UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA

FILIPE BENTO DE GODOI

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES ROCHOSOS COM USO DE DRONE, UM ESTUDO COMPARATIVO

CURITIBA
2024

FILIPE BENTO DE GODOI

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES ROCHOSOS COM USO DE DRONE, UM ESTUDO COMPARATIVO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Geologia

Orientadora: Profa. Dra. Adriana Ahrendt Talamini

CURITIBA

2024

Dedico este trabalho à Alice,

Meu presente mais precioso.

AGRADECIMENTOS

Obrigado à Universidade Federal do Paraná e Departamento de Geologia por viabilizar a realização de um sonho meu e de toda a minha família.

Ao Ivo e Danilo por disponibilizarem o espaço da Pedreira Central para que eu pudesse realizar esse trabalho.

À professora Adriana pela orientação, apoio, paciência e incentivo durante todas as etapas de desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Luiz Gustavo Castro e Carol Aquino pela ajuda na utilização do drone e orientações com os *softwares* de modelagem.

Ao Arthur Vilela Ortiz e Celso Bento de Godoi (meu pai), que se dispuseram de seu precioso tempo e me ajudaram a fazer o mapeamento.

Aos meus preciosos amigos que sempre estiveram presentes desde momentos mais dificultosos curso até os momentos de descontração após uma prova ou trabalho, são eles Liza, Talita, Lorena, Giuliane, Agda, Arthur, Cristian, Daniel, Fred, Fabrizio, Jeasy, Joao Pedro, Joana, Eduardo e Mirian.

Aos meus pais que me criaram e me educaram, graças a você hoje sou uma pessoa feliz e muito querida por muitos amigos e minha família.

Aos meus irmãos Celsinho e Juliano, que nunca me negaram ajuda e sempre foram bons companheiros para mim.

A minhas sobrinhas Angela e Mariana que com seu brilho e alegria por diversas vezes fizeram meu dia mais feliz.

A minha amada esposa, Renata, que sempre me amou e esteve presente em minha vida, acreditando em mim nos momentos que nem mesmo eu acreditava e que me deu o maior presente da minha vida.

A minha linda filha Alice, que mesmo ainda não sabendo ler ou falar, me ensina diariamente a ser um ser humano melhor.

Eu não sei de nada,
Se acertei foi por engano.

(LKS.)

RESUMO

O trabalho de conclusão de curso tem como objetivo comparar dois métodos de coleta de dados estruturais para mapeamento geotécnico de taludes rochosos: método manual convencional e método remoto utilizando drone. A pesquisa é na Pedreira Central, localizada no município de Campo Largo (PR). Este trabalho avalia a confiabilidade das informações obtidas com drone. Utilizando técnicas de fotogrametria e os softwares *Agisoft Metashape* e *Sirovison*, foi gerado um modelo tridimensional do talude a partir do qual foi inferido dados estruturais. Esses dados foram comparados com dados obtidos manualmente em campo por meio de bússolas e outros instrumentos. Dessa forma, foi testada a confiabilidade do aerolevantamento na coleta de informações para classificação geomecânica dos maciços rochosos. A hipótese é que a abordagem semidireta com drones apresenta vantagens em termos de segurança e tempo de coleta, além de permitir a visualização tridimensional das descontinuidades, melhorando a compreensão da estabilidade do talude. Ao final, foi feito uma análise comparativa para avaliar fatores relevantes como precisão, acurácia, tempo de processamento etc. para determinar a eficiência do mapeamento geotécnico com aerolevantamento em relação aos métodos tradicionais.

Palavras-chave: Drone; Análise cinemática; Mapeamento; Estabilidade de talude; Classificação Geomecânica.

ABSTRACT

The objective of this thesis is to compare two methods of collecting structural data for geotechnical mapping of rock slopes: the conventional manual method and the remote method using drones. The research was conducted at Pedreira Central, located in the municipality of Campo Largo (PR). This study evaluates the reliability of information obtained using drones. By employing photogrammetry techniques and the software Agisoft Metashape and Sirovision, a three-dimensional model of the slope was generated, from which structural data were inferred. These data were compared with those obtained manually in the field using compasses and other instruments. Thus, the reliability of aerial surveys in collecting information for geomechanical classification of rock masses was tested. The hypothesis is that the semi-direct approach with drones offers advantages in terms of safety and data collection time, in addition to enabling the three-dimensional visualization of discontinuities, thereby improving the understanding of slope stability. Finally, a comparative analysis was performed to evaluate relevant factors such as precision, accuracy, processing time, etc., to determine the efficiency of geotechnical mapping using aerial surveys compared to traditional methods.

Key-words: Drone; Cinematic analysis; Mapping; Slope stability; Geomechanical classification.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mapa de localização da Pedreira Central.....2
Figura 2: Principais tipos de rupturas: (a) Deslizamento planar; (b) Deslizamento em cunha e (c) Tombamento de blocos. Hoek e Bray (1981). 4
Figura 3: Classificação da rugosidade nos planos de descontinuidades. Traduzido de Barton, 1978.....11
Figura 4: Informações de imagem e especificações da câmera na aba ‘detalhes’ nas propriedades da foto. Fonte: *Windows 11*.....24
Figura 5: Desenho esquemático das bancadas e setorização proposta para o modelo tridimensional. 25
Figura 6: *Layout* da *Table View* e informações dos planos de descontinuidades no *sirovision*. 26
Figura 7: Modelo tridimensional gerado com *software Sirovision*.....28
Figura 8: Estereograma de densidade das descontinuidades. (a) apenas pólos e (b) pólos e planos das principais famílias mapeadas remotamente, considerando todas as linhas de varredura.....29
Figura 9: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor A1.....30
Figura 10: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor A2.....31
Figura 11: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor A3.....32
Figura 12: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor A4.....32
Figura 13: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor A5.....33
Figura 14: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor B1.....34
Figura 15: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor B2.....34
Figura 16: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor B3.....35

Figura 17: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor B4. 36
Figura 18: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor B5. 37
Figura 19: Amostras tipos, com: A) gnaisse encontrado na maioria dos setores, com bandamento metamórfico proeminente e pouco espaçado; B) gnaisse enriquecido em feldspato potássico com destaque para o anfibólio de tamanho centimétrico; C) amostra de gnaisse enriquecido em plagioclásio e bandamento ausente. 39
Figura 20: Estereograma da família 1. 41
Figura 21: Estereograma da família 2. 41
Figura 22: Estereograma da família 3. 42
Figura 23: Estereograma da família 4. 43
Figura 24: Estereograma da família 5. 43
Figura 25: Estereograma da família 6. 44
Figura 26: Estereograma da família 7. 45
Figura 27: (a) Falhas primária (acima) e secundária (abaixo) subparalelas no setor A1. (b) Correspondentes a família 7. 45
Figura 28: Estereograma da família 8. 46
Figura 29: Estereograma da família 9. 47
Figura 30: Estereograma da família 10. 47
Figura 31: Estereograma de densidade das descontinuidades. (a) apenas pólos e (b) pólos e planos das principais famílias mapeadas remotamente, considerando todas as linhas de varredura. 49
Figura 32: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor A1. 50
Figura 33: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor A2. 50
Figura 34: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor A3. 51
Figura 35: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor A4. 51
Figura 36: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor A5. 52

Figura 37: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor B1. 52
Figura 38: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor B2. 53
Figura 39: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor B3. 53
Figura 40: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor B4. 54
Figura 41: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor B5. 54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estimativa de campo para valor de Resistência à Compressão Uniaxial. Fonte: ISRM, 1977. 6
Tabela 2: Classificação do espaçamento das descontinuidades em campo. Traduzido de ISRM (1977) 8
Tabela 3: Tabela de classificação da continuidade. Traduzido de ISRM (1981). 9
Tabela 4: Classificação da abertura de descontinuidades. Traduzido de ISRM (1978). 9
Tabela 5: Classificação geomecânica Q-slope. Traduzido de Bar e Barton (2024). .14
Tabela 6: Classificação geomecânica RMR. Traduzido de Bieniawski (1989). 17
Tabela 7: Classificação da orientação da descontinuidade no sistema RMR. Traduzido de Bieniawski (1989). 18
Tabela 8: Classificação do maciço rochoso no sistema RMR. Traduzido de Bieniawski (1989). 18
Tabela 9: Parâmetros de correção para o sistema SMR. Romana (1985). 19
Tabela 10: Fator de correção F4 para o sistema SMR. Romana (1985). 19
Tabela 11: especificações do drone DJI Air 2S. Fonte: *dji*.com 22
Tabela 12: Especificações do computador utilizado no trabalho. Fonte: Autor. 24
Tabela 13: Orientação média das famílias de descontinuidades mapeadas com uso do sirovision. 29
Tabela 14: Tabela resumo dos índices e RQD dos setores. 37
Tabela 15: Tabela resumo das famílias de fraturas. 47
Tabela 16: Resultados dos parâmetros da classificação geomecânica *Q-slope*.....48
Tabela 17: Resultados obtidos com mapeamento convencional.....54
Tabela 18: Comparação dos planos médios entre as famílias de fraturas equivalentes mapeadas com drone e de maneira tradicional.....56
Tabela 19: comparação entre os resultados de índice de deslizamento, deslizamento em cunha e tombamento. Em vermelho, os índices superiores a 0,1. 57

