; KULATILAKE & WU 1984; ZHANG & EINSTEIN 1998; MAULDON 1998; STURZENEGGER et al. 2011). De fato, se a exposição de rocha tem formato circular, é preferível utilizar janelas de amostragem circulares. Os tipos (i) e (iii) são os mais utilizados para estimativa do comprimento médio dos traços de descontinuidades.

A amostragem do tipo *scanline*, é o tipo de amostragem mais simples que utiliza linhas desenhadas em diferentes orientações no maciço rochoso ou fotografia. Estas linhas interceptam os traços de descontinuidades em intervalos variados de blocos de rocha intacta e, a partir disso, é possível estimar parâmetros geomecânicos como o comprimento médio, densidade e intensidade de traços de descontinuidades.

Apesar da metodologia para amostragem ser de fácil execução, a amostragem do tipo *scanline* reúne vieses principalmente quanto a orientação relativa entre os traços de descontinuidades e a linha de amostragem (PRIEST & HUDSON 1981; LA POINTE & HUDSON 1985; MAULDON & MAULDON 1997). Além do mais, o tipo de amostragem é unidimensional que, para estimativa tridimensional da superfície da descontinuidade, pode conter muitas incertezas.

As janelas de amostragem são superfícies bidimensionais que delimitam o maciço rochoso em uma área finita. Dentro destas janelas, os traços de descontinuidades que as interceptam, assim como a geometria desta área de amostragem, servem como parâmetro para a estimativa de seu comprimento médio.

Inicialmente eram utilizadas formas retangulares das janelas de amostragem e assim, eram definidas considerações quanto ao tamanho e a orientação das descontinuidades bem como eram aplicadas hipóteses quanto a distribuição de probabilidade para estimativa dos comprimento médio dos traços (PAHL 1981; KULATILAKE & WU 1984; WU et al. 2010). No entanto, a orientação relativa das arestas dos retângulo e dos traços de descontinuidades faziam com que a amostragem carregasse vieses de orientação (como será apresentado no tópico 4.2.2 desta seção).

As janelas de amostragem, quando assumem um formato circular, fazem com que não mais exista o viés quanto a orientação relativa dos traços de descontinuidades. Enquanto que, para as janelas retangulares de amostragem, eram desenvolvidas equações para estimativa de um valor teórico de comprimento médio dos traços de descontinuidades a partir de uma orientação e tamanho de traços fixos, as janelas circulares são capazes de estimar este parâmetro para traços de descontinuidades com orientação e tamanho arbitrários.

Além disso, as janelas circulares de amostragem não levam em consideração distribuições de probabilidade para o comprimento e a orientação dos traços de descontinuidades (MAULDON 1998; WEISS 2008). A utilização de métodos estatísticos para estimativa de parâmetros geomecânicos trata-se de um assunto recente e é discutido na seção 4.3.

4.2.1. Considerações e hipóteses

Considerando os traços de descontinuidades que interceptam uma superfície de área circular (janela circular de amostragem), as considerações e hipóteses quanto à geometria da descontinuidade podem ser aplicadas (KULATILAKE & WU 1984; ZHANG & EINSTEIN 1998; MAULDON 1998):

- (a) Todas as descontinuidades são planas e interceptam a janela circular de amostragem como traços lineares;
- (b) Os pontos médios do comprimento das descontinuidades são uniformemente distribuídos no espaço bidimensional, isto é através da janela circular de amostragem;
- (c) O comprimento e a orientação dos traços de descontinuidades são funções independentes um do outro.

4.2.2. Limitações e vieses

A amostragem de traços de descontinuidades pode carregar eventuais erros devido a diferentes vieses que distorcem a estimativa real (BAECHER et al. 1978; PRIEST & HUDSON 1981; KULATILAKE & WU 1984; ZHANG & EINSTEIN 1998):

- (a) Viés de orientação: a probabilidade de uma descontinuidade aparecer em um afloramento rochoso depende da orientação relativa entre a superfície de descontinuidade e a superfície da exposição;
- (b) Viés de tamanho: provavelmente, grandes descontinuidades são mais fáceis de serem amostradas do que pequenas descontinuidades. Este viés pode distorcer os resultados da seguinte maneira: grandes descontinuidades provavelmente aparecerão mais que pequenas descontinuidades, assim como grandes comprimentos de traços aparecerão com mais facilidade do que pequenos traços. Este viés influencia diretamente na definição da função de probabilidade que o conjunto de tamanhos de traço, caso hajam traços muitos pequenos, a função de probabilidade mais se aproximará de uma exponencial negativa. Do contrário, caso não sejam observados traços muito pequenos, a função mais se assemelhará com uma função Log-Normal;

(c) Viés de truncamento: pequenos comprimentos de traços de discontinuidades podem ser difíceis ou mesmo impossíveis de serem medidos. Para isso, muitas vezes é estabelecido um valor de corte, para que somente os traços com comprimento maior do que este valor sejam identificados e amostrados;

(d) Viés de censura: Muitas vezes, as superfícies das discontinuidades são maiores que as exposições de maciço rochoso. Desta forma, grandes traços de discontinuidades podem ter somente uma ou nenhuma terminação observável, o que torna impossível a medida do comprimento real daquele traço.

4.2.3. Estimativa do comprimento médio de traços de discontinuidades

Em uma superfície do tipo janela de amostragem, encontram-se três diferentes tipos de traço que a interceptam: (a) cuja nenhuma terminação pode ser observada, ou seja, cujas terminações encontram-se fora da área de exposição (traços transectados); (b) cuja uma única terminação é observada e (c) cujas duas terminações do traço são observadas (traços contidos) (KULATILAKE & WU 1984). A Figura 3 ilustra os três diferentes tipos de traços encontrados em uma área de amostragem circular.

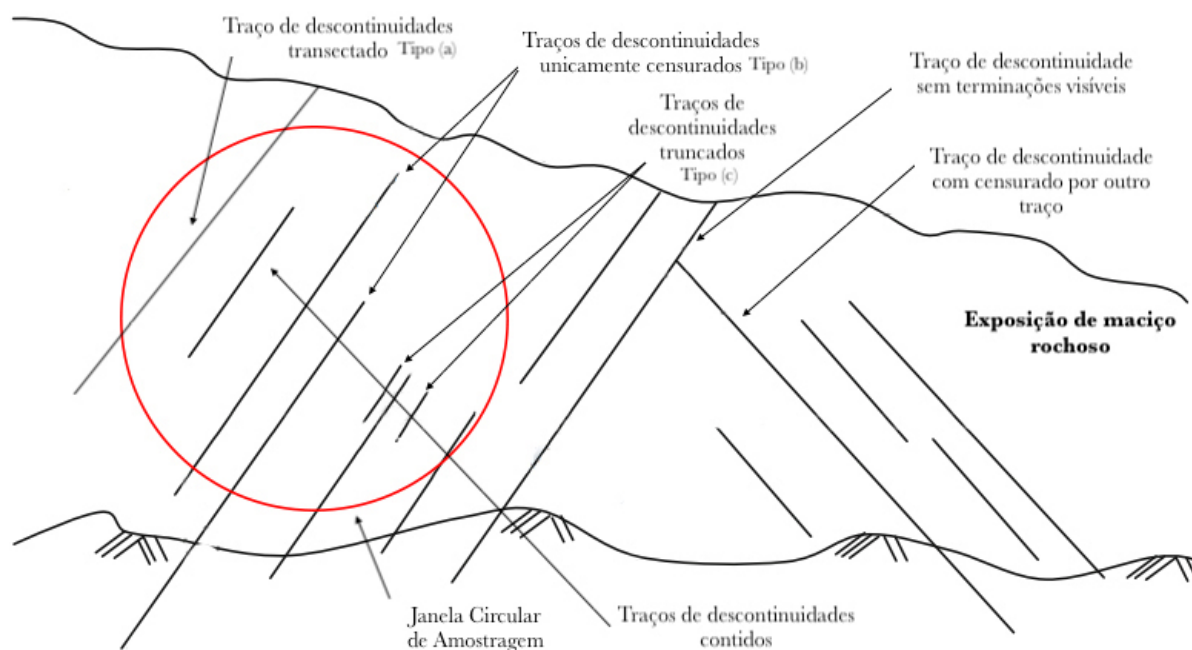


Figura 3: Traços de discontinuidades que interceptam uma janela circular de amostragem de diferentes maneiras.

Seja N_0 o número de traços de descontinuidades do tipo (a) transectados; N_1 o número de traços de descontinuidades do tipo (b) unicamente censurados e N_2 o número de traços de descontinuidades do tipo (c) contidos; em uma janela circular de amostragem, o número total de traços observados na área de amostragem (N) é obtido através da Equação 1:

$$N = N_0 + N_1 + N_2 \quad (1)$$

Em que N_0 é a quantidade de traços do tipo (a), N_1 é a quantidade de traços tipo (b) e N_2 é a quantidade de traços do tipo (c) observadas na área de amostragem (Figura 3).

Considerando uma janela circular de amostragem de raio r , diante de uma área de exposição, orientada no plano xy que exhibe os traços de descontinuidade A, B, C, D, E e F de tamanho l (Figura 4). O número esperado $[n]$ de descontinuidades com comprimento $l \in (l, l + dl)$, direção $\theta \in (\theta, \theta + d\theta)$ e mergulho $\varphi \in (\varphi, \varphi + d\varphi)$ que interceptam a janela circular é definido a partir da Equação 2:

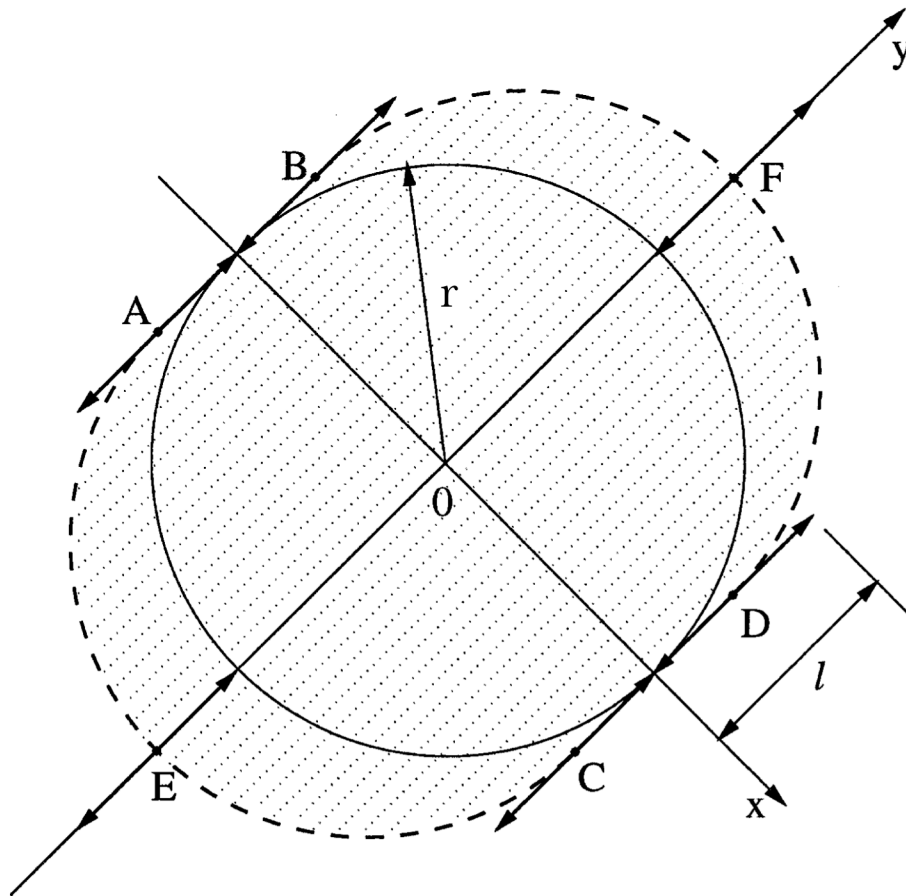
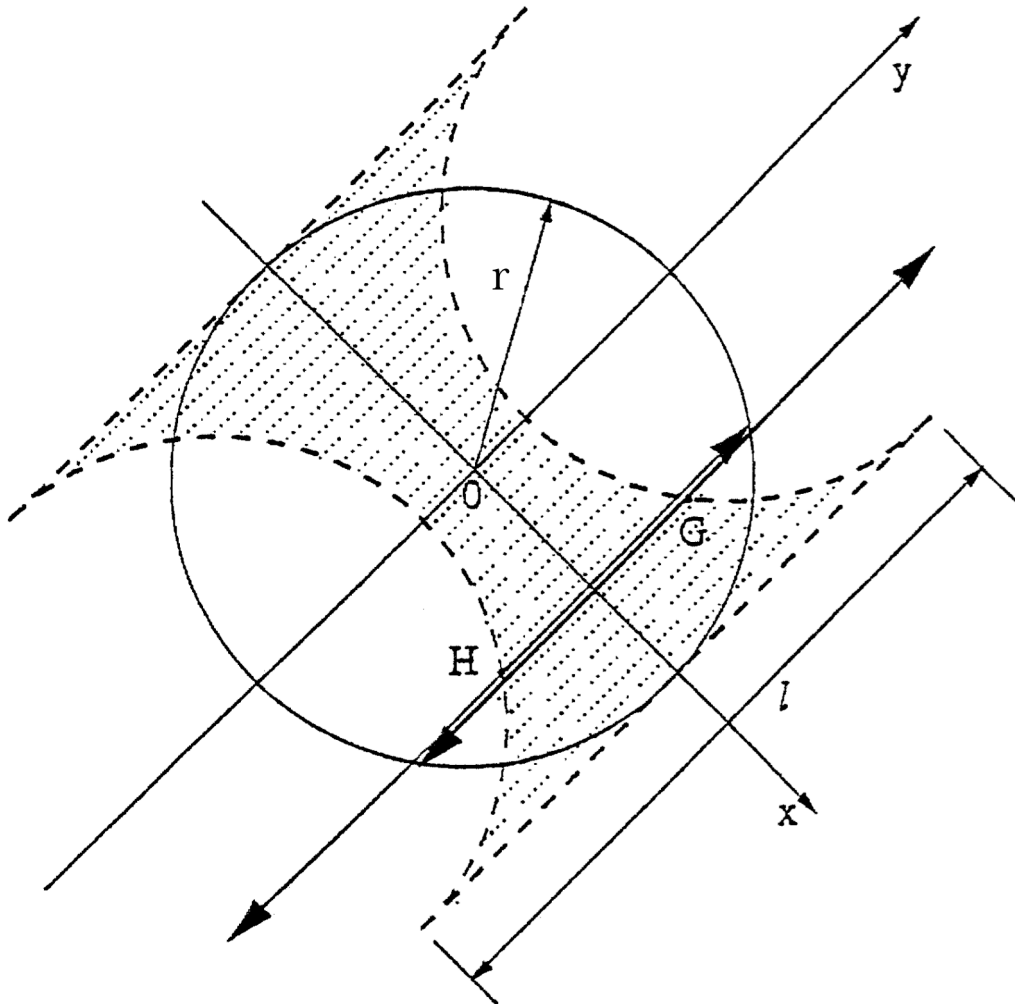


Figura 4: Traços de descontinuidades que interceptam uma janela circular de amostragem (ZHANG & EINSTEIN 1998).



Em que ρ é a densidade média de pontos médios de traços por unidade de área.

Assim, o número total de traços, N , que interceptam a janela circular é obtido integrando a função $n(\theta, \varphi, l)$ (Equação 3) (ZHANG & EINSTEIN 1998):

$$N = \int_0^{\infty} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \rho(\pi r^2 + 2rl) f(l) f(\theta, \varphi) d\theta d\varphi dl \quad (3)$$

Admitindo que as funções $f(l)$ e $f(\theta, \varphi)$ são f.d.p., é correto aplicar as propriedades básicas de uma função de probabilidade (Equação 4):

$$n = \rho(\text{área da zona sombreada})f(l)f(\theta,\varphi)d\theta d\varphi dl \quad (2)$$

$$n = \rho(\pi r^2 + 2rl)f(l)f(\theta,\varphi)d\theta d\varphi dl$$

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} f(\theta,\varphi)d\theta d\varphi = 1$$

$$\int_0^{\infty} f(l)dl = 1 \quad (4)$$

$$\int_0^{\infty} lf(l)dl = \mu$$

Assim pode-se denotar N , na forma reduzida (Equação 5):

$$N = \rho(2r\mu + \pi r^2) \quad (5)$$

Em que μ é o comprimento médio de traços que deve ser determinado.

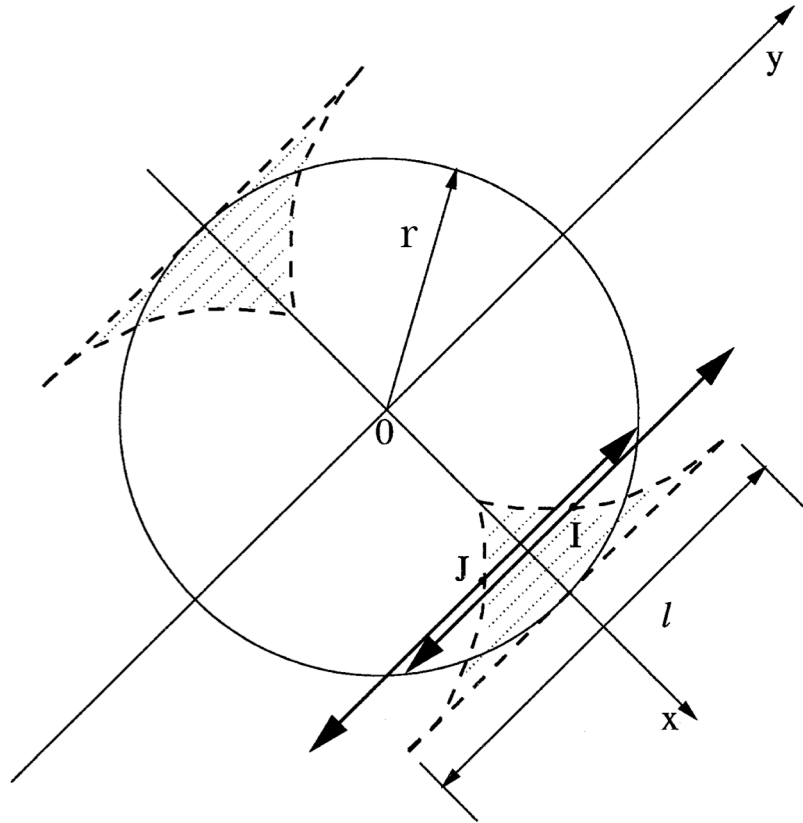
De maneira similar, pode-se estimar o número de traços do tipo (a), em que nenhuma terminação é visualizada dentro da janela circular, da seguinte maneira:

Para traços de descontinuidades, H e G (Figura 5), maiores ou de mesmo tamanho que duas vezes o tamanho do raio, i.e. $l \geq 2r$, pode-se determinar o número $[n_{01}]$ de descontinuidades que interceptam a janela circular de amostragem (Equação 6):

$$n_{01} = \rho(2rl - \pi r^2)f(l)f(\theta,\varphi)d\theta d\varphi dl \quad (6)$$

Figura 5: Traços de descontinuidades tipo (a) que interceptam a janela de amostragem circular ($l \geq 2r$) (ZHANG & EINSTEIN 1998).

