

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA LICENCIATURA

Marco Antônio da Rosa Soares

**Caracterização de descontinuidades em pedreira por meio de
extração semiautomática com o uso de drone**

Santa Maria, RS
2023

Marco Antônio da Rosa Soares

**CARACTERIZAÇÃO DE DESCONTINUIDADES EM PEDREIRA POR MEIO DE
EXTRAÇÃO SEMIAUTOMÁTICA COM O USO DE DRONE**

Trabalho de Conclusão, apresentado ao Curso de Geografia - Licenciatura, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de Licenciado em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Romario Trentin

Santa Maria, RS
2023

Marco Antônio da Rosa Soares

CARACTERIZAÇÃO DE DESCONTINUIDADES EM PEDREIRA POR MEIO DE EXTRAÇÃO SEMIAUTOMÁTICA COM O USO DE DRONE

Trabalho de Conclusão, apresentado ao Curso de Geografia Licenciatura, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de Licenciado em Geografia.

Aprovado em 18 de dezembro de 2023.

Romario Trentin, Dr. (UFSM)
Orientador

Andrea Valli Nummer, Dra. (UFSM)

Lucas Krein Rademann, Msc. (UFSM)

Santa Maria, RS
2023

Soares, Marco Antônio da Rosa
CARACTERIZAÇÃO DE DESCONTINUIDADES EM PEDREIRA POR MEIO
DE EXTRAÇÃO SEMIAUTOMÁTICA COM O USO DE DRONE / Marco Antônio da
Rosa Soares. - 2023.

112 p.; 30 cm

Orientador: Romario Trentin

Trabalho de Graduação (Geografia Licenciatura) - Universidade Federal de
Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Departamento de Geociências,
Curso de Geografia, RS, 2023.

1. Classificação geomecânica 2. Extração semiautomática de
descontinuidades 3. VANTs 4. Fotogrametria 5. Estabilidade de Taludes

I. Trentin, Romario II. Título.

Declaro, MARCO ANTÔNIO DA ROSA SOARES, para os devidos fins e sob as
penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (TCC)
foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em
literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este
trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer
outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração
poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras
consequências legais.

AGRADECIMENTOS

Sou grato a todos que fizeram parte de forma positiva da minha jornada acadêmica dentro do curso de Geografia – Licenciatura, em especial, agradeço:

- Meus pais por me permitirem estudar, em destaque, minha mãe Christiane por todo o suporte e apoio durante esses 4 anos;

- ao meu orientador Romario Trentin pela oportunidade de fazer parte do LAGEOLAM e por toda a orientação acadêmica e pessoal. Agradeço pela confiança e por todo o suporte durante os artigos e trabalhos. Além de todos os momentos de interações e risadas que vão ser lembrados para sempre por mim;

- à minha coorientadora Andrea Nummer pela confiança, parceria e ajuda durante incontáveis momentos para a conclusão deste trabalho. Também, agradeço por todo o esforço nas explicações e saídas de campo, foram momentos de enorme aprendizado;

- aos meus colegas do LAGEOLAM, em especial, George Schnorr e Lucas Rademann por toda a parceria e risadas durante esse tempo juntos;

- à doutoranda Haline Ceccato por ajudar em dúvidas, ensaios e projetos envolvendo o presente trabalho. Sua ajuda foi fundamental para a conclusão deste trabalho;

- aos meus amigos que me apoiaram durante todo esse período, em destaque, Márcio, Matheus, Elias, Vitória, Sandy, Andressa e Luísa.

EPÍGRAFE

“Quem escreverá a história do que poderia ter sido o irreparável do meu passado;
Este é o cadáver.
Se a certa altura eu tivesse me voltado para a esquerda, ao invés que para direita;
Se em certo momento eu tivesse dito que não, ao invés que sim;
Se em certas conversas eu tivesse dito as frases que só hoje elaboro;
Seria outro hoje, e talvez o universo inteiro seria insensivelmente levado a ser outro também.”

Fernando Pessoa

RESUMO

CARACTERIZAÇÃO DE DESCONTINUIDADES EM PEDREIRA POR MEIO DE EXTRAÇÃO SEMIAUTOMÁTICA COM O USO DE DRONE

Autor: Marco Antônio da Rosa Soares

Orientador: Prof. Dr. Romario Trentin

As descontinuidades são importantes parâmetros para verificar a situação geomecânica do talude e inspecionar a sua estabilidade. Nesse contexto, desde a década de 1960 trabalhos têm sido feitos a fim de fazer a análise estrutural por meio de técnicas fotogramétricas. A partir do avanço da tecnologia, que permitiu a diminuição no custo de aquisição dos drones, a maior capacidade de processamento dos computadores e o surgimento da fotogrametria digital, a extração das características com Veículos Aéreos não tripulados (VANTs) se tornou um procedimento com grande interesse, com tentativas de automatização em partes do seu processo. Alguns fatores que auxiliam na justificativa do método são: acesso em áreas remotas, segurança do profissional que está coletando as informações e rapidez no serviço. Neste estudo, utilizou-se uma aeronave de asas rotatórias para sobrevoar três bancadas de uma frente de lavra, em uma pedreira da empresa Brita Pinhal, no município de Itaara, RS, posteriormente, utilizou-se essas imagens para gerar, por meio do software de fotogrametria Agisoft Metashape, as nuvens densas em diferentes qualidades da área de estudo. Os produtos foram importados para o *software* DSE para a extração das descontinuidades e das suas características, como espaçamento, orientação espacial e persistência, para a geração foram testados os parâmetros: qualidade da nuvem densa, KNN, tolerância e cone. Em conclusão das mudanças dos valores dessas questões, verificou-se que há uma grande diferença nos resultados, sendo necessário um profissional especializado em geotecnia para decidir a melhor configuração do programa. Essas informações foram aplicadas no Rock Mass Rating (RMR) e no Slope Mass Rating (SMR) para realizar a definição inicial da estabilidade do talude estudado. A validação da metodologia foi feita com base em uma segunda saída de campo para extração das orientações das descontinuidades com uma bússola do tipo Brunton, além disso, foram analisadas as informações necessárias para a classificação RMR. Posteriormente, realizou-se um ensaio de tensão uniaxial com três corpos de prova para obter o último parâmetro do RMR. Os resultados da extração das descontinuidades foram satisfatórios, entretanto, seria necessário um maior número de orientações coletadas no campo para uma validação mais precisa, entretanto, a metodologia se mostrou promissora. O talude da área de estudo de acordo com a classificação SMR foi considerado Bom e sem a necessidade de medidas de contenção, esse resultado era esperado, uma vez que a área possui profissionais para a abertura de novas bancadas e assegurar a estabilidade dos mesmos.

Palavras-chave: Geotecnia; Extração de Descontinuidades Semiautomatizada; VANTs; Fotogrametria; Estabilidade de taludes.

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF DISCONTINUITIES IN A QUARRY THROUGH SEMI-AUTOMATIC EXTRACTION USING DRONE

AUTHOR: Marco Antônio da Rosa Soares

ADVISOR: Romario Trentin

Discontinuities are important parameters for assessing the geomechanical condition of a slope and inspecting its stability. In this context, since the 1960s, efforts have been made to conduct structural analysis using photogrammetric techniques. With the advancement of technology, which has made drones more affordable, increased computing power, and the emergence of digital photogrammetry, the extraction of features with Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) has become a procedure of great interest, with attempts to automate parts of its process. Some factors that support the justification of the method include access to remote areas, the safety of the professional collecting information, and the speed of service. In this study, a rotary-wing aircraft was used to fly over three benches of a mining face in a quarry owned by Brita Pinhal, located in the municipality of Itaara, RS. Subsequently, these images were used to generate dense point clouds in different qualities of the study area through Agisoft Metashape photogrammetry software. The products were imported into the DSE software for the extraction of discontinuities and their characteristics, such as spacing, spatial orientation, and persistence. Parameters such as cloud quality, KNN, tolerance, and cone were tested for the generation. In conclusion, due to changes in the values of these parameters, a significant difference in the results was observed, requiring a geotechnical specialist to decide on the best program configuration. These extracted features were applied to the Rock Mass Rating (RMR) and Slope Mass Rating (SMR) to make the initial definition of the stability of the studied slope. The methodology's validation was based on a second field survey for extracting discontinuity orientations using a Brunton-type compass. Additionally, the necessary information for RMR classification was analyzed. Subsequently, a uniaxial tension test was conducted on three specimens to obtain the final RMR parameter. The results of the extraction of discontinuities were satisfactory; however, a greater number of field-collected orientations would be needed for more precise validation. Nevertheless, the methodology proved to be promising. According to the SMR classification, the slope of the study area was considered Good and do not require containment measures. This result was expected since the area has professionals supervising the opening of new benches and ensuring their stability.

Keywords: Geotechnics; Semiautomated Discontinuity Extraction; UAVs (Unmanned Aerial Vehicles); Photogrammetry; Slope stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da pedreira	13
Figura 2 – Sobreposição de imagens.....	16
Figura 3 – Derivação geométrica das relações	17
Figura 4 – 1) DEM da pedreira 2) Número de imagens sobrepostas na área	18
Figura 5 – Principais tipos de rupturas em maciços rochosos.....	25
Figura 6 – Descontinuidades em rupturas planas	26
Figura 7 – Características de descontinuidades.....	28
Figura 8 – Representação da coleta dos dados de Strike, Dip e Dip Direction	30
Figura 9 – Persistências de acordo com o comprimento das descontinuidades	31
Figura 10 – Perfis de rugosidade	33
Figura 11 – Pente de Barton	34
Figura 12 – Classificação da resistência de rochas e do solo com tradução pelo autor	35
Figura 13 – Classificação da resistência de rochas e do solo com tradução pelo autor	36
Figura 14 – Descrição de aberturas com tradução do autor	37
Figura 15 – Parâmetros F1, F2 e F3 para ajustar a orientação das descontinuidades	43
Figura 16 – Combo Fly More do Drone Mavic Air 2	52
Figura 17 – Rota no plano de voo automatizado.....	53
Figura 18 – Rota utilizada no voo manual	54
Figura 19 – Distribuição dos pontos coletados na área de estudo	54
Figura 20 – Fluxo de Trabalho para gerar a nuvem densa	56
Figura 21 – Configurações utilizadas no processamento.....	57
Figura 22 – Dados contidos na informação das fotos obtidas com Drone	58
Figura 23 – Marcação dos GCPs nas imagens.....	59
Figura 24 – Ruídos no modelo	59
Figura 25 – Recorte final da nuvem densa.....	60
Figura 26 – Ensaio de tensão uniaxial	65
Figura 27 – Recorte final da nuvem densa.....	67

Figura 28 – Coleta das informações de uma das descontinuidades da família principal	68
Figura 29 – Dip Direction, Dip e densidade obtidos com diferentes KNNs.....	70
Figura 30 – Nuvens densas nas qualidades Ultra High, Medium e High.....	71
Figura 31 – Nuvem densa na qualidade Low	72
Figura 32 – Dense Clouds com qualidades diferentes	73
Figura 33 – Estruturas com nuvens densas de diferentes qualidades	75
Figura 34 – Diagrama de rosetas.....	79
Figura 35 – Dense cloud classificada de acordo com a família de descontinuidades	81
Figura 36 – Família J1	81
Figura 37 – Família J2.....	82
Figura 38 – Família J3.....	83
Figura 39 – Família J4.....	84
Figura 40 – Família J5.....	85
Figura 41 – Corpos de Provas submetidos ao ensaio Uniaxial.	87
Figura 43 – Ruptura do corpo de prova 1.....	88
Figura 44 – Ruptura do corpo de prova 2.....	89
Figura 45 – Ruptura do corpo de prova 3.....	90
Figura 46 – Espaçamento obtido com o DSE.....	91
Figura 48 – Condição das descontinuidades em campo.....	93
Figura 49 – Persistência da família 4 do DSE	93
Figura 51 – Ferramenta SMRTool.....	95
Figura 52 – Resultados do F1, F2 e F3 pelo SMRTool	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros e pesos para aplicação do RMR	41
Tabela 2 – Parâmetros para classificação da condição das descontinuidades.....	42
Tabela 3 – Correção para ser feita na classificação de acordo com o tipo de obra ..	43
Tabela 4 – Definição do F1 e seu peso.....	44
Tabela 5 – Definição do F2 e seu peso.....	44
Tabela 6 – Definição do F3 e seu peso.....	45
Tabela 7 – Correção de acordo com o método de escavação	45
Tabela 8– Significado das classes de acordo com o peso final do SMR	47
Tabela 9 – Sugestão de métodos de contenção de acordo com o SMR.....	48
Tabela 10 – Especificações da aeronave.....	51
Tabela 11 – Informações do plano de voo	53
Tabela 12– Valores definidos para os processamentos no DSE.....	63
Tabela 13 – Tempo de processamento, número de fotos utilizadas e pontos nas Dense Clouds	67
Tabela 14 – Dip, Dip direction e densidade em diferentes qualidades de nuvem densa	76
Tabela 15 – Qualidades que contém as orientações	77
Tabela 16 – Resultados para valores de tolerância diferentes.....	77
Tabela 17 – Tensão obtida com o ensaio uniaxial	87
Tabela 18 – Parâmetros e pesos definidos para a condição das descontinuidades .	92
Tabela 19 – Classificação da família J1 no RMR	94

LISTA DE SIGLAS

UFMS - Universidade Federal de Santa Maria
VANTs - Veículos aéreos não tripulados
SfM - Structure-from-Motion
RMSE - Erro quadrático médio
TLS - Laser scanner terrestre
MVS - Multi-view-Stereo
VSLAM - Visual Simultaneous Localization and Mapping
GPS - sistema de posicionamento global
RTK - Real Time Kinematic
GNSS - Sistema de navegação por satélite
GCPs - Pontos de controle
PPK - Post-processing kinematic
RQD - Rock Quality Designation
RMR - Rock Mass Rating System
SMR - Slope Mass Rating
GSI - Geological Strength Index
CRTDP - TLS em conjunto com a fotogrametria de curto alcance
TIN - Grade triangular irregular
PPP - Posicionamento por Ponto Preciso
CP - Checkpoints
DSE - Discontinuity Set Extractor
KNN - k-nearest neighbours
KDE - Kernel density estimation
DS - (discontinuity set)
DBSCAN - Density-Based Scan Algorithm with Noise
LMCC - Laboratório de Materiais de Construção Civil
CC -CloudCompare
CP - Corpo de prova
CSMR - Chinese Slope Mass Rating

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.1.1 Objetivo geral.....	12
1.1.2 Objetivos Específicos	12
1.2 ÁREA DE ESTUDO	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 FOTOGRAMETRIA DIGITAL E <i>STRUCTURE-FROM-MOTION</i>	14
2.1.1 Fotogrametria digital, etapas e produtos	14
2.1.2 Técnica Structure-from-Motion e Multi-View-Stereo (SfM-MVS).....	19
2.2 USO DE DRONES E FOTOGRAMETRIA DIGITAL NA GEOGRAFIA..	20
2.3 MAPEAMENTO COM DRONES E PROCESSAMENTO DAS IMAGENS	
.....	22
2.3.1 Utilização de RTK e Estação Total para a correção geométrica de	
produtos de drones.....	22
2.3.2 Processamento de imagens de drones em softwares de	
fotogrametria digital.....	23
2.4 TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSA A PARTIR DAS	
DESCONTINUIDADES.....	24
2.5 – DESCONTINUIDADES E SUAS CARACTERÍSTICAS.....	26
2.6 SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS	38
2.6.2 Rock Quality Designation - RQD	39
2.6.3 Rock Mass Rating System – RMR system e Slope Mass Rating -	
SMR	40
2.7 FOTOGRAMETRIA E EXTRAÇÃO AUTOMATIZADA DAS	
CARACTERÍSTICAS DAS DESCONTINUIDADES.....	48
3 METODOLOGIA	51

3.1 ESPECIFICAÇÕES DO DRONE UTILIZADO.....	51
3.2 AQUISIÇÃO DAS IMAGENS	52
3.3 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS.....	55
3.4 EXTRAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES	60
3.5 TRABALHO DE CAMPO PARA COLETA DOS PARÂMETROS DO RMR	64
3.6 ENSAIO DE TENSÃO UNIAXIAL.....	64
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	66
4.1 EXTRAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DAS DESCONTINUIDADES....	68
4.2 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NO SOFTWARE DSE	69
4.2.1 Influência do parâmetro KNN no software DSE	69
4.2.2 Dense clouds de diferentes qualidades.....	70
4.2.3 Tolerância.....	77
4.2.4 Orientação obtida com o software DSE e em trabalho de campo	78
4.3 NUVEM DENSA CLASSIFICADA DE ACORDO COM A FAMÍLIA	80
4.4 SISTEMA RMR BÁSICO.....	86
4.5 SISTEMA SRM.....	94
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
REFERÊNCIAS.....	100

1 INTRODUÇÃO

O estudo dos desastres naturais é um tópico de recorrentes pesquisas no Brasil. Por conseguinte, observa-se que nos anos de 2002 a 2013, 10% dos trabalhos defendidos sobre desastres são da Geografia, sendo ela a terceira área do conhecimento com maior número de defesas, atrás das Ciências ambientais, 13% e Engenharia Sanitária, 11% (RODRIGUES et al, 2015).

Entre os diversos desastres naturais, destacam-se as enchentes e os movimentos de massa, ambos acarretam danos em diferentes graus e são os mais recorrentes no mundo (RIFFEL, GUASSELLI e BRESSANI, 2016). Em linhas gerais, os movimentos de massa compreendem quatro situações principais: queda de blocos, escorregamentos, corridas e rastejos (RAMOS, ALTAMIRANO E FERNANDA, 2009).

Um caso recente perto da área de estudo são os movimentos de massa ocorridos na BR-158, uma importante rodovia que faz conexão do município de Itaara com Santa Maria, que impediram o trânsito por cerca de 3 dias, ainda, no mesmo mês um motorista morreu ao colidir com uma rocha na pista. A cidade de Santa Maria possui 118 áreas de risco mapeadas, o que demonstra a alta necessidade de estudos dessa temática para mitigar ao máximo possível os danos gerados por essas ocorrências.

A coleta de dados das descontinuidades em maciços rochosos é um fator importante para estudos de queda de blocos, especialmente aqueles dentro da área da análise estrutural, pois são essas informações que permitem inferir a probabilidade desse movimento ocorrer. À vista disso, a obtenção dessas características de descontinuidades não é fundamental apenas por elas representarem áreas suscetíveis ao cisalhamento, mas também, por permitirem uma série de ensaios geotécnicos e conseqüentemente inferir a situação de estabilidade do talude (FIORI e CARMIGNANI, 2001). Desta forma, torna-se possível a identificação de área mais ou menos propensas à ocorrência de determinados processos de movimento de massa.

O modelo tradicional para obter os valores dessas características é por meio de medição manual de um geólogo ou engenheiro utilizando uma bússola do tipo Brunton ou Clar. Esse procedimento, de acordo com Wyllie e Mah (2005) é lento, expõe o profissional a riscos, como ser atingido por blocos rochosos, e é impossibilitado em áreas inacessíveis. A coleta dessas informações de maneira

semiautomática utilizando drones permite uma maior rapidez, análise de qualquer área do talude e segurança para o profissional. Diante disso, percebe-se que essa técnica com novas tecnologias busca mitigar as dificuldades encontradas no método tradicional.

Dessa forma, escolheu-se realizar o trabalho em uma pedreira constantemente utilizada para trabalhos de campo de alunos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), em decorrência da mesma apresentar um ambiente controlado, possibilitando uma análise de maior precisão e um risco mínimo para os envolvidos no trabalho.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Aplicar e analisar a extração semiautomatizada de características das descontinuidades com o uso de drones e fotogrametria digital.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Aplicar a extração semiautomatizada das características geométricas das descontinuidades com produtos gerados com imagens de drones;
- Utilizar as características das descontinuidades para o cálculo dos sistemas geomecânicos RMR e SRM;
- Verificar se os resultados expressos pelo método digital são coerentes, quando possível.

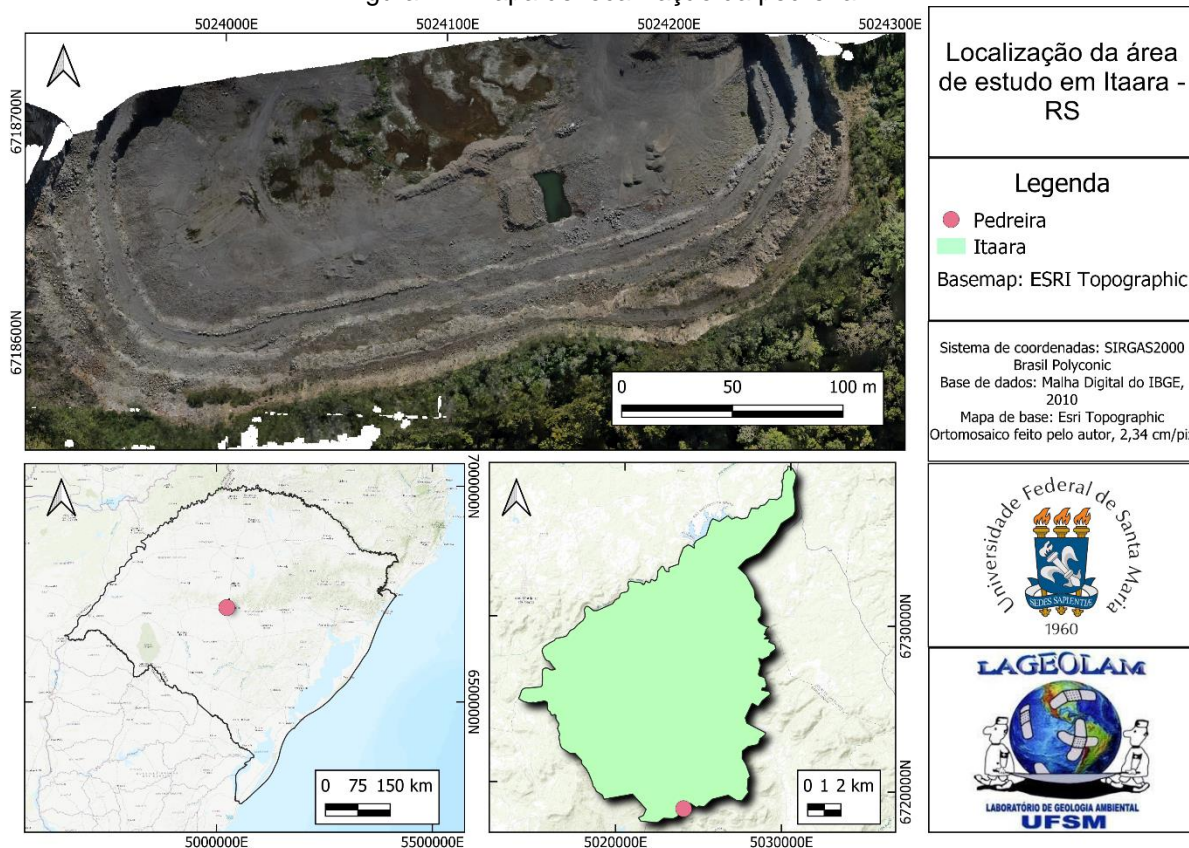
1.2 ÁREA DE ESTUDO

A pedreira que foi a área de estudo é da empresa Brita Pinhal Indústria e Comércio Ltda, localizada no município de Itaara, Rio Grande do Sul, com coordenadas UTM 233670mE e 6716905mS (Figura 1). As rochas da área de estudo foram formadas a partir de vulcanismos no Cretáceo inferior, pertencentes à Formação Serra Geral, fácies Caxias, com derrames em composição intermediária a ácida (CPRM, 2008).

A extração das rochas é feita com o método de lavra a céu aberto, as bancadas sendo de 12 metros e em 2017 a pedreira chegou a ocupar uma área escavada de 170.000 metros quadrados e desnível de 60 metros. A empresa produz brita e finos de britagem para construção civil, além de realizar serviços como construção de pontes, galerias, açudes, barragens e terraplanagem (BRITA PINHAL, 2017).

O município de Itaara está à 295 km da capital Porto Alegre e faz limite ao norte com Júlio de Castilhos (49 km), ao sul com Santa Maria (14 km), ao leste com Distrito de Arroio Grande e Santa Maria (15 km) e ao oeste com São Martinho da Serra (17 km). O município se encontra na mesorregião do Centro Ocidental Rio-Grandense, na microrregião Santa Maria, com os biomas Mata Atlântica e Pampa, compreendendo as bacias hidrográficas Vacacaí Mirim e Ibicuí Mirim. (PREFEITURA DE ITAARA, 2023).

Figura 1 – Mapa de localização da pedreira



Fonte: Autor (2023).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão expostas as principais referências teóricas que buscaram nortear e dar sustentação à pesquisa. A fundamentação teórica foi construída a partir de artigos e livros que circundam os temas abordados na pesquisa.

2.1 FOTOGRAMETRIA DIGITAL E *STRUCTURE-FROM-MOTION*

Neste tópico serão apresentadas as ideias gerais dos temas: fotogrametria digital, as etapas e os produtos gerados pelo processamento de imagens aéreas com drones e a técnica *Structure-from-Motion* (SfM).

2.1.1 Fotogrametria digital, etapas e produtos

O avanço das tecnologias, principalmente na área da computação, permitiu cálculos mais complexos e conseqüentemente o avanço de técnicas. A fotogrametria moderna pode ser caracterizada como um procedimento para coletar as informações métricas de um objeto por meio do uso de fotografias, estabelecendo ligações geométricas entre o que está na imagem e o objeto real (MIKHAIL, BETHEL E MCGLONE, 2001).

Nesse contexto, a fotogrametria é efetiva quando há no mínimo duas imagens do mesmo objeto retratado em diferentes posições, sendo que com um número maior de fotografias e sobreposição presente, o resultado da estimativa da distância do alvo e suas coordenadas pode ser melhorado (LINDER, 2006). Ainda, de acordo com Linder (2006) na história da fotogrametria podem ser destacadas três fases: *Analogue Photogrammetry*, *Analytical Photogrammetry* e *Digital Photogrammetry*, sendo as evoluções na tecnologia que permitiram essa transição de exigência de máquinas robustas e profissionais experientes para computadores simples e pessoas com pouco conhecimento sobre o assunto.

De acordo com Mikhail, Bethel e Mcglone (2001) há duas partes nos processos fotogramétricos:

- 1) Aquisição e preparação das imagens e demais dados;
- 2) Processamento das imagens a fim de obter os produtos.

A primeira se constitui de etapas como estudo do local, planejamento do plano de voo, coleta de pontos de controle e execução do plano. O plano do voo se mostra importante, pois é um momento que possui um grande impacto no resultado final em relação ao custo financeiro e temporal (GOODBODY, COOPS, E WHITE, 2019). A segunda é a inserção das imagens e dados no *software* de fotogrametria, a definição dos critérios de qualidade e o processamento em si.

A aquisição das imagens é um procedimento extremamente importante no processamento fotogramétrico, as escolhas tomadas quanto à uma série de fatores vão influenciar diretamente na qualidade do produto final. Na área da fotogrametria com *softwares*, destacam-se alguns elementos para um resultado satisfatório no processamento, sendo os principais: taxa de sobreposição, altura do voo, orientação da câmera em relação ao objeto e horário do voo.

A taxa de sobreposição (Figura 2) é uma área constante em duas ou mais imagens, podendo ser frontal, estabelecendo relação com as imagens adiantes, ou lateral, relação com as imagens ao lado (MIKHAIL, BETHEL e CHRIS, 2001). A sobreposição permite a identificação das *features* ou *keypoints* em diferentes pontos de visão no *software*, dessa forma, uma sobreposição excessiva pode levar a estimações erradas.

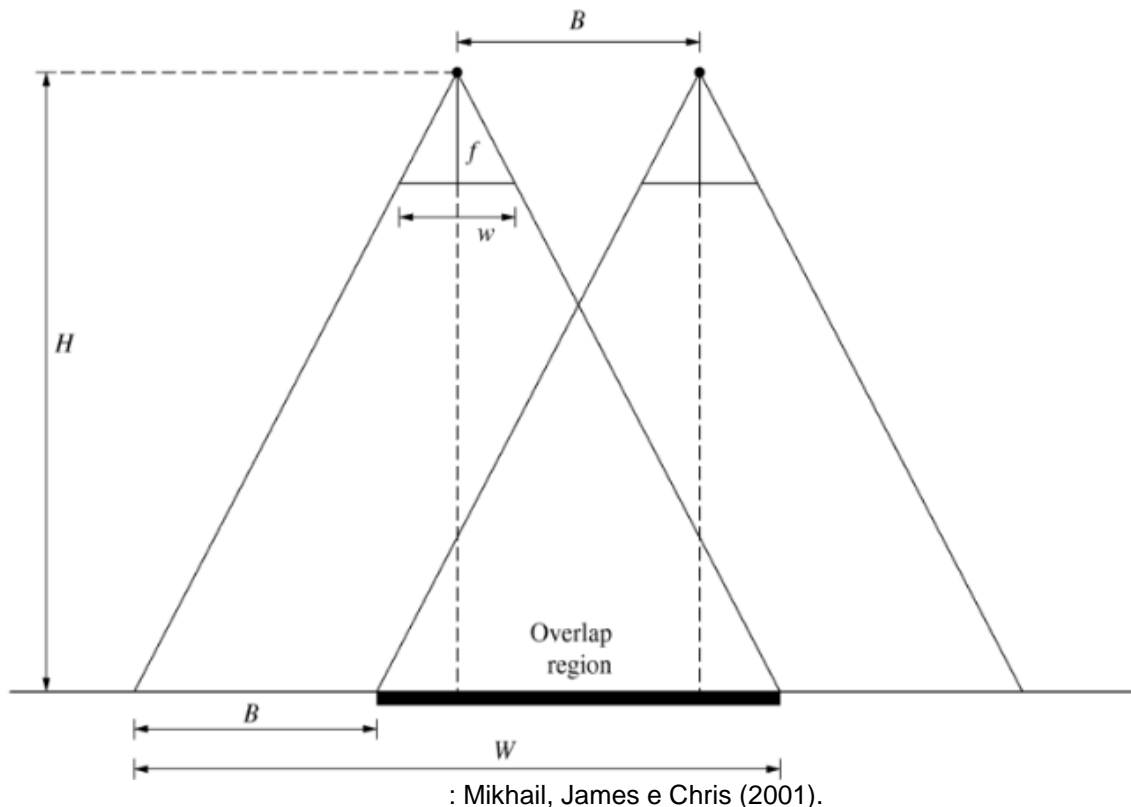
De acordo com Seifert, et al., 2019, as sobreposições frontal (1) e lateral (Equação 2) podem ser calculadas utilizando os parâmetros de altitude e sensor a partir das seguintes equações:

$$\text{Sobreposição } fron = \left(1 - \frac{d_{frontal}f}{Hw}\right) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Sobreposição } lat = \left(1 - \frac{d_{lateral}f}{Hw}\right) \times 100 \quad (2)$$

onde $d_{frontal}$ é a distância em metros dos retângulos de exposição, $d_{lateral}$ é a distância em metros das linhas do plano de voo, f é a distância focal em milímetros, H é a distância do centro de projeção da câmera até o chão, em metros, e w é o tamanho da abertura do sensor em milímetros.

Figura 2 – Sobreposição de imagens



Os valores mais utilizados na taxa de sobreposição estão entre 60 e 80% na sobreposição frontal para a obtenção de produtos fotogramétricos (MCGLONE, MIKHAIL e BETHEL, 2004). Em centros urbanos são utilizados números superiores à 80%, com o intuito de ter uma melhor visualização das áreas “escondidas” por construções altas (PEPE, FREGONESE e SCAIONI, 2018).