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 OBJETIVOS 1
1.2 LOCALIZAÇÃO 1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 2
2.1 GEOLOGIA LOCAL 2
2.2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE EM TALUDES ROCHOSOS 3
2.3 CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS 5
2.3.1 Resistência à Compressão Uniaxial (RCU) 5
2.3.2 Caracterização das Descontinuidades 7
2.4 CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA 11
2.4.1 RQD (*Rock Quality Designation*) 12
2.4.2 *Q-System e Q-Slope* 12
2.4.3 RMR (*Rock Mass Rating*) 16
2.4.4 SMR (*Slope Mass Rating*) 18
2.5 DRONE APLICADO ÀS GEOCIÊNCIAS 19
2.5.1 *Structure from Motion* 20
3 MATERIAIS E MÉTODOS 21
3.1 MATERIAIS 21
3.2 MÉTODOS 22
3.2.1 Revisão Bibliográfica 22
3.2.2 Levantamento Aerofotogramétrico 22
3.2.3 Modelagem Tridimensional 23
***3.2.4* Mapeamento com *Sirovision* 25**
3.2.5 Mapeamento de Campo 26
3.2.6 Análise Cinemática 27
3.2.7 Classificação Geomecânica 28
4 RESULTADOS 28
4.1 RESULTADOS DO LEVANTAMENTO REALIZADO COM DRONE (ETAPA 1) 28
4.2 RESULTADOS DO MAPEAMENTO CONVENCIONAL (ETAPA 2) 38
4.2.1 Aspectos Geológicos 38
4.2.2 Caracterização das Descontinuidades 39

4.2.3 **Classificação Geomecânica *Q-Slope*.....48**
4.2.4 Análise Cinemática.....49
5 DISCUSSÃO 55
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 58
REFERÊNCIAS.....60

1 INTRODUÇÃO

A realização do mapeamento geológico-geotécnico visando a compreensão da mecânica das rochas é uma etapa fundamental em projetos de engenharia, tanto no âmbito da realização de obras de infraestrutura, construção de rodovias ou na mineração. A observação dos parâmetros geotécnicos e a consequente análise de estabilidade são indispensáveis para evitar danos materiais e preservar a vida humana.

Existem diversos métodos que podem ser empregados para realizar o mapeamento geotécnico, em cada um é adotado o sistema de classificação composto por diferentes parâmetros. Entretanto, é comum a todos eles a necessidade de visitas a campo para coleta das informações sobre o maciço rochoso. Neste contexto, tem sido cada vez mais frequente o estudo de ferramentas que oferecem alternativas ao método clássico de mapeamento geológico-geotécnico e com desenvolvimento das geotecnologias, uma ferramenta que vem ganhando cada vez mais destaque na obtenção de dados estruturais é o drone.

O uso do drone pode ser uma alternativa viável em situações em que o mapeamento geológico-geotécnico de maneira convencional é inviabilizada, seja pela alta periculosidade do local ou pela falta de tempo para coleta de todas as informações necessárias. No entanto, a utilização do método semidireto depende da qualidade das informações levantadas, ou seja, é fundamental avaliar quais parâmetros podem ser obtidos e qual a precisão dos dados levantados.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa é avaliar a confiabilidade do uso de drone para realização de um mapeamento geológico-geotécnico de duas bancadas na Pedreira Central, localizada no município de Campo Largo (PR).

1.2 LOCALIZAÇÃO

A Pedreira Central fica localizada no município de Campo Largo, próximo à divisa com Curitiba (Figura 1). O acesso a partir de Curitiba é feito pela BR-277, no sentido Campo Largo/Ponta Grossa. Após percorrer cerca de 20 km, entrando na

cidade de Campo Largo, pega-se à direita na rua Pascoal Carignano. A partir daí, segue por cerca de 500 metros até a entrada da pedreira.

A bancada estudada fica localizada na porção sudoeste da mina e possui orientação aproximada de N55W e cerca de 230 metros de extensão.

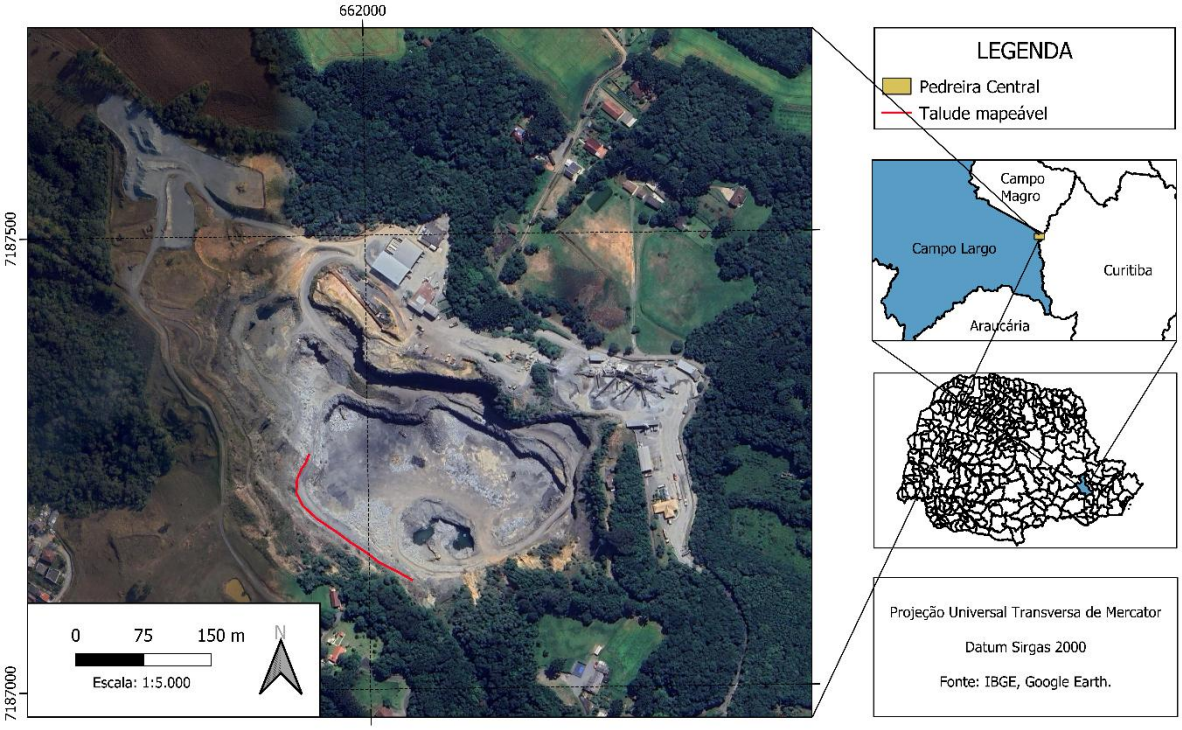


Figura 1: Mapa de localização da Pedreira Central.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 GEOLOGIA LOCAL

Segundo Heilbron et al. 2004, a província Mantiqueira é um sistema orogênico Neoproterozoico que fica situado no sul e sudeste do brasil e que foi formado durante o Brasiliano-Pan Africana. Esta província engloba os orógenos Araçuaí, Dom Feliciano, Brasília Meridional, São Gabriel e Ribeira (Heilbron et al. 2004).

Sendo um dos mais importantes orógenos da província Mantiqueira, o Cinturão Ribeira é caracterizado por conter um complexo sistema de cisalhamento transcorrente (Siga Jr. 1995) e sua formação está associada a processos de amalgamação, dobramentos e metamorfismo ocorridos ao longo da Orogenia Brasiliana Pan-Africana (Faleiros et al. 2011).

De acordo com Siga Jr. (1995), o Terreno Curitiba é formado por uma estreita faixa de direção NE-SW, que é limitada a noroeste pelos metassedimentos do Supergrupo Açungui e a sudeste pelos Gnaisses dos Domínio Luiz Alves. Localizado ao sul da Falha da Lancinha, o terreno Curitiba é constituído pelas unidades litotectônicas Atuba, Complexo Turvo-Cajati, Suíte Rio Piên e Sequências Capiru/Setuva (Faleiros, 2008).

2.2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE EM TALUDES ROCHOSOS

As descontinuidades podem evoluir para uma ruptura quando os esforços atuantes no maciço vencem a resistência interna, devido a geometria e orientação das fraturas que não favorecem a estabilidade dos blocos que compõem o maciço Vallejo (2002). Exemplificado na Figura 2, a análise cinemática é a ferramenta adequada para compreender a ocorrência de movimentos de massa estruturalmente controlados em maciços rochosos (Cerri et al. 2018).