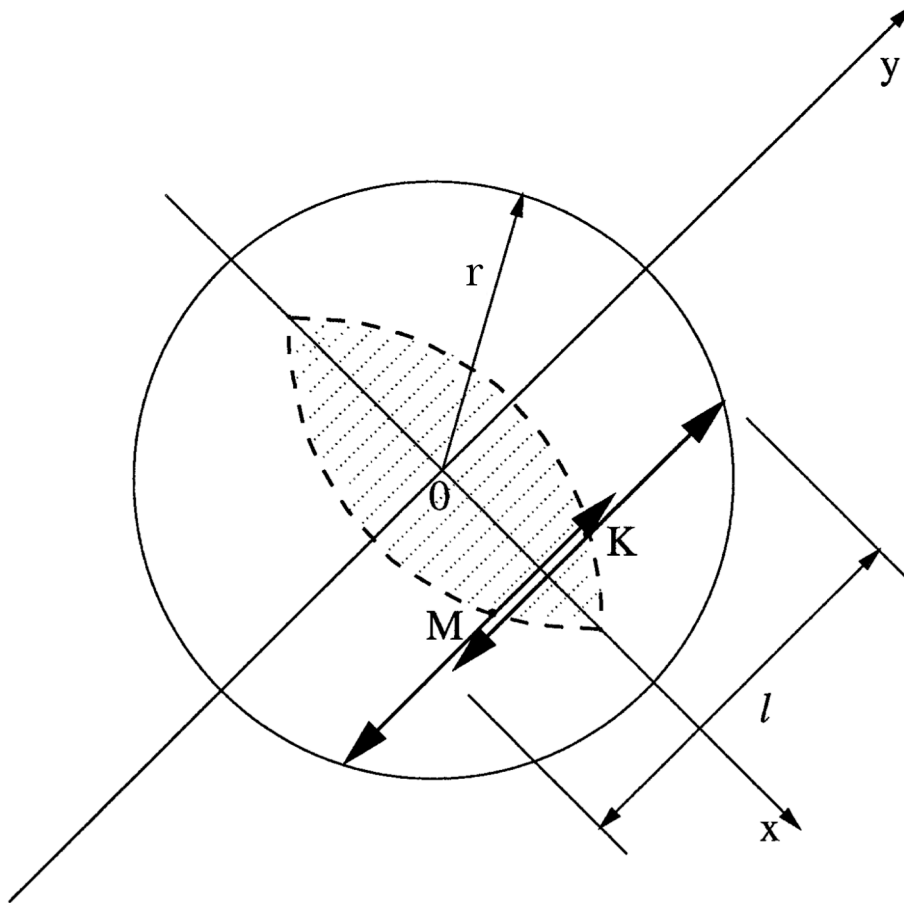
Já para traços tipo (a), J e I (Figura 6), que têm comprimento menor que duas vezes o raio, i.e. $l < 2r$, temos o número esperado $[n_{02}]$ de descontinuidades que interceptam a janela circular de amostragem (Equação 7):



$$n_{02} = \rho \left[2rl - \pi r^2 - l \sqrt{r^2 - \left(\frac{l}{2}\right)^2} + r^2 \arcsin \frac{\sqrt{r^2 - \left(\frac{l}{2}\right)^2}}{r} \right] f(l) f(\theta, \varphi) d\theta d\varphi dl \quad (7)$$

Figura 6: Traços de descontinuidades tipo (a) que interceptam a janela de amostragem circular ($l \geq 2r$) (ZHANG & EINSTEIN 1998).

Assim, o número total de traços de descontinuidades do tipo (a) que interceptam a janela circular de amostragem, N_0 , é definido pela soma das integrais:



$$\begin{aligned}
 N_0 = & \int_0^{\infty} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \rho (2rl - \pi r^2) f(l) f(\theta, \varphi) d\theta d\varphi dl + \\
 & + \int_0^{2r} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \rho \left[-l \sqrt{r^2 - \left(\frac{l}{2}\right)^2} + r^2 \arcsin \left(\frac{\sqrt{r^2 - \left(\frac{l}{2}\right)^2}}{r} \right) \right] f(l) f(\theta, \varphi) d\theta d\varphi dl
 \end{aligned} \tag{8}$$

De maneira semelhante, considerando traços de descontinuidades do tipo (c), M e K (Figura 7), i.e. em que ambas terminações são observáveis dentro da janela de amostragem, pode-se calcular o número esperado de traços que interceptam esta área de amostragem da seguinte forma (Equação 9):

$$n_2 = \rho \left[-l\sqrt{r^2 - \left(\frac{l}{2}\right)^2} + r^2 \arcsin \frac{\sqrt{r^2 - \left(\frac{l}{2}\right)^2}}{c} \right] f(l)f(\theta, \varphi) d\alpha d\theta dl \quad (9)$$

Figura 7: Traços de descontinuidades tipo (c) que interceptam a janela de amostragem circular ($l \geq 2r$) (ZHANG & EINSTEIN 1998).

Assim, o número total de traços de descontinuidades tipo (c) contidos na janela circular de amostragem é definido a partir da integral (Equação 10):

$$N_2 = \int_0^{2r} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \rho \left[-l\sqrt{r^2 - \left(\frac{l}{2}\right)^2} + r^2 \arcsin \frac{\sqrt{r^2 - \left(\frac{l}{2}\right)^2}}{r} \right] f(l)f(\theta, \varphi) d\theta d\varphi dl \quad (10)$$

Afim de obter o comprimento médio de traços de descontinuidades, deve-se subtrair as Equações (10) e (8), da seguinte maneira (Equação 11):

$$\begin{aligned} N_2 - N_0 &= \int_0^{\infty} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \rho(2rl - \pi r^2) f(l)f(\theta, \varphi) d\theta d\varphi dl - \\ &- \rho \int_0^{\infty} (2rl - \pi r^2) f(l) \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} f(\theta, \varphi) d\theta d\varphi \end{aligned} \quad (11)$$

Utilizando a as simplificações apresentadas na Equação 4, a Equação 11 pode ser simplificada da seguinte maneira (Equação 12):

$$N_0 - N_2 = \rho(2r\mu - \pi r^2) \quad (12)$$

Combinando-se a Equação 5 e a Equação 12, o comprimento médio de traços, μ , é definido como (Equação 13):

$$\mu = \frac{\pi(N + N_0 - N_2)}{2(N - N_0 + N_2)} r \quad (13)$$

Enquanto ZHANG & EINSTEIN (1998) utilizam do número de traços de descontinuidades, identificando ainda aqueles que são do tipo (a) e tipo (c) individualmente, MAULDON et al. (2001), a partir de simplificações dimensionais, utilizam apenas o número total de pontos que: (n) interceptam o círculo de amostragem (pontos sólidos pretos) e (m) são terminações dentro da janela circular de amostragem (triângulos sólidos pretos) (Figura 8). Sejam estes ainda definidos a partir da Equação 14:

$$n = (N + N_0 - N_2) \quad (14)$$

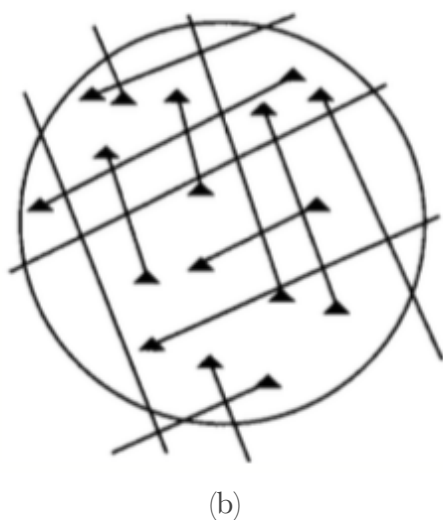
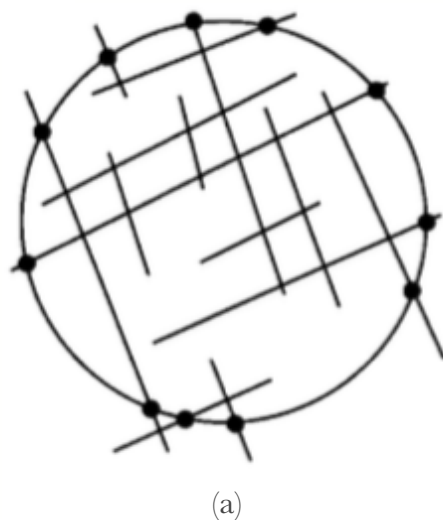
$$m = (N - N_0 + N_2)$$

Figura 8: Conjunto de traços de descontinuidades com janela circular de amostragem e parâmetros de Mauldon (2001). Em (a) parâmetro (n); (b) parâmetro (m). (ROHRBAUGH JR et al. 2002).

Assim, pode-se estimar o comprimento médio de traços a partir da Equação 15:

$$\mu = \frac{\pi r}{2} \left(\frac{n}{m} \right) \quad (15)$$

Analisando o efeito escala, ou seja, com o aumento progressivo do tamanho do raio da janela de amostragem, maior será o número de terminações de descontinuidade em seu interior e mais próximo do tamanho real das descontinuidades (ROHRBAUGH JR et al. 2002).



4.3. Estimativa do comprimento médio de traços de descontinuidades utilizando análises estatísticas

Devido principalmente aos vieses de censura e de tamanho, os métodos para estimativa do comprimento médio dos traços de descontinuidades utilizando janelas de amostragem carregam dificuldades (CALL et al. 1976; CRUDEN 1977; PAHL 1981; KULATILAKE & WU 1984; MAULDON 1998; PRIEST 2012).

Os traços de descontinuidades com comprimentos maiores que a superfície de exposição, ou seja aqueles não possuem terminações visíveis no afloramento rochoso, terão sua estimativa de comprimento reduzida e, obrigatoriamente, subestimam o comprimento médio.

Ao passo que, nos trabalhos de amostragem, os traços de descontinuidades com comprimento maior serão mais facilmente identificados e amostrados do que traços de comprimento menor. O que pode levar a uma tendência na amostragem.

Para isso, as aproximações probabilísticas, que reduzem estas dificuldades de amostragem, podem ser definidas de duas maneiras distintas: (a) métodos que assumem que o conjunto de dados segue uma conhecida distribuição de probabilidade, chamado de Métodos Dependentes e (b) Métodos que não assumem, ou assumem minimamente uma distribuição de probabilidade, são conhecidos como Métodos-Livres (MAULDON 1998).

Os Métodos-Livres para a estimativa do comprimento médio dos traços de descontinuidades foi desenvolvida através da observação de traços de descontinuidades com orientação paralela através de janela retangulares de amostragem (PAHL 1981). Mais tarde, o método da Pahl foi estendido para traços de descontinuidades com orientações variadas (KULATILAKE & WU 1984). Estes métodos assumem uma distribuição contínua para o comprimento dos traços de descontinuidades, porém deve ser conhecida a distribuição de probabilidade que a orientação dos traços segue.

A amostragem utilizando janelas circulares de amostragem é um método em que não são feitas considerações sobre a distribuição de probabilidade dos traços de descontinuidade tampouco sobre a distribuição de probabilidade da sua orientação (SONG 2009; MAULDON 2001).

Diferentemente destes métodos, a estimativa de comprimento médio dos traços de descontinuidades a partir de distribuições de probabilidade conhecidas vem sendo discutida por diversos autores. A Tabela 2 apresenta as principais distribuições de probabilidade assumidas pelos principais autores nos mais variados tipos de rochas.

Tabela 2: Distribuições de probabilidade para traços de descontinuidades segundo autores conhecidos

Pesquisador	Tipo de Rocha	Distribuição de probabilidade
GRENON et al. 2017	Metamórfica	Log-Normal
ZADHESH et al. 2014	Ígnea, Metamórfica e Sedimentar	Log-Normal
ZHANG & DING 2010	-	Lognormal, Gamma
WEISS 2008	-	Log-Normal
SONG & LEE 2006	-	Exponencial Negativa, Log-Normal
KULATILAKE et al. 2003	Metamórfica	Gamma, Exponencial Negativa e Log-Normal
ZANG & EINSTEIN 2000	-	Gamma
ZANG 1999	-	Gamma
ODLING et al. 1999	Sedimentar	Log-Normal
KULATILAKE et al. 1996	Ígnea	Gamma
VILLAESCUSA & BROWN 1992	Ígnea e Metaforfica	Log-Normal
DERSHOWITZ & EINSTEIN 1988	-	Log-Normal
KULATILAKE & WU 1984	-	Exponencial Negativa
EINSTEIN & BAECHEER 1983	Ígnea, Metamórfica e Sedimentar	Log-Normal
PRIEST & HUDSON 1981	Sedimentar	Exponencial Negativa
WARBURTON 1980	-	Log-Normal
BARTON 1977	Metamórfica	Log-Normal

A dificuldade maior destes Métodos Dependentes é que deve-se inicialmente assumir uma distribuição de probabilidade para um conjunto de dados qualquer e, para isso, várias considerações iniciais (ver no tópico 4.2.1) são tomadas como verdadeiras, porém não podem ser completamente avaliadas (MAULDON 1998).

Para os métodos que utilizam janelas de amostragem, existe uma relação entre a distribuição de probabilidade do comprimento do diâmetro das descontinuidade (assumidas como discos finos e planos) e a distribuição de probabilidade dos traços que elas descrevem

nas exposições de rocha. Esta relação é conhecida como Interpretação Estereológica (WARBURTON 1980) (Equação 17).

$$f(l) = \frac{l}{\mu_D} \int_l^{\infty} \frac{g(D)dD}{\sqrt{D^2 - l^2}} \quad (17)$$

Em que D é o diâmetro da descontinuidade; l é o comprimento do traços uma exposição planar infinita; $g(D)$ é a função densidade de probabilidade (f.d.p.) do diâmetros das descontinuidades; $f(l)$ é a função densidade de probabilidade do comprimento dos traços e μ_D é o diâmetro médio das descontinuidades.

Seja $f(l)$ uma f.d.p., o comprimento médio dos traços de descontinuidade pode ser obtido através da Equação 18:

$$\mu_l = \int_0^{\infty} lf(l)dl \quad (18)$$

Assim, aplicando a Equação (17) na Equação (18), pode-se escrever:

$$\mu_l = \frac{1}{\mu_D} \int_0^{\infty} ldl \int_l^{\infty} \frac{l g(D)dD}{\sqrt{D^2 - l^2}} \quad (19)$$

Revertendo a ordem da integral na Equação 19 e resolvendo a integral com respeito aos limites de l , é possível obter a Equação (20):

$$\begin{aligned} \mu_l &= \frac{1}{\mu_D} \int_0^{\infty} g(D)dD \int_0^D \frac{l^2 dl}{\sqrt{D^2 - l^2}} \\ &= \frac{\pi}{4\mu_D} \int_0^{\infty} D^2 g(D)dD \end{aligned} \quad (20)$$

Em que $\int_0^{\infty} D^2 g(D) d(D)$ é o segundo momento de D e pode ser relacionado com a média $[\mu_D]$ e o desvio-padrão $[\sigma_D]$ de D de acordo com a Equação (21):

$$\int_0^{\infty} D^2 g(D)d(D) = (\mu_D)^2 + (\sigma_D)^2 \quad (21)$$

Logo, a Equação (20) pode ser simplificada como:

$$\mu_l = \frac{\pi}{4\mu_D} \left[(\mu_D)^2 + (\sigma_D)^2 \right] \quad (22)$$

Se $g(D)$ se comporta como uma função Log-Normal, com média μ_D e desvio-padrão σ_D , a Equação (21) pode ser reescrita como a Equação (23):

$$\mu_l = \frac{\pi}{4} \left[1 + \left(\frac{\sigma_D}{\mu_D} \right)^2 \right] \mu_D \quad (23)$$

Neste trabalho, a Interpretação Estereológica proposta por WARBURTON (1980) para distribuição de probabilidade do tipo Log-Normal aplicada ao conjunto de dados sobre os diâmetros de discos será utilizada para comparar e apurar os valores estimados através das janelas circulares de amostragem aplicando-se a metodologia de MAULDON (2001).

4.4. Fotogrametria aplicada à geomecânica

O uso de ferramentas de fotogrametria, ou fotogrametria digital, teve um aumento significativo nas últimas duas décadas devido a disponibilidade de novas pesquisas que envolvem o tema, à facilidade de softwares de processamento e ao desenvolvimento de novos recursos fotográficos, como mais recentemente, a utilização de UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) ou drones (FRANCIONI et al. 2018).

Nesta seção serão abordados os princípios que envolvem a fotogrametria, técnicas de captura de imagens, vantagens, limitações e boas práticas para a atividade de campo e, ao final, suas aplicações em trabalhos de geomecânica.

4.4.1. Princípios de fotogrametria

Fotogrametria é a ciência que determina modelos tridimensionais a partir de duas ou mais imagens bidimensionais de um alvo qualquer. Esta configuração é realizada identificando-se um mesmo ponto em cada imagem e, em seguida, projeta-se um raio que liga o ponto do alvo a cada posição da câmera através de seu centro de perspectiva (Figura 9).

Onde os raios se cruzam é possível construir uma imagem 3D. Para isso ainda, devem ser conhecidas com bastante precisão a localização e orientação da câmera em cada captura de imagem (BIRCH 2006).