A equação (3) demonstrada por Kraus (2007) para o erro médio quadrático de z , σ_z , obtida através do desenvolvimento com as equações de paralaxes (Figura 3), demonstra que o acurácia de z é influenciada pela sobreposição frontal:

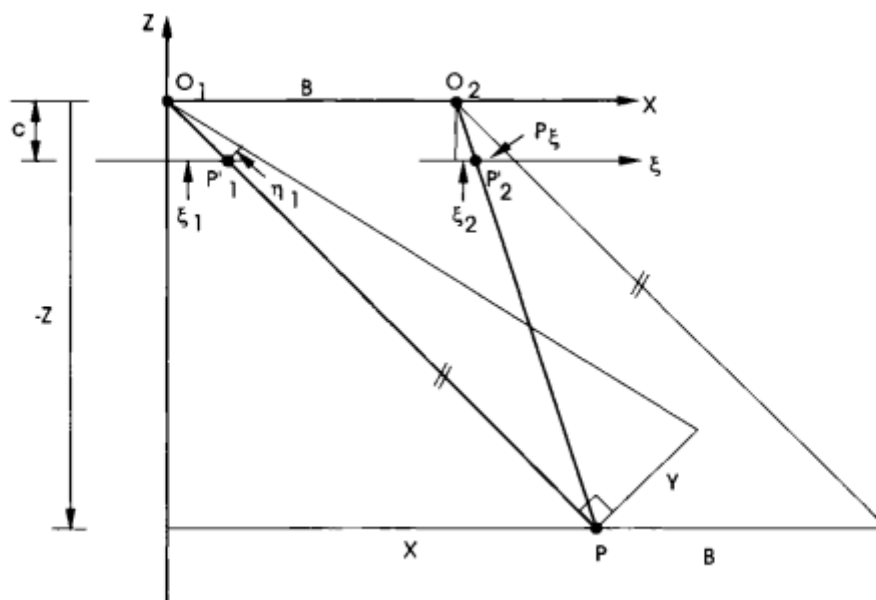
$$\sigma_z = \frac{cB}{p^2 \varepsilon} \sigma_{p\varepsilon} = \frac{Z}{c} \frac{Z}{B} \sigma_{p\varepsilon} \quad (3)$$

onde: a razão $\frac{Z}{c}$ vai ser a escala da imagem (m_B), sendo ela $m_B = \frac{Z_0}{c}$

a razão $\frac{B}{Z}$ vai ser a relação altura base

e p_ε a paralaxe de ε sendo essa a resultante de $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$

Figura 3 – Derivação geométrica das relações



Fonte: Kraus (2007)

Tendo em vista a equação, observa-se que a acurácia de z , σ_z , será dependente da distância do objeto em relação à câmera utilizada. Nesse viés, aplica-se essa noção aos termos utilizados na fotogrametria digital e se assume que há uma relação direta do aumento da sobreposição frontal e a acurácia no eixo z , ou seja, a elevação da primeira resulta em modelos menos precisos em z . (KRAUS, 2007). Em vista disso, afirma-se a necessidade de estudos nos *softwares* atuais para verificar a influência dessa ligação.

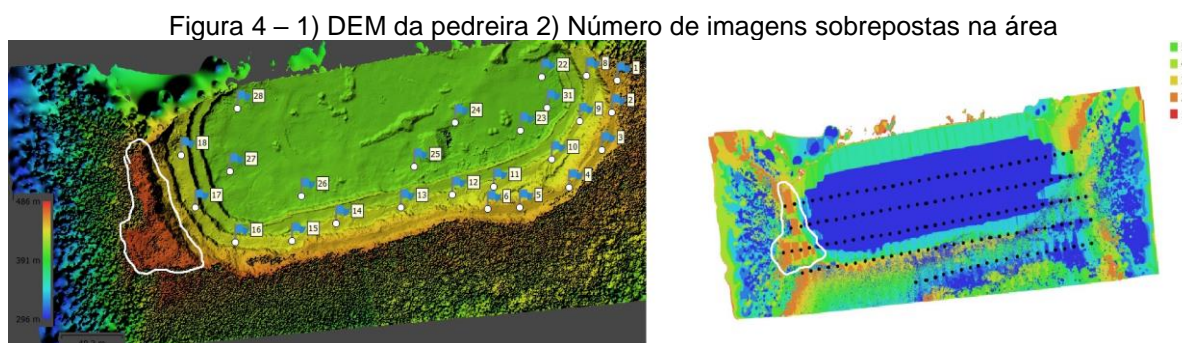
A sobreposição lateral de acordo com Pepe, Fregonese e Scaioni (2018) varia geralmente entre os valores de 20% a 30%, sendo o espaçamento das linhas (SP) possível de ser calculado a partir das linhas de voo (W) e da sobreposição lateral (Equação 4).

$$SP = W \cdot \left(\frac{100 - \text{sobreposição lat.}}{100} \right) \quad (4)$$

Entretanto, encontra-se, na área das geociências, uma diversidade de autores que utilizam sobreposições laterais maiores, variando entre 60% a 85% (SANTANA et al., 2022; LIU et al., 2016; KOCI et al., 2017).

A sobreposição utilizada para o voo deve levar em consideração outros parâmetros, como a geomorfologia do local e diferenças de alturas. As áreas mais

altas possuem uma distância vertical menor com o drone em relação às áreas mais baixas, o que conseqüentemente acaba diminuindo a taxa de sobreposição das áreas com maior altitude (JIMÉNEZ-JIMÉNEZ et al., 2021). A afirmação posta anteriormente pode ser vista na Figura 4, a qual exibe uma pedreira com 4 bancadas, a mais alta delas possuindo uma sobreposição muito menor, conforme é demonstrado na imagem da direita, enquanto a base é totalmente coberta por um número maior de fotos.



Fonte: Autor (2023).

A altura do voo constitui outro fator crucial a ser considerado durante a fase de planejamento, sendo que o aumento desse parâmetro tende a resultar em uma elevação do erro do modelo. De forma mais detalhada, o acréscimo na altura do voo ocasiona no aumento do tamanho do pixel; inversamente, a diminuição na altura do voo provoca uma redução no tamanho do pixel. Essa afirmação foi corroborada por Zarco-Tejada et al (2014), que observou um aumento no RMSE à medida que o tamanho do pixel da imagem aumentava.

Diante dessa constatação, é possível afirmar que o aumento da altura de voo contribuirá para o aumento do erro médio quadrático do modelo. Um ponto importante a ser avaliado é a magnitude desse aumento no erro, visando compreender o impacto resultante do aumento na altura do voo.

Em concordância, Gómez-Candon, De Castro e López-Granados (2014) encontram valores bastante similares na comparação com altitudes de 30, 60 e 100 metros, sendo que de 30 para 60 há um aumento mais relevante no erro quadrático médio (RMSE) enquanto que de 60 a 100 metros essa diferença é negligenciável.

Nesse tópico, Aguera-vega (2017), fez uma comparação do seu resultado de acurácia vertical com a pesquisa de Uysal (2015) onde demonstra que o RMSE foi similar para altitudes de 60 e 120 metros. Em contrapartida, Quoc-long (2020) mostra que a média do erro médio quadrático em seu trabalho é crescente conforme a altura

do voo aumenta, sem essa similaridade encontrada pelos autores citados previamente. Em conclusão, ele define que alturas de voo na faixa de 50 até 150 metros geram resultados confiáveis, ainda que exista um aumento do RMSE de cerca de 2,5x a cada 50 metros.

O ângulo de visada é igualmente uma variável importante que deve ser levada em consideração, especialmente em áreas de topografia complexa. A área de estudo é uma pedreira com uma significativa quantidade de ocorrências de falhas em cunhas, gerando estruturas com profundidade, o que resulta em sombras e maior dificuldade para a reconstrução digital por meio do método SfM-MVS.

Ângulos diferentes no gimbal da câmera do drone podem melhorar a visualização do objeto de estudo, facilitando a identificação de *features* e, conseqüentemente, melhorando a precisão do modelo. De acordo com Zapico et al (2020) o uso de fotos oblíquas permite uma maior precisão do modelo topográfico, na faixa de 0,9-1,9 cm acima das acurácias que podem ser obtidas com laser scanner terrestre (TLS).

Uma análise nesse tema aplicado ao estudo de voçorocas é feita por Rademann e Trentin (2023) os quais comparam os processamentos de três voos: nadir 90°, oblíquo (70°) e cruzado e, o terceiro, oblíquo (70°) e cruzado mais Nadir. O resultado foi um maior número de pontos na nuvem densa do projeto que continha os dois voos e um menor erro nas áreas mais profundas do talvegue.

Zapico et al (2021) realizaram 7 voos, diferenciando entre eles o tipo de voo e o ângulo da câmera, em uma área de mineração a céu aberto. A conclusão, de acordo com os dados, foi de que em todos os tipos de voo há uma diminuição do RMSE total quando há a utilização da câmera em ângulos oblíquos.

2.1.2 Técnica *Structure-from-Motion* e *Multi-View-Stereo* (SfM-MVS)

O conceito *Multi-view-Stereo* (MVS) é amplo e abrange uma diversidade de metodologias que utilizam mais de duas imagens e a correspondência estéreo como principal indicativo para a reprodução de uma cena tridimensional (FURUKAWA, 2015). A correspondência estéreo ou correspondência computacional é definida como a tentativa de identificar o mesmo ponto em fotos com pontos de vista diferentes, para isso, as abordagens mais utilizadas são a programação dinâmica, relaxamento e correlação (JAWAHAR e NARAYANAN, 2000).

Nesse contexto, outra divisão nos tipos de metodologias aplicadas na *stereovision matching* é sugerida por Pajares, Cruz e Orozco (2000) os quais falam sobre duas linhas principais de técnicas, *area based e feature based*, a primeira analisa a variação da ocorrência de certo elemento nas imagens e a segunda busca identificar o mesmo ponto, localizado nas bordas dos objetos, em diferentes imagens. Essa mesma categorização é descrita por Lee e Leou (1994), adicionando ainda que a técnica baseada na intensidade é mais sensível e conseqüentemente menos precisa se comparada com a outra.

Por meio disso, ressalta-se que há um grande leque de opções de algoritmos que podem ser utilizados em conjunto com o MVS, sendo o SfM, que obtém os parâmetros da câmera, um dos que popularizou o método MVS (FURUKAWA, 2015). Em adição, para o sucesso do MVS, além dos avanços nas técnicas SfM e *Visual Simultaneous Localization and Mapping* (VSLAM), a evolução em *hardware* das máquinas permitiu o processamento de tarefas com um maior número de imagens, além da popularização e barateamento dos sistemas de posicionamento global (GPS), os quais conseguem providenciar uma estimativa inicial dos parâmetros da câmera, que vão ser refinados posteriormente (FURUKAWA, 2015).

O algoritmo SfM tem a função de gerar dois produtos, o parâmetro da câmera para as imagens e pontos 3D que estão presentes nelas (FURUKAWA, 2015). De acordo com Jiang, Jiang e Jiang (2020), a aplicação do SfM é composta de duas partes principais, as quais eles denominam “*termed correspondence search*” e “*incremental reconstruction*”, sendo que a primeira busca extrair elementos da imagem e correlacionar com o mesmo elemento, mas em outra imagem, enquanto que a segunda formula pontos tridimensionais. Para além disso, há outras etapas feitas em conjunto com a técnica SfM-MVS, mas que não são parte da mesma, por exemplo, o *bundle adjustment*, a seleção de imagens e a remoção manual de ruídos (JIANG, JIANG, JIANG, 2020).

2.2 USO DE DRONES E FOTOGRAMETRIA DIGITAL NA GEOGRAFIA

O uso de drones está em crescimento tanto no cenário internacional quanto no nacional, principalmente nas áreas de Engenharia, Ciência da Computação e Telecomunicações (AFONSO e ALENCAR, 2022). No âmbito da Geografia, observa-se uma utilização menos expressiva, mas também em ascensão, entretanto, em

muitos casos o drone é utilizado apenas para a obtenção de fotos aéreas, sem avançar para as etapas relacionadas à fotogrametria digital.

A popularização dos drones em serviços mais próximos da sociedade fez com que uma série de conceitos e nomenclaturas diferentes surgissem. Em vista disso, torna-se importante entender corretamente o que são os drones, de acordo com Kreps (2016, p.7):

“o termo drone informalmente se refere à unmanned aerial vehicles” (UAVs), a Administração Federal de Aviação (FAA) se refere como “sistema de Aeronaves não Tripuladas” (UAS) enquanto a Força Aérea dos Estados Unidos se refere como “Aeronave Remotamente Pilotada” (RPAs)”

A utilização do SfM para a criação dos demais produtos é recente no Brasil, as primeiras pesquisas na área do algoritmo aplicado na fotogrametria visavam verificar os resultados e se a ferramenta era promissora para estudos futuros (FRANCO e NAIME, 2021). A aplicação de fotogrametria digital aérea no campo da Geografia se limita principalmente à estudos relacionados à Geografia Física, com destaque para os temas relacionados à Geomorfologia (RADEMANN, TRENTIN e ROBAINA, 2023; LOUREIRO, GUERRA e ANDRADE, 2020; FARIA et al., 2017) e mapeamentos de áreas de risco (ELAIZ, TOMAS e OTACÍLIO, 2018; FURLAN e TRENTIN, 2021; GUIDI, 2023).

Outra área na qual a utilização de fotogrametria digital é muito popular, tanto internacionalmente quanto nacionalmente, é a de conservação de patrimônios históricos, culturais e outros, Carla et al. (2019), destaca que a utilização dessa tecnologia permite uma maior compreensão do estado da construção e quais as melhores intervenções a serem feitas. Os estudos com drones aplicados na educação se destacam no Brasil, não sendo tão popular no cenário internacional, em síntese, a maioria utiliza o drone apenas para capturar fotografias, sem processar elas (SILVA et al., 2021; SILVA, ARAÚJO e REBOUÇAS, 2018)

Paz e Sampaio (2019), realizaram um levantamento do uso de aeronaves remotamente pilotadas em artigos em periódicos e anais de eventos da área da Geografia, do ano de 2014 até 2017. Um total de 2057 artigos publicados na faixa de tempo citada anteriormente foram consultados em 13 periódicos, porém apenas 8 trabalhos utilizaram drones. Já em anais de eventos, foram revisados 8541 artigos de 14 eventos e somente 73 fizeram uso de drones.

Em conclusão, percebe-se que, ainda que tenha sido dito anteriormente que essa é uma tecnologia recente, existe uma baixa quantidade de trabalhos utilizando essas ferramentas e aplicando na Geografia. Em adição a isso, considera-se que para a aplicação dos drones e fotogrametria digital é necessário que o geógrafo amplie seus conhecimentos, ainda que de maneira mínima, nas áreas de computação e exatas, o que pode se tornar um obstáculo, visto que, de acordo com BREUNIG et al. (2019), os estudantes de Geografia tendem a se distanciar das interpretações numéricas e áreas relacionadas.

2.3 MAPEAMENTO COM DRONES E PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

Este tópico possui a função de destacar dois procedimentos importantes que ocorreram no presente trabalho, o uso de ferramentas no processo de coleta das imagens, como *Real Time Kinematic* (RTK) e estação total, e o processamento das imagens de drones para a geração dos produtos. Esse último é feito em *softwares* de fotogrametria digital e o resultado apresenta uma variação dependendo de qual for utilizado, nesse contexto, foi feita uma breve comparação com base na literatura.

2.3.1 Utilização de RTK e Estação Total para a correção geométrica de produtos de drones

As aeronaves remotamente pilotadas em sua maioria possuem um sistema de navegação por satélite (GNSS) integrado e tradicionalmente era por esse equipamento que o georreferenciamento das imagens era feito (EKASO, NEX e KERLE, 2020). Em contraponto, reafirma-se que esse método, utilizando o GNSS integrado no drone, não fornece resultados úteis para projetos que requerem uma alta acurácia do modelo (JAMES et al., 2017).

Uma das maneiras de melhorar a acurácia dos produtos é utilizar pontos de controle (GCPs), os quais podem ser coletados com receptor GNSS com o RTK (EKASO, NEX E KERLE, 2020; VERDONK, 2015; LIU et al., 2016), post-processing kinematic (PPK) (EKER, ALKAN E AYDIN, 2021; TADDIA, STECCHI E PELLEGRINELLI, 2020; ZHANG et al., 2019), estação total (HANKUS-KUBICA et al., 2020; STÖCKER, ELTNER E KARRASCH, 2015) e GPS (RADEMANN, TRENTIN, ROBAINA, 2022) . Uma das dificuldades para a correção geométrica nos modelos é

o tempo necessário para realizar esse procedimento e o alto custo de aquisição dos equipamentos necessários (WOODGET et al., 2017). No presente trabalho foi utilizado um RTK, um dos métodos mais rápidos e eficientes para essa etapa, entretanto, ele ainda consome um tempo considerável.

2.3.2 Processamento de imagens de drones em softwares de fotogrametria digital

O processamento das fotografias obtidas com o uso de drones e algoritmos SfM-MVS, pode ser sintetizado em três fases principais, 1) reconstrução da nuvem esparsa, 2) Georreferenciamento e 3) Reconstrução de nuvem densa. Essa técnica gera diversos produtos, de acordo com Zeni (2021), tais como ortomosaico, nuvem esparsa e nuvem densa, modelo digital de elevação e ortomosaico.

O procedimento mencionado anteriormente é feito em softwares especializados de fotogrametria. Em vista da ampla variedade de programas desenvolvidos para esse processamento, observa-se como conveniente uma análise sobre os principais e suas diferenças (KINGSLAND, 2020). Uma comparação foi conduzida por Alidoost e Arefi (2017) entre os *softwares* 3DSurvey, Agisoft Photoscan, Pix4Dmapper Pro e SURE. Após os testes, concluiu-se que os três últimos apresentam resultados similares, enquanto que o primeiro demonstra resultados inferiores em comparação com os demais.

Kingsland (2020) fotografou um aríbalo em três ângulos, obtendo 72 fotos que foram usadas para testar os *softwares* ContextCapture, Photoscan e RealityCapture. Em resumo, concluiu-se que o Metashape exibe uma superioridade em termos de opções de processamento, enquanto os outros dois oferecem poucas opções ajustáveis que impactam o resultado final. Além disso, Kingsland (2020) afirma que a escolha do software depende do objetivo específico do projeto.

Cucchiaro et al. (2018) avaliaram os resultados da nuvem densa e do modelo digital do terreno (MDT) em uma área de enseada de fluxo de detritos nos *softwares* 3DF Zephyr Aerial e Agisoft Photoscan. Os resultados apresentaram uma variação absoluta de 4.2cm entre as duas nuvens densas e um desvio padrão de 3,4cm, ademais, o autor defende que para estudos geomorfológicos semelhantes, a diferença entre ambos programas é pouco impactante.

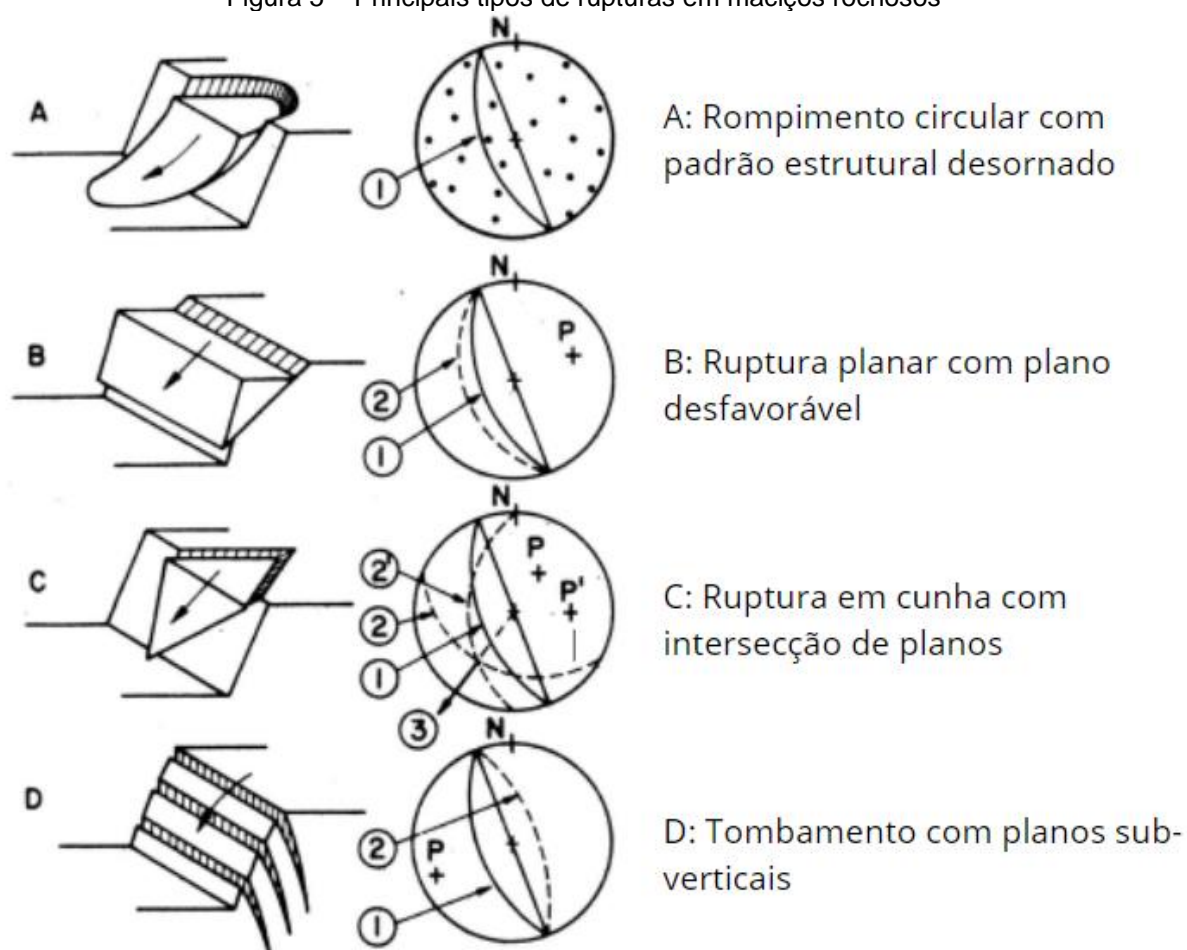
Gagliolo et al. (2020) compararam os *softwares* Agisoft Photoscan, Pix4D, ContextCapture, VisualSFM, MicMac e Insight3D no processamento de imagens de um castelo, em adição, para validar as nuvens geradas por esses programas foi feito um escaneamento com um TLS. O processamento foi totalmente concluído nos quatro primeiros citados e no MicMac, enquanto os outros dois não apresentam todas as etapas. Os resultados da nuvem densa em comparação com o TLS foram similares, com exceção do MicMac. Por último, destacam-se algumas falhas dos programas gratuitos mencionados no artigo, como alto tempo de processamento, interface pouco amigável e ausência da possibilidade de gerar alguns produtos.

2.4 TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSA A PARTIR DAS DESCONTINUIDADES

Uma das melhores abordagens para projetos relacionados com a estabilidade de taludes é a tentativa de reconhecimento de possíveis movimentos que podem acontecer no talude que está sendo analisado (HOEK E LONDE, 1974). O conhecimento da provável falha que irá ocorrer no maciço rochoso permite o emprego da técnica mais eficaz e de menor custo para mitigar os danos da situação, seja provocando o rompimento ou instalando métodos de contenção.

Hoek e Londe (1974), apresentam os principais tipos de rupturas em maciços rochosos na Figura 5:

Figura 5 – Principais tipos de rupturas em maciços rochosos

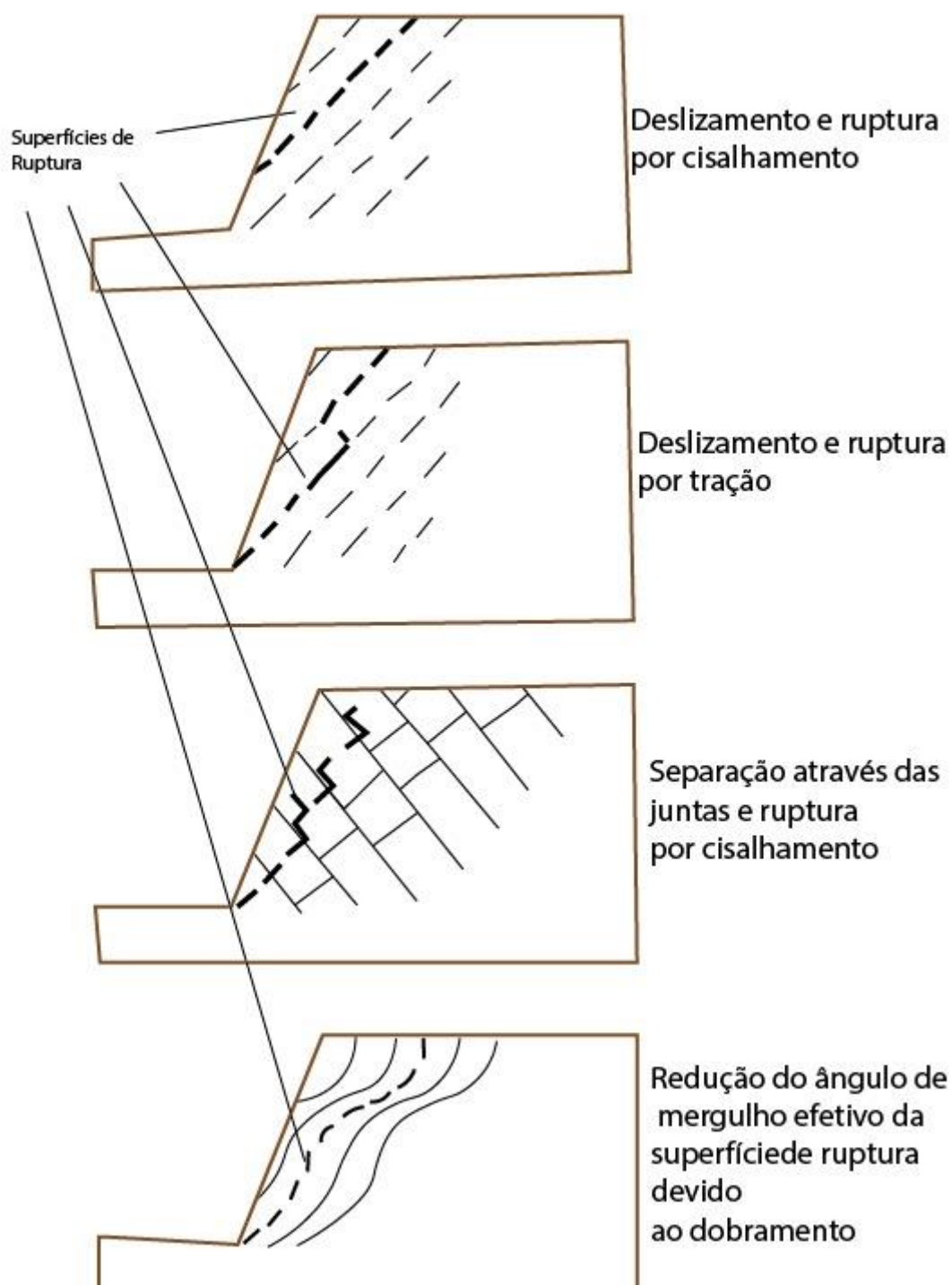


- (1) Face do talude
 (2) (2') Planos de descontinuidade
 P, P' pólos dos planos
 (3) Direção do escorregamento

Fonte: Adaptado de Hoek e Londe (1974).

Piteau e Martin, 1981 apud Oliveira e Monticeli, 2018 apresentam uma ilustração para demonstrar a influência das descontinuidades em rupturas planas (Figura 6):

Figura 6 – Descontinuidades em rupturas planas



Fonte: Adaptado de Piteau e Martin (1981) apud Oliveira e Monticeli (2018).

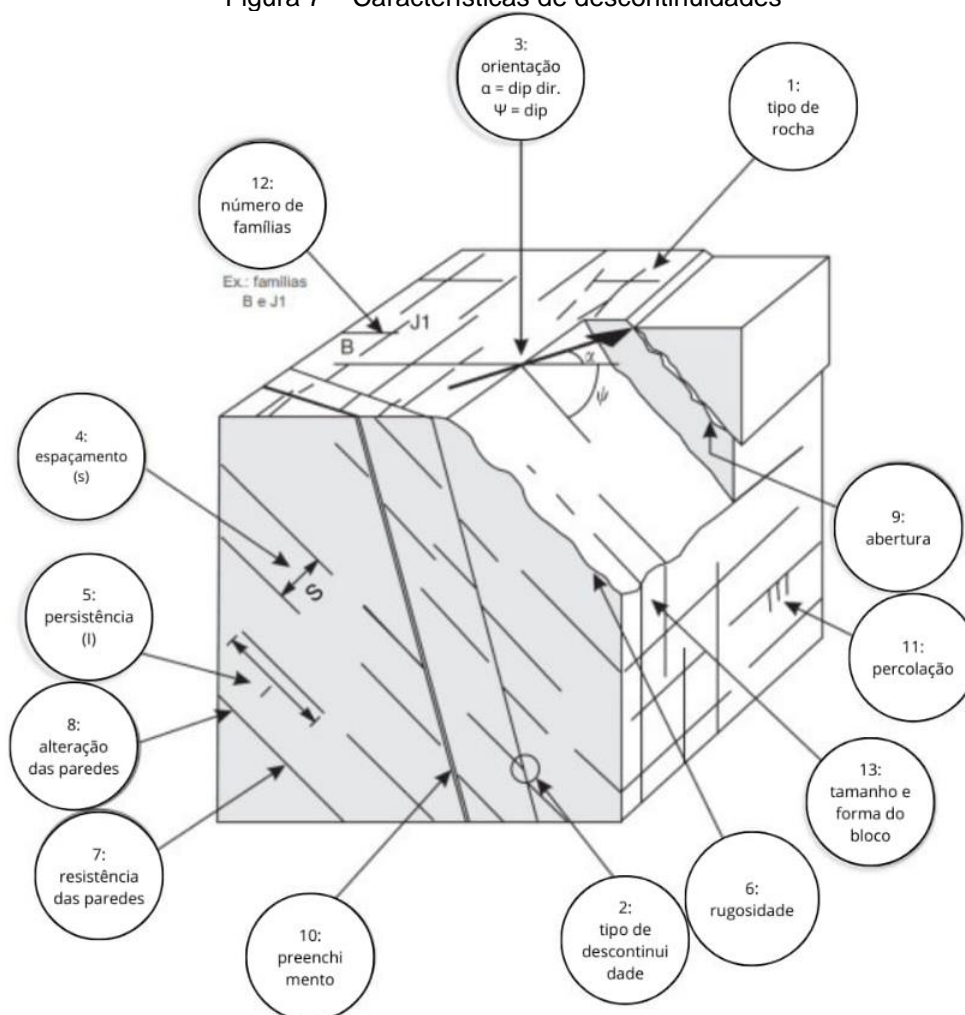
2.5 – DESCONTINUIDADES E SUAS CARACTERÍSTICAS

As descontinuidades são definidas por FIORI e CARMIGNANI (2001, p. 322) como “plano de fraqueza na rocha, por meio da qual o material rochoso é

estruturalmente descontínuo e apresenta uma menor resistência ao cisalhamento”. O estudo dessas discontinuidades em um maciço rochoso é fundamental, uma vez que, em alguns casos, podem ser mais importantes do que a resistência intrínseca da rocha (FIORI E CARMIGNANI, 2001). As descrições das características aqui descritas e suas medições podem variar de acordo com autores e suas abordagens. As informações pertinentes ao sistema de classificação geomecânico utilizado neste trabalho, o RMR, estão no tópico do 2.6.3 *Rock Mass Rating System – RMR system e Slope Mass Rating - SMR*.