A análise cinemática pode ser entendida como o estudo buscando identificar os potenciais ocorrência de rupturas (Campos, 2020). O estudo é feito a partir de uma representação gráfica em estereograma de igual área (rede de Schmidt-Lambert). Nele, é representado os planos de descontinuidades com linhas traçadas sobre os grandes círculos contidos no estereograma, enquanto os polos são plotados a 90° no sentido oposto a direção da vertente do plano. A partir disso, mede-se pela relação entre os planos das estruturas, ângulo e direção da face do talude e ângulo de atrito (Φ), as condições para ocorrência de deslizamento planar, deslizamento em cunha e tombamento, que segundo Fiori (2015), as condicionantes para a ocorrência dos principais movimentos de massa são:

a) Deslizamento planar: o ângulo de mergulho da descontinuidade deve ser maior do que o ângulo de atrito do maciço; a direção do plano de deslizamento não deve ter o ângulo de afastamento (limite lateral) maior do que 20° da direção da face da vertente do talude; o plano de descontinuidade deve aflorar na face da vertente.
b) Deslizamento em cunha: deve se intersectar dois planos de ruptura e a linha de interseção entre os dois planos deve possuir o ângulo de caimento maior do

que o ângulo de atrito; deve aflorar na face do talude tanto os planos de descontinuidades como também a linha de interseção dos planos.

c) Tombamento: deve se entrecruzar duas famílias de descontinuidades, uma mergulhando a alto ângulo contra a face do talude e outra mergulhando a baixo ângulo em direção a vertente do talude.

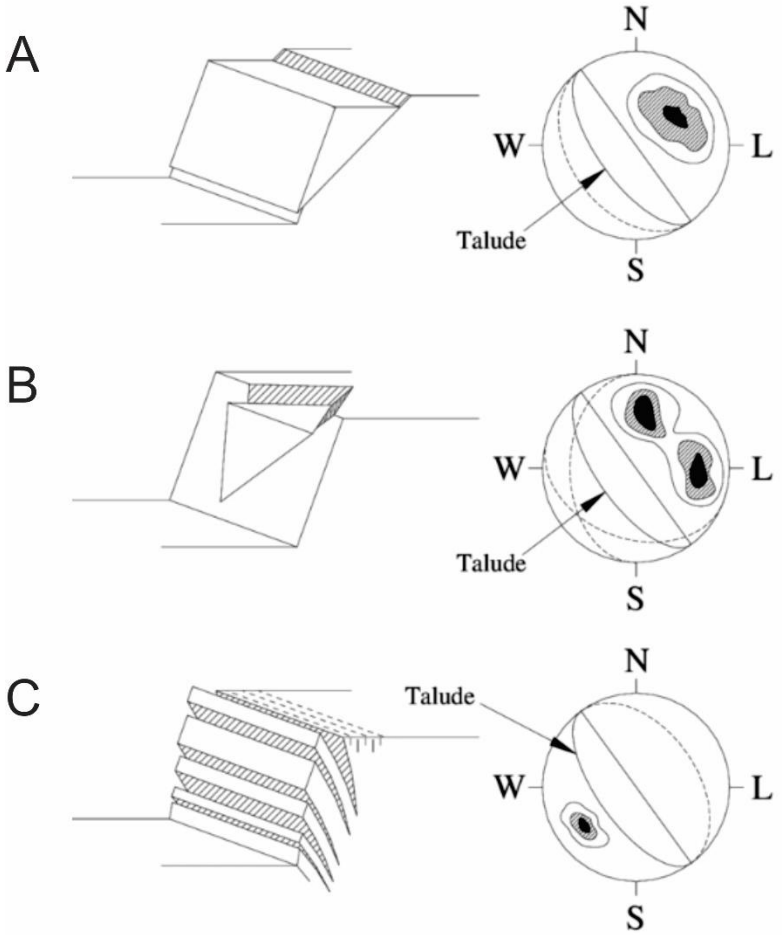


Figura 2: Principais tipos de rupturas: (a) Deslizamento planar; (b) Deslizamento em cunha e (c) Tombamento de blocos. Hoek e Bray (1981).

Admasu (2010) sugere uma análise quantitativa para as descontinuidades condicionantes de movimentos de massa, propondo que seja somado o número total de planos ou interseções críticas (planos ou interseções que podem gerar um deslizamento ou tombamento) e então dividir pelo número total de descontinuidades ou interseções medidas. Assim, obtém-se as seguintes equações:

$$IDP = \frac{Número\ total\ de\ descontinuidades\ críticas}{Número\ total\ de\ descontinuidades} \qquad \text{Equação 1}$$

Onde:

IDP: Índice de deslizamento planar.

$$IDC = \frac{Número\ total\ de\ interseções\ críticas}{Número\ total\ de\ interseções} \qquad \text{Equação 2}$$

Onde:

IDC: Índice de deslizamento em cunha.

$$IT = \frac{Número\ total\ de\ interseções\ críticas}{Número\ total\ de\ interseções} \qquad \text{Equação 3}$$

Onde:

IT: Indice de tombamento.

O autor adotou em seu trabalho o índice máximo de 0,3 para a ocorrência de rupturas, a partir do qual poderia ser considerado acima do aceitável. Entretanto, este valor vai depender do contexto, podendo ser adotado limites mais conservadores como 0,1 a depender do local da encosta ou da possibilidade de perda ou danos.

2.3 CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

2.3.1 Resistência à Compressão Uniaxial (RCU)

O ensaio laboratorial de resistência a compressão uniaxial tem como função determinar a capacidade de um material de resistir à pressão sem fraturar. É bastante utilizado na engenharia civil, mineração, geotecnia e áreas correlatas e segundo Freitas (2011), o ensaio de resistência à compressão uniaxial é amplamente utilizado na mecânica das rochas, pois visa conhecer o valor de resistência máxima da amostra antes de atingir o ponto de ruptura.

As dimensões do corpo de prova cilíndrico são de diâmetro entre 38 e 54 mm e altura equivalente a 2 vezes o diâmetro. Segundo Cardoso (2020), este ensaio é realizado sobre um corpo de prova sobre o qual é aplicada, com velocidade constante, uma carga axial de compressão, entre 0,5 a 1,0 MPa/s. A ruptura se dá entre 5 a 10 minutos após a aplicação da carga. O ensaio deve ser feito em, no mínimo, cinco amostra.

Para Filho (2019), as condicionantes mais importantes que influenciam na resistência à compressão uniaxial da rocha são: índice de flexão, porosidade,

granulometria, estado de alteração, posicionamento estrutural e presença de microfissuras. A equação utilizada para determinar o valor de resistência é:

$$\sigma_C = \frac{P}{\pi \cdot D^2 \,/\, 4} \qquad \text{Equação 4}$$

Onde:

σc: resistência à compressão uniaxial (MPa);

P: carga na ruptura do corpo de prova (N);

D: diâmetro do corpo de prova (m²).

Percebe-se então que a preparação do corpo de prova para a execução do ensaio é bastante complexa, sendo necessário tomar muito cuidado para manter a integridade da amostra intacta e fiel ao comportamento original da rocha. Dessa forma, em alguns casos a realização do teste em laboratório fica impossibilitada devido à falta de tempo e/ou recursos. Portanto, o ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial pode ser substituído pelos testes de martelo de Schimidt ou martelo geológico, sendo possível fazer uma equivalência dos resultados dos ensaios obtidos em campo com o valor aproximado de RCU (Tabela 1), permitindo uma análise em campo muito mais expedita e barata (Filho, 2019).

Tabela 1: Estimativa de campo para valor de Resistência à Compressão Uniaxial. Fonte: ISRM, 1977.

Nota	Descrição	Identificação de campo	Valor aproximado de RCU (Mpa)
R0	Rocha Extremamente Branda	Risca com a unha	0,25 - 1,0
R1	Rocha Muito Branda	Desintegra-se com golpes de martelo/ risca com canivete	1,0 - 5,0
R2	Rocha Branda	Marcas superficiais com golpes de martelo/ pode ser riscado por canivete com dificuldade	5,0 - 25
R3	Resistência Média	Pode ser fraturado com um único golpe firme de martelo	25 - 50

R4	Resistência Alta	É preciso mais de um golpe de martelo para ser fraturado	50 - 100
R5	Resistência Muito Alta	É preciso vários golpes de martelo para ser fraturado	100 - 250
R6	Resistência Extremamente Alta	Golpes de martelo removem somente lascas	>250

2.3.2 Caracterização das Descontinuidades

Segundo Fiori (2015), maciço rochoso é definido como um meio sólido descontínuo, interrompido por descontinuidades que separam blocos de rocha discretos. Neste caso, entende-se como blocos de rocha as frações delimitadas por descontinuidades formando porções intactas do maciço. O conceito de descontinuidades é importante, pois representam planos de fraqueza em maciços rochosos que diminuem a sua resistência ao cisalhamento, podendo ser foliações metamórficas, bandamentos, falhas, fraturas, juntas, zonas de cisalhamento, veios ou diques.