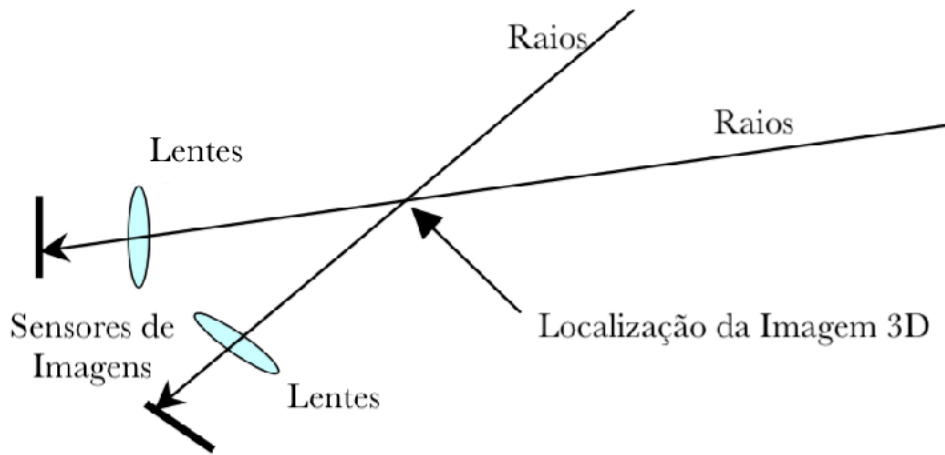
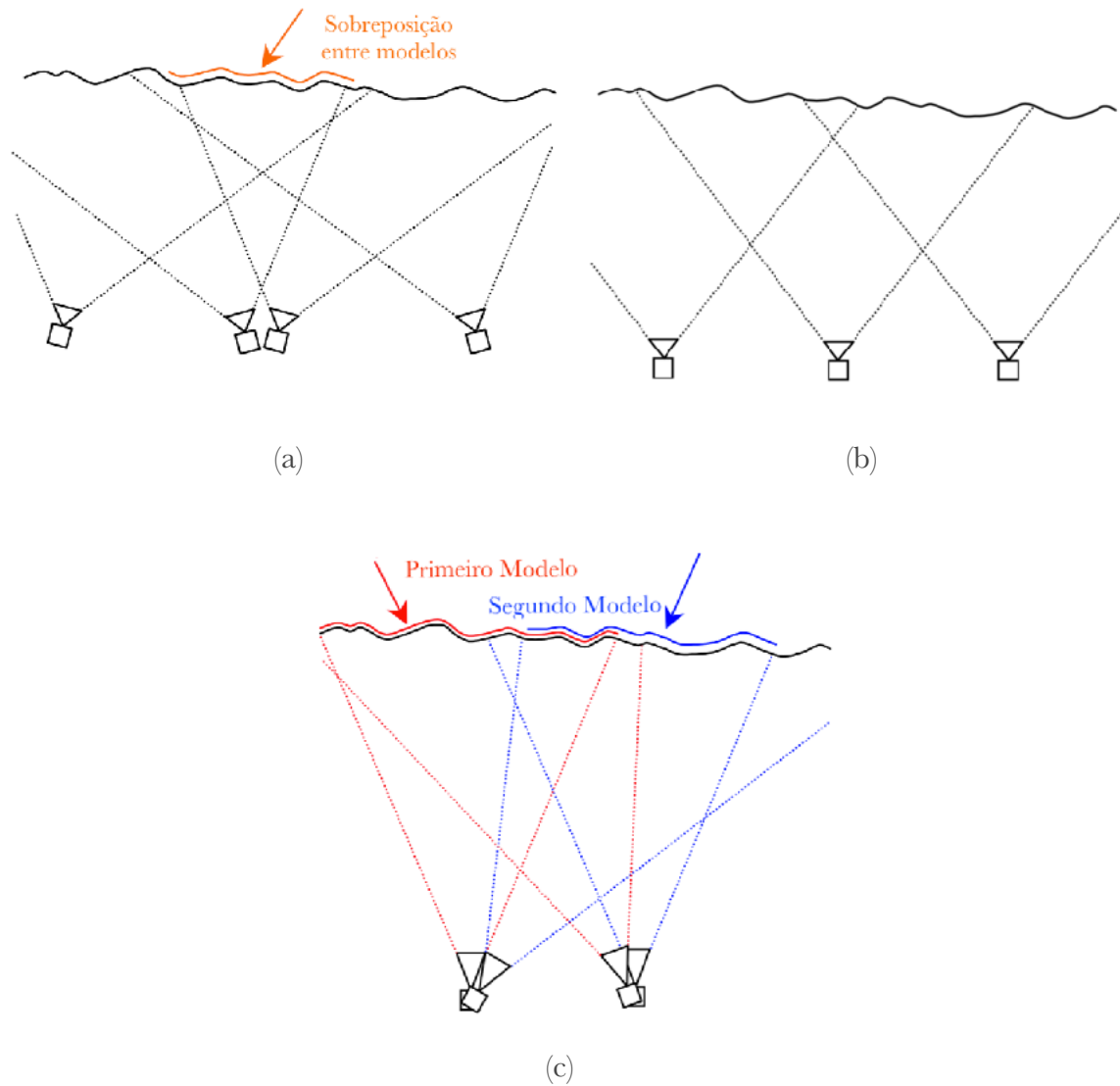


Figura 9: Determinação da imagem tridimensional em um único ponto através de dois raios projetados do sistema de lentes e sensores localizados em diferentes locais (BIRCH 2006).

A partir do conhecimento da posição e da localização da câmera, foram desenvolvidos programas que utilizam de algoritmos sofisticados para a construção de um Modelo Digital de Terreno (DTM) com perspectivas tridimensionais (BIRCH 2006 3DM Analysis; SIROVISION 2010). Geralmente, estes programas podem identificar automaticamente vários pontos correspondentes em cada fotografia e assim determinar a localização e a posição da câmera frente ao alvo, quando não se tem um conhecimento preciso sobre estes parâmetros (TANNANT 2015). Este procedimento de identificação de pontos correspondentes ainda pode ser feito manualmente nestes programas. Devem ser utilizados no mínimo três pontos de correspondência em cada foto. A utilização de mais que três pontos pode gerar problemas de redundância e reduzir a acurácia do procedimento (BIRCH 2006).

A acurácia destes pontos correlacionados espacialmente é controlada pela escolha das lentes utilizadas, da distância do objeto alvo e da distância relativa entre as diversas localizações da câmera. É importante salientar que a acurácia não é controlada pelos programas computacionais de fotogrametria, que podem produzir uma aproximação sub-milimétrica utilizando diversas fotos de pequenos objetos (BIRCH 2006; TANNANT 2015).



Não existe limite para a quantidade de fotografias para serem utilizadas neste trabalho. No entanto, quanto maior for a quantidade de imagens, mais carregado ficará o arquivo e mais tempo será necessário para o processamento na máquina (BIRCH 2006).

Na prática, deve-se evitar uma coleção de várias fotos utilizando lentes com grande distância focal ou de pequenas distâncias da câmera para o objeto alvo, que podem resultar em modelos tridimensionais de difícil processamento (TANNANT 2015).

4.4.2. Técnicas de captura de imagens

As facilidades que os programas computacionais proporcionam quanto ao reconhecimento de pontos correlacionados, proporcionam uma livre utilização da orientação da câmera fotográfica de dos procedimentos de captura de imagem. No entanto, existem três

procedimentos mais comuns para este tipo de trabalho: (a) imagens independentes convergentes; (b) em faixas e (c) leque de imagens (BIRCH 2006; FRANCONI et al. 2017) (Figura 10).

O método de imagens independentes convergentes é aquele que utiliza 100% de cada imagem para a construção de um único modelo tridimensional e, quando forem necessários vários modelos para se cobrir uma área de exposição, a sobreposição dos modelos pode ser bastante pequena (cerca de 10 a 20%). A vantagem deste método é que a razão da distância entre a câmera de a exposição e da distância relativa da localização da base da câmera (distância:base) é bastante flexível, além de se poder trabalhar com diversos comprimentos focais de lentes (BIRCH 2006; FRANCONI et al. 2017).

Figura 10: Métodos de captura de imagens (a) independente, convergente; (b) em fatias e (c) leque de imagens (BIRCH 2006).

No método de imagens em fatias são utilizadas uma série de imagens paralelas com alto nível de sobreposição, tipicamente 60%. A vantagem deste método é que, devido ao alto nível de sobreposição de imagens, tem como resultado um modelo bastante preciso quanto a posição e orientação. Este método, além da aplicação para fotogrametria aérea, também é utilizado em fotogrametria de terrestre, ou de afloramentos rochosos - quando se tem uma distância pequena entre a câmera e a exposição de rocha e quando esta exposição não é bastante alta. Este método é bastante utilizado em trabalhos de mapeamento geomecânico e as imagens podem ser capturas com lentes de pequenos comprimentos (28 mm; 50 mm) (BIRCH 2006; FRANCONI et al. 2017).

O último método, do leque de fotos, é amplamente utilizado no caso da utilização de lentes com grandes distâncias focais para se capturar imagens com longas distâncias entre a câmera e a exposição. Este método se assemelha com o de imagens independentes e convergentes, no entanto não se faz necessário um conhecimento muito preciso quanto a localização e posição da câmera, desde que fixos. A precisão deste método é alta. Assim como no primeiro método, para uma exposição bastante larga, em que são precisos vários modelos para se cobrir esta área, os modelos separadamente podem ser sobrepostos com baixo nível de sobreposição (10-20%) (BIRCH 2006; STURZENEGGER & STEAD 2009; FRANCONI et al. 2017).

4.4.3. Vantagens, limitações e boas práticas em trabalhos de campo

O método de fotogrametria aplicada a trabalhos de geomecânica tem várias vantagens comparado ao método convencional de mapeamento utilizando bússola de geólogo ou outros instrumentos tradicionais (TANNANT 2015). Podem ser listadas as vantagens:

- (a) A praticidade dos trabalhos de campo e o baixo custo despendido permitem um tempo maior para a interpretação e o mapeamento digital;
- (b) É possível realizar estes trabalhos a distâncias consideráveis e seguras diante de uma exposição rochosa com risco de deslizamento ou tombamento de blocos, bem como é possível fazer o mapeamento de regiões de difícil acesso, a partir de captura de imagens a distâncias remotas.
- (c) Em atividades de mineração, estes trabalhos de fotogrametria não apresentam procedimentos que restringem esta atividade, além de registrarem na forma de arquivo digital as condições dos taludes e dos avanços da escavação;
- (d) A partir dos modelos digitais construídos através de fotografias (DTM), quando bastante precisos e detalhados, promovem um modelo realístico, sendo possível realizar a análise e o mapeamento de feições estruturais (como orientação, comprimento de descontinuidades) com alto nível de confiança;
- (e) A geometria e as estruturas geológicas identificadas no DTM podem ser utilizadas em modelos de rede de fraturas discretas (DFN), de elementos discretos e de elementos finitos para análises de estabilidade geomecânica (ORTEGA et al. 2013; FRANCONI et al. 2014; BONILLA-SIERRA et al. 2015; GRENON et al. 2017).

No entanto, existem fatores que limitam a utilização da fotogrametria em trabalhos de campo, como a restrição da localização da câmera. Muitas vezes é recomendado que a distância relativa entre as bases da câmera localizadas em diferentes lugares seja proporcional à distância da câmera para a área amostrada, o que pode ser bastante complicado em relevos acidentados. Além disso, a posição da câmera muitas vezes deve ser paralela a face da exposição amostrada, o que restringe sua utilização (TANNANT 2015).

Outra limitação do método quanto a posição é de que os modelos digitais construídos para análise geomecânica, tipicamente, deve ser feitos a partir de imagens capturadas a uma distância inferior que dois quilômetros (2 km) (TANNANT 2015).

Os algoritmos de correlação de pontos comuns utilizam a intensidade de luz capturada deste determinado ponto. Logo, quando houver diferentes intensidades de luz capturadas de um mesmo ponto - a posição da luz solar em um determinado ponto da superfície por exemplo - os programas computacionais não são capazes de reconhecer estes pontos e de construir um modelo mais homogêneo (Figura 11).



Figura 11: Diferença na posição da iluminação solar na exposição rochosa amostrada. Na imagem da esquerda, a imagem foi capturada momentos antes que na imagem da direita.

Além disso, a presença de vegetação pode cobrir parte da área amostrada ou mesmo restringir a visibilidade entre a câmera e a exposição. Para isso, deve-se fazer uma limpeza do local onde será disposta a câmera fotográfica e da superfície amostrada. Quando isto não for possível, nos trabalhos de correlação de pontos comuns em fotos diferentes, deve-se evitar a utilização de pontos em áreas cobertas por vegetação.

4.4.4. Mapeamento geomecânico e aplicação da fotogrametria

O mapeamento geomecânico do maciço rochoso é realizado a partir da identificação de características, seja da rocha intacta ou das discontinuidades, que influenciam em seu comportamento mecânico.

A partir de modelos tridimensionais (DTM) gerados com a utilização de recursos de fotogrametria e programas computacionais adequados, pode-se realizar este trabalho de

maneira segura, quando estes estão precisamente posicionados espacialmente e com tamanho real (modelo realístico).

O *Sirovision* utiliza pares de imagens e de ferramentas de fotogrametria para a construção de DTM. O programa ainda é capaz de gerar mosaicos utilizando vários modelos gerados separadamente, cobrindo assim toda, ou boa parte, do maciço rochoso amostrado (BONILLA-SIERRA et al. 2015).

Além disso, o programa é capaz de reconhecer demais parâmetros geomecânicos como comprimento dos traços de descontinuidades, ondulação das paredes, rugosidade e espaçamento, além de detectar condições de instabilidade do maciço rochoso.

As análises de estabilidade quanto ao deslizamento e ao tombamento de blocos podem ser feitas com bastante confiança e facilidade utilizando modelos de rede de fraturas discretas (DFN) (UMILLI et al. 2013; BONILLA-SIERRA et al. 2015; TANNANT 2015; GRENON 2017; RIQUELME et al. 2018).

A construção dos modelos DFN é feita a partir da hipótese de que as características geométricas das descontinuidades (persistência, orientação, espaçamento, entre outros) seguem uma determinada f.d.p., portanto, para gerá-los é preciso ter conhecimento sobre a função de distribuição que melhor se ajusta a esta característica. Com este modelo DFN, as condições das propriedades que influenciam a estabilidade e condições de fluxo são mais realísticas e se aproximam do comportamento do material geológico.

É importante ainda que as considerações geométricas sobre as descontinuidades definidas no modelo DFN devem ser orientadas espacialmente, bem como deve ser considerada da intensidade das fraturas (número de fraturas por área).

5. Materiais e Métodos

Foram desenvolvidas as seguintes atividades neste trabalho: (a) Atividade de Campo: identificação litológica e captura de imagens digitais; (b) Atividades de Fotogrametria e Mapeamento Geomecânico utilizando programas computacionais e (c) Análise estatística dos dados coletados e comparação com metodologias de amostragem bidimensional.

A seguir são apresentados os procedimentos, materiais e ferramentas (programas computacionais) utilizados em cada atividade.

5.1. Atividade de Campo: identificação e captura de imagens digitais

O primeiro passo para esta atividade é o reconhecimento e seleção da exposição de maciço rochoso que será amostrado. Esta exposição deve ter dimensões em comprimento e altura consideráveis, geralmente com altura maior que cinco metros, para que consiga-se imaginar uma janela circular de amostragem com raio de tamanho compatível (Figura 12).



Figura 12: Captura de imagens utilizando tripé, câmera acoplada e escala de fita métrica.

Janelas circulares de amostragem de menor área são capazes de censurar mais traços de descontinuidades, causando uma subestimativa no comprimento médio dos traços. A exposição também deve ter superfícies e traços de descontinuidades facilmente identificáveis e deve-se evitar locais com vegetação, marcas de erosão ou demais fatores que impossibilitam a visualização destas estruturas. Após este primeiro passo, começam os trabalhos de captura de imagens. Para esta atividade, são utilizados os seguintes materiais:

- (a) Câmera fotográfica NIKON D7200;
- (b) Lente de abertura fixa AF Nikkor 50mm f/1.8D;
- (c) Tripé com nível de bolha para acoplar a câmera;
- (d) Trena de fita métrica metálica;
- (e) Trena a laser ou trena óptica;
- (f) Spray de tinta;
- (g) Bússola de geólogo;
- (h) Martelo de geólogo;

Na posse destes materiais, deve-se acoplar a câmera no tripé e posicionar este conjunto a uma certa distância do afloramento rochoso, esta distância [d] deve ser medida utilizando a trena a laser (ou óptica). Com o auxílio da bússola de geólogo, deve-se posicionar a câmera paralelamente a direção do talude, assim como deve-se utilizar os níveis (da bolha do tripé e da câmera) para posicioná-la horizontalmente. No caso de uma captura inclinada, os programas computacionais são capazes de construir um mosaico com diferentes posições.

A câmera e a lente tiveram as especificações de acordo com as funções de cada material. A Tabela 3 apresenta as especificações utilizadas para a Câmera NIKON D7200, enquanto a Tabela 4 apresenta as especificações para a lente NIKKOR 50mm f/1.8 D.

Tabela 3: Especificações da câmera NIKON D7200

Funções	Especificações da Câmera
Tipo de Imagem	RAW-N
Abertura do foco	$f8.0$
Sensibilidade ISO	100
Tempo de Exposição	AUTO

Tabela 4: Especificações da lente NIKKOR 50mm f/1.8 D

Funções	Especificações da Lente
Distância Focal	50mm
Abertura Máxima	$f/1.8$
Abertura Mínima	$f/22$
Construção da lente	6 elementos em 5 grupos
Ângulo de observação diagonal	46°
Ajuste do Foco	Sistema de extensão linear total com Micromotor
Distância focal mais próxima	0.45m
Tamanho de filtro	52mm
Diâmetro máximo / comprimento	Aproximadamente 63,5 x 39mm

Após ajustadas as especificações e medida a distância entre a câmera e a exposição de rocha, na exposição devem ser feitos pontos, utilizando a tinta de spray, além de posicionar a trena de fita métrica metálica para servir de escala para os trabalhos de fotogrametria em programas computacionais adequados. O uso da trena de fita metálica como escala se faz necessário, uma vez que não é conhecida a localização espacial exata dos diferentes pontos onde a câmera está posicionada e nem dos pontos focalizados na exposição.

A partir do primeiro ponto registrado com a tinta de spray na exposição, são capturadas duas fotografias, de diferentes localizações da câmera, com o centro da imagem focalizado neste ponto em comum. A distância relativa das duas localizações da câmera $[b]$ deve ser maior que $[d]/6$ e maior que $[d]/8$, para isso utiliza-se a trena de fita metálica ou de laser. Esta medida deve ser registrada e repetida para os demais pontos.

O método deve ser aplicado e repetido de maneira sistemática tentando cobrir toda a área da exposição rochosa. Assim, para cada ponto marcado nesta exposição terá uma dupla de fotos que focalizam e centralizam o foco em um ponto em comum nas diferentes posições da câmera que, para efeitos de fotogrametria, forma uma imagem tridimensional.

A fim de se investigar a litologia da rocha intacta e as atitudes das famílias de descontinuidades reconhecidas em campo, utilizou-se respectivamente o martelo e a bússola de geólogo. As medidas das atitudes das famílias de descontinuidades reconhecidas em campo são importantes para a calibração e verificação dos trabalhos de mapeamento geomecânico utilizando programas computacionais, como o *Sirovision*.

As imagens capturadas devem ser armazenadas em cartão de memória e devem ser descarregadas de forma sistemática nas máquinas de processamento. Cada dupla de imagem deve ser guardada em uma pasta com a nomeação dada para aquele ponto, por exemplo “DUPLA 1” é o nome da pasta que estão guardadas as duas imagens do primeiro ponto identificado na exposição de rocha e comum nas duas fotos.

5.2. Fotogrametria e mapeamento geomecânico

Após a coleta e armazenamento de todos os pares de imagens dos pontos amostrados naquela superfície de exposição, deve-se trabalhar com programas computacionais adequados que são capazes de gerar modelos tridimensionais a partir a técnica da fotogrametria, além de se realizar o mapeamento geomecânico.