No que diz respeito à descrição de discontinuidades, ISRM (1978) sugeriu dez parâmetros: orientação, espaçamento, persistência, rugosidade, resistência da parede, abertura, tipo de espessura e preenchimento, percolação, número de famílias e tamanho/forma do bloco. Wyllie e Mah (2005) adicionaram duas características: tipo de discontinuidade e alteração das paredes. Dos doze indicativos, seis deles são geométricos e podem ser obtidos no trabalho de campo feito por profissionais da área, orientação, abertura, tamanho ou forma do bloco, persistência, espaçamento e número de famílias. Uma ilustração foi criada por Wyllie e Mah (2005) para destacar todas essas características e está exposta na Figura 7:

Figura 7 – Características de descontinuidades



Fonte: Adaptado de Wyllie e Mah (2005).

As características compõem os sistemas geomecânicos utilizados no presente trabalho, possuindo grande importância na Geologia Estrutural. Por esse motivo, serão brevemente discutidas a seguir, na ordem apresentada pela Figura 7:

1: Tipo de rocha: O tipo de rocha é definido pela sua origem, podendo ser ígneas, metamórficas e sedimentares. Além disso, as rochas podem se diferenciar pela sua composição mineral (WYLLIE E MAH, 2005).

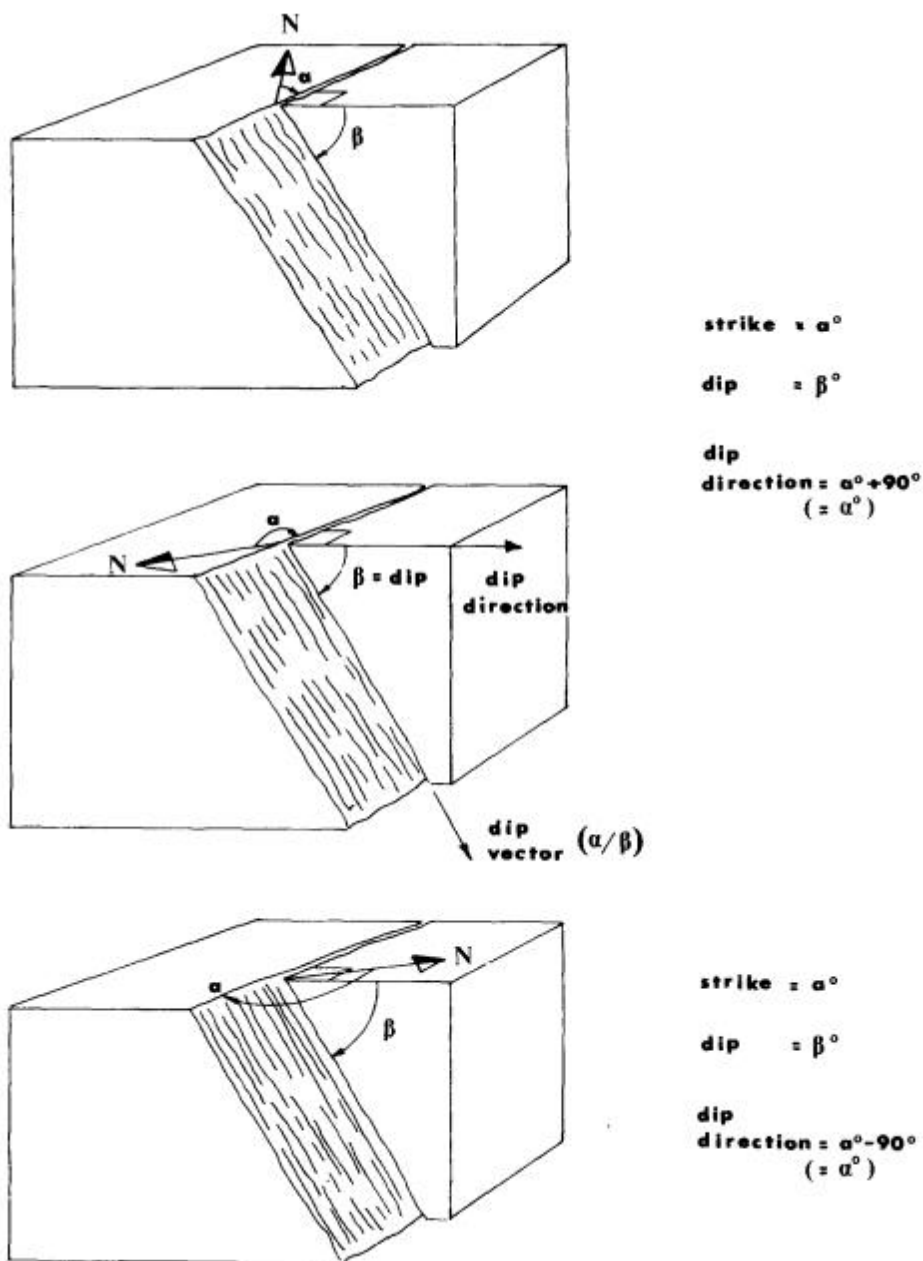
2: Tipos de descontinuidades: As descontinuidades podem assumir vários tipos, como planos de acamamento, planos de juntas, planos de falhas, planos de foliação, discordâncias ou inconformidades, margens de intrusões ígneas, planos de cisalhamentos ativos ou inativos e fendas de tração (FIORI E CARMIGNANI, 2001).

Em conclusão, cada tipo de descontinuidade apresenta diferentes relações com a estabilidade do maciço rochoso.

3: Orientação espacial: A orientação é obtida com a bússola geológica em trabalho de campo, através da coleta do *Dip* (ψ) e do *Dip Direction* (α). De acordo com Fiori e Carmignani (2001) essa característica é crucial, pois é um dos fatores determinantes na formação de blocos individuais, os quais apresentam alto potencial de escorregamento.

Waldron e Snyder (2020) definem *Dip* como o plano de inclinação da linha mais íngreme do plano, para facilitar a compreensão, eles propõem imaginar o movimento de água no talude, ela irá percorrer o caminho mais íngreme, que será congruente com o *Dip*. O *Dip Direction* é o azimute da linha mais íngreme do plano. Além disso, menciona-se o *Strike*, utilizado no presente trabalho, uma vez que apresenta maior facilidade de coleta em campo. O *Strike* é definido como a direção horizontal da linha formada entre um plano horizontal e uma descontinuidade. Em termos gerais, ele indica a inclinação dessa linha imaginária em relação ao norte. A Figura 8 e o elemento 3 da Figura 7 demonstram esses conceitos:

Figura 8 – Representação da coleta dos dados de Strike, Dip e Dip Direction



Fonte: ISRM (1978).

4: Espaçamento ou frequência: O espaçamento, ou frequência (f_d) das discontinuidades é a distância entre as linhas das discontinuidades, definido pela Equação 5, sua importância principal decorre do fato de possibilitarem a entrada de água no interior do talude (FIORI E CARMIGNANI, 2001). Wyllie e Mah (2005) fazem uma distinção entre o espaçamento mencionado anteriormente, das linhas aparentes, e a frequência, que pode ser calculada a partir do primeiro.

$$f_d = \frac{N}{L} \quad (5)$$

onde:

N : número de traços de descontinuidades intersectadas pela linha de varredura

L : comprimento da linha de varredura (m)

5: Persistência: Esse conceito é definido por Wyllie e Mah (2005) como:

Persistência é a medida do comprimento contínuo ou da extensão da área de uma descontinuidade contida em um plano. Trata-se do parâmetro que define o tamanho dos blocos e os comprimentos das superfícies potenciais de ruptura.

ISRM (1978) estabelece uma tabela para classificar as persistências de acordo com o comprimento das descontinuidades (Figura 9), a mesma se apresenta traduzida pelo autor na Figura 9. Einstein et al. (1983) define uma série de conceitos acerca da persistência, destaca-se a persistência da descontinuidade (K) para uma fração de área do plano de descontinuidade (Equação 6)

Figura 9 – Persistências de acordo com o comprimento das descontinuidades

Tipo de persistência	Tamanho da descontinuidade
Persistência muito baixa	< 1 m
Persistência baixa	1 - 3 m
Persistência média	3 - 10 m
Persistência alta	10 - 20 m
Persistência muito alta	> 20 m

Fonte: Adaptado de ISRM (1978).

$$K = \lim_{A_D \rightarrow \infty} \left(\frac{\sum_i a_{Di}}{A_D} \right)^n \quad (6)$$

onde:

D é a região do plano

A_D é a área total da região

a_{Di} é a área da descontinuidade i na região do plano (D)

6: Rugosidade: A rugosidade é a irregularidade da superfície e, de maneira simples pode ser definida como a ondulação da parede das descontinuidades. Sua principal importância reside na facilitação da estimação da resistência ao cisalhamento (ISRM, 1978). A resistência ao cisalhamento foi inicialmente calculada pelo Critério de Mohr-Coulomb (Equação 7), o qual pode ser aplicado apenas em descontinuidades sem rugosidades (OLIVEIRA, 2019). Considerando isso, Barton E Choubey (1977 apud ISRM, 1978) estabelecem uma correlação entre a rugosidade e a resistência ao cisalhamento por meio da Equação 8:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (7)$$

onde:

τ : tensão cisalhante

σ_n : tensão normal ao plano

c : coesão

ϕ : ângulo de atrito das descontinuidades

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_N} \right) + \phi_r \right] \quad (8)$$

onde:

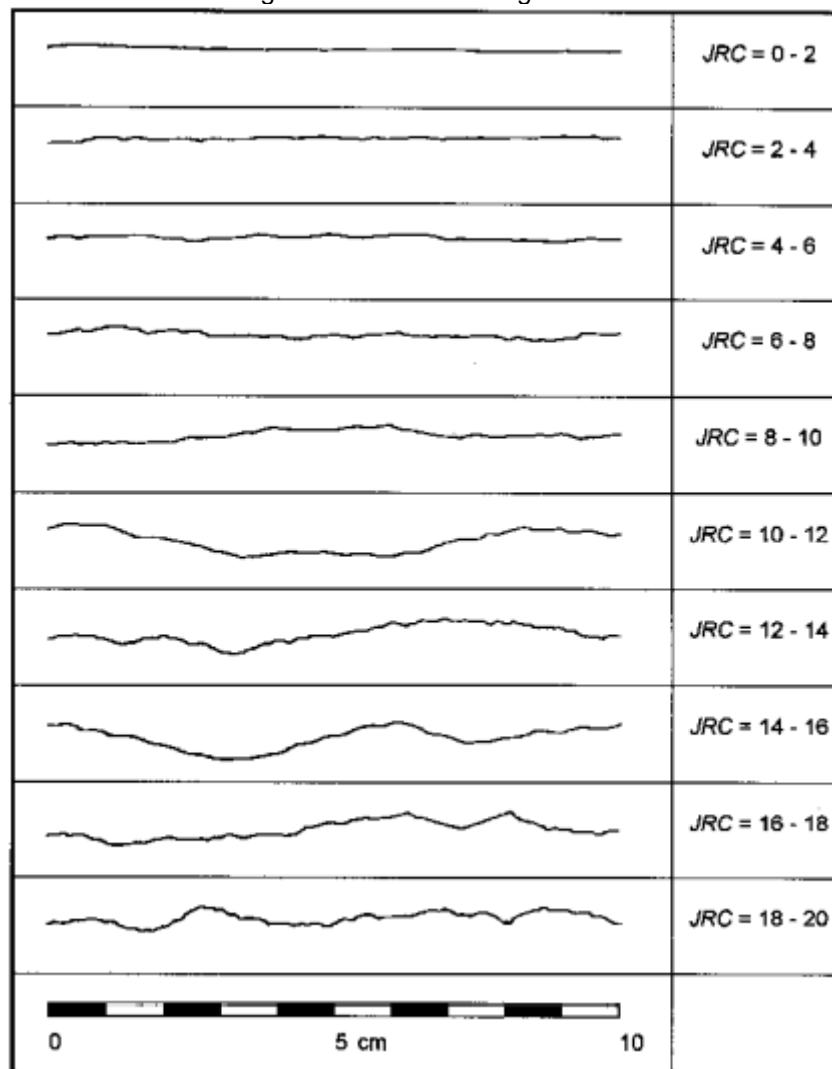
ϕ_r : ângulo de atrito residual

JRC : coeficiente de rugosidade da junta

JCS : Resistência à compressão das paredes da junta

O JRC é determinado de acordo com os perfis de rugosidade para a determinação dos coeficientes de rugosidade (Figura 10) em Barton e Choubey (1977), eles são obtidos por meio do Pente de Barton (Figura 11). Ele deve ser mensurado na parede da descontinuidade, sendo três medições feitas na direção do mergulho e três na direção perpendicular (DAL BOSCO, 2019).

Figura 10 – Perfis de rugosidade



Fonte: Barton e Choubey (1977).

Figura 11 – Pente de Barton



Fonte: Autor (2023).

7: Resistência das paredes: Essa característica influencia principalmente o componente rugosidade, conforme discutido anteriormente, no atrito presente na resistência ao cisalhamento. A medição pode ocorrer de acordo com o ensaio de compressão uniaxial, seguindo a tabela exposta em ISRM (1981b apud WYLLIE E MAH 2005) como mostrado na Figura 12:

Figura 12 – Classificação da resistência de rochas e do solo com tradução pelo autor

Tabela 3.1 Classificação da força de rochas e solo (ISRM, 1981b)			
Nota	Descrição	Identificação em Campo	Faixa aproximada de resistência à compressão uniaxial (MPa)
R6	Rocha extremamente forte	Amostra só pode ser lascada com martelo geológico	>250
R5	Rocha muito forte	Amostra requer muitos golpes de martelo geológico para fraturá-la	100-250
R4	Rocha forte	Amostra requer mais de um golpe de martelo geológico para fraturá-lo	50-100
R3	Rocha de média força	Não pode ser raspado ou descascado com canivete, a amostra pode ser fraturada com um único golpe firme do martelo geológico	25-50
R2	Rocha fraca	Amostra pode ser raspado com dificuldade por um canivete, reentrâncias superficiais feitas por golpe firme com a ponta do martelo geológico.	5.0-25
R1	Rocha muito fraca	Amostra desmorona sob golpes firmes com a ponta do martelo geológico e pode ser raspado com canivete	1.0-5.0
R0	Rocha extremamente fraca	Amostra pode ser marcada com unha.	0.25-1.0
S6	Argila dura	Marcada com dificuldade com unha	>0.5
S5	Argila muito rígida	Facilmente marcada com unha	0.25-0.5
S4	Argila rígida	Facilmente marcada por dedo, mas penetrada	0.1-0.25
S3	Argila firme	Pode ser penetrada em alguns centímetros por dedo com esforço moderado	0.05-0.1
S2	Argila macia	Facilmente penetrada por vários centímetros por dedo	0.025-0.05
S1	Argila muito macia	Facilmente penetrada por vários centímetros por punho	<0.025
<p>Nota</p> <p>A resistência da parede de descontinuidade será geralmente caracterizada pelos graus R0-R6 (rocha). Alguns arredondamentos dos valores de resistência foram feitos ao converter para unidades SI (ISRM, 1981b)</p>			

Fonte: Adaptado de ISRM (1981b) apud WYLLIE E MAH (2005).

8: Alteração das paredes: A alteração das paredes reduz a resistência das mesmas, diminuindo, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento das superfícies das descontinuidades, conforme discutido anteriormente. Uma tabela para a categorização desse parâmetro é fornecida em ISRM (1978) e está exposta na Figura 13:

Figura 13 – Classificação da resistência de rochas e do solo com tradução pelo autor

Termo	Descrição	Nota
Fresca	Sem sinais visíveis de desgaste de material rochoso: talvez leve descoloração em grandes superfícies de descontinuidades.	I
Ligeiramente desgastado	Descoloração indica desgaste de material rochoso e superfícies de descontinuidades. Todo o material rochoso talvez possa estar descolorido pelo desgaste e pode se mostrar levemente mais frágil externamente em comparação á sua condição fresca.	II
Moderadamente desgastado	Menos que a metade do material rochoso se encontra decomposto e/ou desintegrado em solo. Rocha fresca ou descolorida está presente quer como uma estrutura contínua ou como pilares.	III
Altamente desgastado	Mais da metade do material rochoso se encontra decomposto e/ou desintegrado em solo. Rocha fresca ou descolorida está presente quer como uma estrutura contínua ou como pilares.	IV
Completamente desgastado	Todo o material rochoso se encontra decomposto e/ou desintegrado em solo. A estrutura de massa original ainda está praticamente intacta.	V
Solo residual	Todo o material rochoso foi convertido em solo. A estrutura de massa e o tecido material estão destruídos, Há uma grande mudança em volume, mas o solo não foi significativamente movido.	VI

Fonte: Adaptado de ISRM (1978).

9: Abertura: Wyllie e Mah (2005) definem esse conceito como

“distância perpendicular entre as paredes rochosas adjacentes de uma descontinuidade que se encontra aberta e cujo espaço intermediário se encontra preenchido por água ou ar”

ISRM (1978) apresenta uma tabela para a descrição de aberturas (Figura 14):

Figura 14 – Descrição de aberturas com tradução do autor

Abertura	Descrição	
<0.1 mm 0.1-0.25 mm 0.25-0.5mm	Muito apertado Apertado Parcialmente aberto	Características “fechadas”
0.5-2.5 mm 2.5-10 mm >10 mm	Aberto Moderadamente largo Largo	Características “lacuna”
1-10 cm 10-100 cm >1 m	Muito largo Extremamente largo Cavernoso	Características “abertas”

Fonte: Adaptado de ISRM (1978).

10: Preenchimento: A abertura define a distância, se existir, entre as paredes das descontinuidades e o tamanho dessa medida. Concomitantemente, o preenchimento se refere à presença ou ausência de material nesse espaço. Os materiais que podem preencher a abertura incluem areia, argila ou outro material mais grosseiro, em concordância, dependendo do preenchimento a resistência da parede pode aumentar (FIORI E CARMIGNANI, 2001).

11: Percolação: Esse conceito é um dos fatores fundamentais que aumentam a probabilidade de movimentos no maciço rochoso, pois impacta na distribuição das falhas e permite a entrada de água no interior do talude (ZHÃO et al, 2021). Nesse mesmo viés, Zhang, Zhou e Guo (2019) afirmam que 60% dos desastres em áreas de mineração e 90% das instabilidades em taludes estão relacionados à presença de água infiltrada.

12: Número de famílias De acordo com Wyllie e Mah (2005) o número de famílias de descontinuidades que se intersectam tem um impacto até o momento anterior à falha do talude. A presença de um maior número de famílias de descontinuidades pode sugerir uma menor estabilidade no talude, uma vez que o cruzamento de diferentes famílias de descontinuidades tem o potencial de criar zonas de fraqueza no maciço. Essas áreas vulneráveis podem propiciar o movimento de blocos rochosos, aumentando a probabilidade de instabilidades e deslizamentos.

13: Tamanho e forma do Bloco: Esse parâmetro é definido pela descrição do maciço rochoso e é influenciado pelo espaçamento, número de famílias, persistência e orientação (ISRM, 1978).

2.6 SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

A ocorrência de movimentos de massas e instabilidades de blocos rochosos em taludes pode, quando próximas a áreas habitadas, resultar na perda de vidas humanas, em adição, mesmo quando esses eventos acontecem em locais distantes de residências, ainda podem causar danos econômicos, como a interrupção do tráfego em vias de transporte (PANTELIDIS, 2008). Segundo Oliveira e Monticeli (2018) a litologia, o estado de alteração, a coerência e as descontinuidades são características fundamentais para a compreensão dos meios rochosos.

Os sistemas de classificação de maciços rochosos, de acordo com Liu e Chen (2007), têm como principal objetivo fornecer informações quantitativas sobre os maciços, a fim de diminuir a abordagem abstrata das descrições de formações geológicas. Em consonância, Bieniawski (1989) defende que as classificações não devem ser utilizadas isoladamente, mas sim como um suporte para os métodos tradicionais de observação e estudos analíticos.

Os principais sistemas utilizados foram desenvolvidos em meados da década de 1970: *Rock Quality Designation* (RQD) (Deere et al., 1967), *Rock Structure Rating* (RSR) (WICKHAM et al., 1972), *Rock Mass Rating* (RMR) (BIENIAWSKI, 1973), *Q-system* (BARTON, LIEN E LUNDE 1974). Nesse sentido, este tópico tem o intuito de expor, nos itens subsequentes, de maneira breve, classificações geomecânicas utilizadas no presente trabalho, sendo elas: RQD, RMR e SMR.

2.6.2 Rock Quality Designation - RQD

O conceito de RQD foi apresentado pela primeira vez em estudos escritos por Deere et al (1967). A definição do termo pode ser entendida como a razão (em porcentagem) entre o somatório do comprimento das partes fraturadas com mais de 10cm de comprimento da amostra e o comprimento total do testemunho de sondagem (Equação 9).

$$RQD = \frac{\sum \text{Comprimento das partes fraturadas} > 10\text{cm}}{\text{Comprimento total da amostra}} \times 100\% \quad (9)$$

Uma das limitações do RQD é a necessidade do testemunho de sondagem, o qual possui um elevado custo de obtenção. Dessa forma, são propostas metodologias para o cálculo quando não há sondagem, entre elas, destaca-se Palmstron (1974), Priest e Hudson (1976), Palmstron (1982), Sen e Kazi (1984) e Palmstron (2005). Palmstron (1974 apud Takano 2022) apresenta a ideia de contagem volumétrica de juntas (J_v), um conceito para o número de juntas que se intersectam por metro cúbico (Equação 10), em conjunto, correlaciona-se o RQD com o J_v (Equação 11) (Palmstron, 1974 apud Palmstron, 2005), para valores de J_v menores que 4.5 o RQD irá ser 100; enquanto que para J_v maior que 35 o RQD irá ser 0:

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} \dots \frac{n}{S_n} \quad (10)$$

onde $S_1, S_2, S_3,$ e S_n são os espaçamentos médios de cada família de descontinuidade

$$\begin{aligned} RQD &= 115 - 3.3J_v \\ RQD &= 0 \text{ para } J_v > 35; RQD = 100 \text{ para } J_v < 4.5 \end{aligned} \quad (11)$$

Posteriormente, Palmstron (2005), afirma que a Equação 12 é mais coerente para blocos com dimensões cúbicas ou similares:

$$\begin{aligned} RQD &= 110 - 2.5J_v \\ &\text{para } J_v \text{ entre } 4 \text{ e } 44 \end{aligned} \quad (12)$$

Priest e Hudson (1976) correlacionam o RQD com a média da frequência de descontinuidades (λ) por metro (Equação 13). A metodologia pode ser aplicada para casos em que o espaçamento das descontinuidades compreende uma função exponencial negativa:

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1) \quad (13)$$

Em comparação com o método original (Equação 9), Priest e Hudson (1976) confirmaram resultados semelhantes, com erros de no máximo 5%, entretanto, os mesmos não consideram isso como validação da Equação 13. Em adição a isso, Takano (p. 23, 2022), destaca que “para a obtenção de uma precisão razoável é necessário que o comprimento total da linha de descrição seja de pelo menos cinquenta vezes o espaçamento médio das descontinuidades”.

2.6.3 Rock Mass Rating System – RMR system e Slope Mass Rating - SMR

O sistema de classificação RMR (BIENIAWSKI, 1973) é um modelo de classificação geomecânico que varia de 0 a 100 e pode ser aplicado para estudos de engenharia envolvendo túneis, câmaras, minas, taludes e fundações. Em adição, devido ao elevado número de aplicações, 351 no total, o sistema desfruta de uma boa aceitação (BIENIAWSKI, 1989). Essa metodologia sofreu diversas modificações ao longo da literatura, abrangendo uma grande diversidade de casos. Para o presente estudo foi utilizado a versão exposta em BIENIAWSKI (1989), a qual estabelece que o sistema pode ser empregado em análises de estabilidades de taludes, visto que originalmente a aplicação era visada para obras subterrâneas, como túneis.

O sistema RMR utiliza seis parâmetros para classificar o maciço rochoso:

- 1: Resistência da rocha intacta;
- 2: RQD (*rock quality designation*)
- 3: Espaçamento das descontinuidades;
- 4: Condição das descontinuidades
- 5: Condição de percolação da água subterrânea;
- 6: orientação das descontinuidades.

As características expostas posteriormente são levantadas em campo, e a cada uma delas é atribuído um peso de acordo com o seu impacto na estabilidade do maciço rochoso, essas informações estão organizadas separadamente e serão apresentadas a seguir (BIENIAWSKI, 1989). Além disso, a utilização do sistema RMR requer a separação do maciço rochoso em regiões com características geomecânicas uniformes, por exemplo, áreas com semelhante espaçamento entre as descontinuidades. Posteriormente, aplica-se a Tabela 1 (BIENIAWSKI, 1989):

Tabela 1 – Parâmetros e pesos para aplicação do RMR

Parâmetros		Coeficientes							
1	Resistencia da rocha intacta	Point Load	> 10 MPa	4_10 Mpa	2-4 Mpa	1-2 MPa	Ver compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 Mpa	1-5 Mpa	<1 Mpa
	Pesos	15	12	7	4	2	1	0	
2	R.Q.D.	90-100 %	75-90%	50-75%	25-50%	<25%			
	Pesos	20	17	13	8	3			
3	Espaçamento das descontinuidades	>2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60mm			
	Pesos	20	15	10	8	5			
4	Condição das descontinuidades (ver Tabela 3)	Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes da rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1mm, paredes ligeiramente alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou enchimento com espessura < 5mm ou juntas contínuas com separação 1-5mm	Enchimento mole com espessura >5mm ou juntas contínuas com separação > 5mm			
		Pesos	30	25	20	10	0		
5	Presença de água	Caudal por 10 m de comprimento do túnel	nenhum	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min		
		Relação pressão da água vs tensão principal máxima	0	< 0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	0,5		
		Condições Gerais	Completament e seco	Água intersticial	Úmido	Escorrimentos	Entrada de água		
Pesos		15	10	7	4	0			

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

A presença da água no maciço rochoso pode ser caracterizada por três parâmetros diferentes, e não é necessário marcar as três condições. Dessa forma, percebe-se um alto grau de subjetividade nesse parâmetro. Romana (2005 apud Tomás, Delgado e Serón 2007) propõe um método mais preciso para o cálculo desse critério, relacionando-o com a pressão dos poros no maciço. A relação é demonstrada na Equação 14:

$$r_G = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{r_u} \right) - 1.5 \quad (14)$$

A fórmula é válida para $r_u (= \frac{u}{\sigma_v})$ com valores variando entre 0.02 e 0.7, onde u é a pressão dos poros existente e σ_v o estresse vertical na profundidade considerada.

As condições das descontinuidades, nas primeiras versões, eram agrupadas no parâmetro 4 (Figura 15), a partir de Bieniawski, 1974 os parâmetros são apresentados isoladamente e com pesos correspondentes (Tabela 2) (NOVAIS, 2017). Recomenda-se, quando possível, aplicar a Tabela 2 que possibilita um maior detalhamento.

Tabela 2 – Parâmetros para classificação da condição das descontinuidades

Comprimento da descontinuidade (Persistência)	< 1 m	1 - 3m	3- 10 m	10-20 m	> 20m
Peso	6	4	2	1	0
Separação (abertura)	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Quase liso	Liso
Peso	6	5	3	1	0
Enchimento	Nenhum	Duro com espessura < 5 mm	Duro com espessura > 5 mm	Mole com espessura < 5 mm	Mole com espessura > 5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Grau de alteração	Não alteradas	Ligeiramente alteradas	Moderadamente alteradas	Muito alteradas	Em decomposição
Peso	6	5	3	1	0

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

O sexto e último parâmetro é a influência da direção e mergulho das camadas, essa variável é calculada separadamente uma vez que depende do objeto de estudo, ou seja, túneis, fundações e taludes possuem pesos diferentes, a Tabela 3 exibe a influência da orientação das descontinuidades no RMR em túneis por Bieniawski, 1989, baseada em Wickham et al (1972). Nesse contexto, Bieniawski, 1989, recomenda para aplicações do RMR em projetos de estabilidade de taludes a metodologia estabelecida em Romana (1985), entretanto, o arquivo não está disponível de maneira digital, dessa forma, utilizou-se como fonte a revisão do método feita pelo mesmo autor em Romana (2015).

Tabela 3 – Correção para ser feita na classificação de acordo com o tipo de obra

Direção e mergulho das camadas das descontinuidades		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Pesos	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989)

A metodologia proposta por Romana (1985 apud ROMANA 2015), denominada classificação Slope Mass Rating (SMR), é calculada utilizando quatro fatores de correção aplicados no RMR. O SMR foi desenvolvido para solucionar os problemas observados no uso do sistema RMR em projetos de estabilidade de taludes, uma vez que o mesmo apresenta erros devido à sua grande margem de interpretação (MARTINS, 2019). A Equação 15 demonstra os parâmetros que originalmente compuseram esse sistema (ROMANA 1985 apud ROMANA, 2015), a Figura 18 exibe a tabela de Romana (1985 apud ROMANA 2015), ela foi separada e traduzida pelo autor nas Tabelas 4, 5 e 6 para um melhor entendimento:

Figura 15 – Parâmetros F1, F2 e F3 para ajustar a orientação das descontinuidades

Case	Very favorable	Favorable	Fair	Unfavorable	Very unfavorable
P $ \alpha_j - \alpha_s $	> 30°	30–20°	20–10°	10–5°	< 5°
T $ (\alpha_j - \alpha_s) - 180^\circ $					
P/T F_1	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P $ \beta_j $	< 20°	20–30°	30–35°	35–45°	> 45°
P F_2	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
T F_2	1	1	1	1	1
P $\beta_j - \beta_s$	> 10°	10–0°	0°	0° to – 10°	< – 10°
T $\beta_j + \beta_s$	< 110°	110–120°	> 120°	—	—
P/T F_3	0	– 6	– 25	– 50	– 60

P, plane failure; T, toppling failure; α_j , joint dip direction; α_s , slope dip direction; β_j , joint dip; β_s , slope dip.

Fonte: Romana (1985 apud Romana, 2015).

$$SMR = RMR_b + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad (15)$$

onde:

RMR_b é o RMR obtido por meio do resultado da soma dos pesos dos parâmetros (Figura 19);

F_1 depende do resultado da relação, exposta na Tabela 4, entre a direção de mergulho, α_j e o mergulho do talude, α_s :

Tabela 4 – Definição do F1 e seu peso

Relação	Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Ruptura Planar $ \alpha_j - \alpha_s $	> 30°	30°-20°	20°-10°	10°-5°	< 5°
Ruptura por tombamento $ \alpha_j - \alpha_s - 180 $					
Valores F1	0,15	0,4	0,7	0,85	1

Fonte: Adaptado de Romana (1985 apud Romana, 2015).

F_2 depende do mergulho da descontinuidade, $B=\beta_j$ em rupturas planares, e em rupturas por tombamento é adotado para F_2 o valor de 1 (Tabela 5):

Tabela 5 – Definição do F2 e seu peso

Relação	Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Ruptura Planar	< 20°	20°-30°	30°-35°	35°-45°	> 45°
Valores	0,15	0,4	0,7	0,85	1,00
Ruptura por tombamento					
Valores	1,00				

Fonte: Adaptado de Romana (1985 apud Romana, 2015).