Como as descontinuidades representam planos de fraqueza e são condicionantes para percolação de água, o estudo de suas características representam uma parte fundamental em obas de engenharia, mineração etc. Segundo Normando *et al.* (2021), as características das descontinuidades são fundamentais para entender o comportamento do maciço rochoso, pois vão interferir diretamente na resistência geomecânica. As principais características observáveis em uma descontinuidade ou um conjunto delas são:

- Orientação;
- Persistência ou continuidade;
- Espaçamento;
- Abertura;
- Rugosidade;
- Preenchimento;
- Percolação de água;
- Grau de alteração.

A orientação da descontinuidade é definida pela direção e mergulho de um plano e se obtém tais medidas com o uso de uma bússola geológica. A representação gráfica de uma família de descontinuidades em um modelo tridimensional oferece uma visão geral da geometria do maciço rochoso. O estudo da descontinuidade é importante porque ela condiciona os as rupturas, principalmente se os planos de uma ou mais famílias afloram na face do talude.

O espaçamento pode ser medida pela distância perpendicular entre dois planos de descontinuidades da mesma família, influenciando na resistência do maciço. Assim, de acordo com Vallejo (2002) se os espaçamentos são pequenos, a resistência do maciço diminui consideravelmente, a ponto de poder ser representado por um material granular não coeso, em algumas situações extremas.

O espaçamento também exerce muita influência na condutividade hidráulica, sendo que o espaçamento de uma família de juntas é inversamente proporcional ao valor da condutividade hidráulica (Vallejo, 2002).

De acordo com Fiori (2015), durante um mapeamento de descontinuidades é de extrema importância que a linha de varredura seja feita de forma perpendicular à direção da família de descontinuidade, para evitar que a ausência de medidas em fraturas paralelas a direção da linha de varredura. A classificação de espaçamento elaborada pela *Internacional Society for Rock Mechanics* (ISRM) é amplamente utilizada para definir o espaçamento das descontinuidades em campo e é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2: Classificação do espaçamento das descontinuidades em campo. Traduzido de ISRM (1977)

Descrição	Espaçamento (cm)
Extremamente pequeno	<2
Muito pequeno	2-6
Pequeno	6-20
Moderado	20-60
Grande	60-200
Muito grande	200-600
Extremamente grande	>600

Para Normado *et al.* (2021), a persistência ou continuidade pode ser compreendida como a medida da extensão de um plano de descontinuidade que aflora na vertente. Na prática é usual medir o comprimento do traço da

descontinuidade nos afloramentos. Obtém-se a medida da persistência com base na relação abaixo:

$$P = (1-C_{int}/C_d).100 \qquad \text{Equação 5}$$

Cint = somatório dos comprimentos dos segmentos intactos ao longo da descontinuidade.

Cd = comprimento total do segmento da descontinuidade no afloramento.

De acordo com Vallejo (2002) é importante destacar as famílias mais persistentes, pois estas, em geral, condicionam os planos de ruptura do maciço, como por exemplo, planos de falha, muito contínuos. Entretanto, este parâmetro é de difícil obtenção em campo, principalmente pela falta de acesso à toda extensão do talude.

Tabela 3: Tabela de classificação da continuidade. Traduzido de ISRM (1981).

Continuidade	Comprimento
Continuidade muito baixa	< 1 m
Continuidade baixa	1-3 m
Continuidade média	3-10 m
Continuidade alta	10-20 m
Continuidade muito alta	> 20 m

A abertura é entendida como a distância média perpendicular que separa as paredes de uma junta sem preenchimento (Fiori, 2015). A partir de uma abertura pode ocorrer a percolação de água e promover alteração dos planos de fratura. Se a abertura é muito pequena, a resistência da junta poderá ser influenciada pelo do material de preenchimento ou pela rugosidade das juntas. A mensuração da abertura em campo pode ser realizada com uma régua padrão de 30 cm ou com uma trena (dependendo da abertura), e a classificação proposta pela ISRM (1977) é demonstrada na Tabela 4.

Tabela 4: Classificação da abertura de descontinuidades. Traduzido de ISRM (1978).

Descrição	Abertura (mm)
Cerrada	Zero
Extremamente fechada	0 - 2
Muito fechada	2 - 6
Fechada	6 - 20
Moderadamente fechada	20 - 60
Moderadamente aberta	60 - 200
Aberta	> 200

De maneira geral, a rugosidade pode ser definida como ondulações nas superfícies dos planos de descontinuidades. Barton (1978), sugere termos de classificação em duas escalas de observação: Escala intermediária (métrica) e pequena escala (centimétrica). Na escala intermediária pode-se observar ondulações nos planos de descontinuidade que são classificados como escalonados, ondulados e planares, enquanto na escala centimétrica tem-se o padrão de rugosa, lisa e polida (Figura 3). A correta classificação da rugosidade é importante porque ela influencia na resistência do maciço sobre os planos das juntas, quanto menor for o espaçamento nos planos, maior a influência da rugosidade.

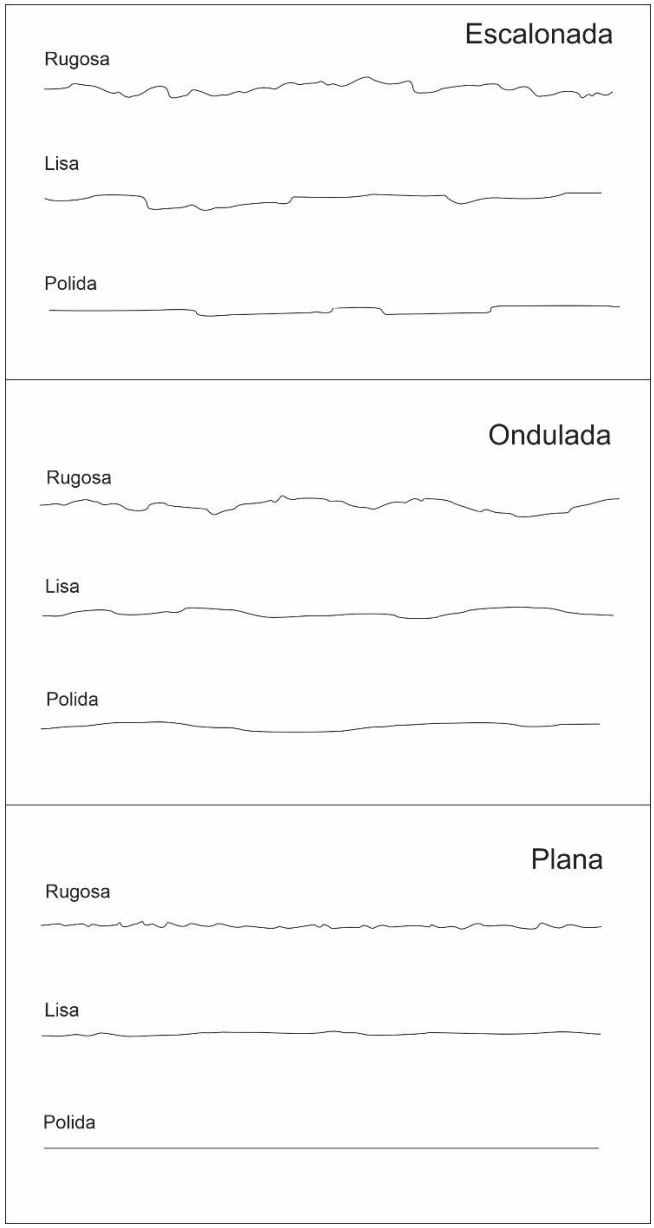


Figura 3: Classificação da rugosidade nos planos de descontinuidades. Traduzido de Barton, 1978.

É comum em descontinuidades que a abertura esteja parcialmente ou totalmente preenchida. Normalmente o preenchimento é de calcita, clorita, argila, silte, entre outros (Zenóbio, 2000). Se uma junta está aberta de tal forma que os planos de descontinuidade não se tocam, então a resistência ao cisalhamento será controlada unicamente pela resistência do material de preenchimento, o que significa, geralmente, uma diminuição da resistência.