Neste trabalho, o programa computacional escolhido foi o *Sirovision* versão 6.11.1. Com este programa, devem ser selecionados os pares de imagens que serão utilizados para a construção do modelo tridimensional. Após esta seleção, as imagens podem ser espacialmente referenciadas ou não.

A localização destas imagens deve ser feita a partir de instrumentos bastante precisos, como GPS geodésico, com tecnologia RTK. Os aparelhos de GPS comuns, não localizam com precisão cada posição espacial da câmera no momento da captura de imagem e geralmente acumulam erros de cinco a dez metros que não são desejáveis neste trabalho. Neste trabalho não foi utilizado este aparelho de precisão e, logo, as imagens não foram espacialmente referenciadas.

Os modelos tridimensionais, quando não referenciados, têm uma orientação genérica leste-oeste (E_W). O ajuste quanto a esta orientação deve ser feita a partir da orientação real medida em atividade de campo. Logo, para afloramentos orientados na posição norte-sul (N_S), medindo-se em atividade de campo, o modelo tridimensional e a estruturas nele delimitadas devem ser rotacionados em 90° no sentido horário.

O modelo tridimensional é gerado automaticamente a partir de uma dupla de imagens. Os procedimentos de superposição de pontos em comum pode ser feito de maneira manual, dando liberdade para o operador na escolha de pontos sem vegetação ou erosão que podem dar interpretações errôneas no modelo.

Neste modelo, também é visualizada a trena de fita metálica que serve de escala e que pode ser medida através de ferramentas do programa. Assim, quando se referencia em atividade de campo 1 metro utilizando a trena de fita metálica sobre o maciço rochoso e no modelo tridimensional, mede-se 0,5m, todas as medidas quanto a geometria das descontinuidades devem ser dobradas.

Desde que construído o modelo tridimensional, é possível agora visualizar, deslocar, orbitar de maneira 3-D o par de imagens conjugados. Este procedimento deve ser feito para todos os pares de imagens capturadas em campo que tentaram cobrir a maior parte da superfície amostrada. Após a construção de todos os modelos tridimensionais gerados a partir destes pares de imagens, pode-se montar um mosaico tridimensional de todos (ou parte) destes modelos.

A montagem do mosaico tridimensional é bastante intuitiva dentro do programa. Deve-se selecionar todos aqueles modelos que serão necessários para se montar o mosaico e sobrepô-los manualmente. O fato é que, devido a distorções nas imagens ou falta de sobreposição de pontos comuns em diferentes modelos - que geram “*gaps*” - os mosaicos não podem ser construídos por completo, ou seja um não é possível gerar um mosaico único da superfície amostrada. Com isso, neste trabalho, foram construídos mosaicos com a maior quantidade de modelos tridimensionais gerados desde que não apresentassem distorções ou problemas como faixas obscuras no mosaico devido aos “*gaps*”.

Com a construção do mosaico tridimensional, livre de problemas gerais de distorção e validação dos modelos, pode-se realizar o mapeamento geomecânico a partir da função “*Mapping*”. Este mapeamento pode ser realizado de duas maneiras: a partir da investigação

sobre características da rocha intacta, como densidade, coesão, porosidade e ângulo de atrito interno, ou sobre as superfícies e traços de descontinuidades que separam estes blocos de rocha intacta, em que são avaliados parâmetros como sua orientação e posição espacial, persistência, entre outros. Neste trabalho foram avaliados somente as características que são conferidas às superfícies e traços de descontinuidades, mais precisamente quanto ao seu tamanho (ou persistência).

As superfícies e traços de descontinuidades devem ser identificados e delimitados no próprio mosaico tridimensional e, automaticamente, são gerados “discos” que representam a superfície hipotética para cada estrutura, além de uma planilha com suas características individuais. Ainda neste momento, a projeção estereográfica é representada no canto direito da janela de visualização (Figura 13).

O programa ainda permite outras várias funções, aqui não discutidas, quanto à identificação de famílias de descontinuidades, análises de estabilidade de ruptura planar ou em cunha, executados com auxílio da função “Analysis”. No entanto, como o modelo não é georreferenciado e as estruturas estão fora de escala, este recurso do programa não foi utilizado. Estes procedimentos foram executados em outro programa a partir da exportação e posterior ajuste destes dados.

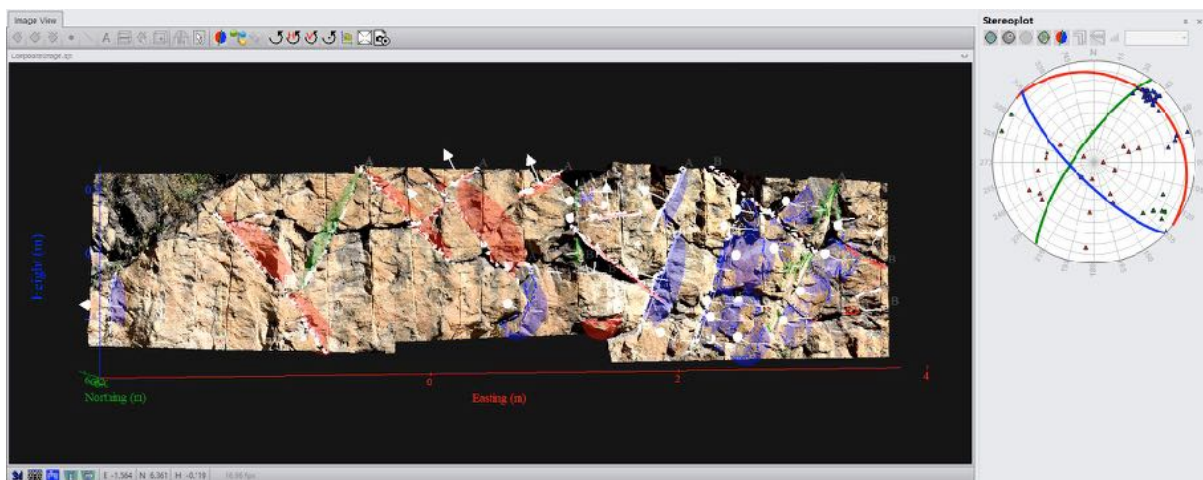


Figura 13: Método de Mapeamento e análise geomecânica realizada no Sirovision.

Após de delimitação das estruturas presentes no modelo tridimensional, as informações quanto às características de cada uma delas, assim como sua respectiva geometria, podem ser exportadas em diferentes formatos para uma análise mais avançada.

É importante lembrar que estas informações podem estar fora de escala, uma vez que o mosaico tridimensional não encontra-se georreferenciado. Logo, no mosaico tridimensional, deve-se identificar e medir a escala utilizada, para que assim consiga-se ajustar as medidas das características geomecânicas e de sua geometria. Desta maneira, a partir do conhecimento prévio do tamanho da escala utilizada em campo e da mesma escala medida no modelo tridimensional, os tamanhos devem ser comparados e as características geomecânicas e geométricas devem ser ajustadas ao tamanho real.

As características geomecânicas das superfícies e traços de discontinuidades ajustadas quanto a escala, devem ser também ajustadas quanto a orientação. Para isso, neste trabalho, foi utilizado o programa DIPS 5.1, Graphical and Statistical Analysis of Orientation (desenvolvido pela RocScience, em Toronto, Ontário, Canada, 1999). Neste programa foi feita a rotação destas estruturas de acordo com a orientação ajustada do talude medida em atividade de campo e assim, pode-se sanar o problema quanto a posição georreferenciada da exposição de rocha amostrada. Além disso, neste programa são feitas as identificações das principais famílias de discontinuidades.

O formato e a geometria das superfícies e traços de discontinuidades podem ser exportadas do *Sirovision* em formato DXF (*Drawing Exchange Format*). Este formato de arquivo é compatível com programas do tipo CAD (*Computer Aided Design*), ou seja programas de edição de imagens. Neste trabalho foi utilizado o AutoCAD 3D v.2016 - versão estudante - criado e comercializado pela Autodesk Inc. para trabalhos posteriores para amostragem de janelas circulares.

5.3. Análise estatística de dados e avaliação da estimativa de métodos de amostragem

A partir dos dados coletados e exportados nos mais diferentes formatos no *Sirovision*, pode-se realizar uma análise simultânea destes dados de maneira objetiva. Neste trabalho foram realizadas duas análises distintas: (a) Análise estatística do tamanho ou persistência de cada “disco” gerado a partir da delimitação das estruturas no mosaico tridimensional e (b) Amostragem e estimativa do comprimento médio dos traços de discontinuidades utilizando janelas circulares e a metodologia proposta por MAULDON et al. (2001).

Na primeira análise, foi utilizado o programa MINITAB 18, desenvolvido pela Minitab Inc., State College, Pensilvânia, EUA, que fornece um conjunto de ferramentas para analisar dados estatísticos com confiança, facilidade e praticidade. Com este programa ainda podem ser gerados gráficos, boxplot e histogramas de frequência e densidade de amostras que melhoram a visualização e a interpretação dos dados. Neste trabalho, o MINITAB 18 foi utilizado com a finalidade ilustrativa a partir da construção de histogramas de frequência absoluta e de densidade relativa do parâmetro investigado que é o tamanho ou persistência dos “discos” formados através das superfícies e traços de descontinuidades identificados e delimitados no *Sirovision*.

Além da construção dos histogramas de intervalos dos tamanhos das descontinuidades, faz-se necessário a realização de testes de aderência que exploram a condição do conjunto de dados seguir ou não uma distribuição de probabilidade. Para isso, este trabalho, utilizou-se a ferramenta INPUT ANALYSER do *software* ARENA, desenvolvido pela *Rockwell Automation Technologies Inc.*, Coraopolis - PA15108 - Estados Unidos, 1992.

O INPUT ANALYSER é um componente do ARENA que serve para determinar qual a distribuição de probabilidade que melhor se ajusta aos dados coletados. Esta determinação é feita pelos valores de P-value dos testes de aderência Qui-Quadrado e Kolmogorov-Smirnov (K-S). A partir disso, é feita a classificação das distribuições por ranqueamento, da melhor para a pior, mas também que permite a comparação das mesmas.

A segunda análise, da avaliação do método de amostragem proposto por MAULDON et al. (2001), foi realizada utilizando os arquivos em formato DXF (exportados do *Sirovision*) e o programa AutoCAD 3D v. 2016 (versão estudante). Os arquivos em formato DXF nada mais são que os formatos geométricos das superfícies e dos traços de descontinuidades delimitados no modelo tridimensional no *Sirovision* (formas geométricas em branco na Figura 14). Estas formas geométricas, neste trabalho, foram devidamente ajustadas de acordo com a escala utilizada e identificada no mosaico tridimensional, afim de se obter medidas reais destas estruturas.

A partir destas superfícies e traços de descontinuidades (que algumas vezes eram pouco curvilíneos) foram definidos traços retos e de natureza bidimensional utilizando linhas simples no programa. Estes traços são utilizados para amostragem utilizando janelas circulares (traços vermelhos na Figura 14).

No AutoCAD ainda podem ser definidas as janelas circulares de amostragem (círculos em azul turquesa na Figura (14)) que devem-se encontrar posicionadas normalmente à face da exposição de rocha, aqui definida pela superfície dos formatos de descontinuidades. Estas janelas podem ser posicionadas em diferentes porções da face e podem apresentar diversos tamanhos, são as denominadas janelas múltiplas. Neste trabalho, foram definidos tamanhos máximos de janelas de amostragem que cobrissem a totalidade da altura do talude e, de maneira concêntrica, foram definidas as janelas circulares de amostragem com menores áreas.

Tendo em mãos os traços bidimensionais de descontinuidades e as janelas circulares de amostragem, aliado a programas de edição de planilhas, como o Microsoft Excel (Pacote de programas do Microsoft Office) ou Numbers (Apple Inc.), é possível fazer a estimativa do comprimento médio dos traços a partir dos parâmetros definidos por MAULDON (2001): o número de interseções de traços de descontinuidades com os círculos de amostragem $[n]$, o número de terminações de traços de descontinuidades dentro da área desta circunferência de amostragem $[m]$ e o raio da janela de amostragem $[r]$.

Esta estimativa de comprimento médio dos traços para cada área de janela circular de amostragem é comparada com os valores encontrados através das estimativas de média e desvio-padrão segundo distribuições de probabilidade definidas e interpretação estereológica.

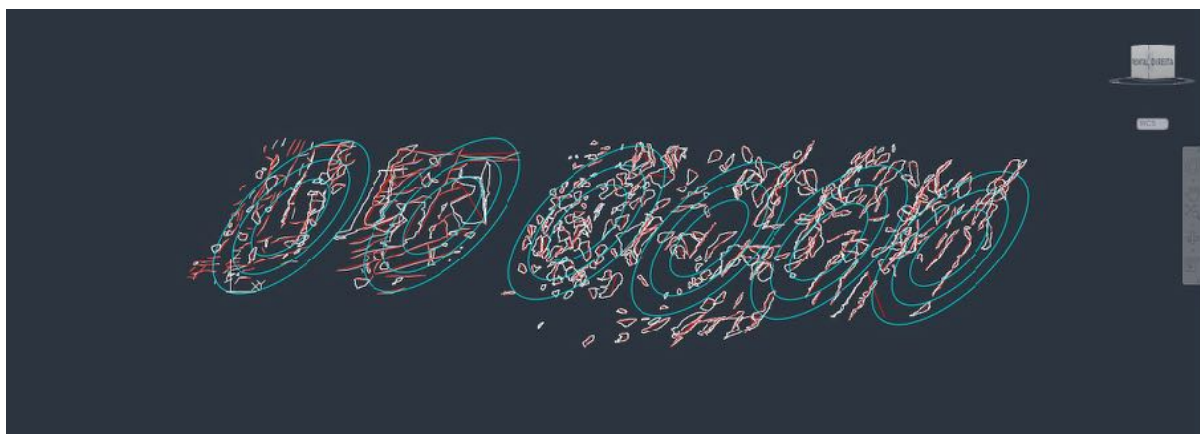


Figura 14: Amostragem de traços de descontinuidades utilizado o AutoCAD.

Tratam-se de exposições de rocha em taludes rodoviários. Os afloramentos rochosos (b), (c), (d), e (e) encontram-se na Rodovia BR-356, Rodovia dos Inconfidentes que ligam os municípios de Ouro Preto e Itabirito mas também é a principal via de acesso a capital do Estado, Belo Horizonte. Enquanto o afloramento (a) localiza-se em estrada vicinal no distrito de Rodrigo Silva, município de Ouro Preto, que dá acesso ao distrito de Miguel Bournier.

O QF possui cinco principais unidades litoestratigráficas: o Embasamento Cristalino de idade Arqueana; o Supergrupo Rio das Velhas; o Supergrupo Minas; Intrusões magmáticas pós Minas e o Grupo Itacolomi (ALKMIM & MARSHAK 1998).

As rochas do embasamento cristalino incluem complexos gnaisses e migmatitos de idade de cristalização entre 2,9 - 3,2 Ga (CARNEIRO et al. 1995). O complexo do Bação apresenta gnaisses caracterizados pela alternância de bandas leucocráticas e mesocráticas, mais raramente melanocráticas, variando em largura de 2 - 10 mm definido foliação penetrava em fácies anfibolito (FARINA et al. 2016). Estes gnaisses possuem mineralogia básica contendo na porção mesocrática plagioclásio e biotita, com textura lepidoblástica, e na porção leucocrática quartzo e microclina, com textura granoblástica (LANA et al. 2013).

O Supergrupo Minas é uma espessa sequência metassedimentar composta de rochas de natureza clástica (conglomerados, quartzitos e filitos) e química (formações ferríferas e carbonatos) (BABINSKI et al. 1995). Este Supergrupo pode ser dividido em seis Grupos de idade Proterozóica, cronologicamente, do mais antigo para o mais novo: Grupo Tamanduá, Grupo Caraça, Grupo Itabira, Grupo Piracicaba, Grupo Sabará e Grupo Itacolomi (FARINA et al. 2016).

O Grupo Itabira possui natureza de sedimentação química em ambiente de transgressão marinha. Pode ser subdividido em duas formações: a Formação Cauê, formada por rochas do tipo formações ferríferas bandadas (*BIF*), sobrepostas por camadas de dolomitos da Formação Gandarela (DORR 1969, BABINSKI et al. 1993).

O Grupo Piracicaba consiste em rochas metassedimentares de natureza clástica e química (CHEMALE et al. 1994). Pode ser subdividido em quatro formações: Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro (FARINA et al. 2016). O Grupo exibe granodecrescência do conglomerado basal Cercadinho até o filito grafitoso da Formação Barreiro, que deve ser interpretado como sedimentação de fechamento de bacia (RENGER 1994). A unidade basal

deste Grupo, a Formação Cercadinho, exhibe quartzitos e filitos, ferruginosos ou não, e pequenas intercalações de dolomitos.

Os afloramentos Tripuí, Maracujá e Itabirito são cartografados regionalmente como gnaisses do Complexo do Bação (MINAS GERAIS 2017). Tratam-se macroscopicamente de rochas com coloração esbranquiçada à cinzenta, por vezes rosada (em virtude da composição mais potássica do feldspato), intensamente fraturadas (Figura 16-18). Suas fraturas possuem superfícies das paredes rugosas e, quando combinadas com a superfícies dos taludes, formam planos e cunhas de deslizamento de blocos de rocha intacta. Os aspectos geométricos, como comprimento e altura, bem como as atitudes dos taludes de rocha são apresentados na Tabela 5. Esta tabela ainda sumariza as classificações geomecânicas GSI (HOEK & BROWN 1997) dos maciços rochosos destes afloramentos.



Figura 16: Maciço rochoso do ponto de amostragem Tripuí (trena comprimento de 1m).



Figura 17: Maciço rochoso do ponto de amostragem Maracujá.



Figura 18: Maciço rochoso do ponto de amostragem Itabirito (trena comprimento de 1m).

A exposição rochosa do ponto Ponte de Trem é mapeada regionalmente como dolomitos da Formação Gandarela, Grupo Itabira (MINAS GERAIS 2017). Localmente, afloram xistos de coloração rosada a amarelada, ricos em minerais micáceos (mica branca) e quartzo em granulação fina (Figura 19). As camadas de rocha encontram-se fortemente dobradas e fraturadas segundo, aparentemente, uma única família de descontinuidades pouco persistente. A xistosidade marca um plano de descontinuidade da rocha bastante persistente, muitas vezes preenchido por minerais alterados (caulim). Os aspectos geométricos e de orientação deste talude encontram-se na Tabela 5.



Figura 19: Maciço rochoso do ponto de amostragem Ponte de Trem.

As rochas do talude amostrado de Rodrigo Silva são cartografadas regionalmente como quartzitos do Grupo Piracicaba (MINAS GERAIS 2017). Localmente trata-se de um filito escuro, de coloração cinza, marrom em decorrência de material carbonoso. Visualmente são reconhecidas no mínimo três famílias de descontinuidades com diferentes persistências relativas que formam cunhas de deslizamento de diferentes tamanhos (Figura 20-21). Os tamanhos de comprimento e altura da exposição rochosa bem como a atitude deste talude são apresentadas na Tabela 5.