F_3 depende da relação entre o ângulo de mergulho do talude, B_s , e o mergulho da descontinuidade, B_j , (Tabela 6) esse parâmetro pode indicar em rupturas planares a possibilidade de as descontinuidades aflorarem no talude, nesse tópico, Fontinhas, (2012, p. 28) diz:

“Essa possibilidade é classificada de razoável se a inclinação da família de descontinuidades é igual à do talude, o que permite assumir o afloramento de apenas algumas descontinuidades. Se o declive do talude é superior em 10° ao das descontinuidades, criam-se condições estruturais muito desfavoráveis. Se pelo contrário for a inclinação da descontinuidade superior em 10° à do talude, essas condições tornam-se muito favoráveis”

Tabela 6 – Definição do F3 e seu peso

Relação	Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Ruptura planar $\beta_j - \beta_s$	$> 10^\circ$	$10^\circ-0^\circ$	0°	$0^\circ-10^\circ$	$<-10^\circ$
Ruptura por tombamento $\beta_j + \beta_s$	$<110^\circ$	$110^\circ-120^\circ$	$>120^\circ$	-	-
Valores	0	-6	-25	-50	-60

Fonte: Adaptado de Romana (1985 apud Romana, 2015).

F_4 é um fator de correção que depende do método de escavação, esses estão presentes juntamente com os valores correspondentes na Tabela 7:

Tabela 7 – Correção de acordo com o método de escavação

Método de escavação	Encosta Natural	Desmorte por pré-fissuramento	Desmorte suave	Desmorte com explosivos ou escavação mecânica	Desmorte com explosão inadequada
Valores para F_4	15	10	8	0	-8

Fonte: Adaptado de Romana (1985 apud Romana, 2015).

Uma das principais razões para a criação do SMR, conforme visto anteriormente, foi a necessidade de uma melhor definição dos parâmetros utilizados em aplicações de estabilidade de taludes. Nesse sentido, diversas modificações foram propostas a fim de reduzir as interpretações subjetivas e, conseqüentemente, diminuir os possíveis erros. Romana (2015) destaca as funções contínuas (TOMÁS, DELGADO e SERÓN, 2007), método gráfico (TOMÁS et al, 2012), *Chinese Slope Mass Rating* (CSMR; CHEN, 1995) e aplicação com *fuzzy* (DAFTARIBESHELI, 2011).

Diante do objetivo do presente estudo, relacionado à aplicação do RMR com métodos computacionais, as funções contínuas destacadas anteriormente se apresentam atrativas, pois também propostas em ambientes virtuais. Tomás, Delgado e Serón (2007) propõem funções contínuas para o cálculo dos parâmetros F_1 (Equação 16), F_2 em rupturas planares (Equação 17), para rupturas por tombamento

o resultado é 1, e F_3 , (Equação 18) para rupturas planares e (Equação 19) para rupturas por tombamento:

$$F_1 = \frac{16}{25} - \frac{3}{500} \operatorname{atan} \left(\frac{1}{10} (|A| - 17) \right) \quad (16)$$

onde A e a função arco tangente são expressas em graus

$$F_2 = \frac{9}{16} + \frac{1}{195} \operatorname{atan} \left(\frac{17}{100} |B| - 5 \right) \quad (17)$$

onde B e a função arco tangente são expressas em graus

$$F_3 = -30 + \frac{1}{3} \operatorname{atan} C \quad (18)$$

$$F_3 = -13 - \frac{1}{7} \operatorname{atan} (C - 120) \quad (19)$$

onde C é equivalente à $\beta_j - \beta_s$ para rupturas planares, $\beta_i - \beta_s$ para rupturas em cunha e $\beta_i + \beta_s$ para rupturas por tombamento.

A descrição dos maciços de acordo com o valor do SMR final (Tabela 8) permite uma noção sobre o nível de estabilidade do talude em análises iniciais. Entretanto, esses resultados não são definitivos, sendo necessário análises de um profissional especializado em geotecnia para confirmar a situação do maciço em termos estruturais (ROMANA, TOMÁS e SERÓN, 2015).

Conhecida a situação do talude, torna-se possível propor maneiras de aumentar a estabilidade do mesmo. Nesse sentido, Romana, 1993, apresenta, fundamentada na literatura, métodos de contenção a serem aplicados com base no valor do SMR (Tabela 9):

Tabela 8– Significado das classes de acordo com o peso final do SMR

Peso Global	100-81	80-61	60-41	40-21	<21
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Maciço Rochoso muito bom	Maciço rochoso bom	Maciço Rochoso razoável	Maciço Rochoso fraco	Maciço Rochoso muito fraco
Tempo médio para aguentar sem suporte	20 anos para 15 m de vão	1 ano para 10 m de vão	1 semana para 5 m de vão	10 horas para 2,5 m de vão	30 minutos para 1 m de vão
Coesão da massa rochosa (kPa)	> 400	300-400	200-300	100-200	<100
Ângulo de atrito da massa rochosa (°)	> 45	35-45	25-35	15-25	<15

Fonte: Adaptado de Romana (1985 apud Romana, 2015).

Tabela 9 – Sugestão de métodos de contenção de acordo com o SMR

Classe	SMR	Tipo de suporte
Ia	91-100	Nenhum
Ib	81-90	Nenhum; possível retirada de blocos instáveis e Reperfilamento
IIa	71-80	Nenhum; Valas de pé de talude; Vedações flexíveis; Pregagens esporádicas
IIb	61-70	Valas de pé de talude ou proteções flexíveis; Pregagens esporádicas ou sistemáticas; Redes metálicas
IIIa	51-60	Valas de pé de talude e/ou redes metálicas; Pregagens esporádicas ou sistemáticas; Concreto projetado esporádico
IIIb	41-50	Valas de pé de talude ou redes metálicas/ Pregagens sistemáticas ou ancoragens; Concreto projetado sistemático; Muro de contenção no pé do talude e/ou concreto de enchimento
IVa	31-40	Ancoragens; Concreto projetado sistemático; Muro suporte no pé do talude e/ou vigas de betão
IVb	21-30	Concreto projetado sistemático; Muro suporte no pé do talude e/ou vigas de concreto
Va	11-20	Muro de gravidade ou muro ancorado; Reescavação

Fonte: Adaptado de Romana (1985 apud Romana, 2015).

2.7 FOTOGRAMETRIA E EXTRAÇÃO AUTOMATIZADA DAS CARACTERÍSTICAS DAS DESCONTINUIDADES

As primeiras tentativas de usar a fotogrametria para análise das características das descontinuidades começaram em meados do século XIX (GAICH E SCHUBERT, 2003). Wickens e Barton (1971) empregaram um instrumento estereoscópico e a máquina Thompson-Watts Plotter, modelo 2, (Thompson, 1963), para medir os deslocamentos ocorridos durante a escavação de um talude. Allam (1978) também utilizou técnicas da estereoscopia com fototeodolito para determinar se era possível estimar a largura, posição e orientação das fraturas em faces de maciços rochosos.

As pesquisas envolvendo os campos de estabilidade de taludes e fotogrametria analítica são diversas nesse período (ALLAM, 1975 apud ALLAM, 1978; FOOKES, POWELL E MERCER, 1979; MOORE; 1974). Em resumo, pode-se dizer que a maioria delas buscavam validar esse método.

Concomitantemente, intensificou-se o uso de imagens 2D. Crosta (1997) utilizou essa metodologia por meio da digitalização das fraturas presentes em fotografias retiradas lateralmente com taxa de sobreposição igual. Franklin, Maerz e Bennet, 1987, usaram uma abordagem semelhante, destacando o processo de vetorização, que produz um resultado mais confiável em relação às técnicas computacionais. Percebe-se, portanto, que o uso das fotos estereoscópicas avançou em suas validações e os estudos passaram a integrar os computadores no processamento, como é visto em Hagan (1980) e detalhado por Blin-Lacroix (1990).

Até os dias atuais, afirma-se que um dos principais resultados da fotogrametria digital utilizada para a extração semiautomatizada de parâmetros na área da geologia estrutural é a nuvem de pontos. Nesse contexto, as primeiras literaturas envolvendo essa metodologia utilizaram o TLS para obter esse produto, como é visto em Kemeny e Donovan (2005) e Monte (2004), ambos utilizaram o *software* SplitFX para caracterizar o maciço rochoso. O último ainda comparou a qualidade da rocha encontrada pelo método digital com os valores inferidos e aplicados no *Geological Strength Index* (GSI), porém o resultado foi satisfatório apenas para rochas com os valores do GSI entre 40 e 60.

O uso do TLS em conjunto com a fotogrametria de curto alcance (CRTDP) se consolidou na descrição da morfologia de taludes (STURZENEGGER E STEAD, 2009). Nesse sentido, uma série de trabalhos foi realizada para testar e propor algoritmos para obter parâmetros utilizando produtos fotogramétricos, como a nuvem de pontos e a grade triangular irregular (TIN) (RAMSAC - FERRERO et al, 2009; SplitFX - LATO et al, 2009; PlaneDetect – LATO E VÖGE, 2012; COLTOP – JABOYEDOFF E COUTORE, 2003 e JABOYEDOFF et al, 2007; DiAna – GIGLI E CASAGLI, 2011; Agrupamento com nova técnica – OLARIU et al, 2008).

O método SfM-MVS (Ver Tópico **2.1.2 Técnica Structure-from-Motion e Multi-View-Stereo (SfM-MVS)**) e as evoluções tecnológicas permitiram o avanço do uso dos drones, além disso, destacam-se como motivos o barateamento das aeronaves e as facilidades de suas interfaces e funcionamento (BATTULWAR et al, 2021). Os drones tiveram um aumento na literatura dentro da área da Geografia (Ver

Tópico 2.2 USO DE DRONES E FOTOGRAMETRIA DIGITAL NA GEOGRAFIA sendo alvos de uma diversidade de testes para verificar seu potencial. Concomitantemente, diversas análises foram feitas para descobrir se são capazes de substituir os TLS, uma vez que o primeiro apresenta um valor de compra muito menor.

Nesse contexto, também se observa a validação da afirmação anterior para a extração automática de características de descontinuidades (HANEBERG, 2008; VASUKI et al, 2014; MICKLETHWAITE et al, 2012), e trabalhos utilizando ambos, TLS e drones, se intensificaram (PAGANO et al, 2020; SALVINI et al, 2019). Alguns trabalhos recentes em destaque na área são: (RIQUELME, 2014; 2015; 2016; 2018; ZHANG et al, 2018; LI et al, 2019; CHEN et al, 2017, ÜNLÜSOY, E SÜZEN, 2019; KONG et al, 2020)

3 METODOLOGIA

3.1 ESPECIFICAÇÕES DO DRONE UTILIZADO

A aeronave utilizada para a aquisição das fotografias foi o drone Mavic Air 2 da empresa DJI, a Tabela 10 apresenta as especificações da aeronave, da câmera e do estabilizador, respectivamente. Uma imagem do drone com os acessórios adicionais está presente na Figura 16:

Tabela 10 – Especificações da aeronave

Especificações Drone Mavic Air 2	
Peso	570 g
Distância máxima de voo	18.5 km
Tempo máximo de voo (sem vento)	34 min
Velocidade horizontal máxima	19 m/s
Resistência máxima ao vento	8.5 - 10.5 m/s
Especificações da Câmera	
Sensor	48 MP (Pixels efetivos)
Lentes	FOV = 84° Distância Focal Equivalente: 24 mm Abertura: f / 2.8
Especificações Estabilizador	
Estabilização	3 eixos (inclinação, rotação e giro)
Alcance controlável	Inclinação: -90° a 0° (padrão) -90° a 24° (estendido)
Velocidade máx. controlável (Inclinação)	100° /s

Fonte: Autor (2023).

Figura 16 – Combo Fly More do Drone Mavic Air 2



Fonte: Tecnodrones.com.br (2023).

3.2 AQUISIÇÃO DAS IMAGENS

Para a aquisição das imagens foi realizado um planejamento do voo em uma das frentes de talude localizada na pedreira da empresa Brita Pinhal. O planejamento de voo automatizado e a execução do mesmo foi feito no aplicativo DroneLink, disponível para web, sistemas android e iOS, com suporte para drones das marcas DJI e Autel Robotics.

A missão foi classificada como um levantamento aerofotogramétrico clássico, no qual o drone segue uma trajetória com elevação constante. Conforme mencionado por Takano (2022), esse tipo de levantamento é caracterizado pelo percurso do drone em uma altitude constante. Vários fatores influenciam a preparação do plano de voo, conforme discutido na revisão de literatura e considerado durante o planejamento do voo deste projeto. As configurações utilizadas para a execução do plano estão expostas na Tabela 11:

Tabela 11 – Informações do plano de voo

Tipo de voo	Taxa de Sobreposição long./lateral (%)	Inclinação da câmera (°)	Altura do voo (m)	Velocidade (m/s)	Imagens obtidas	Deslocamento no plano
Automático	80 / 75	90	80	12	187	Horizontal
Manual	2/3 da foto anterior	0	10	5	22	Vertical
Manual	2/3 da foto anterior	-5	25	5	24	Vertical
Manual	2/3 da foto anterior	-15	50	5	19	Vertical

Fonte: Autor (2023).

A retirada de fotos de taludes apresenta uma grande problemática devido à falta de programas que realizam voos automáticos na vertical. Nessa afirmação, verifica-se que demais autores também tiveram dificuldade nessa questão, como evidenciado por Takano (2022), onde foi necessário realizar voos manuais e automáticos para recobrir toda a extensão do talude.

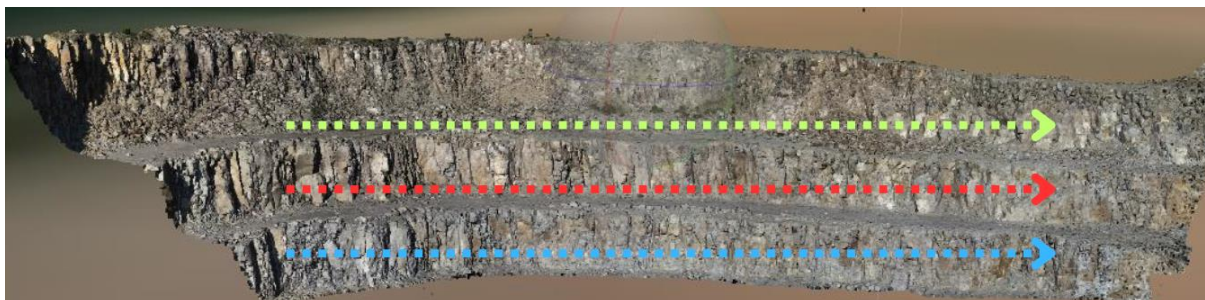
O primeiro voo foi o automatizado, configurado em momento prévio à saída de campo, a Figura 17 exibe a rota utilizada pelos autores. A Figura 18 demonstra a trajetória dos três voos manuais, primeiramente, seguiu-se da esquerda para direita e depois realizou o movimento contrário, a fim de tentar recobrir todas as feições visíveis no talude.

Figura 17 – Rota no plano de voo automatizado



Fonte: Autor (2023).

Figura 18 – Rota utilizada no voo manual

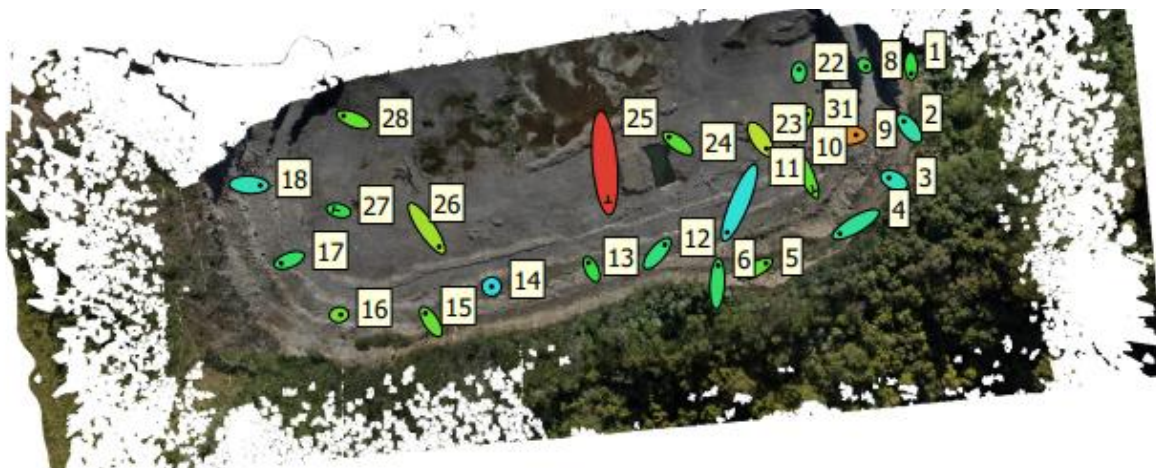


Fonte: Autor (2023).

A coleta dos pontos de controle é fundamental para garantir confiabilidade e possibilitar a validação das coordenadas geográficas no posterior processamento. Para essa finalidade, foi utilizado um equipamento aparelho receptor GNSS com RTK modelo REACH RS2+ da fabricante EMLID emprestado pela empresa Inovagro Tecnologia em Drones. Além disso, aproveitou-se a existência de um marco geodésico previamente estabelecido no local por meio do método de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), que serviu como base para o funcionamento do par RTK.

No total, foram coletados 32 pontos, sendo que apenas 26 estavam dentro da área de cobertura do plano de voo. Desses, 23 foram utilizados como GCPs, identificados com um ponto, e 3 como *checkpoints* (CP), marcados na imagem com a letra T. A distribuição estratégica desses pontos (Figura 19) foi realizada de forma a abranger toda a extensão do talude em estudo, incluindo a base, as bancadas e o topo da pedreira.

Figura 19 – Distribuição dos pontos coletados na área de estudo



Fonte: Autor (2023).

A execução do voo automático começa quando o operador clica no botão de iniciar no aplicativo do celular. Nesse momento, o drone ascende lentamente até atingir a altura estabelecida, dando início ao trajeto. Vale destacar que a aeronave utilizada pelo autor está equipada com sensores de obstáculos para evitar colisões, no entanto, é essencial manter a atenção para acompanhar a movimentação do drone.

Durante o voo, é crucial monitorar a bateria para garantir que o drone permaneça no ar pelo tempo necessário. Caso a bateria esteja indicando baixo nível, é possível acionar o botão de *Home Point*, permitindo que o drone retorne à sua posição inicial. Visto isso, entende-se imprescindível o conhecimento das funcionalidades e botões tanto do drone quanto do aplicativo a ser utilizado para o voo. Além disso, deve-se evitar a proximidade de torres de telecomunicações, pois podem interferir no sinal entre o celular e a aeronave.

O voo manual, por outro lado, é inteiramente controlado pelo operador, exigindo habilidade e familiaridade com a pilotagem desse tipo de aeronave. Nesse viés, ressalta-se que esse tipo de plano não permite uma reprodução exatamente igual posteriormente. Dessa forma, torna-se fundamental que o operador retire as fotos com calma, a fim de garantir a maior precisão possível.

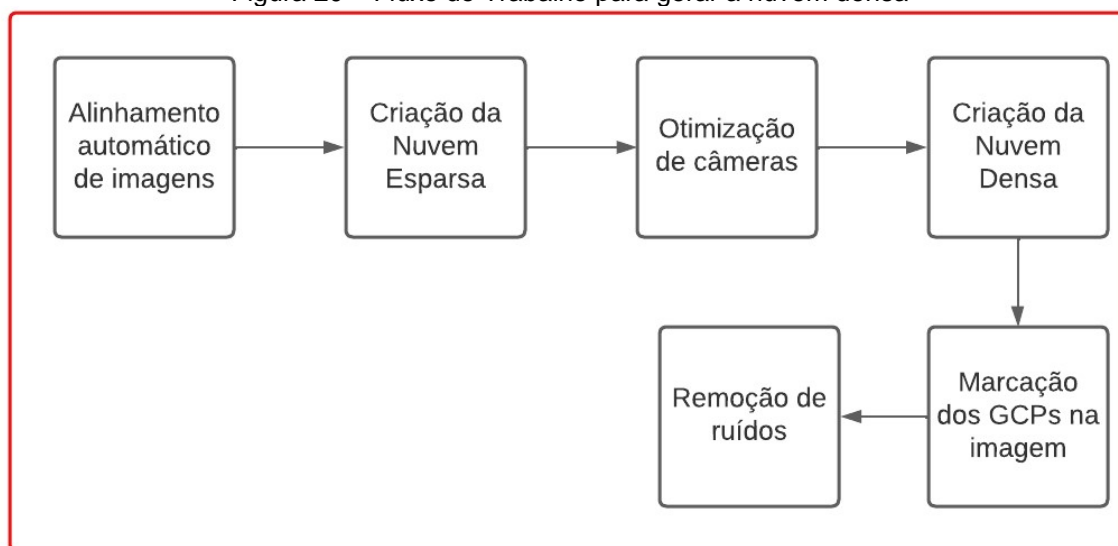
3.3 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

A primeira etapa neste tópico envolve a escolha do *software* entre as diversas opções disponíveis, pois esta decisão tem uma relação direta com a qualidade do processamento das imagens. Uma análise concisa dos diferentes programas foi realizada na revisão de literatura, e com base nela, juntamente com as experiências

prévias do autor, optou-se pelo uso do Metashape versão profissional 1.8 da empresa Agisoft. Essa escolha foi feita devido aos excelentes resultados apresentados nas análises, além da plataforma simples e intuitiva, que oferece diversas opções de processamento.

O presente trabalho utiliza a nuvem densa para obter informações sobre as descontinuidades presentes no talude observado. Assim, é possível gerar o Modelo Digital de Elevação, o modelo tridimensional e o Ortomosaico. No entanto, vale ressaltar que esses resultados não são utilizados na extração das descontinuidades e foram gerados apenas para o autor verificar os resultados. A obtenção da *Dense Cloud* consiste de seis passos, detalhados no fluxograma (Figura 20):

Figura 20 – Fluxo de Trabalho para gerar a nuvem densa



Fonte: Autor (2023).

O primeiro procedimento consistiu na inclusão das imagens no *software* e seu alinhamento. Esse último pode ser configurado nas qualidades muito alta, baixa, média, alta e muito alta. Em todos os processamentos, a escolha de uma opção de maior qualidade exigirá mais recursos computacionais e resultará em um tempo de espera mais longo para a conclusão. Por conseguinte, o produto final será de melhor qualidade e mais fácil de visualizar. As configurações utilizadas pelo autor estão disponíveis na Figura 21:

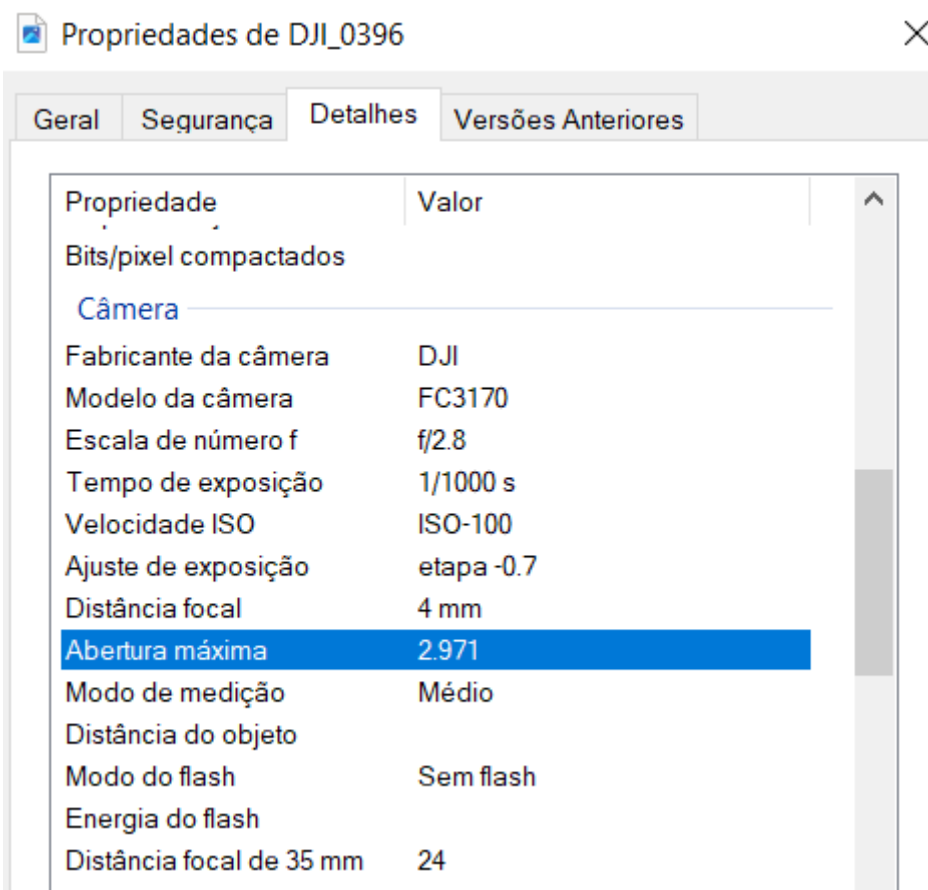
Figura 21 – Configurações utilizadas no processamento

Procedimento	Qualidade
Alinhamento das imagens	Ultra High
Dense Cloud	Low; Lowest; Medium; High; Ultra High
Modelo 3D	High
DEM	Ultra High
Ortomosaico	Ultra High

Fonte: Autor (2023).

A otimização das câmeras é realizada com base nas informações contidas nos metadados das fotos (Figura 22). Uma alternativa adicional seria realizar a calibração de forma manual em campo, mas esse processo é lento e complexo, tornando-se pouco atrativo em comparação com a facilidade da execução no Metashape.

Figura 22 – Dados contidos na informação das fotos obtidas com Drone



The image shows a screenshot of a Windows file properties window titled 'Propriedades de DJI_0396'. The 'Detalhes' tab is selected, displaying a list of camera properties. The 'Abertura máxima' property is highlighted in blue.

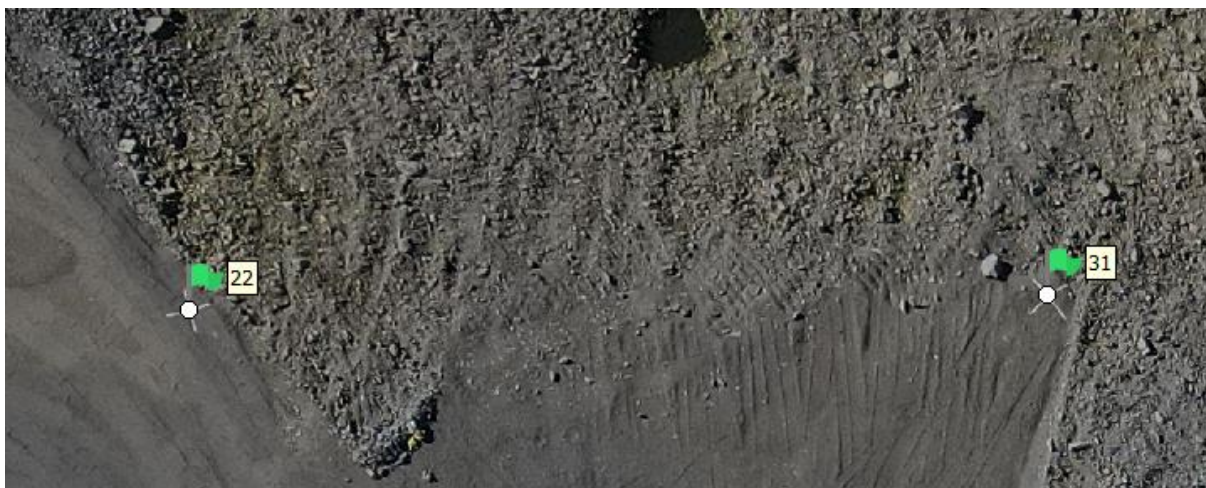
Propriedade	Valor
Bits/pixel compactados	
Câmera	
Fabricante da câmera	DJI
Modelo da câmera	FC3170
Escala de número f	f/2.8
Tempo de exposição	1/1000 s
Velocidade ISO	ISO-100
Ajuste de exposição	etapa -0.7
Distância focal	4 mm
Abertura máxima	2.971
Modo de medição	Médio
Distância do objeto	
Modo do flash	Sem flash
Energia do flash	
Distância focal de 35 mm	24

Fonte: Autor (2023).

A criação da nuvem densa ocorreu inicialmente com a configuração de qualidade *Ultra High*, o que gerou 208.670,180 pontos. Em contrapartida, devido ao elevado número de pontos, o programa utilizado para extrair as discontinuidades apresentou erro, impedindo a conclusão da ferramenta. Diante disso, optou-se por refazer o processamento em mais de uma qualidade e avaliar o impacto nas etapas subsequentes do trabalho, por conseguinte, gerou-se a nuvem densa com os parâmetros *High*, *Medium*, *Low* e *Lowest*.

Em seguida, procedeu-se à marcação manual dos pontos de controle nas fotos utilizadas para o processamento (Figura 23). Nesse momento, é interessante que o usuário tenha cautela para evitar confundir as marcações, pois apenas um equívoco dessa natureza pode aumentar significativamente o erro do modelo.

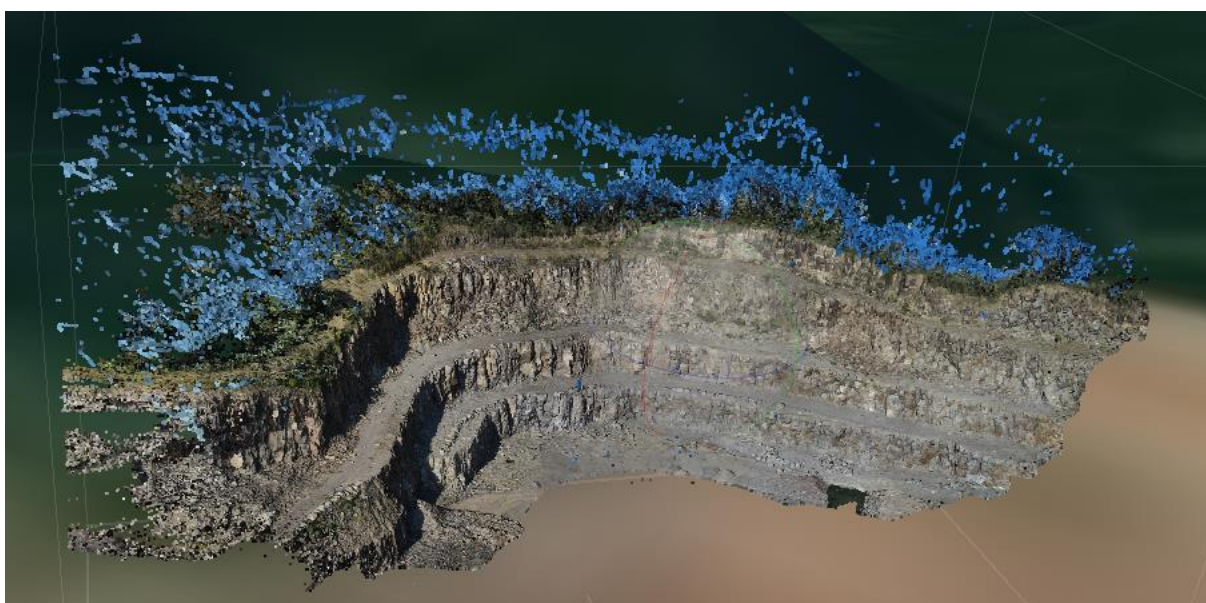
Figura 23 – Marcação dos GCPs nas imagens



Fonte: Autor (2023).