A percolação de água na abertura de descontinuidades também é um importante fator de influência no maciço e deve ser descrita com bastante cuidado. ISRM (1977) sugere os seguintes termos de classificação:

- W1 – material de preenchimento consolidado e seco, improvável a ocorrência de um fluxo de água significativo devido à baixa permeabilidade;
- W2 – material de preenchimento úmido, mas sem fluxo de água;
- W3 – material de preenchimento molhado, eventual presença de gotejamento;
- W4 – sinais de escoamento no material de preenchimento, ocorrência de fluxo de água (litros/minuto);
- W5 – O material de preenchimento está lavado localmente, presença de fluxo considerável de água na abertura da descontinuidade. Neste caso, é importante descrever a pressão (baixa, média ou alta)
- W6 – Material de preenchimento totalmente lavado, pressões de água muito alta. Importante estimar a vazão (litros/minuto)

2.4 CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA

Durante a realização de um mapeamento geológico-geotécnico, é de suma importância qualificar e quantificar as características geomecânica de maciços rochosos, de forma que possibilite a previsão de possíveis rupturas. Para tal, é necessário utilizar a classificação geomecânica que melhor atenda as características e necessidades de cada projeto. Desde a década de 70, diversos sistemas de classificação foram criados, sendo os parâmetros mais frequentemente considerados: frequência, orientação, espaçamento das descontinuidades, resistência da rocha, grau de alteração e percolação de água (Pires, Viana & Campanha, 2016). Os sistemas de classificação mais amplamente utilizados são:

2.4.1 RQD (*Rock Quality Designation*)

RQD (*Rock Quality Designation*) é um método que foi desenvolvido por Deere (1963) para obter informações sobre a qualidade do maciço rochoso a partir da descrição de testemunhos de sondagem. O método consiste em estabelecer uma porcentagem dos trechos intactos de cumprimento superior a 10 cm em relação ao cumprimento total do testemunho. A análise é feita utilizando a seguinte equação:

$$RQD = \left(\frac{\Sigma l_i > 10}{L}\right) \cdot 100 \qquad \text{Equação 6}$$

Onde:

l_i: trechos do testemunho de cumprimento superior a 10 cm.

L: Cumprimento total do testemunho de sondagem.

Posteriormente, Hudson e Priest (1979), propôs uma nova equação (Equação 7), no qual o RQD pudesse ser adaptado para avaliar a qualidade de maciços rochosos em afloramentos. O método proposto consiste em estabelecer uma linha de varredura (*scanline*) na frente de um talude e contar o número de descontinuidades que interceptam a linha por metro. Ao final é dada a equação:

$$RQD = 100 \cdot e^{-0,1f} \cdot (1 + 0,1f) \qquad \text{Equação 7}$$

Onde:

f: número de fraturas por trecho medido (*scanline*);

e: constante que equivale a 2,718.

2.4.2 *Q-System e Q-Slope*

A classificação geomecânica *Q-System* foi desenvolvida por Barton *et al* (1974) com o propósito de avaliar a estabilidade de túneis escavados em rocha, com a possibilidade de realizar ajuste de escavação e suporte quando necessário. A qualidade (Q) do maciço rochoso é dada em função de seis parâmetros, que quando combinados oferecem informações sobre o tamanho do bloco de rocha, o estresse ativo e a resistência ao cisalhamento. Os seis parâmetros são: índice RQD, número de famílias de fraturas, rugosidade, grau de alteração ou preenchimento, estado de tensões e percolação de água.

Como citado no item 2.2.1, o índice RQD não é eficiente quando há famílias de fraturas paralelas ou subparalelas à linha de amostragem, resultando em uma nota indevidamente superior para o maciço rochoso. Sabendo disso, Barton et al (1974), percebeu que podia obter valores mais representativos do estado do maciço quando a nota RQD era dividida pelo número de famílias de fraturas, uma vez que o número de famílias é um importante indicador do grau de liberdade dos blocos. Dessa forma, foi elaborado o primeiro fator de ajuste para a classificação, considerando-se o número de famílias de fraturas (J_n). A rugosidade nos planos de fratura foi incorporada no sistema de classificação como um fator positivo, uma vez que favorecem na resistência ao cisalhamento, ao contrário da condição de alteração que quando presente nas descontinuidades tendem a aumentar a instabilidade do maciço, por isso foi incorporada como um fator negativo. Portanto, quanto maior o fator de alteração, menor a nota final Q. Por fim, também foram adicionados os parâmetros de ajuste do estado das tensões e percolação de água, resultando na equação:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) \times \left(\frac{J_r}{J_a}\right) \times \left(\frac{J_{wice}}{SRF}\right) \qquad \text{Equação 8}$$

Onde:

- Q: Qualidade do maciço rochoso.
- RQD: Rock Quality Designation (Deere, 1963).
- J_n: número de famílias de fraturas.
- J_r: número de rugosidade da junta.
- J_a: número de alteração da junta.
- J_w: índice de influência da percolação de água.
- SRF: índice de influência do estado de tensões no maciço (Stress Reduction Factor).

Para a atribuição das notas de cada componente da equação, Barton (1974) sugere valores de entrada baseados em observações de campo, que podem ser consultados conforme apresentado na Tabela 5.

Mais tarde, em 2015 Barton adaptou a sua classificação para que fosse utilizada também em escavações em taludes, criando o Q-Slope, o que permitiu realizar ajustes nos ângulos dos taludes durante a sua escavação.

O Q-Slope foi desenvolvido complementando o sistema Q, amplamente utilizado por 50 anos para caracterizar exposições de rochas, testemunhos de sondagem e túneis em construção. Os parâmetros Q′ (RQD, J_n, J_r e J_a) permaneceram inalterados no Q-Slope, embora um novo método para aplicar as razões J_r/J_a em ambos os lados de uma cunha potencial seja usado, com ponderações de orientação relativa (fator O) para cada lado. O termo J_w foi substituído pelo termo mais abrangente J_{wice}, que leva em conta a exposição de longo prazo a várias condições climáticas e ambientais, como chuvas erosivas intensas. As categorias de SRF (fator de redução de resistência) foram desenvolvidas para condições da superfície do talude, relações tensão-resistência e descontinuidades maiores, como falhas, zonas de fraqueza ou enxames de juntas (Bar & Barton, 2024). Os parâmetros do sistema Q estão demonstrados na Tabela 5.

Tabela 5: Classificação geomecânica Q-slope. Traduzido de Bar e Barton (2024).

Condição Geomecânica do maciço	**Valores RQD (%)**
Muito Ruim	0 - 25
Ruim	25 - 50
Regular	50 - 75
Bom	75 - 90
Excelente	90 - 100
Número das famílias de fraturas	**Valores J_n**
A - Fraturas esparsas ou ausentes	0,5 - 1
B - Uma família de fraturas	2
C - Uma família + fraturas esparsas	3
D - Duas famílias de fraturas	4
E - Duas famílias + fraturas esparsas	6
F - Três famílias de fraturas	9
G - Três famílias + fraturas esparsas	12
H - Muito fraturado, quatro ou mais famílias de fraturas	15
I - Maciço completamente fragmentado	20
Condições de rugosidade das paredes	**Valores J_r**
(a) Contato da parede da rochosa, (b) Contato após cisalhamento	
A - Juntas descontínuas	4
B - Irregular ou áspero, ondulado	3
C - Liso, ondulado	2
D - Polido, ondulado	1,5
E - Irregular ou áspero, plana	1,5
F - Lisa, plana	1
G - Polida, plana	0,5
Condição de Alteração das descontinuidades	**J_a**
(a) Contrato rocha-rocha	

A - Preenchimento duro, inalterado, impermeável. Quartzo ou epidoto	0,75
B - Paredes inalteradas, apenas machas superficiais	1
C - Paredes ligeiramente alteradas, preenchimento de minerais não amolecidos (areia e fragmentos de rocha)	2
D - Preenchimento de argila siltosa ou arenosa (não amolecida)	3
E - Revestimentos de minerais de argila de baixo atrito ou amolecimento. Também clorita, talco, gesso, grafite, etc.	4
(b) Fraturas com contato rocha-rocha, rejeito <10 cm	
F - Partículas arenosas ou fragmentos de rocha (sem argila)	4
G - Preenchimentos minerais de argila fortemente consolidados e não amolecíveis	6
H - Preenchimentos minerais de argila de média ou baixa consolidação, amolecíveis	8
J - Preenchimentos de argila expansiva.	8 - 12
(c) Fraturas sem contato rocha-rocha e com deslocamento relativo	
M - Zonas ou bandas de rocha e argila desintegradas ou trituradas	6 - 8 ou 8 - 12
N - Zonas ou faixas de argila siltosa ou arenosa, pequena fração de argila (não amolecida)	5
O P R - Zonas ou faixas espessas e contínuas de argila	10 - 13 ou 13 - 20

Condição ambiental e geológica J_{wice}

J_{wice}	Rocha intacta	Ambiente desértico	Ambiente úmido	Chuvas tropicais	Cunhas de gelo
Estável	Competente	1	0,7	0,5	0,9
Estável	Incompetente	0,7	0,6	0,3	0,5
Instável	Competente	0,8	0,5	0,1	0,3
Instável	Incompetente	0,5	0,3	0,05	0,2