Figura 20: Maciço rochoso do ponto de amostragem Rodrigo Silva.



Figura 21: Maciço rochoso do ponto amostrado Rodrigo Silva. Detalhe para os planos subverticais das discontinuidades (trena comprimento 1m).

Tabela 5: Características dos pontos amostrados. (Ma) em milhões de anos.

Ponto de Amostragem	Localização	Coordenadas		Litologia	Idade (Ma)	GSI	Componentes Geométricos			Atitude do Talude	
		UTM E	UTM N				Altitude (m)	Altura (m)	Comprimento (m)		Dip (°)
Rodrigo Silva	Estrada vicinal Rodrigo Silva e Miguel Bourmier	642470.95	7741933.48	1.350	Filito	2420 - 2100	45	4	27	58	265
Ponte de Trem	Rodovia MG-356 Município de Ouro Preto	643265.12	7746397.48	1.101	Xisto	2419 ± 19	25	7	30	85	245
Maracujá	Rodovia MG-356 Município de Ouro Preto	637937.00	7750203.78	983	Gnaisse	3220 - 2680	65	6	48	87	135
Tripuí	Rodovia MG-356 Município de Ouro Preto	636532.48	7752072.17	952	Gnaisse	3220 - 2680	80	6	25	88	350
Itabirito	Rodovia MG-356 Município de Itabirito	625513.28	7762187.24	867	Gnaisse	3220 - 2680	70	9	24	87	215

7. Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para a estimativa do comprimento médio de traços de descontinuidades. Esta estimativa é feita através do(a): (a) Mapeamento Geomecânico utilizando recursos de fotogrametria; (b) Análise estatística e Testes de Aderência aplicado aos dados coletados e (c) Amostragem bidimensional de Janelas Circulares como proposto por MAULDON et al. (2001). São discutidas facilidades e limitações dos processos para se chegar nos resultados apresentados, além de propostas para melhor acurácia dos valores obtidos nestes trabalhos.

7.1. Mapeamento Geomecânico Utilizando o *Sirovision*

Durante os trabalhos de mapeamento geomecânico utilizando o programa *Sirovision*, foram identificadas e delimitadas superfícies e traços de descontinuidades presentes no maciço rochoso de cada ponto amostrado. Estas superfícies foram identificadas com cautela nos mosaicos tridimensionais e as características geomecânicas de cada estrutura delimitada foram avaliadas.

Nesta seção serão apresentadas as características sobre a orientação espacial de cada família de descontinuidades identificadas visualmente com auxílio do programa DIPS 5.1. A identificação visual foi feita de forma manual (Free-hand) a partir da densidade acumulada de polos dos planos de descontinuidades em estereogramas e a atitude de cada uma destas famílias é denotada em trama e apresentada Tabelas 6 a 10.

No ponto de amostragem Itabirito (Figura 18), foram definidos 15 modelos tridimensionais que combinados formaram quatro mosaicos. A partir destes mosaicos, foram identificadas e amostradas 273 superfícies e traços de descontinuidades que, distribuídos os polos das superfícies em estereograma, foram definidas cinco famílias de descontinuidades (Figura 22) (Tabela 6). Neste ponto, trata-se de um gnaisse localizado próximo ao limite no embasamento cristalino (Complexo do Bação) e as rochas supracrustais a norte (Supergrupo Minas). Esta localização limítrofe pode justificar os diversos planos de descontinuidades identificados nas mais diferentes orientações que formam uma quantidade considerável de famílias de descontinuidades.

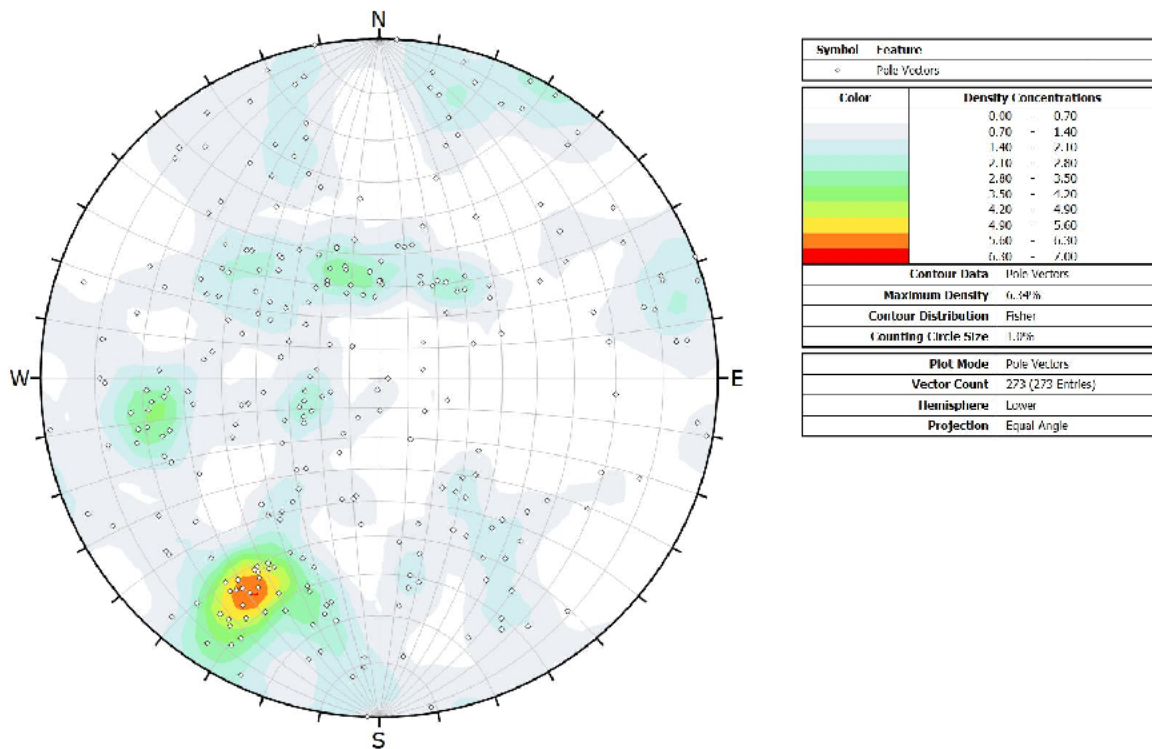


Figura 22: Estereograma do tipo densidade de pólos de descontinuidades para o ponto amostrado Itabirito.

Tabela 6: Atitude das famílias de descontinuidades identificadas no ponto Itabirito. Concentração de densidade de Fisher 0,34%.

Família	Dip	Dip Diretion
F1	24	31
F2	53	128
F3	68	81
F4	36	166
F5	39	218

No ponto de amostragem Maracujá (Figura 17), foram identificadas e amostradas 180 superfícies e traços de descontinuidades a partir de seis mosaicos tridimensionais construídos a partir de dez modelos. Foram assim identificadas e definidas três famílias de descontinuidades (Figura 23) (Tabela 7). Duas destas famílias apresentam forte mergulho (84-90°) que podem ser chamadas de fraturas subverticais e são facilmente perceptíveis nos

modelos tridimensionais. A combinação destas famílias de fraturas formam cunhas e blocos de considerável tamanho e volume, algumas suscetíveis a ruptura.

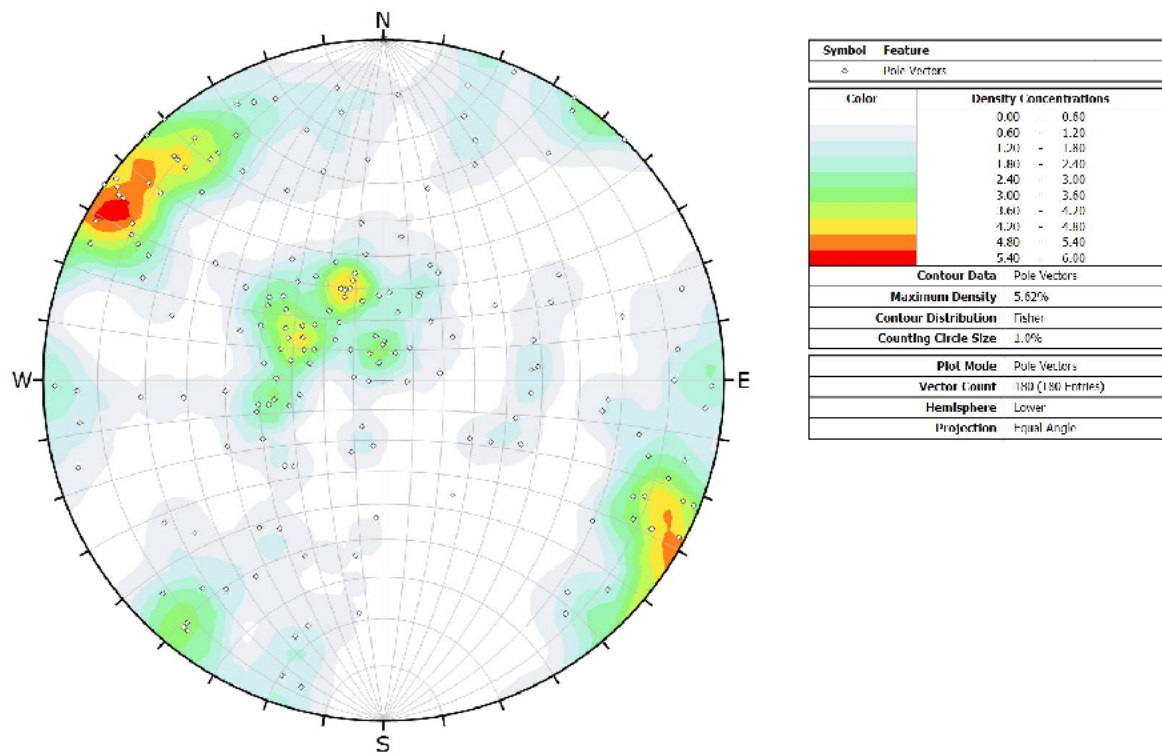


Figura 23: Estereograma do tipo densidade de pólos de descontinuidades para o ponto amostrado Maracujá.

Tabela 7: Atitude das famílias de descontinuidades identificadas no ponto Maracujá. Concentração de densidade de Fisher 5,62%.

Família	Dip	Dip Diretion
F1	31	129
F2	84	39
F3	90	125

Para o ponto amostrado Ponte de Trem (Figura 19), foram amostradas 324 superfícies e traços de descontinuidades a partir de quatro mosaicos construídos de 16 modelos tridimensionais gerados a partir de pares de imagens. Foram definidas, de acordo com a identificação visual, duas famílias de descontinuidades (Figura 24) (Tabela 8). Dentre estas famílias, a F1 define a xistosidade da rocha bastante persistente e com planos bem marcados em toda a exposição de rocha. A família F2 possui menor persistência e geralmente é

truncada pelos planos que definem a primeira família de descontinuidades. Por se tratar de um xisto, é comum que os planos de xistosidade, sendo mais persistentes, sejam mais facilmente identificados.

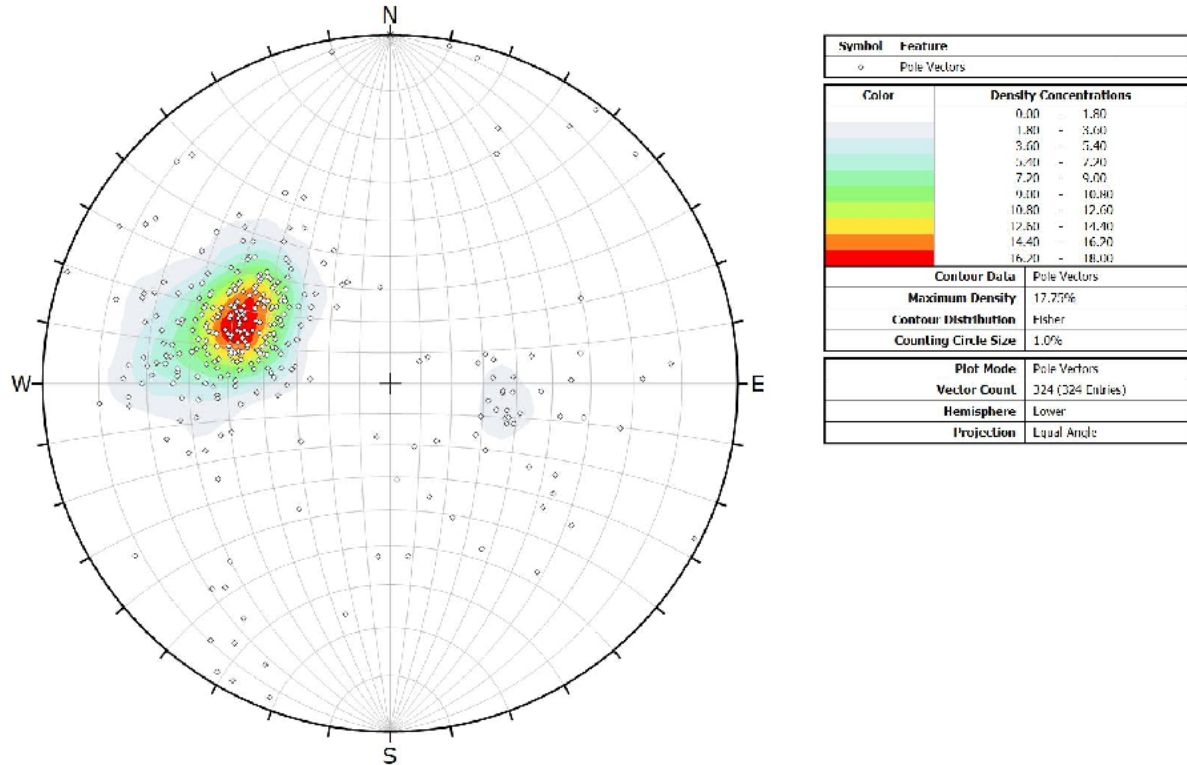


Figura 24: Estereograma do tipo densidade de pólos de descontinuidades para o ponto amostrado Ponte de Trem.

Tabela 8: Atitude das famílias de descontinuidades identificadas no ponto Ponte de Trem. Concentração de densidade de Fisher 17,75%.

Família	Dip	Dip Diretion
F1	51	111
F2	35	278

No ponto de amostragem Rodrigo Silva (Figuras 20-21), trata-se de uma rocha do tipo filito que apresenta planos de fraturas bem definidos e muitas vezes é perceptível a direção verticalizada do mergulho. Neste ponto, foram identificados e delimitados 385 planos e traços de descontinuidades e plotados em estereogramas de densidade de pólos (Figura 25). Visualmente, foram definidas três famílias de descontinuidades (Tabela 9). A família F2 pode ser interpretada visualmente como planos de foliação que apresentam baixo ângulo de

mergulho e são pouco persistentes. A família F3, por sua vez, é bastante persistente e apresenta forte mergulho das superfícies bastante perceptíveis tanto nas atividades de campo como nos modelos tridimensionais.

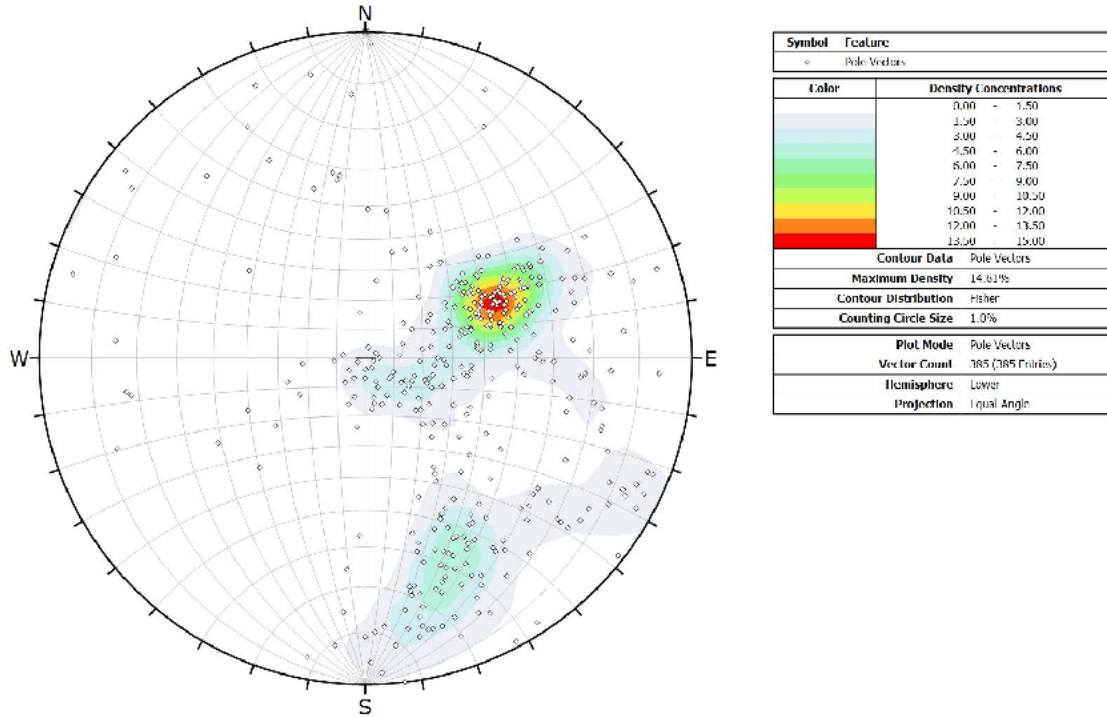


Figura 25: Estereograma do tipo densidade de pólos de descontinuidades para o ponto amostrado Rodrigo Silva.

Tabela 9: Atitude das famílias de descontinuidades identificadas Rodrigo Silva. Concentração de densidade de Fisher 14,61%.

Família	Dip	Dip Diretion
F1	49	245
F2	17	249
F3	71	340

No último ponto amostrado, Tripuí (Figura 16), foram identificados e delimitados 329 planos e traços de descontinuidades a partir de três mosaicos construídos a partir de 9 modelos tridimensionais gerados com auxílio de pares de imagens. Estas estruturas, plotadas em estereogramas de densidade de polos, puderam ser classificadas de acordo com quatro diferentes famílias de descontinuidades (Figura 26) (Tabela 10). Devido à grande quantidade

de polos de planos de descontinuidades dispersos, não evidenciando grandes densidades, a identificação e definição das famílias de descontinuidades não foi uma tarefa simples. Algumas vezes, escamamentos esferoidais, comuns em rochas graníticas, eram confundidos com planos de descontinuidades.