Um dos últimos passos é a remoção dos ruídos, ilustrada na Figura 24, onde se observa um grande número de pontos que estão localizados fora do aglomerado, esses são excluídos manualmente. Além disso, optou-se por retirar a vegetação mais densa, também manualmente, pois ela poderia atrapalhar na identificação das características das descontinuidades. Para finalizar os procedimentos no Agisoft Metashape, realizou-se um recorte na nuvem densa gerada, limitando-a à área de interesse do trabalho, uma vez que inicialmente cobria um espaço muito maior. O resultado final está exposto na Figura 25.

Figura 24 – Ruídos no modelo



Fonte: Autor (2023).

Figura 25 – Recorte final da nuvem densa em qualidade *Ultra High*

Fonte: Autor (2023).

Conforme mencionado anteriormente, efetuou-se diversos processamentos em diferentes qualidades, com base nisso, com o objetivo de manter os modelos com o recorte mais similar possível, criou-se linhas em torno da primeira nuvem densa gerada e elas serviram como “molde” para os demais produtos. Na versão utilizada do Metashape, 1.7.6 profissional, é necessário criar cópias da nuvem densa antes de efetuar o segundo processamento, para casos em que é necessário mais de uma no mesmo projeto, caso esse passo não seja feito, o primeiro produto será substituído pelo segundo.

O processamento foi feito inteiramente no computador de uso pessoal do autor com as seguintes configurações:

- Modelo: Nitro AN515-44
- Processador: AMD Ryzen 7 4800H
- Placa de Vídeo: Nvidia GeForce GTX 1650
- Memória Ram: 16gb Microchip Samsung
- Sistema Operacional: Windows 10 Home
- HD / SSD: HD 1TB Seagate e SSD NVMe 500GB Kingston.

3.4 EXTRAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES

A extração das descontinuidades foi feita no *software* Discontinuity Set Extractor (DSE), na versão 210, desenvolvido por Riquelme, Abellán e Tomás (2014); (2015). O programa é escrito em m-código e executado dentro do MATLAB,

posteriormente, uma versão alternativa foi criada em um executável que funciona no MATLAB Runtime.

Como foi visto no tópico 2.7 FOTOGRAMETRIA E EXTRAÇÃO AUTOMATIZADA DAS CARACTERÍSTICAS DAS DESCONTINUIDADES, existem diversos *softwares* para extração das características das descontinuidades, cada um com suas diferenças, como o formato do arquivo de entrada, parâmetros que podem ser coletados, entre outras. Em vista disso, a escolha do DSE foi fundamentada na sua metodologia bem estabelecida em trabalhos anteriores, como Riquelme (2014, 2015, 2016, 2018) e em Takano (2022). Nesse contexto, essa literatura serviu como base metodológica para o presente trabalho.

A utilização conjunta do programa DSE em conjunto com as imagens de drone permitem a coleta dos parâmetros: *Dip Direction*, *Dip*, espaçamento e persistência. Essas informações são fundamentais para a aplicação do RMR, entretanto, é necessário, também, sair à campo para coletar a condição das descontinuidades e verificar a presença de água no talude. A escolha do RMR foi motivada pelo fato de o DSE fornecer a maioria das informações necessárias, tornando o sistema altamente eficiente e facilitado por meio dessa metodologia.

Nesse tópico, primeiramente, a nuvem densa do Metashape foi exportada no formato .ASCII, pois essa é a extensão suportada pelo programa, e importada para o DSE. A plataforma é intuitiva e de interface amigável, o *software* conta com 4 processamentos, sendo necessário executá-los na ordem correta, pois ficam inativos caso o usuário tente pular alguma etapa.

Após a inserção dos dados no programa, calcula-se a vetor normal do polo, para isso, insere-se o valor do *k-nearest neighbours* (KNN), um método de classificação que considera os dados mais próximos, chamados de vizinhos ou *k*, do objeto de estudo, denominado *t* (GUO et al, 2003). Outro parâmetro a ser definido é a tolerância, que representa desvio máximo permitido quando os pontos são agrupados. Riquelme et al (2014), estabeleceu os valores ideais de KNN para 30 e de tolerância para 20.

Posteriormente, calcula-se a densidade dos polos, utilizando o método *Kernel density estimation* (KDE), uma das abordagens mais utilizadas para estimar a função de densidade de probabilidade de um conjunto de dados (CHEN, 2017). No próximo procedimento, as descontinuidades são extraídas e agrupadas em famílias, esse processo realizado atribuindo um número a todos os pontos com uma orientação

principal. Em sequência, dois filtros são aplicados, um indicando o número máximo de famílias, enquanto o outro define um ângulo mínimo que precisa ser formado por dois vetores principais (RIQUELME et al, 2014).

Riquelme et al. (2014) exemplifica em três passos como as principais famílias de descontinuidades são definidas em seu software:

“(a) se calcula o vetor normal para cada plano e ele é convertido para uma projeção estereográfica; (b) é calculada a intensidade dos polos para cada região da projeção estereográfica e (c) calcula a máxima local”

As variáveis que podem ser alteradas são *Bins level*, *Min. angle*, *N. max. DS* (*discontinuity set*), para elas seguiu-se o valor padrão do programa, o mesmo feito por Takano (2022), sendo eles: 6, 30 e 10, respectivamente. Em adição, durante alguns testes pelo autor, foi visto que eles alteram significativamente o valor do *dip direction* e *dip* fornecidos pelo *software*, entretanto, optou-se por não analisar as correlações nessa fase a fim de não fugir do tema principal do trabalho com constantes comparações, ainda que essas sejam importantes para uma melhor compreensão da configuração desses parâmetros.

O terceiro campo é um agrupamento realizado com o algoritmo *Density-Based Scan Algorithm with Noise* (DBSCAN) para definir os planos das famílias de descontinuidades. Também, é possível eliminar os agrupamentos com um número de pontos menores que x , os valores para satisfazer x variam entre 100 e 400 (Riquelme et al, 2014), para o presente trabalho utilizou-se o valor de 200.

De acordo com Riquelme et al (2014) o aumento no número do KNN gera uma maior precisão. Visto isso, observou-se conveniente a análise desse parâmetro no processamento da presente pesquisa. Além disso, calculou-se os resultados da variável *cone* (γ_1) com os valores 30 e 50, isso significa que o ângulo formado por dois vetores principais deve ser maior que 30 e 50, respectivamente, para a *dense cloud* de qualidade *High*. Todos os valores utilizados nas variáveis do DSE estão apresentados na Tabela 12, optou-se pelo processamento 8 para a aplicação no sistema geomecânico. A diferença no valor do *cone* não apresentou resultados dissimilares, logo, não se efetuou uma comparação acerca desse conceito.

Tabela 12 – Valores definidos para os processamentos no DSE

Váriavel	Processamento 1	Processamento 2	Processamento 3	Processamento 4	Processamento 5	Processamento 6	Processamento 7	Processamento 8
KNN	5	10	15	20	30	40	15	30
Tolerance	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
Bins Level	6	6	6	6	6	6	6	6
Min. Angle	30	30	30	30	30	30	30	30
Nmax DS	10	10	10	10	10	10	10	10
Cone	50	50	50	50	50	50	30	30

Fonte: Autor (2023).

O espaçamento também foi calculado no DSE, de acordo com a metodologia exposta em Riquelme et al (2015), eles fazem uma diferenciação entre a abordagem da persistência total e das descontinuidades não persistentes, afirmando que a última é mais precisa. Além disso, o cálculo no *software* é feito utilizando a orientação média do conjunto e não do plano da descontinuidade, ou seja, os planos apresentam ângulos iguais.

Além do espaçamento, afirma-se possível extrair a persistência no DSE também. O presente trabalho utilizou a metodologia exposta em Riquelme et al (2018). As descontinuidades são agrupadas em famílias de acordo com um grau de semelhança na orientação, chamados de *Clusters*. O programa procura e une os *Clusters* que possuem a mesma coplanaridade, por meio da Equação 20 vista em Riquelme et al (2015):

$$k \times (\sigma_1 + \sigma_2) \geq |D_1 - D_2| \quad (20)$$

onde:

k é parâmetro de sensibilidade do teste

σ_1 e σ_2 são o desvio padrão da distância perpendicular (normal) de cada ponto em relação ao plano que representa o cluster

D_1 e D_2 são os parâmetros do cluster 1 e 2, eles podem ser encontrados pela Equação 21 (Riquelme et al, 2018)

$$A_x + B_y + C_z + D = 0 \quad (21)$$

onde:

A é o vetor normal de x , que é a primeira coordenada de um ponto no sistema de coordenadas cartesianas.

B é o vetor normal de y , que é a segunda coordenada de um ponto no sistema de coordenadas cartesianas

C é o vetor normal de z , que é a terceira coordenada de um ponto no sistema de coordenadas cartesianas

3.5 TRABALHO DE CAMPO PARA COLETA DOS PARÂMETROS DO RMR

Após a conclusão das extrações com o *software* DSE, realizou-se o trabalho de campo para a coleta das informações pertinentes à aplicação do sistema geomecânico RMR no maciço rochoso da área de estudo. Os parâmetros obtidos foram: condição das descontinuidades, presença de água, separação (abertura), rugosidade, preenchimento, grau de alteração, *Dip*, *Strike*, que em outro momento foi transformado para *Dip Direction*, além de obter com o proprietário a informação sobre o método de escavação utilizado na pedreira.

As ferramentas utilizadas para obtenção das informações citadas previamente foram: Bússola do tipo Brunton, ortomosaico e fotografias da área para facilitar a visualização e demarcação das estruturas. O tempo total do trabalho de campo foi em torno de 4 horas e 30 minutos, envolvendo todas as etapas.

3.6 ENSAIO DE TENSÃO UNIAXIAL

O ensaio de tensão uniaxial foi necessário para a coleta do parâmetro “Resistência da Rocha Intacta” presente no sistema RMR, ele foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFSM, responsável por atender alunos dando suporte nas disciplinas de: Materiais de Construção I e II, Resistência dos Materiais I e II, Mecânica dos Solos, Materiais de Pavimentação I e II e Geologia de Engenharia. Os procedimentos e a obtenção dos corpos de teste foram auxiliados pelo laboratorista e por uma colega doutoranda na área. Ainda, os resultados foram convertidos para MPa pelos mesmos. A Figura 26 ilustra o início do ensaio com o corpo de prova 1, sendo utilizados, no total, três corpos de prova.

Figura 26 – Ensaio de tensão uniaxial



Fonte: Autor (2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em relação ao processamento fotogramétrico, a Tabela 13 apresenta informações sobre o tempo de processamento, o número de fotos utilizadas, e os pontos para cada qualidade de nuvem densa. Ao analisar a tabela, percebe-se um aumento exponencial tanto no número de pontos quanto no tempo de processamento conforme uma melhor qualidade é selecionada. Além desses dados quantitativos, na avaliação visual (Ver Tópico **4.2.2 Dense clouds de diferentes qualidades**) também é possível verificar uma grande diferença entre as nuvens densas.

Nesse contexto, a qualidade utilizada para a geração de produtos fotogramétricas pode ser escolhida com base em três fatores principais:

- Capacidade computacional da máquina utilizada;
- tempo disponível para a obtenção dos produtos;
- objetivo do estudo e quais parâmetros se procura analisar.

O primeiro é exemplificado em Takano (2022) onde o processamento nas qualidades mais altas gerava modelos que o computador não conseguia renderizar rapidamente, impedindo um fluxo de trabalho contínuo. O segundo fator refere-se ao prazo para a entrega dos produtos, como foi visto na Tabela 13, a qualidade *Ultra High* apresenta um tempo necessário para conclusão cerca de 10 vezes maior do que a qualidade *High*, ou seja, torna-se necessário verificar o limite de entrega disponível, quando esse fator está presente, e escolher a qualidade em torno disso.

O último parâmetro a ser considerado é a finalidade do produto. No presente trabalho, recorreu-se a diferentes *softwares* para a extração das características das descontinuidades. Entretanto, como foi dito no tópico 3.3 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS o DSE não suportou a quantidade de pontos gerados na maior qualidade, tornando necessário o reproprocessamento para gerar uma nuvem densa com uma menor quantidade de pontos. Ainda, salienta-se que os pontos informados na Tabela 13 não são todos os que foram gerados, mas sim, os que sobraram após a limpeza dos ruídos e retirada das regiões que não faziam parte da área de estudo.

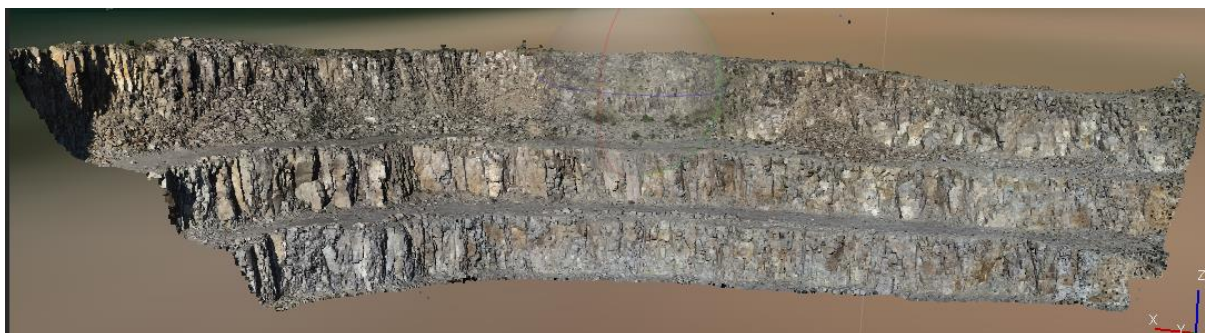
Tabela 13 – Tempo de processamento, número de fotos utilizadas e pontos nas Dense Clouds

Qualidade Produto	Pontos	Tempo do processamento
Lowest	152,716	2min. 40 seg.
Low	657,393	4 min. 30 seg.
Medium	2.772,787	16 min.
High	11.352,722	1h 13 min.
Ultra High	50.356,820	10h 24 min.
Alinhamento	-	6 minutos
Modelo 3d	-	29 minutos
DEM	-	3 minutos
Ortomosaico	-	18 minutos
Número de imagens	-	252

Fonte: Autor (2023).

Em relação à acurácia posicional, como foi visto no tópico 3.2, foram demarcados nas imagens um total de 23 GCPs, sendo que três deles foram considerados como *Checkpoints*, obtendo um erro quadrático médio dos pontos de controle de 2,54 cm. Em complemento, destaca-se que os maiores erros foram apresentados no eixo Z, o que era esperado em vista da variação altimétrica da área de estudo. O resultado final da *dense cloud* na qualidade *Ultra High* está exposto na Figura 27:

Figura 27 – Recorte final da nuvem densa



Fonte: Autor, 2023.

Em relação às estruturas, identificou-se uma família principal a partir da coleta das orientações de várias descontinuidades localizadas na área de estudo do talude.

A mesma frequentemente se expressava em *Dip dir.* ± 233 e *Dip* ± 80 e foi identificada majoritariamente como ruptura em cunha (Figura 28):

Figura 28 – Coleta das informações de uma das descontinuidades da família principal



Fonte: Autor (2023).

4.1 EXTRAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DAS DESCONTINUIDADES

A extração das características das descontinuidades foi feita no *software* livre DSE, e para isso, é necessário importar para o programa o *mesh* ou a nuvem densa. Neste trabalho, com base na literatura (RIQUELME et al, 2014; Takano, 2022), optou-se por utilizar a última opção. Nos próximos tópicos, serão comparados uma série de parâmetros e sua influência nos valores obtidos.

Em relação à qualidade do produto, a nuvem densa *Ultra High* possuía um elevado número de pontos, causando travamentos no programa, enquanto que a com qualidade *High* o procedimento só foi possível ser efetuado até a etapa de análise dos *clusters*, a partir deles o *software* não apresentava mudanças perante os cliques. Ainda, aguardou-se 11 horas para o salvamento do arquivo, a fim de exportar os resultados para o CloudCompare (CC), *software* livre para visualização de produtos fotogramétricos, e verificar se as alterações foram efetuadas e não apareciam no DSE, entretanto, como não foi possível salvar o arquivo, abandonou-se a nuvem densa com essa qualidade.

4.2 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NO SOFTWARE DSE

Os parâmetros como *KNN*, *cone*, *valor de k*, *bins level*, entre outros discutidos no tópico 3.4 EXTRAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES, têm uma influência significativa nos resultados. Em torno disso, percebe-se válida uma breve comparação entre os diferentes valores com essas variáveis a fim de verificar o impacto dessa influência. Este tópico possui como objetivo agrupar as análises dos resultados obtidos com diferentes *KNN*, qualidade da nuvem densa e *tolerance*.

4.2.1 Influência do parâmetro KNN no software DSE

A variação do valor do *KNN* apresenta um grande impacto na geração das descontinuidades. Os valores obtidos (Figura 29) são baseados na *dense cloud* com qualidade *High*, como foi dito anteriormente, o processamento com essa qualidade não concluiu todas as etapas do DSE. Portanto, os resultados obtidos na última etapa com diferentes valores de *KNNs* não estão disponíveis.

Figura 29 – *Dip Direction, Dip* e densidade obtidos com diferentes *KNNs*

KNN = 5			KNN = 10			KNN = 15			KNN = 40		
Dip. Dire.	Dip	Density	Dip dire.	Dip	Density	Dip dir.	Dip	Density	Dip dir.	dip	Density
135.0000	3.8570	14.5296	315.0369	3.8546	7.8319	315.0369	3.8546	7.8319	314.9971	3.8636	11.0473
341.5651	88.7724	5.4218	338.9681	36.6927	1.8421	338.9681	36.6927	1.8421	327.5261	34.4971	1.9782
325.3048	41.2589	2.2175	341.5675	88.7716	1.3901	341.5675	88.7716	1.3901	349.2846	83.7577	0.7666
2.2906	61.5657	1.0788	312.4003	73.1141	0.5861	312.4003	73.1141	0.5861	117.1801	89.4365	0.0929
312.3974	73.1171	0.9436	15.7522	87.9476	0.2755	15.7522	87.9476	0.2755	80.3085	89.4378	0.0679
258.6901	40.0248	0.5856	260.8369	73.5615	0.2327	260.8369	73.5615	0.2327	168.6954	40.0182	0.0482
252.4076	90.0000	0.5111	227.0429	86.6614	0.0451	227.0429	86.6614	0.0451	227.2065	82.4416	0.0410
27.1811	89.4424	0.4280	145.6183	57.4583	0.0291	145.6183	57.4583	0.0291			
73.6105	45.7503	0.1368									
163.6105	45.7503	0.0795									

KNN = 20			KNN = 25			KNN = 30		
Dip Dir	Dip	Density	Dip dir.	Dip	Density	Dip dir.	Dip	Density
315.0289	3.8575	9.5133	315.0156	3.8549	10.1350	315.0122	3.8579	10.5865
327.5325	34.4924	1.9010	327.5318	34.4894	1.9229	327.5310	34.4926	1.9729
345.5805	81.4196	0.7352	342.5543	82.2724	0.7588	342.5538	82.2752	0.7782
28.4947	86.9533	0.1238	111.0380	89.7034	0.0784	204.6761	88.2229	0.1195
83.0460	89.0394	0.0755	238.4941	81.7609	0.0570	111.0380	89.7022	0.0799
			125.5379	63.1358	0.0248	80.3101	89.4385	0.0689
						168.6906	40.0230	0.0443
						120.0690	55.1912	0.0229

Fonte: Autor (2023).

Em uma primeira análise, a principal diferença que a tabela demonstra é a quantidade de planos de orientação identificados conforme o *KNN* aumenta, com exceção para o *KNN* = 30. As tabelas inferem alguns planos de orientação principais com maior densidade, como: *Dip dir.* ± 315 e *Dip* ± 3.8; *Dip dir.* ± 327 e *Dip* ± 34; *Dip dir.* ± 340 e *Dip* ± 34, esse não foi identificado em *KNN* = 5, em contrapartida, esse *KNN* cita um plano de orientação *Dip Dir.* 2.29 e *Dip* 61.56 que não é visto em nenhum outro processamento.

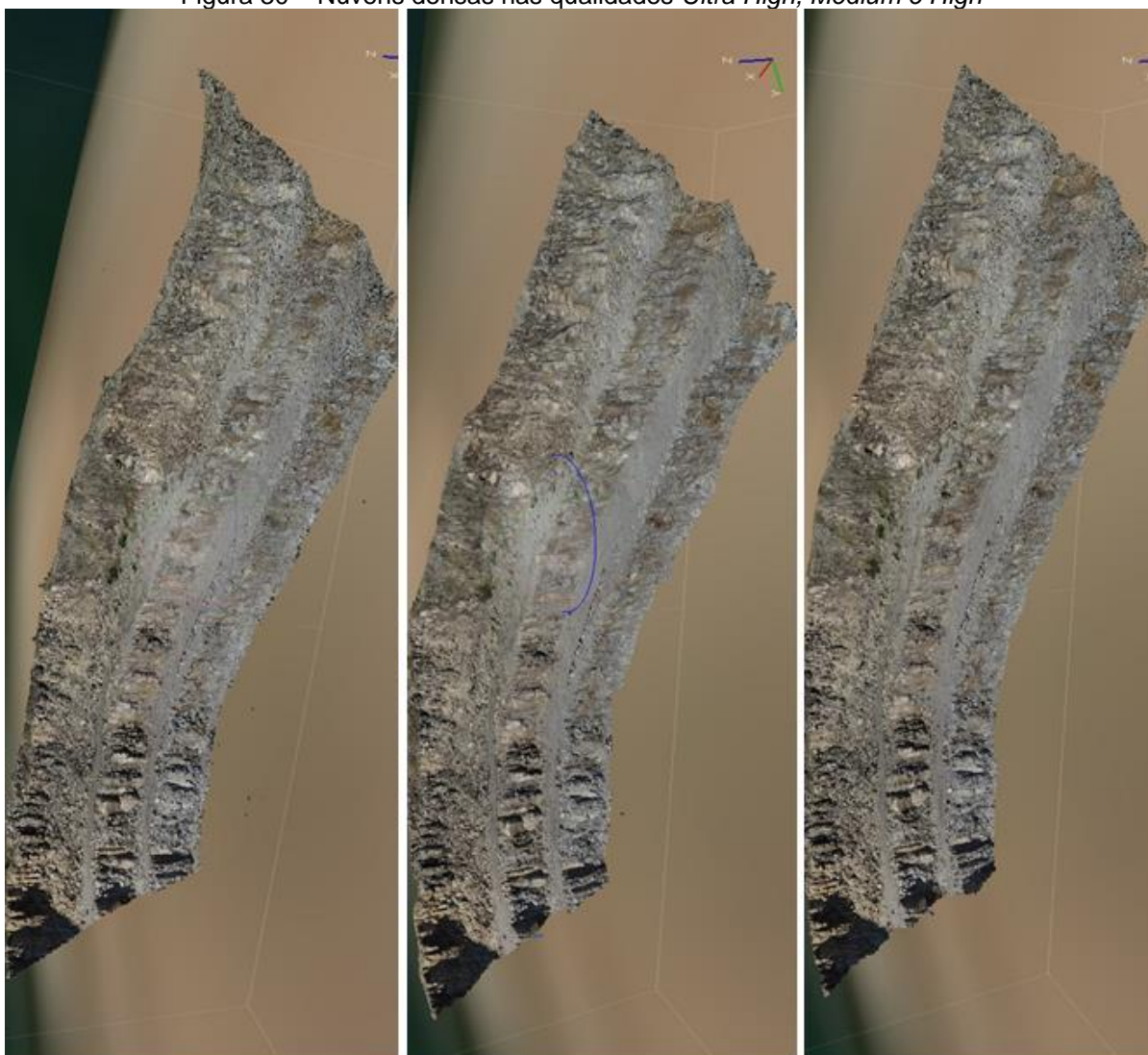
Nesse contexto, afirma-se que para análises mais profundas seria necessário a visualização desses planos na nuvem densa para verificar quais estruturas estão sendo classificadas no plano. Contudo, essa abordagem em linhas gerais é suficiente para comprovar que a alteração do *KNN* impacta no resultado da extração automatizada de características das descontinuidades em ambiente digital.

4.2.2 Dense clouds de diferentes qualidades

Conforme mencionado anteriormente, o programa DSE não conseguiu realizar a extração completa das características das descontinuidades das nuvens densas em qualidade *High* e *Ultra High* devido ao alto número de pontos. As informações

resultantes desses processamentos estão expostas na Tabela 13. Nesse contexto, enfatiza-se que a maior qualidade proporciona feições mais detalhadas e visíveis. Sendo assim, comparou-se brevemente as diferentes nuvens densas geradas com o Metashape. Primeiramente, demonstrou-se as imagens contendo toda a área de estudo nas qualidades *Ultra High*, *Medium* e *High*, respectivamente na Figura 30, *Low* e *Lowest* na Figura 31, respectivamente. Como é possível verificar nas fotos, observa-se que, por mais que seja possível perceber a diferença entre os modelos, a mesma ainda não se expressa de maneira a justificar o aumento exponencial de tempo de processamento e requisitos de recurso computacional.

Figura 30 – Nuvens densas nas qualidades *Ultra High*, *Medium* e *High*



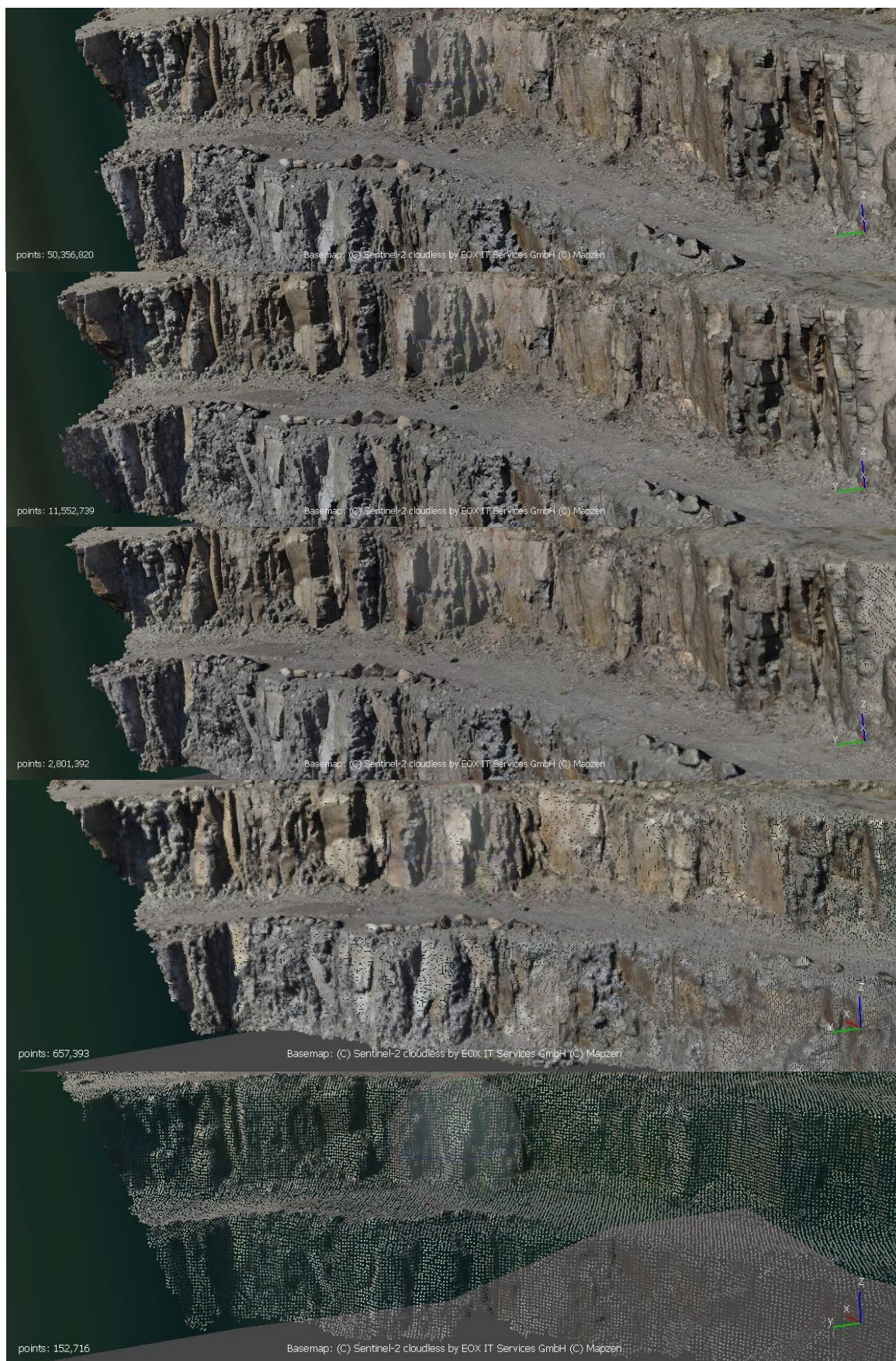
Fonte: Autor (2023).

Figura 31 – Nuvem densa na qualidade *Low* e *Lowest*

Fonte: Autor (2023).

Em decorrência disso, optou-se por exibir as imagens com *zoom* para mostrar o contraste entre os modelos de maneira mais visível. Com base nisso, selecionou-se a porção esquerda do talude, concentrando-se na visualização da segunda bancada. A Figura 32 demonstra as *Dense Clouds* com qualidade *Ultra High*, *High*, *Medium*, *Low* e *Lowest* quando ampliadas, evidenciam de forma incontestável a diferença da qualidade da *dense cloud*, principalmente na *Lowest*, que apresenta uma série de vazios e dificulta a interpretação das estruturas do maciço. Nas qualidades *Low* e *Medium* os pontos pretos também são presentes, mas em quantidades menores.