Condição Física	**SRF_a**
A - Afrouxamento leve devido à localização superficial, perturbação por detonação ou escavação	2,5
B - Blocos soltos, sinais de trincas de tensão e cisalhamento de juntas, susceptibilidade ao intemperismo, perturbação severa por detonação	5
C - Como B, mas forte susceptibilidade ao intemperismo	10
D - Talude em estágio avançado de erosão e afrouxamento devido à erosão periódica por água e/ou efeitos de congelamento	15
E - Talude residual com transporte significativo de material encosta abaixo	20
Intervalo de Tensão-Resistência ($\sigma c/\sigma 1$)	**SRF_b**
F - Intervalo moderado de tensão-resistência: 50 - 200	2,5 - 1
G - Intervalo alto de tensão-resistência: 10 - 50	5 - 2,5

H - Falha localizada de rocha intacta: 5 - 10	10 - 5
J - Esmagamento ou escoamento plástico: 2.5 - 5	15 - 10
K - Fluxo plástico de material amolecido por deformação: 1 - 2.5	20 - 15

Fator de redução de resistência: descontinuidade principal, SRF_c				
Condição	Favorável	Desfavorável	Muito desfavorável	Causando ruptura se não suportado
L - Descontinuidade maior com pouca ou nenhuma argila	1	2	4	8
M - Descontinuidade maior com $RQD_{100} = 0$ devido a argila e rocha triturada	2	4	8	16
N - Descontinuidade maior com $RQD_{300} = 0$ devido a argila e rocha triturada	4	8	12	24

Descrição do fator O	**Família A**	**Família B (quando aplicável)**
Muito favoravelmente orientado	2	1,5
Bastante favorável	1	1
Desfavorável	0,75	0,9
Muito desfavorável	0,5	0,8
Causando falha se não suportado	0,25	0,5

2.4.3 RMR (*Rock Mass Rating*)

Proposto por Bieniawski (1973), o sistema de classificação geomecânica RMR teve a primeira versão publicada em 1973 e desde então diversas melhorias e adaptações foram realizadas pelo autor até a última versão publicada por Bieniawski (1989). Segundo Filho (2019), o sistema RMR é útil para avaliar o fator de resistência e deformação do talude, prevendo a capacidade de autossustentação. O sistema de classificação se utiliza de seis parâmetros:

- Resistência à compressão uniaxial;
- RQD (Rock Quality Designation);
- Espaçamento das descontinuidades;
- Alteração das descontinuidades;
- Percolação de água;
- Orientação das descontinuidades.

Para fazer a classificação geomecânica, Bieniawski (1989) defende que o maciço seja separado em regiões de aspectos estruturais semelhantes, somente

então é avaliado em cada intervalo as características geomecânica, no qual é dada uma nota classificatória para cada uma delas e que ao final são somadas para enquadrar cada região em uma classe estabilidade. As notas sugeridas para as condições dos parâmetros são apresentadas na Tabela 6.

A avaliação da orientação das descontinuidades é feita separadamente porque depende do tipo de obra de engenharia a ser realizada, túnel, talude ou fundação. Além disso, a característica do parâmetro é dada de forma qualitativa, ou seja, observa-se a favorabilidade da direção da descontinuidade em relação ao mergulho do túnel ou talude.

Por fim, a nota de classificação geomecânica é dada a partir da somatória das avaliações dos cinco parâmetros demonstrados na Tabela 6 e decréscimo do fator de ajuste de orientação das descontinuidades presente na Tabela 7. Com o valor final, o maciço rochoso é inserido em uma classe definidora de estabilidade que varia de I a V, e condição geral de muito bom a muito ruim (Tabela 8).

Tabela 6: Classificação geomecânica RMR. Traduzido de Bieniawski (1989).

Parâmetro		Valores						
Resistência à Compressão Uniaxial		>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
Nota		15	12	7	4	2	1	0
RQD (%)		100-90	90-75	75-50	50-25	<25		
Nota		20	17	13	8	3		
Espaçamento da descontinuidade (m)		>2	2-06	06-02	0,2-0,06	<0,06		
Nota		20	15	10	8	5		
Condição da descontinuidade		Superfícies muito ásperas, sem separação, paredes não intemperizadas	Superfícies pouco rugosas, separação 1 mm, paredes levemente alteradas	Superfícies pouco rugosas, separação >1 mm, parede muito alterada	Superfície lisa ou preenchimento <5 mm de espessura ou abertura 1-5 mm	Preenchimento >5 mm ou abertura > 5 mm		
Nota		30	25	20	10	0		
Percolação de água	Fluxo de água subterrânea	Nulo	< 10	10 - 25	25 - 125	>125		
	Condições gerais	Seco	Úmido	Molhado	Gotejando	Fluxo abundante		

Nota	15	10	7	4	0

Tabela 7: Classificação da orientação da descontinuidade no sistema RMR. Traduzido de Bieniawski (1989).

Direção e mergulho das descontinuidades		Muito Favorável	Favorável	Regular	Desfavorável	Muito desfavorável
Notas	Túneis	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Tabela 8: Classificação do maciço rochoso no sistema RMR. Traduzido de Bieniawski (1989).

Somatório dos pesos (Fator RMR)	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	<20
Classe do maciço	I	II	III	IV	V
Condição geral	Muito bom	Bom	Regular	Ruim	Muito Ruim

2.4.4 SMR (*Slope Mass Rating*)

Proposto por Romana (1985), o Slope Mass Rating adiciona quatro fatores de ajuste ao sistema de classificação geomecânica Rock Mass Rating. Estes fatores são inseridos devido à ausência de parâmetros que considerem as relações de orientação das descontinuidades no sistema RMR. Segundo Soares *et al* (2014), uma das vantagens deste sistema de classificação é a possibilidade de definir quantitativamente os fatores de correção para o talude através da adição dos parâmetros f1, f2, f3 e f4. A análise da estabilidade do maciço é dada pela equação:

$$SMR = RMR + (f_1 \times f_2 \times f_3) + f_4 \qquad \text{Equação 9}$$

Onde, segundo Romana (1985):

O fator f1 é dado pela relação de paralelismo (A) entre a direção da descontinuidade (αj) e a direção da face do talude (αs). O valor é expresso a partir da seguinte equação:

$$F_1 = \left(1 - \sin\left(\alpha_j - \alpha_s\right)\right) \qquad \text{Equação 10}$$

F2 está relacionado a resistência ao cisalhamento e vai depender do ângulo de mergulho do plano de descontinuidade (βj) em caso de deslizamento planar (P). O valor pode variar de 0,25 para descontinuidades cujo ângulo de mergulho seja inferior a 20°, até 1,0 em casos de mergulho superior a 45°. Em casos de tombamento de blocos, o valor adotado sempre será igual a 1.

Fator F3 é marcado pela relação de entre os mergulhos do talude (βs) e da descontinuidade (βj). Este fator demarca a possibilidade junta aflorar na face do talude em caso de rupturas planares.

F4 é o fator de correção e está relacionado aos diferentes métodos de escavação da face do talude, como é demonstrado na Tabela 10.

Tabela 9: Parâmetros de correção para o sistema SMR. Romana (1985).

Modo de ruptura			Muito favorável	Favorável	Moderado	Desfavorável	Muito desfavorável
P T C P / T / C	A = F1	αj-αs αj-αs-180	> 30°	30º - 20°	20º - 10°	10º - 5°	< 5°
			0,15	0,4	0,7	0,85	1
P C P / C T	B = F2 F2	βj	< 20°	20° - 30°	30° - 35°	35° - 45°	> 45°
			0,15	0,4	0,7	0,85	1
			1				
P C T P / C / T	C = F3	βj - βs β + βs	> 10°	10° - 0	0°	0° - (- 10°)	< -10°
			< 110°	110° - 120°	> 120°		
			0	-6	-25	-50	-60

Tabela 10: Fator de correção F4 para o sistema SMR. Romana (1985).

Método de escavação (F4)	Valor
Pré-corte	10
Detonação suave	8
Talude natural	15
Detonação ou mecânico	0
Talude natural	15

2.5 DRONE APLICADO ÀS GEOCIÊNCIAS

A utilização de drones nas geociências tem se expandido rapidamente nos últimos anos. Inicialmente, seu uso era restrito à obtenção de imagens aéreas e à

geração de modelos digitais de terrenos (Lozano e Alonso, 2016). No entanto, a rápida evolução da qualidade das câmeras fotográficas, aliada à possibilidade de acoplamento de sensores aerotransportados como o LiDAR (*Light Detection and Ranging*), transformou o potencial dessas ferramentas. Atualmente, os drones também oferecem a vantagem de realizar aerolevantamentos com GPS de alta precisão acoplado, permitindo a obtenção de imagens já georreferenciadas. Além disso, seu tamanho compacto e peso relativamente baixo facilitam o transporte para áreas remotas.

Apesar das vantagens mencionadas, os drones ainda oferecem certas limitações. Como mencionado por Kawamme (2021), ainda há certa dificuldade em se obter resultados precisos de elevação em modelos digitais de terrenos onde há intensa vegetação. Soares (2023) relata que a identificação de pequenas estruturas na nuvem densa de pontos ainda é bastante desafiadora.