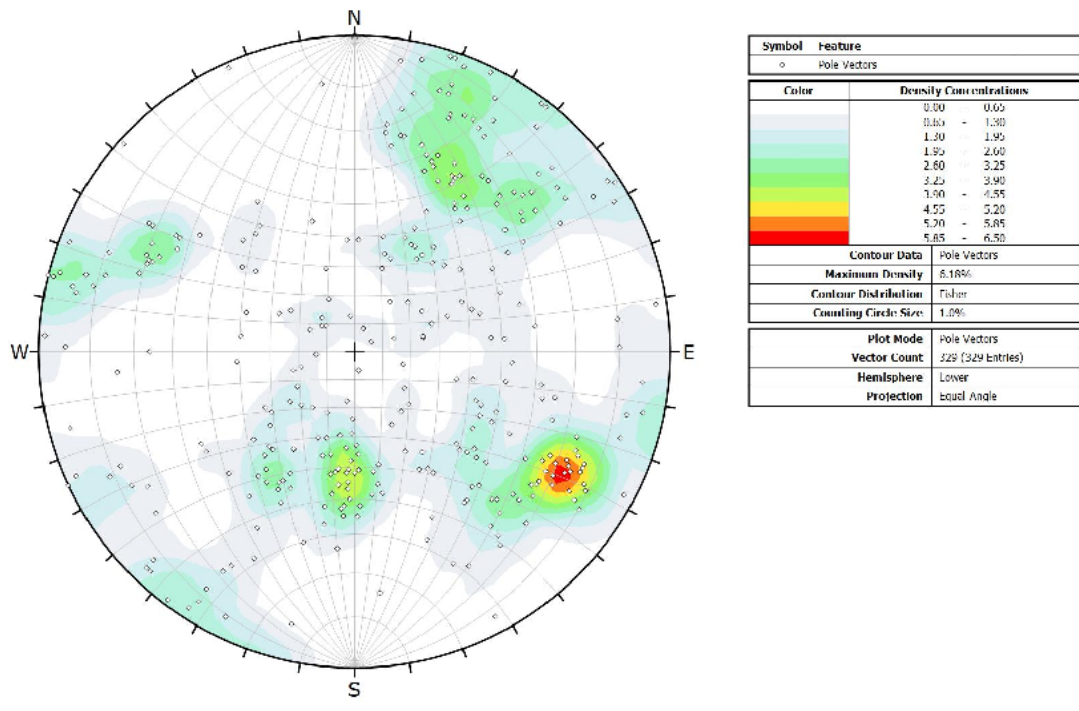


Figura 26: Estereograma do tipo densidade de pólos de descontinuidades para o ponto amostrado Tripuí.

Tabela 10: Atitude das famílias de descontinuidades identificadas no ponto Tripuí. Concentração de densidade de Fisher 16,18%.

Família	Dip	Dip Diretion
F1	72	211
F2	71	305
F3	44	12
F4	76	113

7.2. Análise Estatística dos Dados Coletados

Nesta seção serão apresentadas as análises estatísticas executadas diante do conjunto de dados reunidos sobre a persistência das descontinuidades das respectivas exposições rochosas amostradas. Utilizando a ferramenta INPUT ANALYSER, do programa de simulação ARENA, foram feitos testes de aderência que avaliam qual seria a melhor distribuição de probabilidade que aquele conjunto de dados segue segundo um nível de confiança de 95%.

A partir disso, serão apresentadas as estimativas de média e desvio-padrão para aquela melhor distribuição avaliada além dos valores de *p-value* obtidos com os testes de aderência Qui-quadrado e K-S. Mais adiante serão apresentados gráficos do tipo histogramas de frequência absoluta - em que é também apresentada a curva da distribuição adequada - confeccionados com auxílio do programa Minitab 18.

Ao final desta seção, a Tabela 11 sumariza estas estimativas e parâmetros encontrados nos testes de aderência para cada ponto amostrado.

Para o ponto Itabirito (Figura 18), a função de distribuição de probabilidade que melhor se ajusta para os tamanhos das descontinuidades, ou persistência, é a Log-Normal. A função estima valores de média [μ_D] e desvio padrão [σ^2_D] iguais a 1030 mm e 1160 mm. Os valores do *p-value* é 0,34 para o teste Qui-quadrado e maior que 0,15 para o teste K-S (Figura 27).

Os testes de aderência para o ponto Maracujá (Figura 17) mostram que o conjunto de dados para a persistência das descontinuidades também segue uma função do tipo Log-Normal. Podem ser estimados os valores de média e desvio-padrão de 1790 mm e 1650 mm. O teste Qui-quadrado calcula valores de *p-value* de 0,238, enquanto o teste K-S apresenta valores de *p-value* > 0,15 (Figura 28).

O conjunto de dados para a persistência das descontinuidades no ponto Ponte de Trem (Figura 19) ajustam-se a função de distribuição Log-Normal. A média e desvio-padrão calculados para esta função é 815mm e 692mm respectivamente. O teste estatístico Qui-quadrado apresenta valores de *p-value* de 0,454. Para o teste K-S, o valor de *p-value* é maior que 0,15 (Figura 29).

O teste de distribuição para os comprimentos de descontinuidades no ponto Rodrigo Silva (Figuras 20-21) também aponta uma tendência Log-Normal e valores de média e

desvio-padrão iguais a 439mm e 314mm respectivamente. Os testes Qui-quadrado e K-S apresentam valores de p -value de 0,0674 e $>0,15$, respectivamente (Figura 30)

Os comprimentos de descontinuidades para o ponto Tripuí (Figura 16) também se ajustam melhor na função Log-Normal e valor de média e desvio padrão de 569 e 459 respectivamente. O teste Qui-quadrado obteve valores de p -value de 0,0903. Já o teste K-S calcula valores de p -value $>0,15$ (Figura 31).

O conjunto de dados do tamanho das descontinuidades, obtidos através do mapeamento geomecânico realizado no programa *Sirovision* e avaliado através da ferramenta INPUT ANALYSER (ARENA), para todos os pontos amostrados, indicam com 95% de confiança uma tendência de seguirem uma distribuição Log-Normal assim como diversos autores afirmam para as mais diferentes litologias (WARBURTON 1984; EINSTEIN & BAECHER 1983; DERSHOWITZ & EINSTEIN 1988; VILLAESCUSA & BROWN 1992; ODLING et al. 1999; KULATILAKE et al. 2003; SONG & LEE 2006; WEISS 2008; ZHANG & DING 2010; ZADHESH et al. 2014; GRENON et al. 2017) (ver Tabela 2).

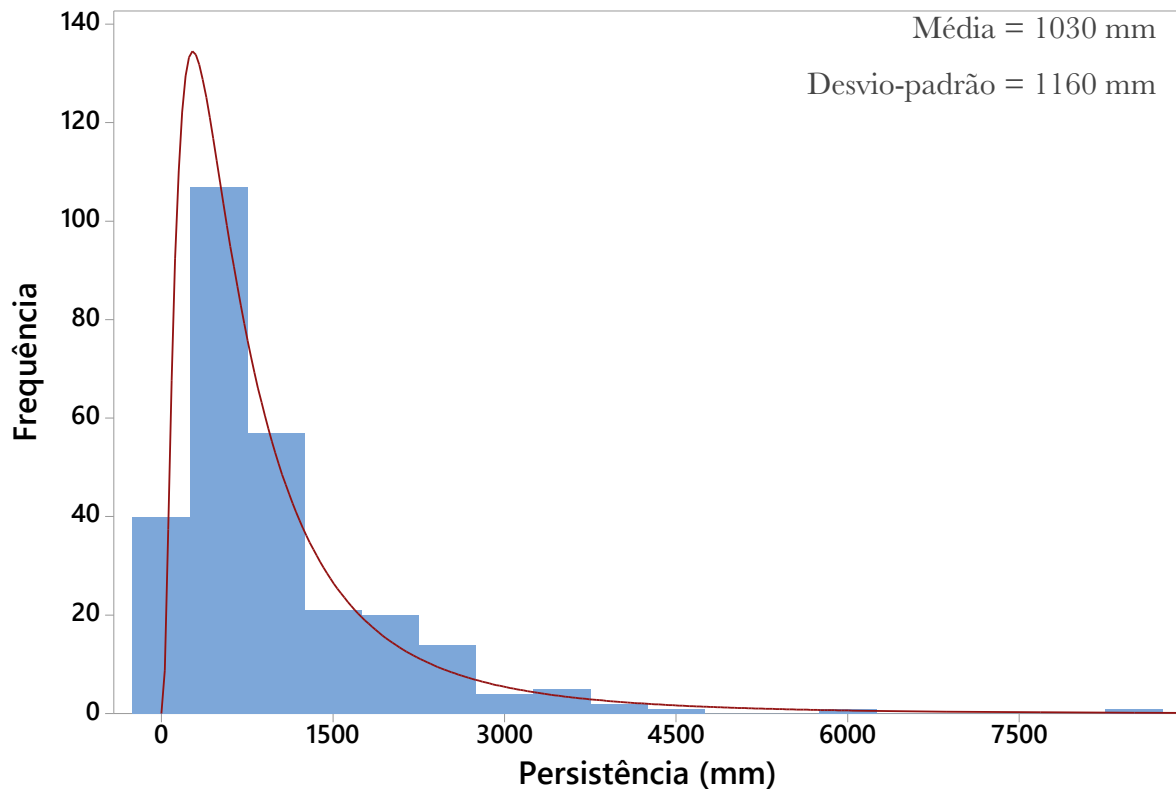


Figura 27: Histograma de frequência absoluta para persistência de descontinuidades para o ponto Itabirito.

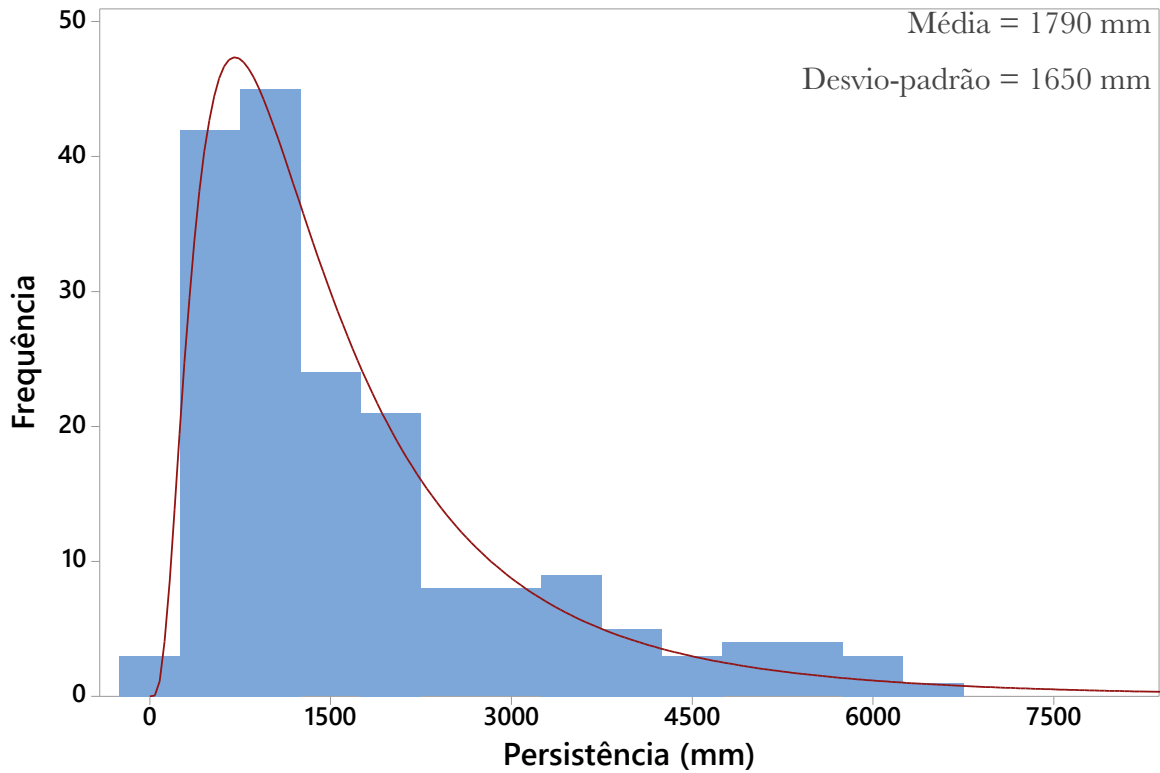


Figura 28: Histograma de frequência absoluta para persistência de descontinuidades para o ponto Maracujá.

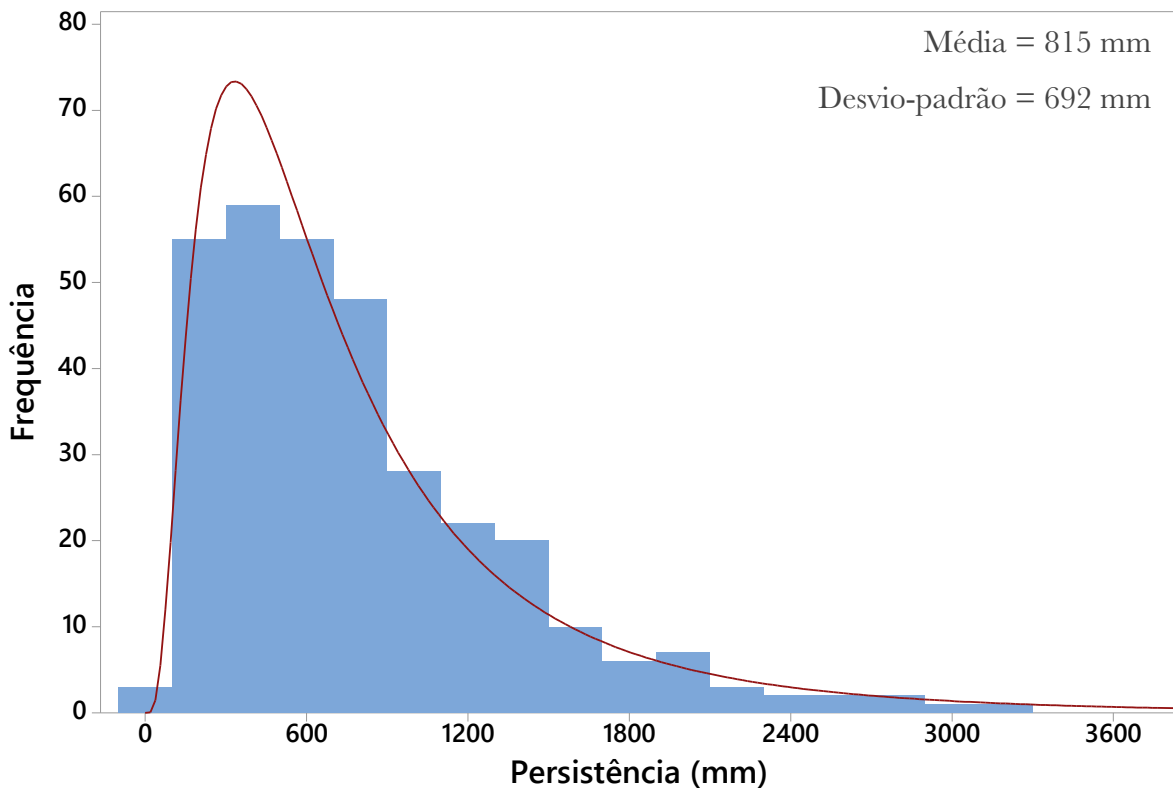


Figura 29: Histograma de frequência absoluta para persistência de descontinuidades para o ponto Ponte de Trem.

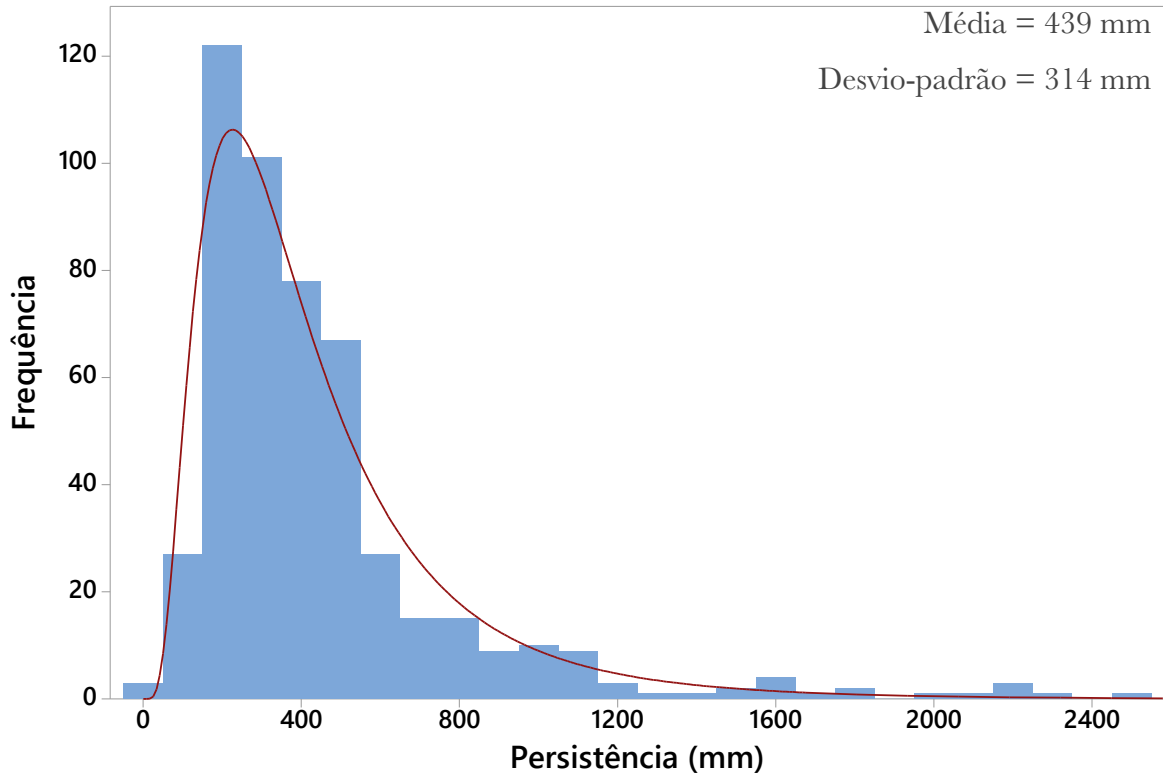


Figura 30: Histograma de frequência absoluta para persistência de descontinuidades para o ponto Rodrigo Silva.