Figura 32 – Dense Clouds com qualidades diferentes

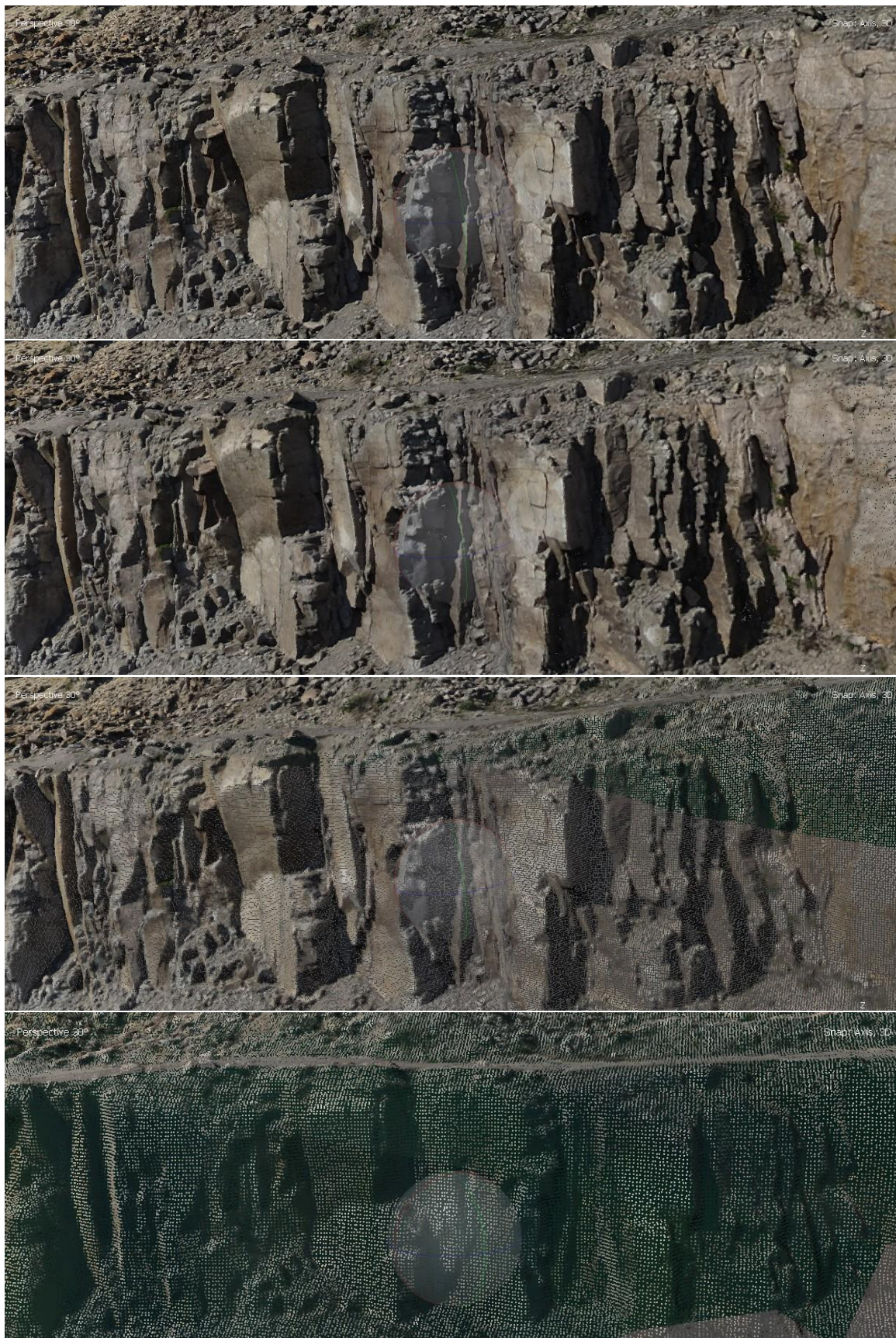


Fonte: Autor (2023).

Nesse contexto, observou-se inicialmente o talude inteiro, seguida pela análise de uma seção específica do mesmo. Por último, foi destacada uma região com o objetivo de inspecionar estruturas a fim de comparar os modelos (Figura 33). De acordo com as imagens, a qualidade *Low* e *Medium* não são viáveis para realizar uma descrição das estruturas, visto que apresentam uma série de falhas na imagem, na segunda ainda é possível em algumas porções realizar alguma análise, entretanto, verifica-se improvável o mesmo na parte direita da foto.

As qualidades *Ultra High* e *High* possuem uma alta semelhança. Dessa forma, infere-se que é pouco provável que haja diferenças, nesse nível de ampliação, significativas o suficiente para justificar 5 vezes mais pontos e tempo de processamento. Nesse sentido, admite-se que caso o *zoom* fosse aumentado, a *Ultra High* iria apresentar suas vantagens, porém, para a análise de estruturas, acredita-se suficiente a imagem nessa escala. A qualidade *Lowest* não foi mencionada e exibida por não apresentar imagem nesse nível de ampliação.

Figura 33 – Estruturas com nuvens densas de diferentes qualidades



Fonte: Autor (2023).

Posteriormente, efetuou-se a inclusão dessas nuvens densas expostas anteriormente no *software* DSE, a Tabela 14 demonstra os valores para *Dip* e *Dip direction* obtidos:

Tabela 14 – *Dip*, *Dip direction* e densidade em diferentes qualidades de nuvem densa

High			Medium			Lowest			Low		
Dip dir.	Dip	Density	Dip. Dir	Dip	Densidade	Dip. Dir.	Dip	Densidade	Dip. Dir.	Dip	Densidade
315.0122	3.8579	10.5865	314.8215	3.8649	12.0318	316.0904	3.7629	15.2973	315.7676	3.7856	15.7792
327.5310	34.4926	1.9729	345.2419	50.1353	1.5397	327.7020	34.3804	3.0422	341.6478	55.5369	1.5963
342.5538	82.2752	0.7782	345.5718	81.4152	0.9290	348.7920	62.4338	2.0904	161.5376	88.7757	0.5345
204.6761	88.2229	0.1195	253.8104	75.0896	0.2510	186.8871	88.9783	0.1621	242.6019	75.6370	0.1664
111.0380	89.7022	0.0799	30.9560	88.3511	0.1181	141.1098	86.9051	0.0992	108.4394	88.7687	0.0534
80.3101	89.4385	0.0689	111.0430	89.6904	0.0644	150.7913	27.5723	0.0825	207.1249	89.4082	0.0527
168.6906	40.0230	0.0443	167.0297	35.2421	0.0470	229.4890	80.2131	0.0628	70.2226	64.6491	0.0149
120.0690	55.1912	0.0229	87.5122	57.4378	0.0154	87.8899	65.4612	0.0616	108.4336	55.6101	0.0079
						84.8437	29.5047	0.0197	182.6398	53.1794	0.0058
						188.0088	53.5409	0.0057			

Fonte: Autor (2023).

De acordo com essas observações, torna-se evidente uma grande diferença entre os resultados obtidos com a mudança desse parâmetro. Em concordância, verifica-se que algumas famílias principais estão contidas em todos os processamentos. No entanto, o que utilizou a nuvem densa *Lowest* apresentou duas famílias a mais que os gerados com as qualidades *High* e *Medium* e uma a mais que o *Low*.

Conforme a qualidade da nuvem densa ia diminuindo a identificação de famílias aumentava. Dessa forma, infere-se que isso seja motivado pelo maior número de ruídos nas nuvens de menor qualidade, o que resulta em pontos deslocados e, conseqüentemente, na identificação de lineamentos que não existem no maciço rochoso.

Nesse contexto, é possível destacar algumas famílias principais, que aparecem consistentemente independente da qualidade: *Dip dir.* \pm 315 e *Dip* \pm 3, contida em todas tabelas; *Dip dir.* \pm 327 e *Dip* \pm 34, nas tabelas *High* e *Lowest*; *Dip dir.* \pm 345 e *Dip* \pm 82, nas tabelas *High* e *Medium*, na *Lowest* ele aparece com o *Dip* \pm 62, o que talvez pode indicar que ele tenha juntado com a família de *Dip dir.* \pm 343 e *Dip* \pm 50, presente na *Medium* e na *Low*.

Outras famílias recorrentes incluem: *Dip dir.* \pm 111 e *Dip* \pm 89, a qual não aparece apenas na *Lowest*; *Dip dir.* \pm 210 e *Dip* \pm 80, em conclusão, afirma-se que há

outras famílias correlatas menos destacadas que não foram mencionadas. Essa discussão está apresentada de forma resumida na Tabela 15:

Tabela 15 – Qualidades que contém as orientações

Dip Dir. \pm 315 Dip \pm 3	Todas qualidades
Dip Dir. \pm 327 Dip \pm 34	High e Lowest
Dip Dir. \pm 345 Dip \pm 82	High e Medium
Dip Dir. \pm 343 Dip \pm 50	Medium e Low
Dip Dir. \pm 111 Dip \pm 89	High, Medium e Low
Dip Dir. \pm 210 Dip \pm 80	High Medium e Lowest

Fonte: Autor (2023).

4.2.3 Tolerância

A tolerância, desvio máximo permitido quando os pontos são agrupados, pode ser calculada a partir do *software* DSE, para essa comparação foi utilizada a nuvem de pontos na menor qualidade. Os resultados estão expostos na Tabela 16:

Tabela 16 – Resultados para valores de tolerância diferentes

Tolerance = 0.15			Tolerance = 0.10			Tolerance = 0.20			Tolerance 0.30		
Dip. Dir	Dip	Density	Dip. Dir.	Dip	Density	Dip dir	Dip	Density	Dip dir.	Dip	Density
316.0904	3.7629	15.3049	316.0904	3.7629	15.3343	316.0904	3.7629	15.3407	316.0904	3.7629	15.3407
327.7020	34.3804	3.0418	327.7020	34.3804	3.0444	327.7020	34.3804	3.0622	327.7020	34.3804	3.0622
348.7920	62.4338	2.0892	348.7920	62.4338	2.0931	348.7920	62.4338	2.1017	348.7920	62.4338	2.1017
186.8871	88.9783	0.1623	186.8871	88.9783	0.1600	186.8871	88.9783	0.1547	186.8871	88.9783	0.1547
141.1098	86.9051	0.0992	141.1098	86.9051	0.0994	141.1098	86.9051	0.0994	141.1098	86.9051	0.0994
150.7913	27.5723	0.0826	150.7913	27.5723	0.0827	150.7913	27.5723	0.0828	150.7913	27.5723	0.0828
229.4890	80.2131	0.0628	229.4890	80.2131	0.0629	229.4890	80.2131	0.0630	229.4890	80.2131	0.0630
87.8899	65.4612	0.0616	87.8899	65.4612	0.0617	87.8899	65.4612	0.0618	87.8899	65.4612	0.0618
84.8437	29.5047	0.0197	84.8437	29.5047	0.0198	201.2534	60.8313	0.0159	201.2534	60.8313	0.0159
188.0088	53.5409	0.0056	188.0088	53.5409	0.0055	54.4895	63.0984	0.0053	54.4895	63.0984	0.0053

Fonte: Autor (2023).

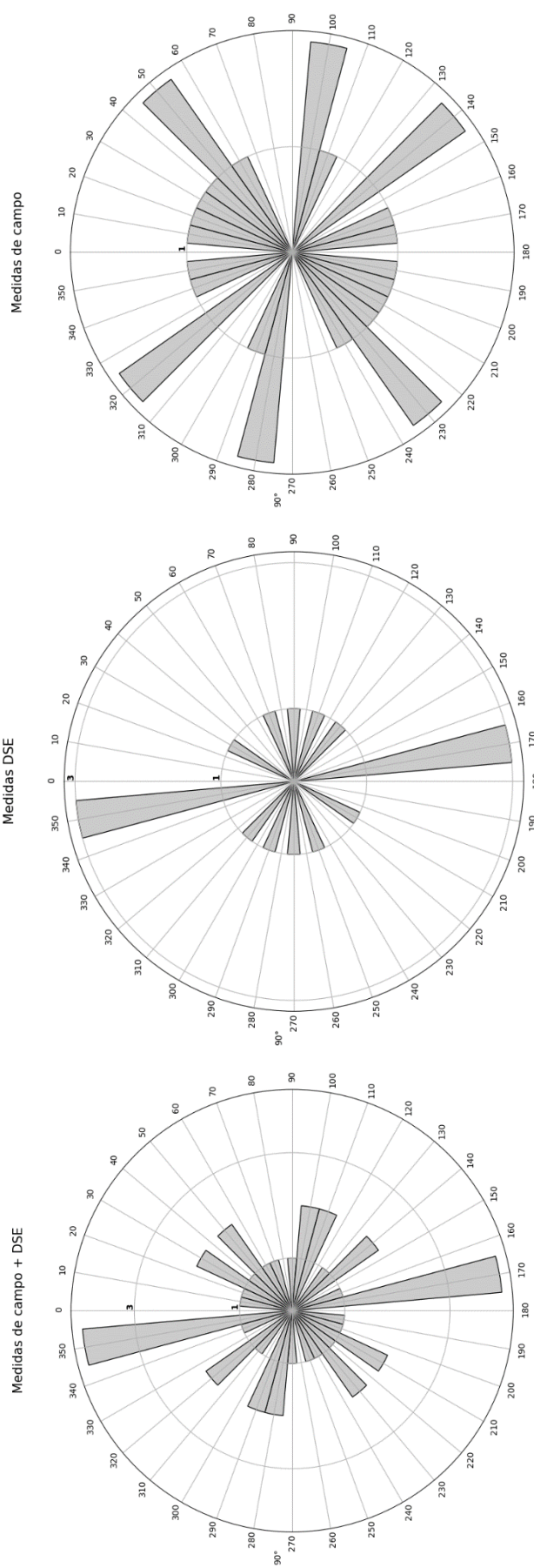
Como é possível ver na tabela, percebe-se pouca alteração no *Dip Dir*. *Dip* e *Density* com a mudança da tolerância, os seis primeiros valores são iguais nos 4 processamentos, alterando apenas os 2 últimos. Esses permanecem constante na

primeira e segunda tabela, com tolerância igual a 0.15 e 0.10, respectivamente, enquanto se alteram nos dois últimos, com tolerância igual a 0.20 e 0.30.

4.2.4 Orientação obtida com o software DSE e em trabalho de campo

Como mencionado anteriormente, a decisão foi utilizar apenas uma família principal que sintetiza de maneira satisfatória, compreendendo a escala do estudo, a situação geomecânicas do talude. Contudo, durante a ida à pedreira, foram coletadas uma série de medidas para descontinuidades de diferentes famílias, a fim de ter uma noção das orientações do talude. Em vista disso, organizou-se três diagramas de rosetas (Figura 34) a fim de facilitar a análise de todas essas informações de maneira conjunta, o primeiro com os dados apenas do campo, o segundo exibe dados apenas do DSE e o terceiro mostra uma sobreposição de ambos:

Figura 34 – Diagrama de rosetas



Fonte: Autor (2023).

De acordo com os diagramas, torna-se possível visualizar que ambos os métodos identificaram orientações similares, porém, com leves desvios entre eles. Em relação a isso, infere-se que o motivo para esse acontecimento é a quantidade superior de descontinuidades analisadas pelo programa em relação às analisadas em campo. Em outras palavras, se um esforço mais exaustivo fosse realizado em campo a fim de coletar um número muito maior de descontinuidades, a resposta no diagrama de rosetas poderia ser mais semelhante.

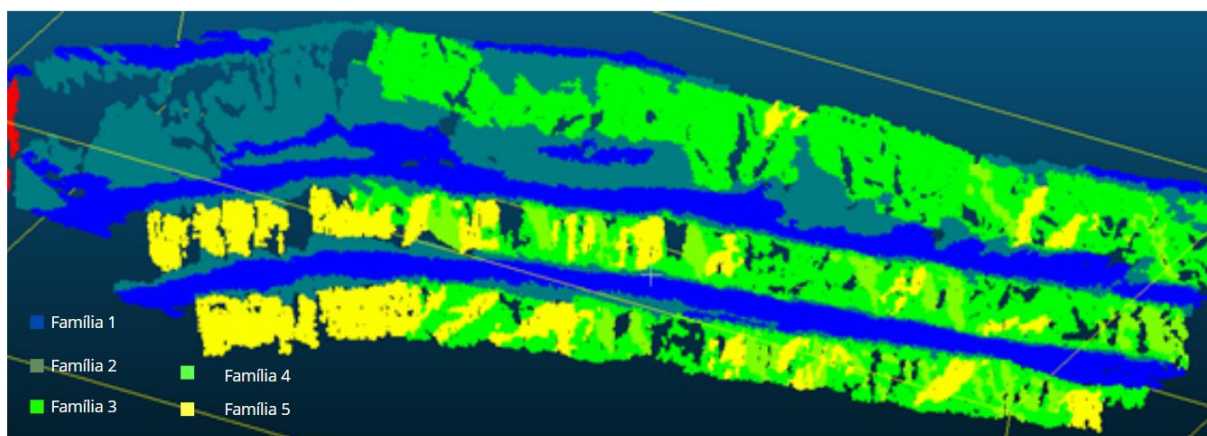
Além disso, ao analisar os diagramas sobrepostos, observa-se um aumento na expressão das demais descontinuidades em relação às duas principais opostas. Juntamente com isso, essas duas principais que estão opostas e foram citadas anteriormente não encostam no terceiro círculo, mas quando há a sobreposição elas ultrapassam esse marcador que indica a intensidade dessas estruturas.

4.3 NUVEM DENSA CLASSIFICADA DE ACORDO COM A FAMÍLIA

Diante das comparações efetuadas, optou-se por utilizar os parâmetros recomendados pelo autor do programa, utilizando a nuvem densa na qualidade *Lowest*. Após a conclusão de todas as etapas, o DSE fornece um arquivo de texto contendo os pontos, previamente inseridos no programa, classificados de acordo com a família em que se encaixam. A visualização não é possível no Metashape, sendo necessário o uso do Cloudcompare.

A Figura 35 ilustra a nuvem densa, tamanho do ponto igual a 3, com as famílias de descontinuidades delimitadas e com cores diferentes:

Figura 35 – Dense cloud classificada de acordo com a família de descontinuidades

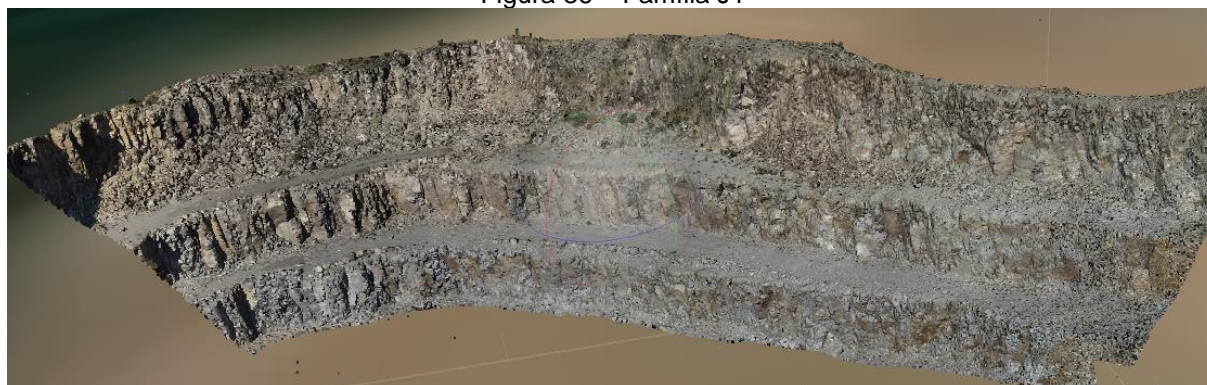


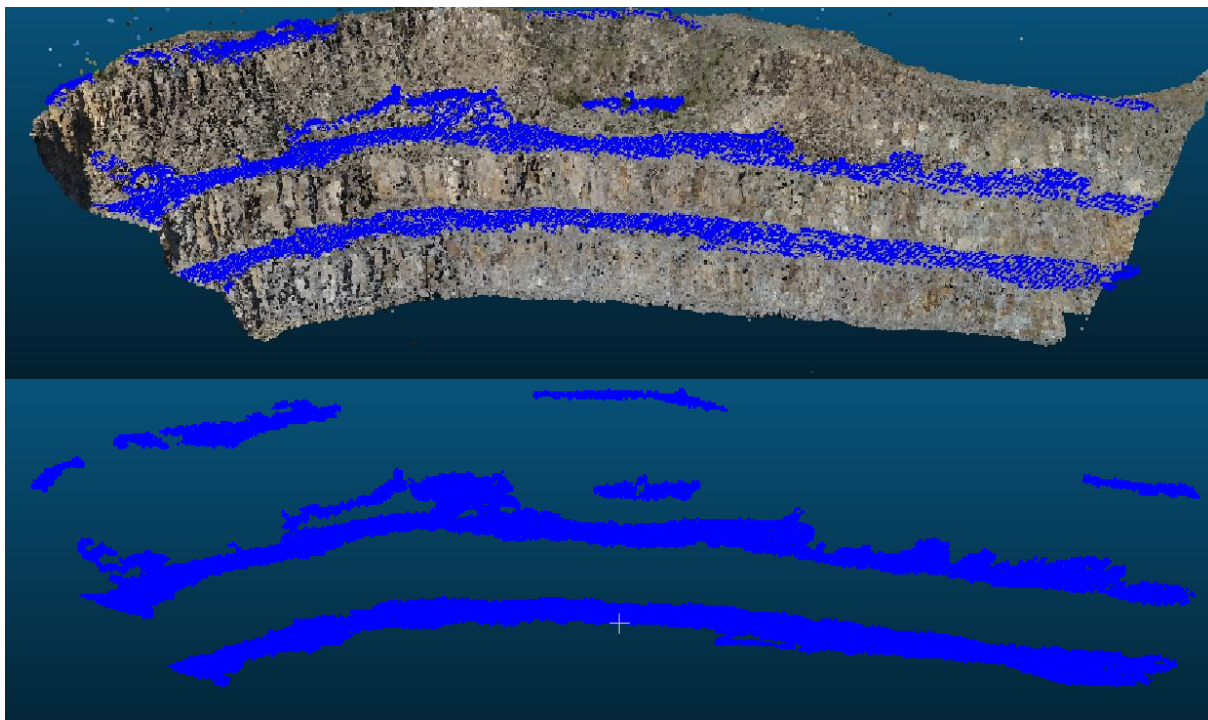
Fonte: Autor (2023).

Por conseguinte, torna-se possível separar a nuvem densa com a ferramenta *Filter Points by value*, em vista disso, extraiu-se as famílias separadamente. Elas foram mostradas em conjunto a nuvem original no Cloud Compare e no Metashape, com *zoom* quando necessário, uma vez que o primeiro apresenta uma baixa qualidade para visualização. Entretanto, em consideração que o objetivo principal era verificar a estrutura, escolheu-se utilizar o processamento *Highest*, o qual apresenta os traços com maior grau de definição.

A família J1 corresponde às descontinuidades horizontais (Figura 36) e em todos os processamentos apresentou a maior densidade. O DSE coletou para ela as informações de *Dip Dir.* = 316 e *Dip* = 3, em linhas gerais, concluiu-se que o DSE representou bem esse grupo de descontinuidades.

Figura 36 – Família J1

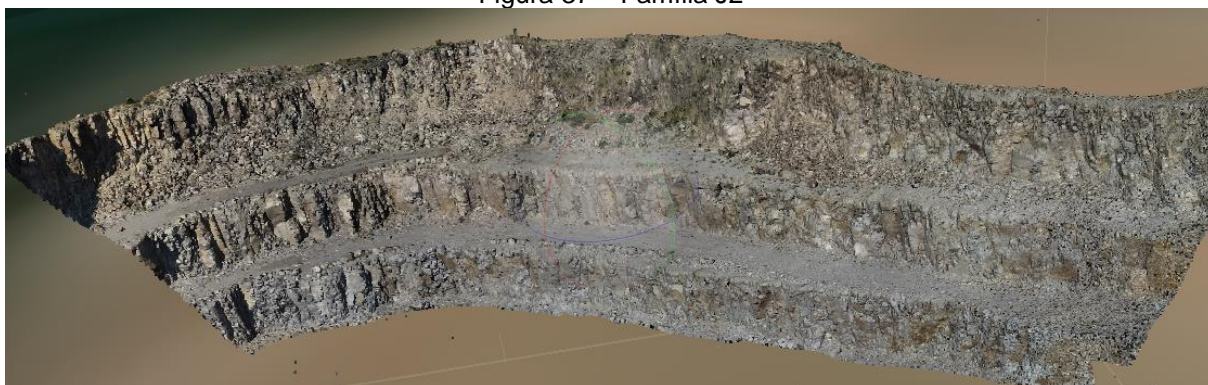


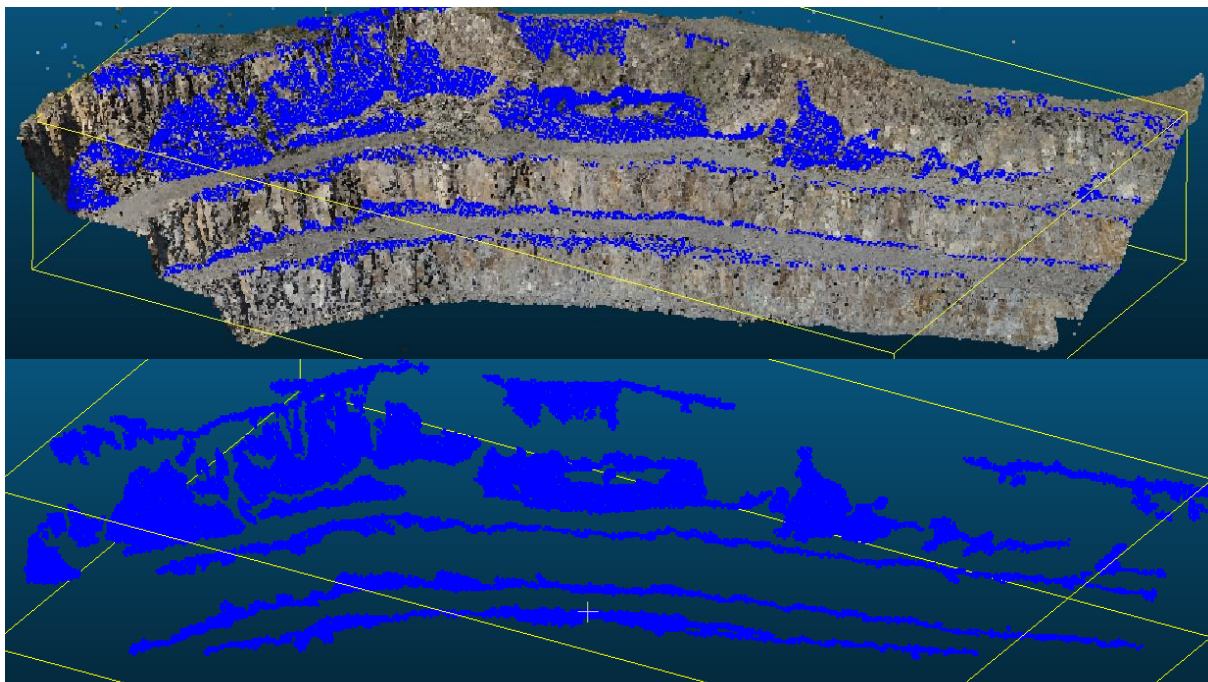


Fonte: Autor (2023).

A família J2 (Figura 37) é a segunda com maior densidade, com $Dip\ dir. = 327$ e $Dip = 34,38$, de acordo com as imagens, percebe-se que ela está localizada principalmente nas áreas de blocos caídos, como nas bordas das bancadas, seja na parte superior ou inferior das mesmas. Nesse contexto, definiu-se que maiores estudos e medições nessas áreas são necessários para ter a certeza de que essa família pode ser considerada como um ruído do modelo ou não.

Figura 37 – Família J2

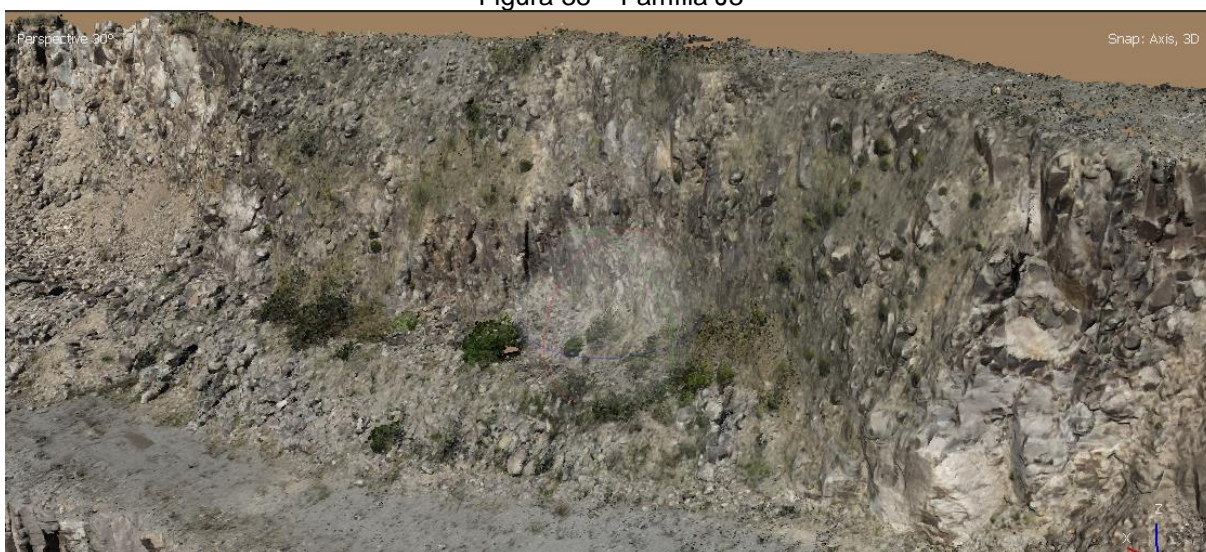


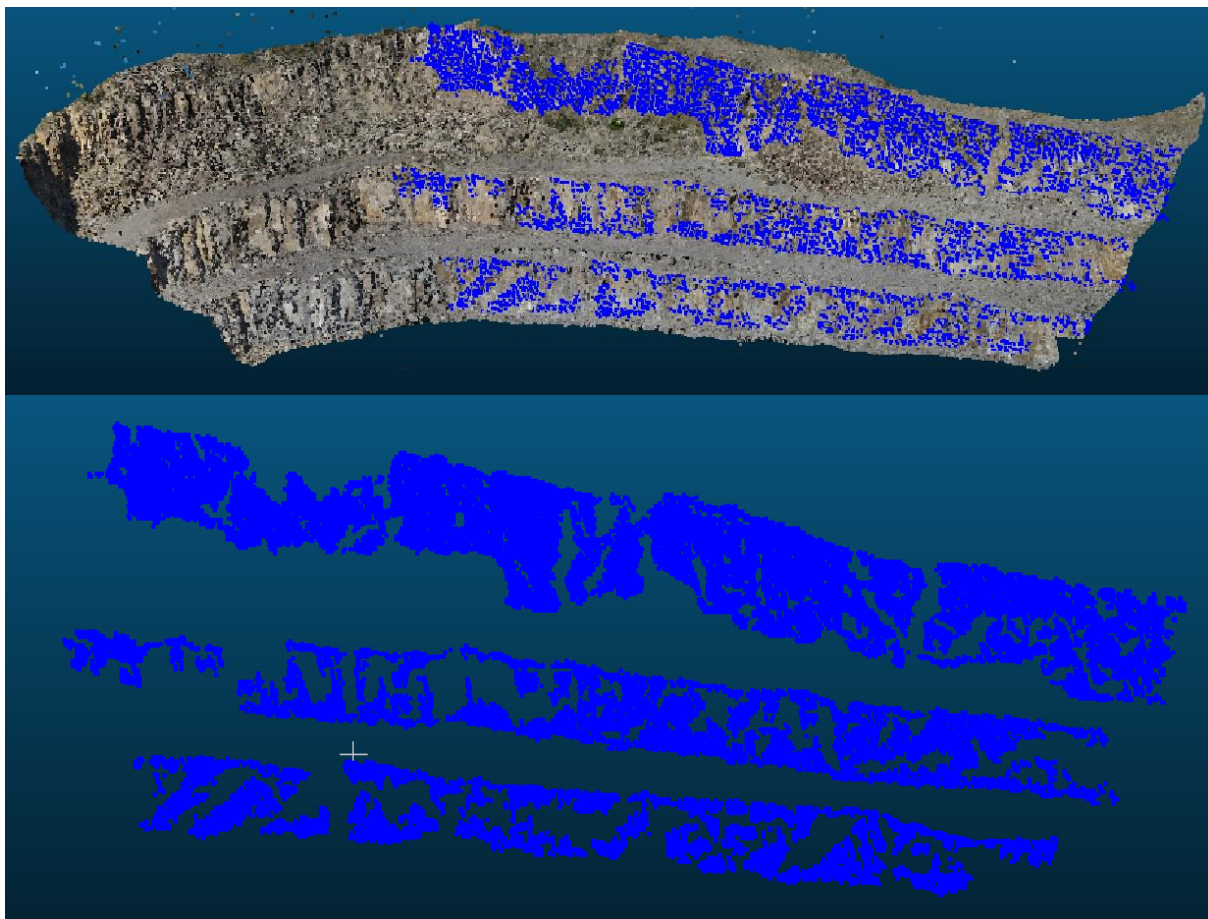


Fonte: Autor (2023).