De qualquer forma, o drone é uma ferramenta que tem se expandido rapidamente no mercado devido a sua versatilidade, por isso tem sido utilizado não somente nas geociências, mas também na geologia, agronomia, engenharia e demais áreas correlatas.

2.5.1 *Structure from Motion*

A técnica *Structure from Motion* consiste na geração de uma cena tridimensional a partir de sobreposição de uma série de imagens em duas dimensões levantadas a partir de um sensor em movimento (Viana, 2015). Para isso, é empregado o princípio da fotogrametria, que é definida como a ciência e tecnologia de adquirir informações precisas do meio físico a partir de medição e interpretação de imagens fotográficas (Takano, 2022). Segundo Soares (2023), na aplicação do princípio da fotogrametria, o algorítico *SfM* (*Structure-fromMotion*) tem a função de gerar dois produtos: o reconhecimento dos parâmetros da câmera e geração de nuvem de pontos 3D formando a geometria da cena. Além disso, a técnica *SfM* é composta principalmente por duas partes, a "*termed correspondence seach*" que busca correlacionar o mesmo elemento em duas imagens diferentes e "*incremental reconstruction*" que estrutura pontos tridimensionais (Soares, 2023).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de estudos utilizada no presente trabalho foi dividida em três etapas fundamentais: revisão bibliográfica, mapeamento e classificação geomecânica com uso de drone, e processamento dos dados aerofotogramétricas (Etapa 1), seguida de mapeamento classificação geológico-geotécnic da frente de lavra, realizado de modo tradicional (Etapa 2). Estas duas etapas foram realizadas de forma sequencial com o intuito de validar as informações obtidas com drone.

Para realização das atividades foram utilizados os materiais e métodos descritos na sequência

3.1 MATERIAIS

Para as atividades de escritório foram utilizados os seguintes materiais:

- Imagens de satélite do Google Earth e Google Maps;
- Bases cartográficas das rodovias federais e estaduais disponibilizadas pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte);
- Bases cartográficas de limiteis Municipais e Estaduais disponibilizadas pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

Além disso, também foi utilizado os *softwares*:

- QGIS, versão 3.28.13, *software* livre;
- *Agisoft Metashape Professional*, versão demonstrativa de 30 dias*;*
- *Sirovison* 7.6.43.0 (*Datamine Corporate* Ltda.), licença temporária;
- *DIPS* v7.0 (Rocscience, 2018), licença disponível na Universidade Federal do Paraná;
- *Microsoft* 365 (*Office*) versão 18.2411.1091.0.

Para a realização da atividade de campo foram usados os equipamentos:

- Drone DJI modelo Air 2S, emprestado pelo CENACID (Centro de Apoio Científico em Desastres);
- Bússola tipo Brunton, capacete de proteção e colete refletivo. Cedidos pelo Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná;
- Pertences próprios como martelo geológico, trena (8 metros), lupa, caderneta, régua etc.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Revisão Bibliográfica

A etapa do trabalho referente à revisão bibliográfica se inicia com o estudo da classificação geomecânica em maciços rochosos, incluindo a compreensão dos parâmetros geotécnicos observáveis e a maneira como tais parâmetros influenciam na estabilidade de taludes em rocha. O estudo da classificação geomecânica é importante porque é através deste método que as bancadas da Pedreira Central serão inseridas em uma classe definidora de estabilidade, além de avaliar quais parâmetros são passiveis de se obter com drone e qual é sua confiabilidade.

A releitura de trabalhos científicos envolvendo o uso de drone se deu para fundamentar a compreensão sobre as qualidades e limitações da ferramenta, pavimentando as tomadas de decisões para a execução do levantamento aerofotogramétrico e escolha dos *softwares* para execução do processamento dos dados e análises.

3.2.2 Levantamento Aerofotogramétrico

O critério para a escolha das bancadas objeto deste trabalho foi de que se tratasse de frentes de lavras inativas. Portanto, não seriam modificadas durante o intervalo entre Etapa 1 de levantamento aerofotogramétrico e a Etapa 2 de mapeamento da maneira convencional.

O drone utilizado para realização do levantamento aerofotogramétrico é o DJI Air 2S, cujas especificações estão apresentadas na Tabela 11. O planejamento de voo manual foi feito em campo com o aplicativo DJI Fly.

Tabela 11: especificações do drone DJI Air 2S. Fonte: *dji*.com

Especificações Aeronave	
Modelo	DJI Air 2S
Dimensões	183x253x77
Duração máx. de voo	31 minutos
Bateria	LiPo 3S
Armazenamento interno	8 GB
Estabilização	Triaxial (inclinação, rotação e giro)
GNSS	GPS+GLONASS+GALILEO
Câmera	
Píxels efetivos	20 MP
Abertura da lente	f/2,8

Alcance de disparo	0,6 m a infinito
ISO (Foto)	100 a 3.200 (automático), 100 a 12.800 (manual)
Velocidade do obturador eletrônico	1/8.000 - 8 segundos

Parte importante do planejamento do voo foi a escolha do dia e horário que favorecesse a execução do aerolevantamento. Isto porque a luminosidade do sol, velocidade do vento e presença de precipitação atmosférica são fatores que exercem influência na qualidade das fotografias aéreas e na segurança do equipamento. Por isso, o voo foi iniciado por volta das 10:00 horas da manhã em um dia parcialmente nublado e sem chuva.

A tomada de fotos e o aerolevantamento foram feitos de forma manual, assim uma parte importante durante este processo foi a definição da taxa de sobreposição de imagem, que neste caso foi adotada uma taxa de 70 a 80% de sobreposição em relação à imagem anterior.

As fotografias foram tiradas em duas etapas, na primeira foi feito um levantamento de detalhe da bancada, focando nas estruturas mapeáveis do talude. A segunda etapa de aerolevantamento foi feita logo após a primeira e buscou obter informações mais generalistas das bancadas, nela adotou-se uma distância de aproximadamente 30 metros. O levantamento aerofotogramétrico foi realizado no tempo decorrido de uma hora.

3.2.3 Modelagem Tridimensional

Finalizada a etapa de voo, as imagens armazenadas no cartão de memória foram salvas no computador. A primeira coisa a se fazer antes que realizar a importação das imagens é verificar a qualidade das fotografias e remover as fotos que não são interessantes da frente de lavra a ser modelada. Cada foto importada contém as especificações da câmera na hora do aerolevantamento, informações da resolução, dimensão da imagem e coordenadas geográficas (Figura 4).

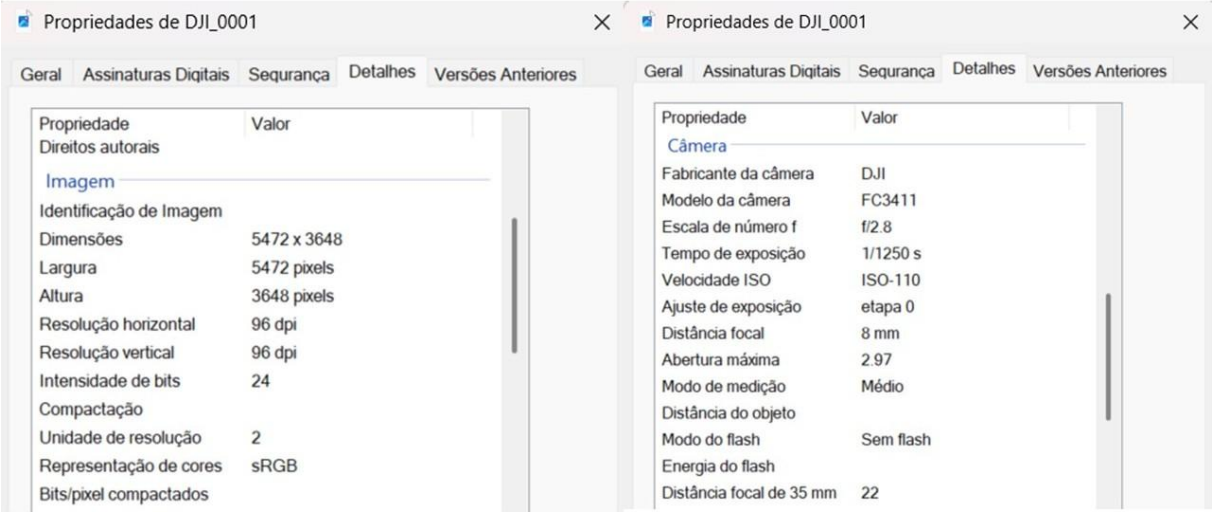


Figura 4: Informações de imagem e especificações da câmera na aba ‘detalhes’ nas propriedades da foto. Fonte: *Windows 11*.