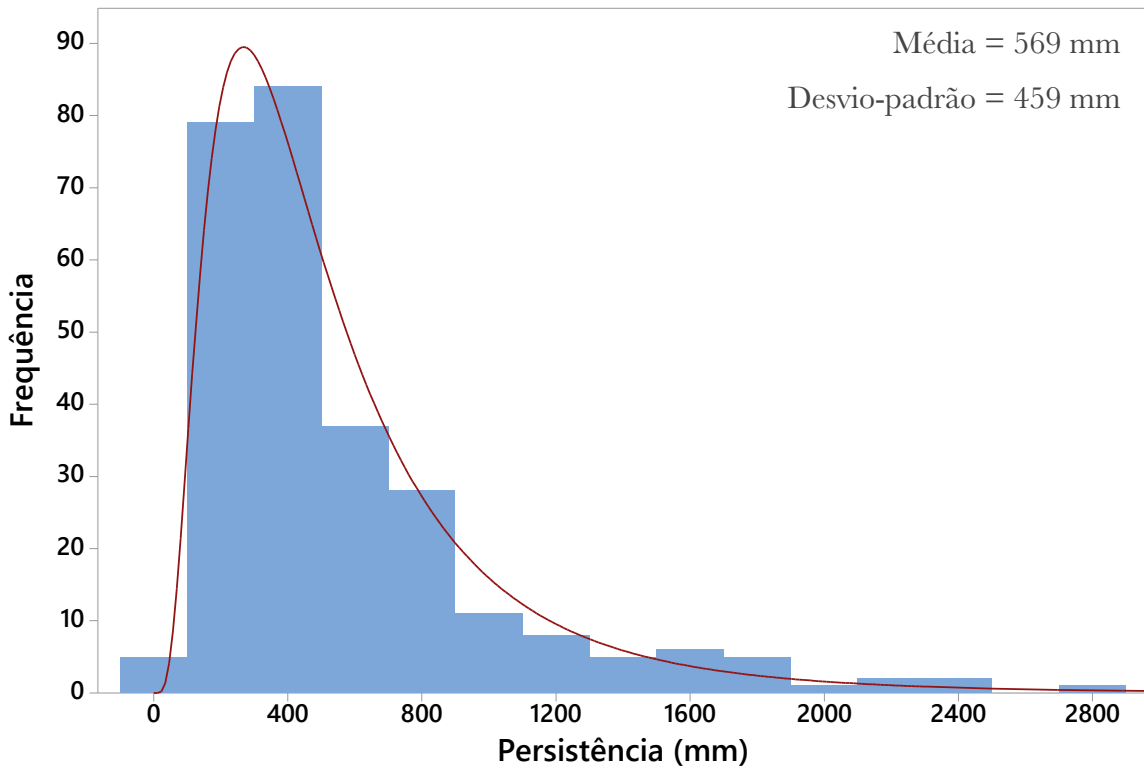


Figura 31: Histograma de frequência absoluta para persistência de descontinuidades para o ponto Tripuí.

Tabela 11: Estimativa de média e desvio-padrão para as distribuições de probabilidade ajustadas dos pontos amostrados

Ponto	Litologia	Distribuição	P-value (Qui- quadrado)	$[\mu_D](\text{mm})$	$[\sigma^2_D](\text{mm})$	GSI
Itabirito	Gnaise	Log-Normal	0,0311	1030	1160	70
Maracujá	Gnaise	Log-Normal	0,238	1790	1650	65
Ponte de Trem	Xisto	Log-Normal	0,454	815	692	25
Rodrigo Silva	Filito	Log-Normal	0,0674	439	314	45
Tripuí	Gnaise	Log-Normal	0,0903	569	459	80

As estimativas de comprimento médio das discontinuidades dos pontos Itabirito e Maracujá classificam o conjunto de discontinuidades como pouco persistentes (1-3m), enquanto para os pontos Ponte de Trem, Rodrigo Silva e Tripuí, a classificação é muito pouco persistente (<1m).

A estimativa acentuada para o desvio-padrão em alguns pontos é reflexo de grandes e solitárias superfícies de discontinuidades que cortam grande parte do maciço rochoso e tem comprimento muitas vezes maior do que a média dos comprimentos das demais superfícies e traços de discontinuidades amostrados, como é o caso do ponto Itabirito.

O ponto Itabirito apresenta o mais baixo valor de p-value de todos os pontos amostrados, o que pode implicar que a função Log-Normal tem menor aderência a este conjunto de dados coletados. De fato, os traços de discontinuidades muito persistentes (maiores que 8 m) têm tamanho muito maior que a média calculada pela função Log-Normal, fazendo com que estes valores não se encaixem na função definida. Os valores de p-value nos pontos Maracujá e Ponte de Trem são os mais altos, o que significa uma boa aderência a função Log-Normal.

7.3. Avaliação do Método de Janelas Circulares de MAULDON et al. (2001)

A avaliação do método de amostragem utilizando janelas circulares, elaborada por MAULDON et al. (2001), foi realizada ao se comparar os valores obtidos para o comprimento médio dos traços de descontinuidades [μ_l] com aqueles calculados a partir das simplificações desenvolvidas por WARBURTON (1980) diante da distribuição Log-Normal dos diâmetros das descontinuidades [μ_D].

Para cada ponto amostrado, será apresentado, em forma de gráfico de dispersão, o comportamento da estimativa do comprimento médio dos traços de descontinuidades para diferentes áreas circulares de amostragem (Figuras 32-36).

A média dos comprimentos de traços para cada área circular de amostragem são definidos como pontos brancos, enquanto a média dos comprimentos de traços obtida para cada janela de amostragem nos diferentes locais são definidos como pontos pretos.

A linha tracejada, paralela ao eixo das abcissas, representa o valor médio do comprimento de traços calculado através das simplificações de WARBURTON (1980) para esta estimativa a partir da definição da distribuição Log-Normal. A linha contínua também paralela ao eixo das abcissas indica o comprimento médio dos discos, ou tamanho das descontinuidades.

A linha cheia que une os pontos de comprimento médio para determinada área de amostragem é simplesmente uma linha de tendência, para facilitar a visualização do comportamento da estimativa.

De maneira geral, as estimativas do comprimento médio dos traços de descontinuidades, através do método de distribuição-livre de amostragem utilizando janelas circulares, apresentam valores menores que aqueles dependentes de distribuição. Ou seja a amostragem de MAULDON et al. (2001) subestima o comprimento médio de traços de descontinuidades comparado com o comprimento médio calculado por WARBURTON (1980), que é calculado a partir de distribuições de probabilidade do tipo Log-Normal.

No entanto, para todos os pontos amostrados, o comprimento médio dos traços de descontinuidades de todas as superfícies de amostragem, calculado a partir da amostragem de MAULDON et al. (2001) muito mais se aproxima do comprimento médio dos discos, ou

comprimento médio das descontinuidades, estimado a partir do mapeamento geomecânico e ferramentas de fotogrametria.

A estimativa do comprimento médio dos traços de descontinuidades a partir da amostragem utilizando janelas circulares tem comportamento de diferentes formas para os pontos amostrados.

O comportamento da estimativa é ligeiramente constante para o ponto Itabirito. O comportamento da estimativa de amostragem no ponto Tripuí pode ser considerado descendente, ou seja, quanto maior a janela de amostragem, mais distante a estimativa do tamanho real. Já para o ponto Maracujá, o comportamento aparenta-se difuso para a estimativa de amostragem - as janelas de tamanho intermediárias têm estimativas que mais se aproximam do valor real - e também descendente para janelas com raio maior que 2m. A litologia comum de todos os afloramentos rochosos destes pontos é o gnaisse.

Contraditoriamente, o ponto Ponte de Trem tem o comportamento da estimativa de amostragem do tipo ascendente e constante - a partir do tamanho da janela de amostragem com raio maior que 1,5m. Este comportamento é comum e esperado segundo ROHRBAUGH JR et al. 2002.

Enquanto, para o ponto Rodrigo Silva, a amostragem de MAULDON et al. (2001) tem comportamento difuso, porém as estimativas para tamanhos intermediários de janelas de amostragem muito se aproximam do comprimento médio calculado a partir da distribuição Log-Normal, bem como do comprimento médio dos discos.

Uma análise mais delicada, quanto a estimativa do comprimento médio dos traços de descontinuidades a partir dos valores estimados da média e desvio-padrão da função de distribuição Log-Normal, indica que os pontos Itabirito e Maracujá apresentam valores de desvio-padrão muito elevados, com valores maiores que a média calculada. O fato é que nestes afloramentos apresentam-se descontinuidades bastante persistentes (com comprimentos de traços de até 15m) em que seus valores de comprimento se diferenciam muito da média das amostras, fazendo com que o desvio-padrão obrigatoriamente aumente.

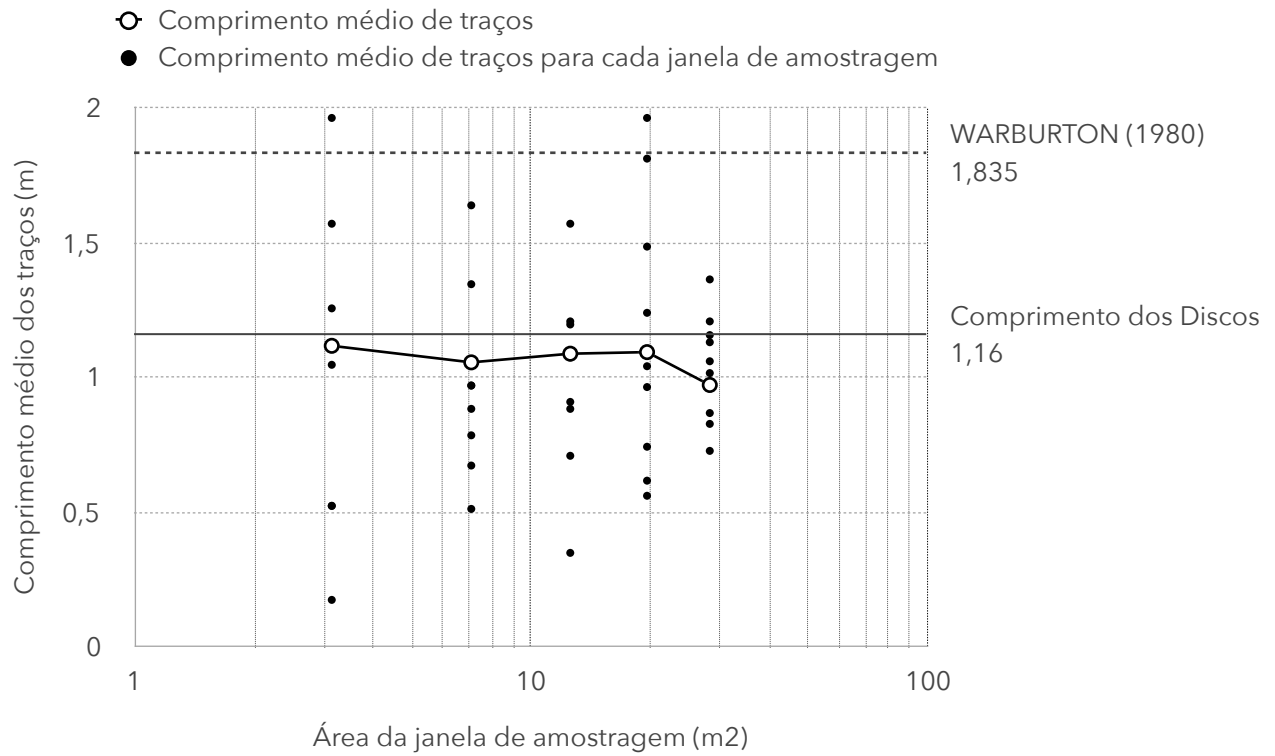


Figura 32: Estimativa de comprimento médio de traços de descontinuidades a partir de janelas circulares de amostragem no ponto Itabirito.

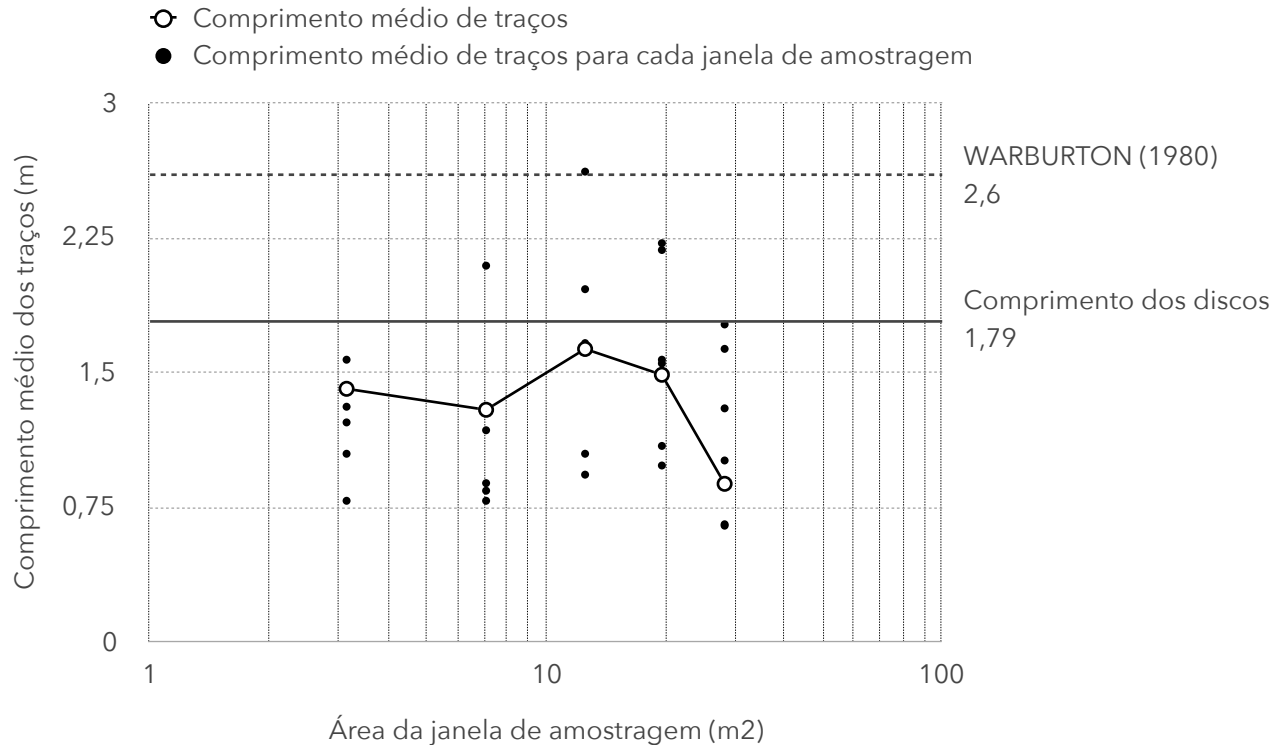


Figura 33: Estimativa de comprimento médio de traços de descontinuidades a partir de janelas circulares de amostragem no ponto Maracujá.

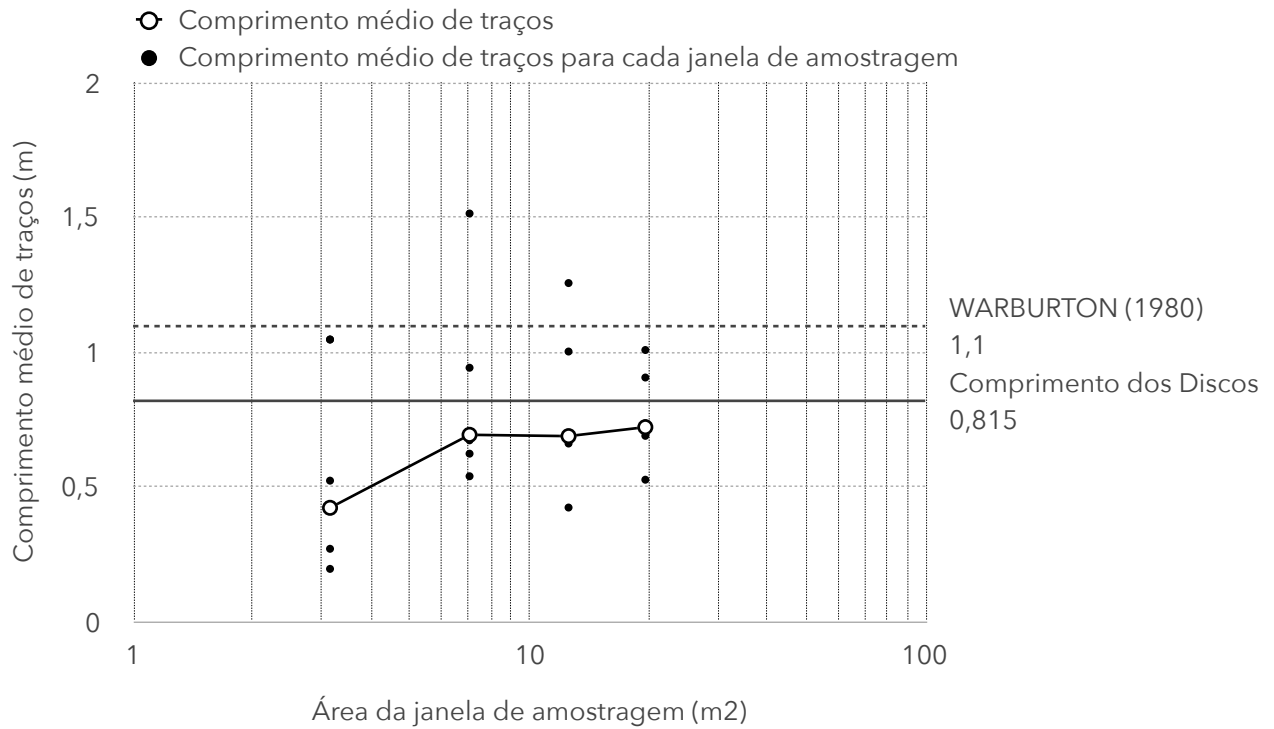


Figura 34: Estimativa de comprimento médio de traços de discontinuidades a partir de janelas circulares de amostragem no ponto Ponto de Trem.