A família J3 (Figura 38) é uma família em contato com o que se acreditou ser a família principal, entretanto, a primeira apresenta maior densidade no DSE, suas orientações são de $Dip\ dir. = 348$ e $Dip = 62$. A primeira figura foi retirada com zoom na parte superior do modelo, onde esse agrupamento apresenta maior coesão.

Figura 38 – Família J3



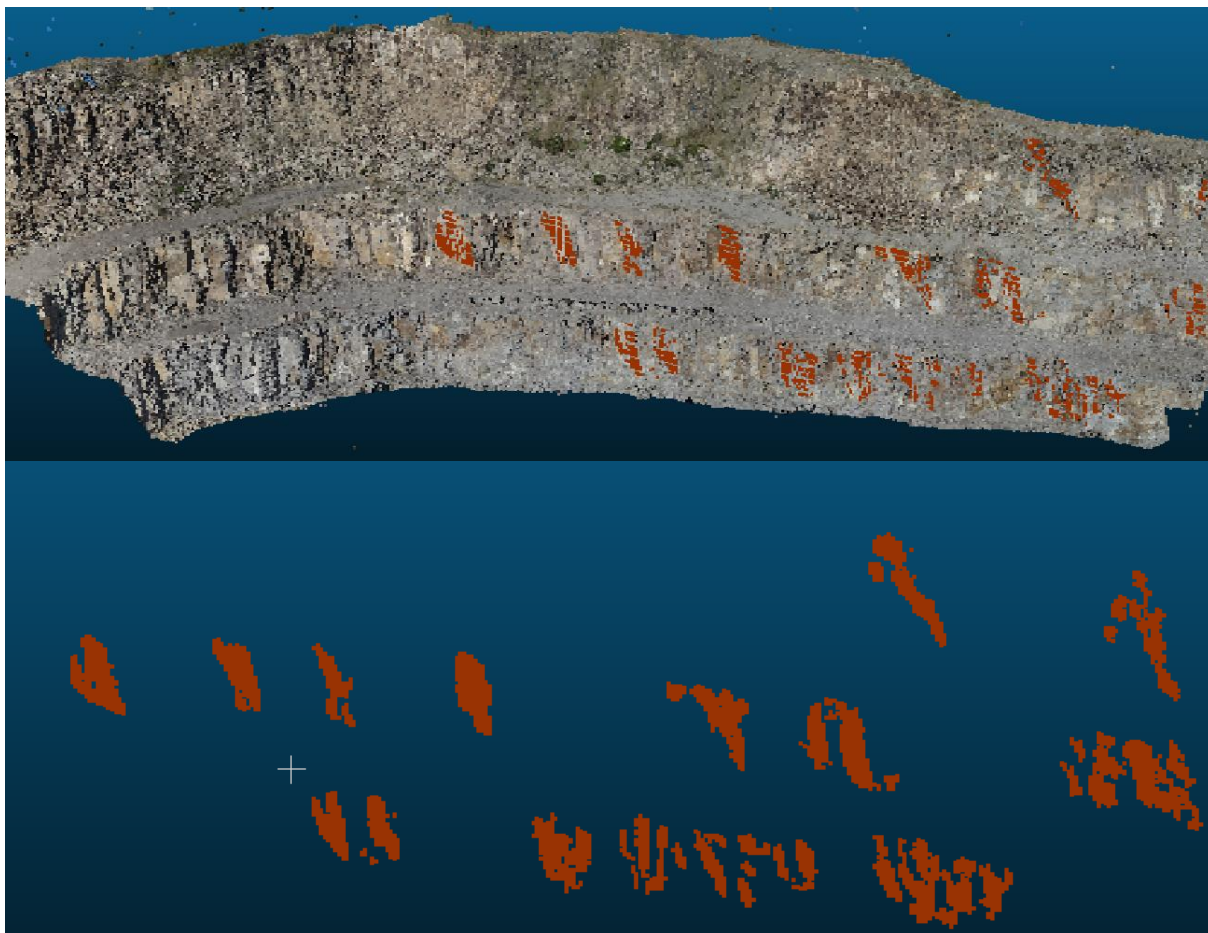


Fonte: Autor (2023).

A família J4 (Figura 39) é foi identificada em campo como representativa e que apresentava uma série de rupturas em cunha. A orientação obtida em campo e no programa foram similares, no primeiro, *Dip dir.* ± 233 e *Dip* ± 80 e no segundo *Dip dir.* = 229 e *Dip* = 80. Acredita-se que caso as primeiras feições, família J1 e J2, tivessem sido retiradas no programa, talvez o resultado fosse mais representativo para a J4. A primeira Figura apresenta um zoom na segunda bancadas primeiras identificações desse agrupamento.

Figura 39 – Família J4



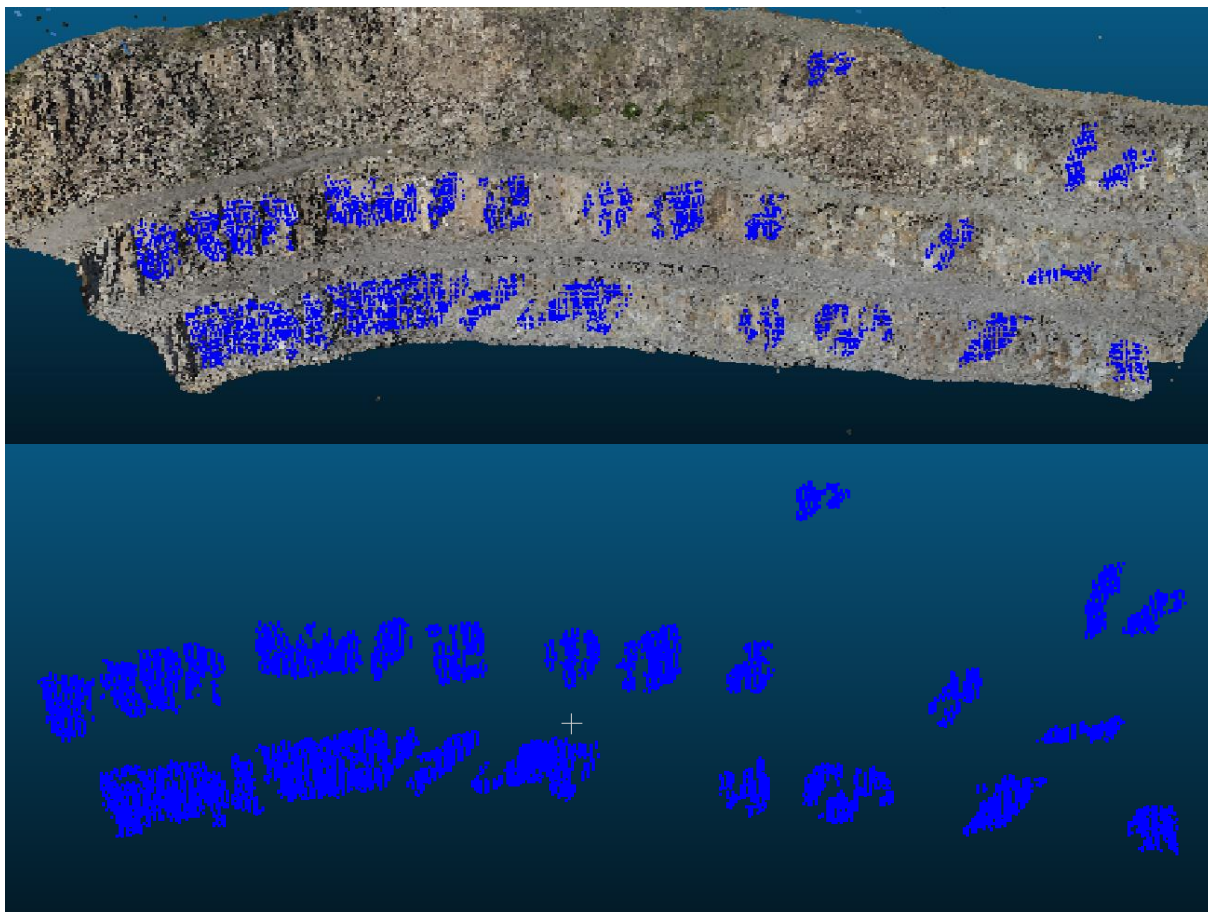


Fonte: Autor (2023).

A família J5 (Figura 40) apresenta valores de orientação similares à família J4, com $Dip\ dir. = 186$ e $Dip = 88$, sendo maiores estudos necessários para definir se ambas podem ser agrupadas ou não. A primeira figura representa a segunda bancada e a base na porção esquerda do modelo.

Figura 40 – Família J5





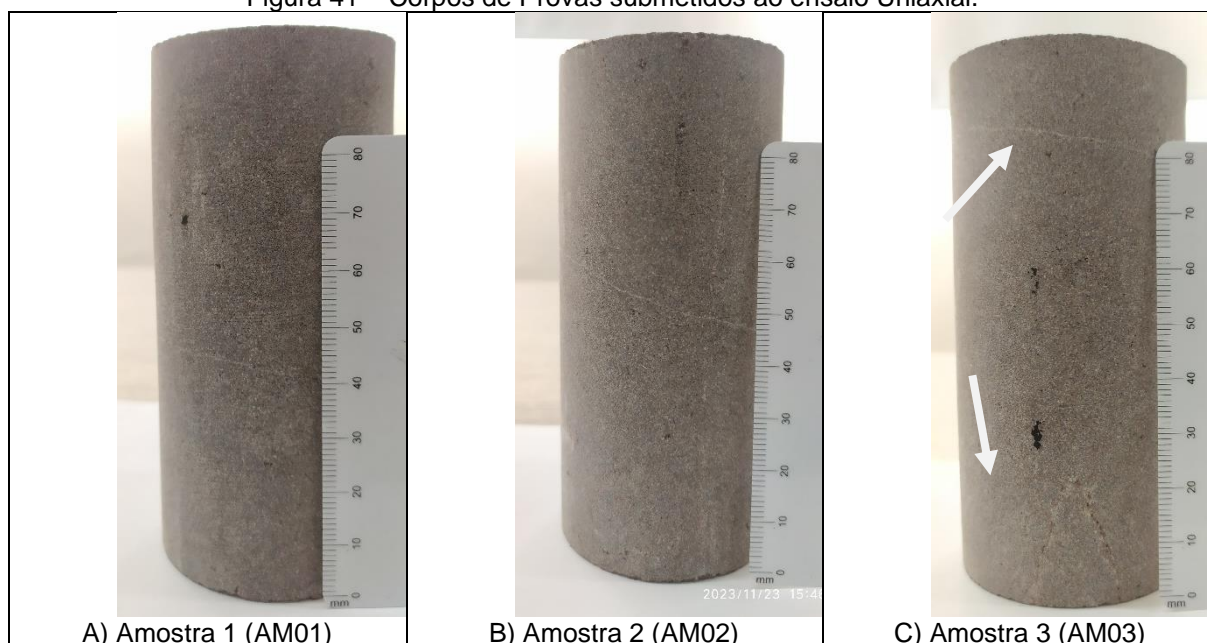
Fonte: Autor (2023).

4.4 SISTEMA RMR BÁSICO

O RMR básico é composto pelos elementos explicados no tópico 2.6.3 *Rock Mass Rating System – RMR system* e *Slope Mass Rating - SMR*. Nesse contexto, foi aplicado ele isoladamente nesse capítulo a fim de facilitar a organização do trabalho. Durante o trabalho de campo, a área do talude foi dividida em duas famílias principais, a primeira com *Dip Direction* ± 233 e a segunda com *Dip Direction* ± 35 . Os sistemas de classificação foram aplicados a ambas as famílias.

A resistência da rocha intacta foi obtida com ensaio de compressão uniaxial em três corpos de teste (Figura 41). Os valores estão dispostos em MPa na Tabela 17:

Figura 41 – Corpos de Provas submetidos ao ensaio Uniaxial.



A) Amostra 1 (AM01)

B) Amostra 2 (AM02)

C) Amostra 3 (AM03)

Fonte: Autor (2023).

Tabela 17 – Tensão obtida com o ensaio uniaxial

Corpo de prova	Tensão (Mpa)
CP 1	120,9
CP 2	108,6
CP 3	119,3
Média	113,3

Fonte: Autor (2023).

O corpo de prova da AM01 é maciço e sem estrutura visível a olho nu. Conforme isso, ele foi o que necessitou uma maior tensão para romper, percebe-se na Figura 43 que, por não ter estruturas ele rompeu completamente.

Figura 42 – Ruptura do corpo de prova 1



Fonte: Autor (2023).

Por sua vez, na AM02 (Figura 44) nota-se uma estrutura cortando todo o diâmetro do corpo de prova. O corpo de prova após o ensaio apresenta diversas linhas de rompimento conectando com essa linha estrutura citada previamente. Esse corpo de prova demonstra a principal estrutura encontrada em campo, ruptura em cunha, a qual é formada pela intersecção das fraturas.

Figura 43 – Ruptura do corpo de prova 2



Fonte: Autor (2023).

Na AM03 foram observadas duas estruturas, uma cortando todo o CP em relação ao seu diâmetro e, uma segunda estrutura formando um par conjugado, na base do CP. A Figura 45 demonstra o corpo de prova após o rompimento:

Figura 44 – Ruptura do corpo de prova 3

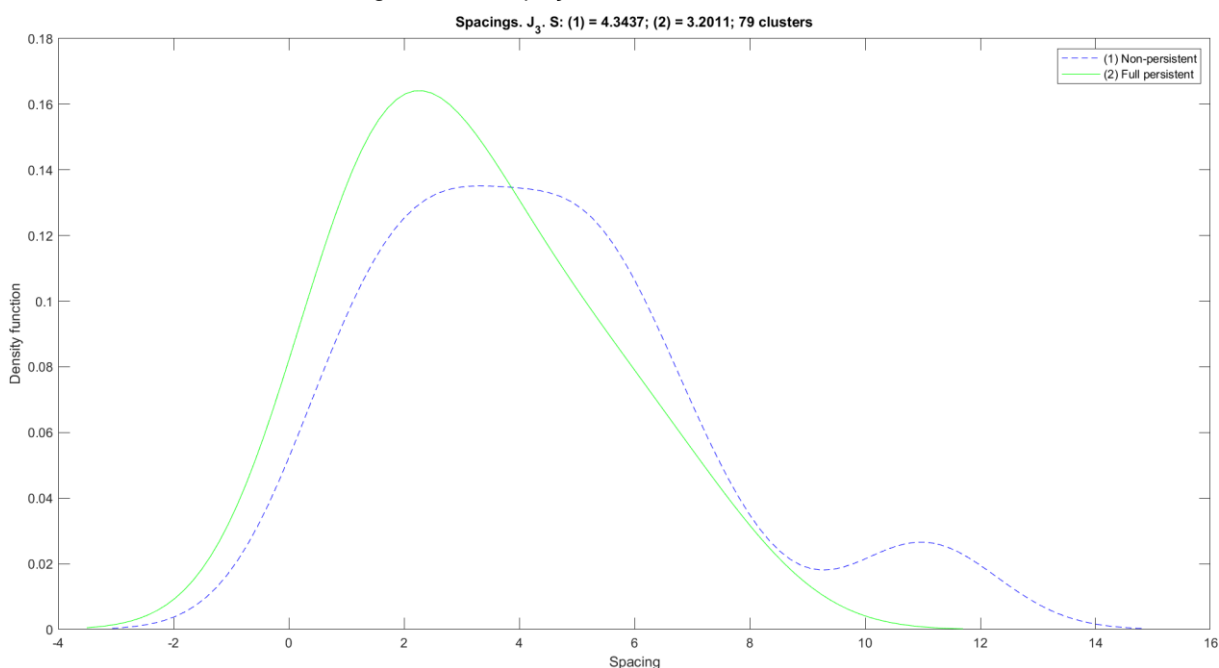


Fonte: Autor (2023).

Ressalta-se que, tanto na AM02 quanto na AM03, a tensão aplicada aos CP's no momento do ensaio Uniaxial foi perpendicular a essas estruturas. Visto os valores obtidos com o ensaio da compressão uniaxial, encaixa-se no RMR na faixa entre 100-250 Mpa, com o peso 12.

O próximo parâmetro é o espaçamento das descontinuidades, que foi obtido por meio da Dense Cloud no *software* DSE (Figura 46). Após a conclusão da ferramenta, obtém-se dois espaçamentos, o primeiro para descontinuidades não persistentes e o segundo para descontinuidades persistentes, sendo necessário tomar cuidado com o valor fornecido na página principal da ferramenta, pois ele exibe a média aritmética entre os dois espaçamentos.

Figura 45 – Espaçamento obtido com o DSE



Fonte: Autor (2023).

Riquelme et al (2018) recomenda fazer uso do espaçamento que considerou as descontinuidades não persistentes, sendo assim, seguiu-se a recomendação do autor do software e utilizou o parâmetro dessa forma. O espaçamento está exibido na Figura 82, 4,3437 metros.

As formas de obter o valor do RQD foram expostas no tópico 2.4.2, empregou-se a equação 10, uma vez que o espaçamento das famílias é facilmente obtido como foi visto anteriormente.

$$J_V = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \frac{1}{S_4} + \frac{1}{S_5} + \frac{1}{S_6} \quad (10)$$

Substituindo com os valores encontrados pelo DSE:

$$J_V = \frac{1}{6,2591} + \frac{1}{5,9683} + \frac{1}{4,3437} + \frac{1}{7,8205} + \frac{1}{4,9692} + \frac{1}{5,5504}$$

$$J_V = 0.1597 + 0.1675 + 0.2302 + 0.1278 + 0.2012 + 0.1801$$

$$J_V = 1.0665$$

Como o J_V obtido é menor que 4.5, Palmstron (1974) indica que o RQD deve ser considerado 100.

Quanto à condição das descontinuidades, utilizou a tabela separada exposta na Tabela 18, o comprimento da descontinuidade (persistência) foi obtido com o *software* DSE, foi utilizada a família definida pelo programa e similar à família principal coletada em campo, os resultados do processamento estão visíveis na Figura 49:

Tabela 18 – Parâmetros e pesos definidos para a condição das descontinuidades

Comprimento da descontinuidade (Persistência)	< 1 m	1 - 3m	3- 10 m	10-20 m	> 20m
Peso	6	4	2	1	0
Separação (abertura)	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Quase liso	Liso
Peso	6	5	3	1	0
Enchimento	Nenhum	Duro com espessura < 5 mm	Duro com espessura > 5 mm	Mole com espessura < 5 mm	Mole com espessura > 5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Grau de alteração	Não alteradas	Ligeiramente alteradas	Moderadamente alteradas	Muito alteradas	Em decomposição
Peso	6	5	3	1	0

Fonte: Autor (2023).

Logo, a condição das descontinuidades pode ser definida como $1 + 0 + 3 + 6 + 3 = 13$. A Figura 48 ilustra o autor calculando o *dip* e o *strike* de uma descontinuidade que posteriormente foi agrupada dentro da família principal que representa de maneira simplificada o talude.

Figura 46 – Condição das descontinuidades em campo



Fonte: Autor (2023).

Figura 47 – Persistência da família 4 do DSE

Persistência dip (m)	8.0484
Persistência strike (m)	11.3409
Persistência máxima (m)	12.167
Persistência área (m ²)	64.1724

Fonte: Autor (2023).

As condições de percolação da água podem ser preenchidas com um dos três parâmetros: Caudal por 10m de comprimento do túnel, relação pressão da água vs tensão principal máxima e condições gerais, para o presente trabalho o último se mostrou mais adequado. Em vista disso, em campo ambas famílias de descontinuidades foram classificadas como úmidas. Uma síntese da classificação feita nesse sistema está ilustrada na Tabela 19:

Tabela 19 – Classificação da família J1 no RMR

Parâmetros		Coeficientes							
1	Resistencia da rocha intacta	Point Load	> 10 MPa	4_10 Mpa	2-4 Mpa	1-2 MPa	Ver compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 Mpa	1-5 Mpa	<1 Mpa
	Pesos		15	12	7	4	2	1	0
2	R.Q.D.		80-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%		
	Pesos		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		>2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60mm		
	Pesos		20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades (ver Tabela 3)		Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes da rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1mm, paredes ligeiramente alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou enchimento com espessura < 5mm ou juntas contínuas com separação 1-5mm	Enchimento mole com espessura >5mm ou juntas contínuas com separação > 5mm		
	Pesos		30	25	20	10	0		
5	Presença de água	Caudal por 10 m de comprimento do túnel	nenhum	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min		
		Relação pressão da água vs tensão principal máxima	0	< 0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	0,5		
		Condições Gerais	Completament e seco	Água intersticial	Úmido	Escorrimentos	Entrada de água		
	Pesos		15	10	7	4	0		

Fonte: Autor (2023).

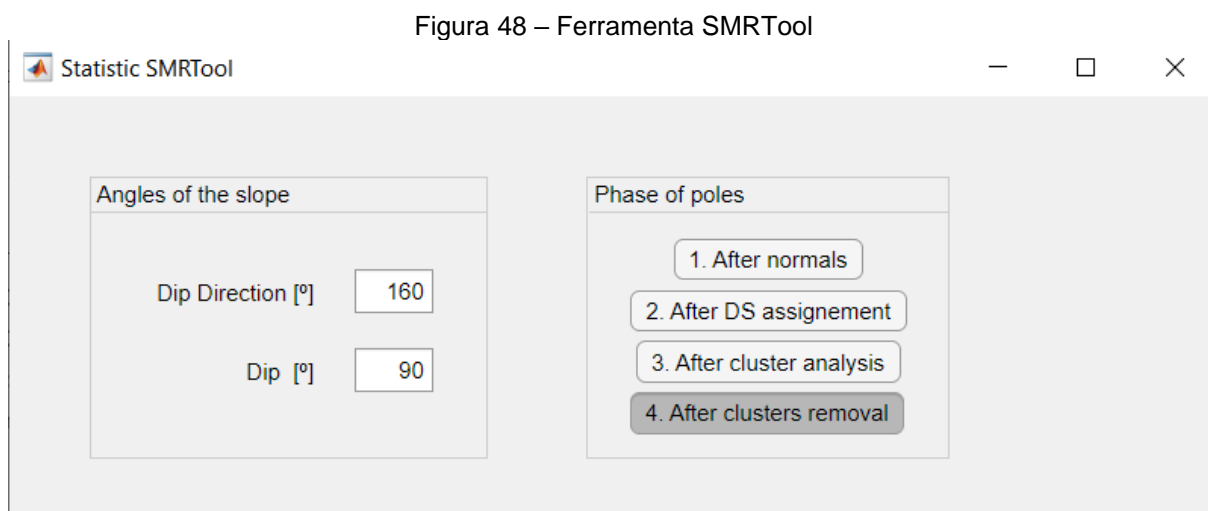
O somatório dos pesos para a família J1, que é a família principal identificada em campo, fica $12 + 20 + 20 + 13 + 7 = 72$.

4.5 SISTEMA SRM

A aplicação do SRM necessita dos parâmetros F_1, F_2, F_3, F_4 , os mesmos foram definidos e explicados no tópico 2.4.3. A obtenção dessas informações pode ser feita tanto pelo programa DSE quanto por cálculos manuais, com exceção do F_4 que corresponde ao tipo de escavação utilizado no local.

Nesse contexto, optou-se por utilizar o DSE, mas apenas com a família correspondente, com $Dip\ dir. = 229$ e $Dip = 80$ à família principal reconhecidas e coletadas em trabalho de campo, essa última possuindo $Dip\ dir. \pm 233$ e $Dip. \pm 80$.

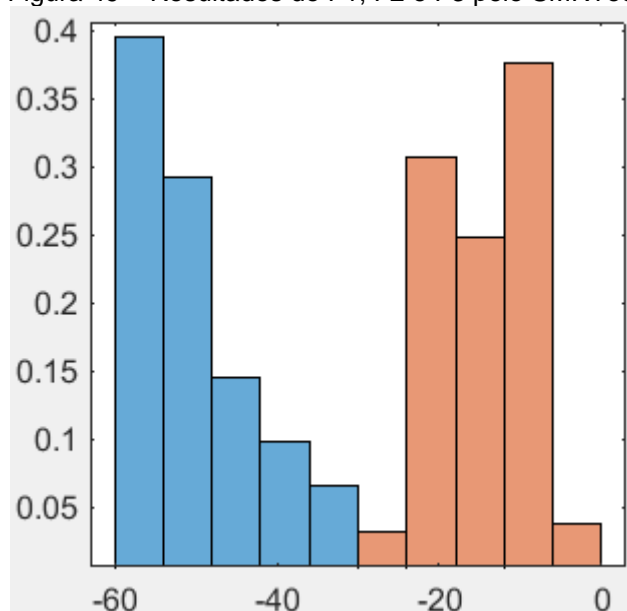
O ângulo do talude foi calculado e os valores foram 160° para o *Dip Direction* e 90° para o *Dip*. A Figura 51 demonstra a interface da ferramenta SMRTool para o cálculo do SRM:



Fonte: Autor (2023).

O resultado obtido para o cálculo $F_1 \cdot F_2 \cdot F_3$ foi 0.39 está na Figura 52, escolheu-se utilizar o resultado com a maior frequência.

Figura 49 – Resultados do F1, F2 e F3 pelo SMRTool



Fonte: Autor (2023).

O F_4 é definido pelo método de escavação da área de estudo, durante a ida à pedreira foi perguntado à um dos responsáveis e foi respondido que as novas bancadas eram feitas com desmonte de explosivo, o qual de acordo com a tabela da Tabela 7 não aumenta a pontuação do SRM. Dessa forma, o resultado do SRM foi definido por:

$$SMR = RMR_b + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$$

$$SMR = 74 + 0,39 + 0$$

$$SMR = 74,39$$

De acordo com a Figura 31, os taludes com SMR nessa faixa são considerados como Maciços Rochosos bons. O resultado expresso é coerente com a realidade, visto que a localização do talude estudado está dentro de uma pedreira com estabilidade controlada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar a viabilidade do uso de drones para a extração semiautomatizada das características de descontinuidades. Além disso, outras conclusões também foram alcançadas, incluindo o potencial da fotogrametria digital aplicada à análise de estruturas e os principais obstáculos associados à metodologia utilizada nessa pesquisa.

A conclusão do estudo permite verificar de forma mais precisa alguns pontos que precisam ser melhorados em trabalhos futuros. Nesse contexto, O desenvolvimento deste trabalho necessitou de duas saídas de campo, o primeiro para o voo de drone e o segundo para a caracterização das condições das descontinuidades, parâmetro necessário para a aplicação do RMR. Para pesquisas posteriores será adotada uma terceira saída de campo, a fim de compreender de maneira detalhada as estruturas predominantes, tipos de possíveis rupturas e, dessa forma, planejar melhor as próximas etapas.

Demais preparações também devem ser tomadas para proporcionar maior confiabilidade no estudo. Uma dessas é a marcação das estruturas medidas em campo, seja com spray ou alguma outra maneira de pintura, pois, algumas descontinuidades não foram possíveis confirmar a identificação, o que impediu de fazer a comparação do espaçamento obtido de forma manual no Metashape com o automático do DSE.

A variação dos resultados conforme as diferentes opções de processamento, tanto no *software* de fotogrametria, Agisoft Metashape, quanto no de extração das descontinuidades, DSE, destaca a necessidade de um profissional especializado em geotecnia nas análises de estabilidade de talude. Em adição, questiona-se se o trabalho não seria mais demorado e tedioso com a necessidade de comparar os resultados a fim de decidir os critérios a serem utilizados.

Nesse sentido, infere-se que a calibração dos parâmetros será necessária constantemente, uma vez que há uma série de fatores que diferenciam a análise de um talude para outro, como tipo de rocha, visibilidade das estruturas, coloração, entre outros. Em contraponto, acredita-se que usuários experientes na ferramenta ao longo do tempo desenvolverão uma compreensão geral do programa, permitindo uma rápida calibração do modelo para obter os melhores resultados.

Quanto aos equipamentos utilizados, o Drone DJI AIR 2 cumpre com sua função e permite, com suas imagens, a reconstrução de um modelo que permite a visualização das estruturas em ambiente digital. A máquina utilizada para o processamento foi considerada adequada, ou seja, para taludes menores ou de mesma área, computadores com *hardware* de menor custo são suficientes para gerar a nuvem densa em todas qualidades.

Ademais, como foi visto no tópico 4.2.2 *Dense clouds* de diferentes qualidades, a nuvem densa nas menores qualidades fornece um ótimo resultado na extração das características de descontinuidades. No entanto, destaca-se que a identificação de pequenas estruturas nas *Dense Clouds* com menor número de pontos pode ser mais desafiadora.

É crucial reforçar a importância do cuidado por parte do operador do drone durante a execução do plano de voo. No decorrer da aquisição das imagens do trabalho, a aeronave perdeu conexão com o aplicativo devido à aproximação com uma torre de telecomunicações. Esse incidente ressalta que equipamentos podem ser perdidos se certos fatores não forem devidamente considerados durante a fase de planejamento.

Conforme detalhado na metodologia, o voo foi executado de duas maneiras: primeiramente de forma automatizada com plano de voo e posteriormente a aeronave foi controlada manualmente, tentando manter a sobreposição constante. Após isso, as fotos foram processadas de maneira conjunta no *Metashape*. Um dos desafios apontados pelo autor é a falta de reprodutibilidade do voo manual, entretanto, não foi encontrado um *software* que permitisse a execução de voos na vertical.

A interface de processamento no *Metashape* é amigável e de fácil uso, as opções ficam indisponíveis para o clique enquanto o usuário não definir as opções e executar os procedimentos anteriores necessários. Alguns procedimentos manuais são essenciais e foram efetuados no trabalho, como retirada de vegetação e posicionamento manual dos pontos dos GCPs. A visualização do programa de nuvens de pontos é de alta qualidade, entretanto, ele não aceita arquivos .txt, que é o formato no qual o DSE exporta os resultados, sendo necessário recorrer ao *Cloudcompare*, que exibe a nuvem densa com menor qualidade.

O RTK utilizado proporcionou uma excelente precisão, com erros inferiores a 3 cm no modelo, o que permitiria a medição de estruturas utilizando algumas ferramentas do *Metashape*, as mesmas não foram empregadas devido à proposta do

trabalho de utilizar as formas semiautomatizadas sempre que possível para a extração das características das descontinuidades. Maiores estudos são necessários para verificar se há influência da acurácia posicional do modelo no *software* DSE.

Além disso, durante a conclusão do estudo, realizou-se um teste com um número maior de *Checkpoints*, resultando em um RMSE menor. Contudo, os processamentos já haviam sido concluídos em todos os softwares, inviabilizando a reexecução de todos os procedimentos.

Para a principal família identificada e mensurada em campo, o DSE mostrou-se eficaz na identificação, uma vez que ela foi consistentemente identificada em diferentes parâmetros. Em contrapartida, caso o trabalho tivesse extraído um maior número de famílias com menor expressão no talude, a precisão do programa poderia ter sido comprometida nas análises.

O espaçamento e a persistência foram obtidos exclusivamente de maneira digital com o software, impossibilitando comparações diretas e a verificação da sua coerência com as condições reais do talude. No entanto, uma análise conduzida por um profissional especializado em geotecnia indicou que os valores se mostraram dentro da faixa do esperado, considerando a praticidade da obtenção desses parâmetros em comparação com a coleta manual em trabalho de campo.

O RQD também foi obtido de maneira fácil e rapidamente. Contudo, ele se encontra na mesma situação que o espaçamento e a persistência, carece de dados para comparação e confirmação de que os valores são representativos. Visto isso, espera-se, caso possível, que posteriormente seja feita a realização de trabalhos para realizar essa análise.

A aplicação do RMR e SRM utilizando o programa DSE foi simples e permitiu a obtenção dos dados rapidamente. Em geral, a ferramenta criada por Riquelme et al (2014) para facilitar o SRM não possibilita algo que seria inviável de realizar manualmente, entretanto, para profissionais da área é válido a diminuição do tempo gasto.

REFERÊNCIAS

- AFONSO, Drielle Cristina Cruz Souza; ALENCAR, Maria Simone de Menezes. Aeronaves não tripuladas: uma análise científica e tecnológica em nível mundial. *In: 8º ENCONTRO BRASILEIRO DE BIBLIOMETRIA E CIENTOMETRIA*, 2022, Maceió. **Anais [...]**. Maceió: UFAL.
- AGÜERA-VEGA, Francisco; CARVAJAL-RAMÍREZ, Fernando; MARTÍNEZ-CARRICONDO, Patricio. Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. **Measurement**, v. 98, p. 221–227, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.002>. Acesso em 14 set. 2023.
- ALIDOOST, Fatemeh; AREFI, Hossein. Comparison of UAS-Based photogrammetry software for 3d point cloud generation: A survey over a historical site. *In: ISPRS ANNALS OF THE PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES*, 2017, Safranbolu. **Anais [...]**.
- ALLAM, Mosaad. Spatial rock face deformations of geological discontinuities in open-pit mines using analytical photogrammetry. **Invited Paper, Proceedings, ISP Symposium on Close-Range photogrammetric Method**, Urbana, Ill., U.S.A., July 28--August 1, 1975, p. 5-23.
- ALLAM, Mosaad. The estimation of fractures and slope stability of rock faces using analytical photogrammetry. **Photogrammetria**, v. 34, n. 3, p. 89–99, 1978. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0031866378900029>. Acesso em: 06 dez. 2023.
- BARTON, Nick; CHOUBEY, Vishnu. The shear strength of rock joints in theory and practice. **Rock Mechanics Felsmechanik Mecanique des Roches**, v. 10, n. 1–2, p. 1–54, 1977. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01261801>. Acesso em: 12 nov. 2023.
- BATTULWAR, Rushikesh *et al.* A state-of-the-art review of automated extraction of rock mass discontinuity characteristics using three-dimensional surface models. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 13, n. 4, p. 920–936, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.008>. Acesso em: 28 nov. 2023.
- BIENIAWSKI, Zdzislaw Tadeusz. Engineering classification of jointed rock masses. **Transactions of the South African Institution of Civil Engineers**, v. 15, n. 12, p. 335–344, 1973. Disponível em: https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/AJA10212019_17397. Acesso em: 06 dez. 2023.
- BIENIAWSKI, Zdzislaw Tadeusz. Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling. *In: 3RD INTERNATIONAL CONGRESS ON ROCK MECHANICS. THIRD INTERNATIONAL CONGRESS ON ROCK MECHANICS*, 1972. Denver: International Society for Rock Mechanics (ISRM). **Anais [...]**.

BLIN-LACROIX, Jean Luc; THOMAS, Alain. Fracture field modelling according to various data structures. **Engineering Geology**, v. 28, n. 1-2, p. 171-190, 1990. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0013795290900408>. Acesso em: 28 nov. 2023.

BREUNIG, Fabio Marcelo *et al.* Reflexões sobre as geotecnologias no contexto da geografia do Brasil. **Revista Ra'e Ga**, v. 46, n. 2, p. 185-198, 2019. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/64045>. Acesso em: 21 out. 2023.

BRITA PINHAL. **Quem somos**. RS: Itaara, 2017. Disponível em: <http://britapinhal.com.br/quem-somos>. Acesso em: 30 ago. 2023.

BUFFON, Elaiz Aparecida Mensch; PAZ, Otacílio Lopes de Souza; SAMPAIO, Tony Vinícius Moreira. Uso de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) para mapeamento das vulnerabilidades à inundação urbana: Referenciais e bases de aplicação. **Revista do Departamento de Geografia**, p. 180-189, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.132547>. Acesso em: 11 out. 2023.

CHEN, Jianqin; ZHU, Hehua; LI, Xiaojun. Automatic extraction of discontinuity orientation from rock mass surface 3D point cloud. **Computers & Geosciences**, v. 95, p. 18–31, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300416301625>. Acesso em: 28 nov. 2023.

CHEN, Yen-Chi. A tutorial on kernel density estimation and recent advances. **Biostatistics & Epidemiology**, v. 1, n. 1, p. 161–187, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/24709360.2017.1396742>. Acesso em: 08 nov. 2023.

CHEN, Zuyu. Recent developments in slope stability analysis. *In*: 8TH ISRM CONGRESS, 1995, Tokio. **Anais [...]**.

COELHO, Carla *et al.* Tecnologias aplicadas à conservação do patrimônio edificado da FIOCRUZ. *In*: VI SIMPOSIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DO PROJETO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2019. **Anais [...]** Uberlândia: UFU, 2019.

CROSTA, Giovanni. Evaluating rock mass geometry from photographic images. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 30, n. 1, p. 35–58, 1997. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01020112>. Acesso em: 06 dez. 2023.

CUCCHIARO, Sara *et al.* 4D-SFM photogrammetry for monitoring sediment dynamics in a debris-flow catchment: Software testing and results comparison. *In*: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. XLII–2, 2018. **Anais [...]**.

DAFTARIBESHELI, Abbas; ATAELI, Mohammad; SERESHKI, Farhang. Assessment of rock slope stability using the Fuzzy Slope Mass Rating (FSMR) system. **Applied Soft Computing**, v. 11, n. 8, p. 4465–4473, 2011. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494611003152?via%3Dihub>. Acesso em: 15 nov. 2023.

DAL BOSCO, Lucas Luiz. **Análise global de estabilidade de taludes e setorização de cava em uma mina de mármore**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, RS, 2019.

DEERE, D. U. *et al.* Design of surface and near-surface construction in Rock. *In: FAILURE AND BREAKAGE OF ROCK*. Society of Mining Engineers of AIME, New York, 1967. **Anais [...]**.

EINSTEIN, H. H. *et al.* The effect of discontinuity persistence on rock slope stability. **International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts**. v. 20, n. 5, p. 227-236, 1983. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(83\)90003-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(83)90003-7). Acesso em: 11 dez. 2023.

EKASO, Desta; NEX, Francesco; KERLE, Norman. Accuracy assessment of real-time kinematics (RTK) measurements on unmanned aerial vehicles (UAV) for direct geo-referencing. **Geo-spatial Information Science**, v. 23, n. 2, p. 165–181, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10095020.2019.1710437>. Acesso em: 22 out. 2023.

EKER, Remzi; ALKAN, Ece; AYDIN, Abdurrahim. A Comparative Analysis of UAV-RTK and UAV-PPK Methods in Mapping Different Surface Types. **European Journal of Forest Engineering**, v. 7, n. 1, p. 12–25, 30, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.33904/ejfe.938067>. Acesso em: 24 out. 2023.
em: 08 out. 2023.

FARIA, Karla Maria Silva *et al.* Dinâmica erosiva de processos tropicais: Três décadas da erosão chitolina. *In: I CONGRESSO NACIONAL DE GEOGRAFIA FÍSICA: OS DESAFIOS DA GEOGRAFIA FÍSICA NA FRONTEIRA DO CONHECIMENTO*, 2017. **Anais [...]**, Campinas: UNICAMP, 2017.

FERRERO, Anna Maria *et al.* Advanced Geostructural Survey Methods Applied to Rock Mass Characterization. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 42, n. 4, p. 631–665, 2009. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00603-008-0010-4>. Acesso em 25 nov. 2023.

FIORI, Alberto Pio; CARMIGNANI, Luigi. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. 20. ed. Curitiba: Editora da UFPR, 2001.

FONTINHAS, Alexandre Manuel Pereira. **Aplicação do SMR na avaliação da estabilidade de taludes de escavação em grauvaques da Formação de Mértola**. 2012. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica – Geotecnia) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

FOOKES, Peter George; POWELL, D. B.; MERCER, R. The application of terrestrial photogrammetry at Tremadoc, North Wales, and an estimate of its cost-effectiveness

in relation to a slope stability study. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, v. 19, n. 1, p. 159–165, 1979. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02600470>. Acesso em: 06 dez. 2023.

FRANCO, Guilherme Gandra; NAIME, André Fonseca. Structure from Motion (SFM) – Uma Breve Revisão Histórica, Aplicações nas Geociências e Perspectivas Futuras. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, 2021. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/40853>. Acesso em: 05 out. 2023.

FRANKLIN, John; MAERZ, Norberth; BENNETT, Caralyn. Rock mass characterization using photoanalysis. **International Journal of Mining and Geological Engineering**, v. 6, 97–112, 1988. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00880801>. Acesso em: 25 nov. 2023.

FURLAN, André Ricardo; TRENTIN, Romario. Urbanização e exposição ao perigo de inundação: Um estudo na bacia hidrográfica do Rio Henrique, Erechim, RS. **ACTA GEOGRÁFICA**, v. 15, n. 37, p. 246–270, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.18227/2177-4307.acta.v15i37.5896>. Acesso em: 08 out. 2023.

FURUKAWA, Yasutaka; HERNÁNDEZ, Carlos. Multi-View Stereo: A Tutorial. **Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision**, v. 9, n. 1–2, p. 1–148, 2015. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8637125>. Acesso em 19 set. 2023.

GAGLILOLO, Sara. *et al.* 3D cultural heritage documentation: A comparison between different photogrammetric software and their products. *In: THE INTERNATIONAL ARCHIVES OF THE PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES*, 2018. **Anais [...]**.

GAICH, Andreas; FASCHING, Alfred; SCHUBERT, Wulf. Determining Structural Rock Mass Parameters Using a Computer Vision System. *In: PROCEEDINGS FROM THE 12TH PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING I 39TH US ROCK MECHANICS SYMPOSIUM*, 2003. **Anais [...]**. Cambridge, Massachusetts.

GIGLI, Giovanni; CASAGLI, Nicola. Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution LIDAR point clouds. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 48, n. 2, p. 187–198, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.11.009>. Acesso em: 25 nov. 2023.

GOMÉZ-CANDÓN, David; DE CASTRO, Ana; LÓPEZ-GRANADOS, Francisca. Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat. **Precision Agriculture**, v. 15, n. 1, p. 44–56, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9335-4>. Acesso em: 14 set. 2023.

GOODBODY, Tristan; COOPS, Nicholas; WHITE, Joanne. Digital Aerial Photogrammetry for updating area-based forest inventories: A review of opportunities, challenges, and future directions. **Current Forestry Reports**, v. 5, n.

2, p. 55-75, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00087-2> . Acesso em: 05 set. 2023.

GUIDI, Henrique Azevedo. **Análise dos riscos e confecção de mapa de risco com utilização de drone em uma pedreira de rocha ornamental na região sul do estado do Espírito Santo**. 2023. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Minas) – Instituto Federal do Espírito Santo, Cachoeiro de Itapemirim, ES, 2023.

GUO, Gongde *et al.* KNN Model-Based Approach in Classification. **On The Move to Meaningful Internet Systems 2003: CoopIS, DOA, and ODBASE**, p. 986–996, 2003. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-540-39964-3_62. Acesso em: 02 nov. 2023.

HAGAN, T.O. A case for terrestrial photogrammetry in deep-mine rock structure studies. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, v. 17, n. 4, p. 191–198, 1980. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(80\)91085-2](https://doi.org/10.1016/0148-9062(80)91085-2). Acesso em: 06 dez. 2023.

HANEBERG, William. Using close range terrestrial digital photogrammetry for 3-D rock slope modeling and discontinuity mapping in the United States. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 67, n. 4, p. 457–469, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10064-008-0157-y>. Acesso em: 28 nov. 2023.

HANKUS-KUBICA, Agnieszka *et al.* Verification tests of total station usability for UAV position measurements. *In: 2020 IEEE 7TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON METROLOGY FOR AEROSPACE (METROAEROSPACE), 2020 Anais [...]*. Pisa, Italy.

HOEK, Evert; LONDE, P. The design of rock slopes and foundations. *In: General report of Third Congress of the International Society for Rock Mechanics, 1974 Anais [...]*. Denver.

International Society of Rock Mechanics (ISRM) (1981b) Rock Characterization, Testing and Monitoring; **ISRM Suggested Method**. Pergamon Press, Oxford, UK

ISRM. 1978. **Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses**. International Society for Rock Mechanics. Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Pergamon Press Ltd. Great Britain., 15, p. 319-368.

JABOYEDOFF, Michel; COUTURE, Réjean. Report on the proje COLTOP3D for March 2003: stay of Michel Jaboyedoff at GSC - Ottawa. **Geological Survey of Canada (NRCan)**, 2003. Disponível em: https://quanterra.ch/wp-content/uploads/2016/02/Admin_doc_RA01.pdf. Acesso em: 06 dez. 2023.

JABOYEDOFF, Michel *et al.* New insight techniques to analyze rock-slope relief using DEM and 3D-imaging cloud points: COLTOP-3D software. *In: ROCK*

MECHANICS: MEETING SOCIETY'S CHALLENGES AND DEMANDS: Taylor & Francis, 2007. **Anais** [...].

JAMES, Michael *et al.* Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. **Geomorphology**, v. 280, p. 51–66, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.021>. Acesso em 22 out. 2023.

JAWAHAR, C; NARAYANAN, P. An adaptive multifeature correspondence algorithm for stereo using dynamic programming q. **Pattern Recognition Letters**, v. 23, e. 5, p. 549-556, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0167-8655\(01\)00132-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8655(01)00132-5). Acesso em: 20 set. 2023.

JIANG, San; JIANG, Cheng; JIANG, Wanshou. Efficient structure from motion for large-scale UAV images: A review and a comparison of SfM tools. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 167, p. 230–251, set. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.016>. Acesso em 03 out. 2023.

JIMÉNEZ-JIMÉNEZ, Sergio Ivan *et al.* Digital Terrain Models Generated with Low-Cost UAV Photogrammetry: Methodology and Accuracy. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 10, n. 5, p. 285, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijgi10050285>. Acesso em: 08 set. 2023.

KEMENY, John; DONOVAN, James. Rock mass characterization using LiDAR and automated point cloud processing. **Ground Engineering**. v. 38, n. 11, p. 26-29, 2005.

KINGSLAND, Kaitlyn. Comparative analysis of digital photogrammetry software for cultural heritage. **Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage**, v. 18, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.daach.2020.e00157>. Acesso em: 01 nov. 2023.

KOCI, Jack *et al.* Assessment of UAV and Ground-Based Structure from Motion with Multi-View Stereo Photogrammetry in a Gullied Savanna Catchment. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 6, n. 11, p. 1-23, 30, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijgi6110328>. Acesso em: 08 set. 2023.

KONG, Deheng; WU, Faquan; SAROGLU, Charalampos. Automatic identification and characterization of discontinuities in rock masses from 3D point clouds. **Engineering Geology**, v. 265, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105442>. Acesso em: 28 nov. 2023.

KRAUS, Karl. **Photogrammetry: Geometry from images and Laser scans**. 2. ed. Berlin: De Gruyter, 2007.

KREPS, Sarah. **Drones: What everyone needs to know**. New York: Oxford University Press, 2016. *E-book*.

LATO, Matt *et al.* Optimization of LiDAR scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rockmasses. **International Journal of Rock**

Mechanics and Mining Sciences, v. 46, n. 1, p. 194–199, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.04.007>. Acesso em 25 nov. 2023.

LATO, Matthew; VÖGE, Malte. Automated mapping of rock discontinuities in 3D lidar and photogrammetry models. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 54, p. 150–158, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.06.003>. Acesso em 25 nov. 2023.

LEE, Shing-Huan; LEOU, Jin-Jang. A dynamic programming approach to line segment matching in stereo vision. **Pattern Recognition**, v. 27, n. 8, p. 961–986, 1994. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(94\)90138-4](https://doi.org/10.1016/0031-3203(94)90138-4). Acesso em 20 set. 2023.

LI, Xiaojun *et al.* Automatic characterization of rock mass discontinuities using 3D point clouds. **Engineering Geology**, v. 259, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.05.008>. Acesso em: 28 nov. 2023.

LINDER, Wilfried. **Digital Photogrammetry: A practical Course**. 2. ed. Springer, 2006.

LIU, Kai *et al.* Detection of Catchment-Scale Gully-Affected Areas Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) on the Chinese Loess Plateau. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 5, n. 12, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijgi5120238>. Acesso em: 08 set. 2023.

LIU, Ya-Ching; CHEN, Chao-Shi. A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment. **Engineering Geology**, v. 89, n. 1–2, p. 129–143, 2007. Disponível em: [10.1016/j.enggeo.2006.09.017](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.017). Acesso em 28 nov. 2023.

LOUREIRO, Hugo Alves Soares; GUERRA, Antonio José Teixeira; ANDRADE, Aluísio Granato. Contribuição ao estudo de voçorocas a partir do uso experimental de laser scanner terrestre e VANT. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 4, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v21i4.1880>. Acesso em: 08 out. 2023.

MARTINS, Fábio Augusto. **Avaliação da estabilidade de taludes rochosos através da classificação geomecânica SMR na BR-392, Pelotas – RS**. 2019 83 f. TCC (Bacharel em Engenharia Geológica) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2019.

MICKLETHWAITE, Steven *et al.* Mapping from an Armchair: Rapid, high-resolution mapping using UAV and computer vision technology. **Proceedings of Structural Geology and Resources**, p. 130-133, 2012.

MIKHAIL, Edward; BETHEL, James; McGlone, Chris. **Introduction to Modern Photogrammetry**. 1. ed. Nova Jersey: Wiley, 2001.

MONTE, Jamie Marie. **Rock mass characterization using laser scanning and digital imaging data collection techniques**. 2004. 176 p. Dissertação (Mestrado

em Mining, Geological and Physical Engineering) – Universidade do Arizona, Tucson, 2004.

MOORE, J. F. A. Mapping major joints in the Lower Oxford Clay using terrestrial photogrammetry. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, v. 7, n. 1, p. 57–67, 1974. Disponível em: <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1974.007.01.04>. Acesso em: 11 dez. 2023.

NOVAIS, Wellington Martins. **Geoestatística e modelagem numérica aplicada à classificação de maciço rochoso pelo Sistema RMR**: Barragem de Itaipu. 2017. 136 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

OLARIU, Mariana *et al.* Outcrop fracture characterization using terrestrial laser scanners: Deep-water Jackfork sandstone at Big Rock Quarry, Arkansas. **Geosphere**, v. 4, n. 1, p. 247, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1130/GES00139.1>. Acesso em: 25 nov. 2023.

OLIVEIRA, Shirley Minnell Ferreira de. **Estudo do comportamento geomecânico e químico das fraturas de rochas carbonáticas**. 2019. 183 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2019.

OLIVEIRA, Antonio Manoel dos Santos; MONTICELI, João Jerônimo. **Geologia de Engenharia e Ambiental**. 1. ed. São Paulo: ABGE, 2018.

PAGANO, Marco. Discontinuity Characterization of Rock Masses through Terrestrial Laser Scanner and Unmanned Aerial Vehicle Techniques Aimed at Slope Stability Assessment. **Applied Sciences**, v. 10, n. 8, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10082960>. Acesso em: 28 nov. 2023.

PAJARES, Gonzalo; MANUEL DE LA CRUZ, Jesús; LÓPEZ-OROZCO, José Antônio. Relaxation labeling in stereo image matching. **Pattern Recognition**, v. 33, n. 1, p. 53–68, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(99\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(99)00036-9). Acesso em 20 set. 2023.

PALMSTROM, Arild. The volumetric joint count—a useful and simple measure of the degree of rock mass jointing. *In*: INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY. INTERNATIONAL CONGRESS. 1982. **Anais [...]**. PALMSTROM, Arild. Characterization of jointing density and the quality of rock masses. **Intern. Rep. Norw. AB Berald**, v. 26, n. 3, 1974.

PALMSTROM, Arild. Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 20, n. 4, p. 362-377, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.01.005>. Acesso em: 11 dez. 2023.

PANTELIDIS, Lysandros. Rock slope stability assessment through rock mass classification systems. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 46, n. 2, p. 315–325, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.06.003>. Acesso em: 08 nov. 2023.

PAZ, Otacílio Lopes de Souza; SAMPAIO, Tony Vinicius Moreira. Aeronaves remotamente pilotadas na pesquisa geográfica uma análise dos usos, aplicações e desenvolvimento tecnológico associado entre os anos de 2014 e 2017. **Revista Interface**, Porto Nacional, v.17, n. 17, p. 23-31, 2019. Disponível em: <https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/interface/article/view/6654>. Acesso em: 19 out. 2023.

PEPE, Massimiliano; FREGONESE, Luigi; SCAIONI, Marco. Planning airborne photogrammetry and remote-sensing missions with modern platforms and sensors. **European Journal of Remote Sensing**, v. 51, n. 1, p. 412–436, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1444945>. Acesso em: 07 set. 2023.

PITEAU, Dominique; STEWART, Alan; MARTIN, D. C. Design examples of open pit slopes susceptible to toppling. In: **Proceeding of third international conference of stability in surface mining. Society of Mining Engineering of AIME, Vancouver**. 1981. p. 679-712.

PREFEITURA DE ITAARA. **Dados Gerais**. Itaara, RS: 2023. Disponível em: <https://www.itaara.rs.gov.br/dados-gerais-2>. Acesso em: 30 ago. 2023.

PRIEST, Stephen; HUDSON, John. Discontinuity spacings in rock. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, v. 13, n. 5, p. 135-148, 1976. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(76\)90818-4](https://doi.org/10.1016/0148-9062(76)90818-4). Acesso em: 12 nov. 2023.

QUOC LONG, Nguyen *et al.* Influence of Flight Height on The Accuracy of UAV Derived Digital Elevation Model at Complex Terrain. **Inżynieria Mineralna**, v. 1, n. 1, p. 179-187, 2020. Disponível em: <http://doi.org/10.29227/IM-2020-01-27>. Acesso em: 19 set. 2023.

RADEMANN, Lucas Krein; TRENTIN, Romario. Influência do ângulo de visada para a geração de MDT com uso de VANT em voçoroca. *In: XIX Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*. 2022. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: UERJ.

RADEMANN, Lucas Krein; TRENTIN, Romario; ROBAINA, Luis Eduardo de Souza. Characterization and analysis of gully erosion in southern Brazil with the assistance of unmanned aerial vehicle. **Mercator**, v. 21, n. 1, p. 1–19, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.4215/rm2022.e21022>. Acesso em 08 out. 2023.

RIFFEL, Eduardo Samuel; GUASSELLI, Laurindo Antonio; BRESSANI, Luiz Antonio. Desastres associados a movimentos de massa: Uma revisão de literatura. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 36, n. 2, p. 285-305, 2016. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/3371/337146915006.pdf>. Acesso em: 2 dez. 2023.

RIQUELME, Adrian *et al.* A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. **Computers & Geosciences**, v. 68, p. 38–52, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.03.014>. Acesso em: 05 nov. 2023.

RIQUELME, Adrian *et al.* Automatic Mapping of Discontinuity Persistence on Rock Masses Using 3D Point Clouds. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 51, n. 10, p. 3005–3028, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1519-9>. Acesso em: 28 nov. 2023.

RIQUELME, Adrian; ABELLÁN, Antonio; TOMÁS, Roberto. Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds. **Engineering Geology**, v. 195, p. 185–195, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.06.009>. Acesso em: 28 nov. 2023.

RIQUELME, Adrian; TOMÁS, Roberto; ABELLÁN, Antonio. Characterization of rock slopes through slope mass rating using 3D point clouds. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 84, p. 165–176, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.12.008>. Acesso em 28 nov. 2023.

RODRIGUES, Angela Cassia *et al.* Delineamento da produção científica sobre desastres no Brasil no início deste século. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 34, p. 61-73, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v34i0.38992>. Acesso em: 2 dez. 2023.

ROMANA, M.; TOMÁS, R.; SERÓN, J. B. Slope Mass Rating (SMR) geomechanics classification: thirty years review. *In*: ISRM CONGRESS. 2015. **Anais [...]**.

ROMANA, Manoel. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. *In*: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROLE OF ROCK MECHANICS. 1985. **Anais [...]**. Zacatecas, Mexico.

SALVINI, Riccardo *et al.* Evaluation of the Use of UAV Photogrammetry for Rock Discontinuity Roughness Characterization. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 53, n. 8, p. 3699–3720, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02130-2>. Acesso em: 28 nov. 2023.

SANTANA, Jefferson dos Santos. **Visualização e manipulação das nuvens de pontos extraídas nos processamentos fotogramétricos a partir da comparação entre softwares**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica) – Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, MG, 2022.

SEIFERT, Erich *et al.* Influence of Drone Altitude, Image Overlap, and Optical Sensor Resolution on Multi-View Reconstruction of Forest Images. **Remote Sensing**, v. 11, n. 10, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs11101252>. Acesso em: 05 set. 2023.

SILVA, José Roselito Carmelo; ARAÚJO, Charles Silva de; REBOUÇAS, Darler Júnior Pereira. O uso de aeronave remotamente pilotada nas aulas práticas de estudo do relevo e de impactos ambientais. **Revista de Estudos e Pesquisas sobre Ensino Tecnológico (EDUCITEC)**, Manaus, v. 4, n. 08, p. 307-325, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.31417/educitec.v4i08.527>. Acesso em: 17 out. 2023.

SILVA, Jairo Rodrigues *et al.* Uso de imagens de drones no ensino de Geografia Estudo de caso: Questões urbanas no município de Ouro Preto-MG. *In: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. Anais [...]*. Florianópolis: INPE.

STÖCKER, Claudia.; ELTNER, Anette; KARRASCH, Pierre. Measuring gullies by synergetic application of UAV and close-range photogrammetry — A case study from Andalusia, Spain. **CATENA**, v. 132, p. 1–11, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.04.004>. Acesso em 24 out. 2023.

STURZENEGGER, Matthieu; STEAD, Douglas. Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. **Engineering Geology**, v. 106, n. 3–4, p. 163–182, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.03.004>. Acesso em: 25 nov. 2023.

TADDIA, Yuri; STECCHI, Francesco; PELLEGRINELLI, Alberto. Coastal Mapping Using DJI Phantom 4 RTK in Post-Processing Kinematic Mode. **Drones**, v. 4, n. 2, p. 9, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/drones4020009>. Acesso em: 24 out. 2023.

TAKANO, Erika Cardoso. **Extração automatizada de dados estruturais em maciços rochosos a partir de fotogrametria com drone**. 2022. 190 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro preto, MG, 2022.

THOMPSON, E. H. The Thompson-Watts plotter model 2. **The Photogrammetric Record**, v. 4, n. 23, p. 337–366, 1964. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.1964.tb00367.x>. Acesso em: 11 dez. 2023.

TOMÁS, Roberto *et al.* New insight into the slope mass rating geomechanical classification through four-dimensional visualization. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 53, p. 64–69, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.04.002>. Acesso em: 15 nov. 2023.

TOMÁS, Roberto; DELGADO, José; SERÓN, José. Modification of slope mass rating (SMR) by continuous functions. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 44, n. 7, p. 1062–1069, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.02.004>. Acesso em: 15 nov. 2023.

TOMAZZOLI, Edison Ramos; ALTAMIRANO, Juan Antônio; BAUZYS, Fernanda. Movimentos de massa ocorridos no evento de novembro de 2008, no entorno do Morro do Baú, Vale do Itajaí (SC): caracterização geológico-geomorfológica. *In: 5ª CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS (COBRAE)*. 2009. **Anais [...]**. São Paulo: UAM.

ÜNLÜSOY, Deniz; SÜZEN, Mehmet. A new method for automated estimation of joint roughness coefficient for 2D surface profiles using power spectral density. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 125, 2020.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104156>. Acesso em: 28 nov. 2023.

UYSAL, Murat; TOPRAK, Ahmet Suad; POLAT, Nizar. DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. **Measurement**, v. 73, p. 539–543, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.06.010>. Acesso em 15 set. 2023.

VASUKI, Yathunathan *et al.* Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach. **Computers & Geosciences**, v. 69, p. 22–32, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.04.012>. Acesso em: 28 nov. 2023.

VERDONK, Stef. **Gully volume estimates using UAV Photometry**. 2015. 80 p. Dissertação (Mestrado) - University of Utrecht, Utrecht, Países Baixos, 2015.

WALDRON, John; SNYDER, Morgan. **Geological Structures: A practical introduction**. Edmonton: University of Alberta, 2020. *E-book*.

WICKENS, E. H.; BARTON, N. R. The application of photogrammetry to the stability of excavated rock slopes. **The Photogrammetric Record**, v. 7, n. 37, p. 46–54, 1971. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.1971.tb01127.x>. Acesso em: 11 dez. 2023.

WICKHAM, G.; TIEDEMANN, H.; SKINNER, E. Support Determination Based on Geologic Predictions. *In*: NORTH AMERICAN RAPID EXCAVATION AND TUNNELING CONFERENCE, SOCIETY OF MINING ENGINEERS OF THE AMERICAN INSTITUTE OF MINING, METALLURGICAL AND PETROLEUM ENGINEERS. 1972. **Anais [...]**. Chicago, IL, New York.

WILDNER, Wilson *et al.* **Geologia e recursos minerais do estado do Rio Grande do Sul**: escala 1:750.000. Porto Alegre: CPRM, 2008.

WOODGET, Amy *et al.* Drones and digital photogrammetry: from classifications to continuums for monitoring river habitat and hydromorphology. **WIRES Water**, v. 4, n. 4, p. 1-20, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/wat2.1222>. Acesso em: 26 out. 2023.

WYLLIE, Duncan. MAH, Christopher. **Rock Slope Engineering: civil and mining**. 4. ed. New York: Spon Press, 2004.

ZARCO-TEJADA, Pablo *et al.* Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. **European Journal of Agronomy**, v. 55, p. 89–99, 2014. Acesso em: 04 nov. 2023.

ZAPICO, Ignacio *et al.* Improvement of Workflow for Topographic Surveys in Long Highwalls of Open Pit Mines with an Unmanned Aerial Vehicle and Structure from Motion. **Remote Sensing**, v. 13, n. 17, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs13173353>. Acesso em: 02 nov. 2023.

ZAPICO, Ignacio *et al.* Stabilization by geomorphic reclamation of a rotational landslide in an abandoned mine next to the Alto Tajo Natural Park. **Engineering Geology**, v. 264, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105321>. Acesso em: 02 nov. 2023.

ZENI, Marília Abrão. **Determinação semi-automática do Geological Strength Index utilizando redes neurais artificiais**. 2021. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2021.

ZHANG, Peng *et al.* Semi-automatic extraction of rock discontinuities from point clouds using the ISODATA clustering algorithm and deviation from mean elevation. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 110, p. 76–87, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.07.009>. Acesso em: 28 nov. 2023.

ZHANG, Weiqiang; ZHOU, Haitao; GUO, Weigong. Experimental Study on Seepage Characteristics of Fractured Rock Mass and Its Electrical Response. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 24, n. 7, 2019. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001796](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001796). Acesso em: 15 out. 2023.

ZHÃO, Yanlin *et al.* Coupled seepage-damage effect in fractured rock masses: model development and a case study. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 144, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104822>. Acesso em: 15 out. 2023.