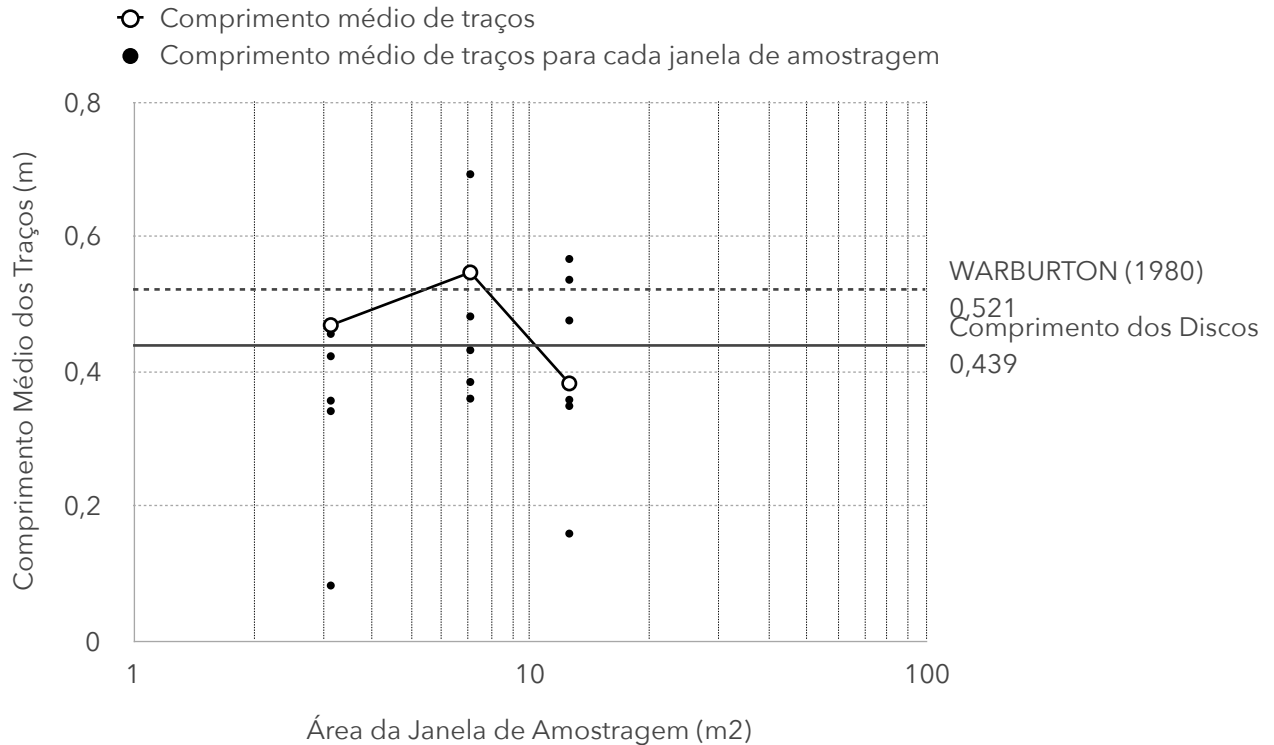


Figura 35: Estimativa de comprimento médio de traços de discontinuidades a partir de janelas circulares de amostragem no ponto Rodrigo Silva.

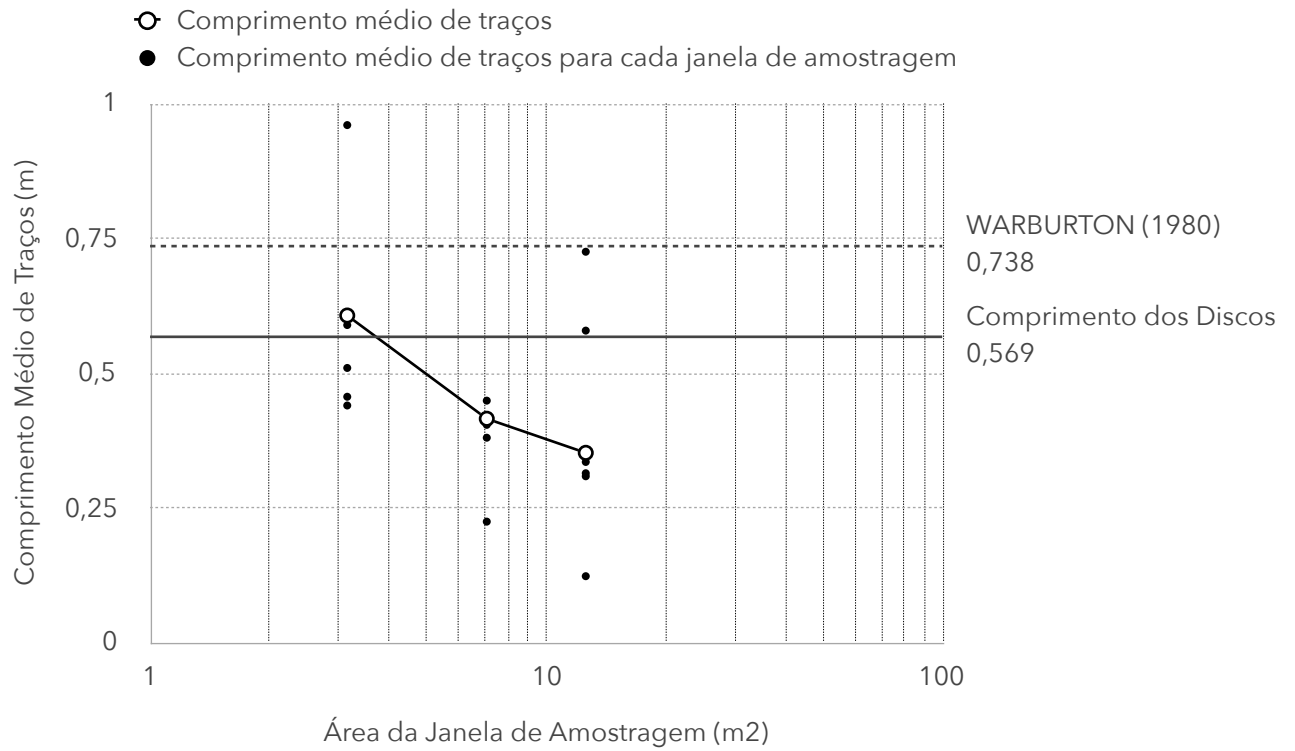


Figura 36: Estimativa de comprimento médio de traços de discontinuidades a partir de janelas circulares de amostragem no ponto Tripuí.

8. Conclusões

Os métodos de fotogrametria aplicados a geomecânica vêm progredindo bastante nas últimas décadas e têm tomado grande importância para o reconhecimento de riscos de rupturas e quedas de blocos. O *Sirovision*, utiliza de recursos de fotogrametria para a construção de modelos tridimensionais mas, além disso, possui ferramentas que realizam o Mapeamento Geomecânico a partir da identificação e delimitação das superfícies de descontinuidade. Com este modelo tridimensional é facilitado o acesso a qualquer porção do maciço rochoso e assim, alimenta-se um conjunto de dados mais robusto quanto aos parâmetros geomecânicos, como o comprimento das superfícies de descontinuidades.

Os trabalhos de Mapeamento Geomecânico realizados a partir de recursos de fotogrametria para cinco exposições de maciço rochoso, em três litologias diferentes (filito, gnanisso e xisto), situados na região sudeste de Minas Gerais, municípios de Ouro Preto e Itabirito, reúnem informações sobre o comprimento das superfícies de descontinuidades que, perante à análises estatísticas, seguem uma distribuição de probabilidade Log-Normal.

Os traços de descontinuidade são superfícies bidimensionais e podem ser definidos através das superfícies delimitadas e exportadas em formato CAD no *Sirovision*. Este procedimento reduz o viés de tamanho, quando traços maiores são mais facilmente visíveis comparados com traços menores, e permite uma amostragem mais realística. A partir disso, as janelas de amostragem são aplicadas normalmente à superfície de exposição e as interseções e terminações dos traços de descontinuidade com esta superfície contabilizadas para a estimativa do comprimento médio dos traços.

A estimativa do comprimento médio de traços de descontinuidades obtida a partir de simplificações probabilísticas utilizando a média e o desvio-padrão do comprimento das superfícies é comparada com o método utilizando janelas circulares de amostragem. Através desta comparação, é possível concluir que os métodos de amostragem de MAULDON et al. (2001) apresentam valores de comprimento médio de traços subestimados comparados com o comprimento médio de traços obtido através da interpretação estereológica proposta por WARBURTON (1980).

Além disso, as estimativas através da amostragem utilizando janelas circulares mais se aproximam dos valores de comprimento médio das superfícies (ou diâmetro) das descontinuidades, e têm diferentes comportamentos de acordo com a área da janela de amostragem, é o que denomina-se efeito escala.

Os afloramentos rochosos de litologia gnaiss apresentam um comportamento da estimativa do comprimento médio dos traços de descontinuidades do tipo descendente, ou seja, quanto maior for a área da janela de amostragem, maior é a diferença entre os valores amostrados e os calculados a partir da interpretação estereológica. Enquanto para os afloramentos rochosos do tipo xisto e filito, o comportamento da estimativa é quase constante para diferentes áreas de janelas de amostragem e apresenta valores menores que os calculados a partir da interpretação estereológica.

A caracterização do maciço rochoso quanto ao tamanho das descontinuidades é mais realística quando utilizam-se métodos de análise probabilística e estereológica aliado com os trabalhos de fotogrametria e mapeamento geomecânico utilizando o *software Sirovision* que, além do menor tempo despendido, viabiliza o acesso a qualquer parte do maciço com segurança, mas ainda pode alimentar um conjunto de dados muito mais robusto em relação ao tamanho das descontinuidades.

9. Referências Bibliográficas

- ALKMIM, Fernando F.; MARSHAK, Stephen. Transamazonian orogeny in the Southern Sao Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**, v. 90, n. 1-2, p. 29-58, 1998.
- BABINSKI, M.; CHEMALE JR, F.; VAN SCHMUS, W. R. A idade das formações ferríferas bandadas do Supergrupo Minas e sua correlação com aquelas da África do Sul e Austrália. **SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO**, v. 2, n. 1993, p. 152-153, 1993.
- BABINSKI, Marly; CHEMALE JR, Farid; VAN SCHMUS, William R. The PB/PB age of the minas supergroup carbonate rocks, quadrilatero FERRIFERO, BRAZIL. **Precambrian Research**, v. 72, n. 3-4, p. 235-245, 1995.
- BAECHER, Gregory B. et al. Trace length biases in joint surveys. In: **19th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)**. American Rock Mechanics Association, 1978.
- BANDIS, S. C. Mechanical properties of rock joints. **Rock Joints. Balkema, Rotterdam**, p. 125-140, 1990.
- BARTON, Colin Munro. A geotechnical analysis of rock structure and fabric in the CSA Mine, Cobar, New South Wales. 1977.
- BIRCH, J. S. Using 3DM analyst mine mapping suite for rock face characterization. **Laser and photogrammetric methods for rock face characterization**, p. 13-32, 2006.
- BRADY, Barry HG; BROWN, Edwin T. **Rock mechanics: for underground mining**. Springer Science & Business Media, 2013.
- BRIDGES, M. C. et al. Presentation of fracture data for rock mechanics. In: **Second Australia-New Zealand Conference on Geomechanics**. Institution of Engineers, Australia, 1975. p. 144.

- BONILLA-SIERRA, V. et al. Rock slope stability analysis using photogrammetric data and DFN–DEM modelling. **Acta Geotechnica**, v. 10, n. 4, p. 497-511, 2015.
- CALL, R. D. et al. Estimation of joint set characteristics from surface mapping data. In: **The 17th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)**. American Rock Mechanics Association, 1976.
- CARNEIRO, M. A.; NOCE, C. M.; TEIXEIRA, W. Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero sob o ponto de vista da Geocronologia. **Revista da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto (Brazil)**, v. 48, p. 264-274, 1995.
- CHEMALE JÚNIOR, Farid; ROSIÈRE, Carlos Alberto; ENDO, Issamu. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. 1994.
- CRUDEN, D. M. Describing the size of discontinuities. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Pergamon, 1977. p. 133-137.
- DERSHOWITZ, W. S.; EINSTEIN, H. H. Characterizing rock joint geometry with joint system models. **Rock mechanics and rock engineering**, v. 21, n. 1, p. 21-51, 1988.
- DORR, John Van Nostrand. Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. US Government Printing Office, 1969.
- EINSTEIN, Herbert H.; BAECHEER, Gregory B. Probabilistic and statistical methods in engineering geology. **Rock mechanics and rock engineering**, v. 16, n. 1, p. 39-72, 1983.
- FARINA, Federico et al. The Archean–Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Brasil): Current models and open questions. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 68, p. 4-21, 2016.
- FRANCIONI, M. et al. A case study integrating remote sensing and distinct element analysis to quarry slope stability assessment in the Monte Altissimo area, Italy. **Engineering Geology**, v. 183, p. 290-302, 2014.

- FRANCIONI, Mirko et al. Improvements in the integration of remote sensing and rock slope modelling. **Natural Hazards**, v. 90, n. 2, p. 975-1004, 2018.
- GRENON, Martin et al. Discrete fracture network based drift stability at the Éléonore mine. **Mining Technology**, v. 126, n. 1, p. 22-33, 2017.
- HOEK, Evert; BROWN, Edwin T. Practical estimates of rock mass strength. **International journal of rock mechanics and mining sciences**, v. 34, n. 8, p. 1165-1186, 1997.
- HUDSON, John A. **Rock mechanics principles in engineering practice**. 1989.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS COMMISSION ON STANDARDIZATION OF LABORATORY AND FIELD TESTS. Suggested methods for quantitative description of discontinuities in rock masses. **Int J Mech Min Sci Geomech Abstr**, v. 15, p. 319-368, 1978.
- KULATILAKE, P. H. S. W.; WU, T. H. Estimation of mean trace length of discontinuities. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 17, n. 4, p. 215-232, 1984.
- KULATILAKE, P. H. S. W. et al. Discontinuity geometry characterization in a tunnel close to the proposed permanent shiplock area of the three gorges dam site in China. In: **International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts**. Pergamon, 1996. p. 255-277.
- KULATILAKE, Pinnaduwa HSW et al. Stochastic fracture geometry modeling in 3-D including validations for a part of Arrowhead East Tunnel, California, USA. **Engineering Geology**, v. 70, n. 1-2, p. 131-155, 2003.
- LA POINTE, P. R.; HUDSON, John A. Characterization and interpretation of rock mass joint patterns. Geological Society of America, 1985.
- LANA, Cristiano et al. The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil. **Precambrian Research**, v. 231, p. 157-173, 2013.

- MAULDON, M.; MAULDON, J. G. Fracture sampling on a cylinder: from scanlines to boreholes and tunnels. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 30, n. 3, p. 129-144, 1997.
- MAULDON, M. Estimating mean fracture trace length and density from observations in convex windows. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 31, n. 4, p. 201-216, 1998.
- MAULDON, M.; DUNNE, W. M.; ROHRBAUGH JR, M. B. Circular scanlines and circular windows: new tools for characterizing the geometry of fracture traces. **Journal of Structural Geology**, v. 23, n. 2-3, p. 247-258, 2001.
- MINAS GERAIS. Projeto Triângulo Mineiro. Folha Ouro Preto (SF.23-X-A-III Escala 1:100.000) Programa de Mapeamento Geológico do Estado de Minas Gerais. CODEMIG, FUNDEP, Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.
- ODLING, N. E. et al. Variations in fracture system geometry and their implications for fluid flow in fractures hydrocarbon reservoirs. **Petroleum Geoscience**, v. 5, n. 4, p. 373-384, 1999.
- ORTEGA, I.; BOOTH, P. W.; DARRAS, J. Stability analysis and remedial design of two road cuttings in North Queensland based on remote geotechnical mapping using digital photogrammetry. **Proc. Slope Stability**, 2013.
- PAHL, P. J. Estimating the mean length of discontinuity traces. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Pergamon, 1981. p. 221-228.
- PITEAU, Douglas R. Characterizing and extrapolating rock joint properties in engineering practice. In: Geomechanik—Fortschritte in der Theorie und deren Auswirkungen auf die Praxis/Geomechanics—Progress in Theory and Its Effects on Practice. Springer, Vienna, 1973. p. 5-31.
- PRIEST, Stephen Donald. Discontinuity analysis for rock engineering. Springer Science & Business Media, 2012.

- PRIEST, S. D.; HUDSON, J. A. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. In: **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**. Pergamon, 1981. p. 183-197.
- RENGER, Friedrich E. et al. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma. de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. **Revista Geonomos**, v. 2, n. 1, 1994.
- RIQUELME, Adrián et al. Automatic Mapping of Discontinuity Persistence on Rock Masses Using 3D Point Clouds. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, p. 1-24, 2018.
- ROBERTSON, A. Interpretation of geological factors for use in slope theory. In: Planning Open Pit Mines-Symp. on the theoretical background to the planning of open pit mines with special reference to slope st. 1970. p. 55-71.
- ROCSCIENCE, D. I. P. S. 5.0—Graphical and Statistical Analysis of Orientation Data. **Rocscience, Canada**, 1999..
- ROHRBAUGH JR, M. B.; DUNNE, W. M.; MAULDON, M. Estimating fracture trace intensity, density, and mean length using circular scan lines and windows. **AAPG bulletin**, v. 86, n. 12, p. 2089-2104, 2002.
- SIROVISION. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization CSIRO (2010) Sirovivation 3D imaging mapping system manual version 6.1.11.
- SONG, Jae-Joon; LEE, Chung-In; SETO, Masahiro. Stability analysis of rock blocks around a tunnel using a statistical joint modeling technique. **Tunnelling and underground space technology**, v. 16, n. 4, p. 341-351, 2001.
- SONG, Jae-Joon. Estimation of a joint diameter distribution by an implicit scheme and interpolation technique. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 43, n. 4, p. 512-519, 2006.
- SONG, Jae-Joon. Distribution-free method for estimating size distribution and volumetric frequency of rock joints. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 46, n. 4, p. 748-760, 2009

- STURZENEGGER, M.; STEAD, D.; ELMO, D. Terrestrial remote sensing-based estimation of mean trace length, trace intensity and block size/shape. **Engineering Geology**, v. 119, n. 3-4, p. 96-111, 2011.
- TANNANT, Dwayne D. Review of photogrammetry-based techniques for characterization and hazard assessment of rock faces. **International Journal of Georesources and Environment-IJGE (formerly Int'l J of Geohazards and Environment)**, v. 1, n. 2, p. 76-87, 2015.
- UMILI, Gessica; FERRERO, A.; EINSTEIN, H. H. A new method for automatic discontinuity traces sampling on rock mass 3D model. **Computers & Geosciences**, v. 51, p. 182-192, 2013.
- VILLAESCUSA, E.; BROWN, E. T. Maximum likelihood estimation of joint size from trace length measurements. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 25, n. 2, p. 67-87, 1992.
- WARBURTON, P. M. A stereological interpretation of joint trace data. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Pergamon, 1980. p. 181-190.
- WEISS, Menachem. Techniques for estimating fracture size: A comparison of methods. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 3, n. 45, p. 460-466, 2008.
- WU, Qiong; KULATILAKE, P. H. S. W.; TANG, Hui-ming. Comparison of rock discontinuity mean trace length and density estimation methods using discontinuity data from an outcrop in Wenchuan area, China. **Computers and Geotechnics**, v. 38, n. 2, p. 258-268, 2011.
- ZADHESH, Jamal; JALALI, Seyed-Mohammad Esmail; RAMEZANZADEH, Ahmad. Estimation of joint trace length probability distribution function in igneous, sedimentary, and metamorphic rocks. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 7, n. 6, p. 2353-2361, 2014.

ZHANG, L.; EINSTEIN, H. H. Estimating the mean trace length of rock discontinuities. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 31, n. 4, p. 217-235, 1998.

ZHANG, Lianyang. **Analysis [sic] and design of drilled shafts in rock**. 1999. Tese de Doutorado. Massachusetts Institute of Technology.

ZHANG, Lianyang; EINSTEIN, H. H. Estimating the intensity of rock discontinuities. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 37, n. 5, p. 819-837, 2000.

ZHANG, Lianyang; DING, Xiaobin. Variance of non-parametric rock fracture mean trace length estimator. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 7, n. 47, p. 1222-1228, 2010.