Com as imagens devidamente selecionadas, foram gerados modelos tridimensionais aplicando a técnica SfM. O *software* escolhido para fazer o modelo foi o *Agisoft Metashape.* A geração do modelo foi relativamente simples e pode ser resumidos nas seguintes etapas: Importação de fotos para o software, alinhamento das fotos, criação de nuvem de pontos, criação do modelo e criação de textura.
Após a criação da nuvem de pontos foi utilizado a ferramenta “*Selection*” para selecionar e remover pontos da nuvem que não interessavam entrar no modelo.

O computador utilizado para geração do modelo tridimensional é o Dell G15 5530, suas especificações constam na Tabela 12.

Tabela 12: Especificações do computador utilizado no trabalho. Fonte: Autor.

Especificações Dell G15 5530	
Processador	3th Gen Intel(R) Core(TM) i5-13450HX
Memória RAM	32,0 GB (utilizável: 31,7 GB)
Placa de vídeo	RTX 3050
Tipo de sistema	Sistema operacional de 64 bits, processador baseado em x64
Sistema operacional	Windows 11 Home

Finalizada a geração do modelo tridimensional, foi exportado em formato .obj (objeto 3D – Wavefront) para inserir no *software Sirovison*.

3.2.4 Mapeamento com *Sirovision*

Após a exportação do modelo tridimensional das bancadas da pedreira Central em formato .obj, o modelo foi inserido no *Sirovision*.

A primeira etapa após a importação do modelo no *software* foi definir a setorização das bancadas, ou seja, intervalos de amostragem individualizados conforme o padrão de fraturamento aflorante na frente de lavra (Figura 5). Os setores de amostragem foram definidos por análise visual com o critério de separação de intervalos com padrão de fraturamento distintos e individualização dos diferentes litotipos, como no caso dos setores A5 e B5, cuja litologia difere dos demais setores.

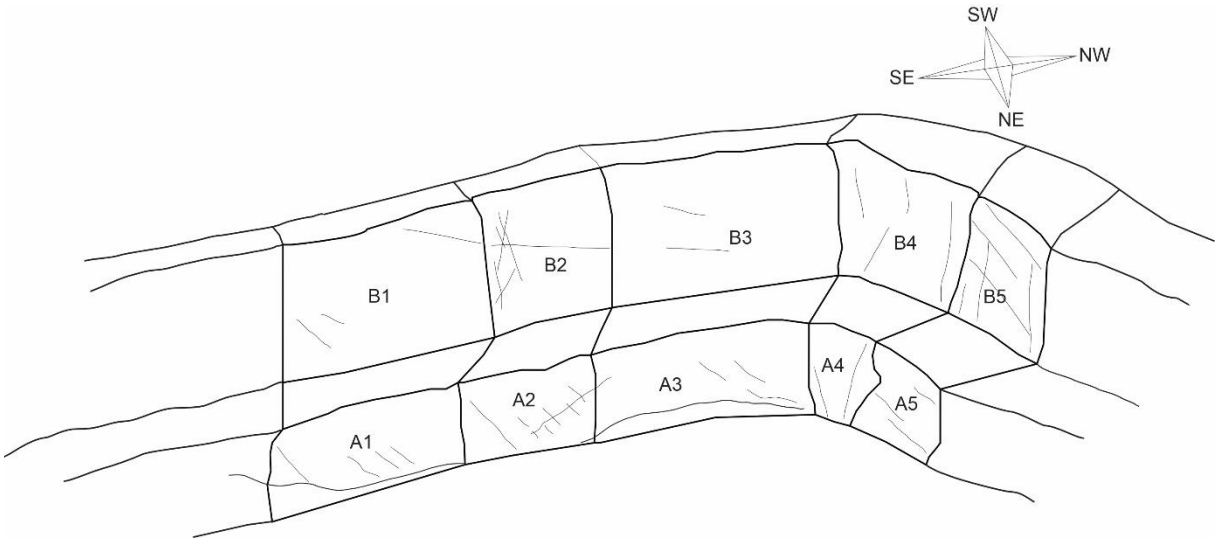


Figura 5: Desenho esquemático das bancadas e setorização proposta para o modelo tridimensional.

No *Sirovision*, o mapeamento das descontinuidades é relativamente simples, com a ferramenta "*trace*" ativada se faz sucessivos cliques com o botão esquerdo na superfície da descontinuidade, para auxiliar na visualização da orientação do plano que está sendo traçado cria-se um disco ajustável paralelo à direção da descontinuidade que está sendo traçada. Para cada plano mapeando foi criada uma linha na "*Table View*" (Figura 6) com informações de tipo de estrutura, persistência atitude do plano (*dip, dip, Direction)*, posição do centroide x, y, z e outras informações pouco relevantes para este trabalho. Com as descontinuidades mapeadas, a ferramenta *Survey Line* foi utilizada para estimar o espaçamento médio entre os planos de descontinuidade aflorantes. Estas informações são parâmetros importantes para aplicação da classificação geomecânica.

A superfície do talude foi inferida utilizando a ferramenta “*plane*”, cujo princípio é bastante parecido com o da ferramenta *trace*, mas nesse caso se fez cliques por toda superfície do talude em cada intervalo da scanline, obtendo o plano médio de *dip* e *dip direction* do talude. É importante ressaltar que o plano é inferido e possui muita variação, uma vez que as frentes de lava são bastante irregulares.

Image View | Table View

Name	Dip	Dip Direction	Plunge	Trend	Centroid X	Centroid Y	Centroid Z	Persistence	Weighting	Displaceme...	Orientation	Reliability	End To End
Trace	89,2	216,2	0,8	36,2	-10,910	30,856	765,673	10,251	1,00	0,049	N/A	N/A	10,532
Trace	6,5	18,1	83,5	198,1	-12,636	25,614	760,826	10,322	1,00	0,003	N/A	N/A	10,346
Trace	84,6	30,8	5,4	210,8	-15,265	19,402	761,934	5,341	1,00	0,000	N/A	N/A	5,349
Trace	85,1	203,9	4,9	23,9	-17,409	16,268	767,793	5,186	1,00	0,000	N/A	N/A	5,210
Trace	38,7	305,0	51,3	125,0	-11,722	26,781	762,840	6,860	1,00	0,041	N/A	N/A	7,165
Trace	11,9	77,1	78,1	257,1	-14,913	22,474	770,315	9,960	1,00	0,047	N/A	N/A	10,465
Trace	89,3	26,3	0,7	206,3	-11,954	26,611	763,461	6,720	1,00	0,017	N/A	N/A	6,910
Trace	88,4	35,7	1,6	215,7	-11,536	28,304	764,163	5,367	1,00	0,008	N/A	N/A	5,499
Plane*	78,4	114,8	11,6	294,8	-13,983	22,418	765,315	13,625	1,00	0,252	N/A	N/A	25,790
Trace	82,3	110,8	7,7	290,8	-16,911	5,343	764,714	3,984	1,00	0,013	N/A	N/A	4,552
Trace	88,5	26,8	1,5	206,8	-17,732	12,713	767,100	6,027	1,00	0,053	N/A	N/A	6,165
Trace	81,7	124,7	8,3	304,7	-16,704	6,448	764,263	4,017	1,00	0,020	N/A	N/A	4,134
Trace	84,6	35,6	5,4	215,6	-17,129	11,992	763,550	6,927	1,00	0,034	N/A	N/A	7,452
Plane*	84,7	87,6	5,3	267,6	-17,058	10,107	764,518	12,157	1,00	0,464	N/A	N/A	29,479
Trace	53,9	264,2	36,1	84,2	-10,750	-5,091	765,280	12,309	1,00	0,069	69,2	N/A	12,649
Trace	56,4	282,2	33,6	102,2	-12,821	-2,815	765,754	8,457	1,00	0,038	69,9	N/A	8,924
Trace	49,0	281,6	41,0	101,6	-7,747	-9,459	764,080	5,143	1,00	0,019	65,0	N/A	5,320
Trace	20,9	261,3	69,1	81,3	-13,606	-1,441	760,907	13,268	1,00	0,057	15,0	N/A	13,835
Trace	4,4	260,8	85,6	80,8	-7,116	-9,647	761,970	8,660	1,00	0,063	16,0	N/A	8,860
Trace	49,1	287,4	40,9	107,4	-9,642	-8,029	764,263	4,340	1,00	0,018	N/A	N/A	4,412
Trace	53,5	270,3	36,5	90,3	-3,037	-12,616	765,936	5,343	1,00	0,018	66,7	N/A	5,470
Trace	57,7	270,3	32,3	90,3	7,649	-19,067	765,951	8,928	1,00	0,044	18,7	N/A	9,318

Edit Filter

Figura 6: *Layout* da *Table View* e informações dos planos de descontinuidades no *sirovision*.

Depois de mapear todas as estruturas, as informações dos planos de descontinuidades presentes na *table view* foram exportadas para a tabela do Excel separadas por intervalos de *scanline*.

3.2.5 Mapeamento de Campo

Depois de traçar as descontinuidades no software *Sirovison*, foram realizadas duas etapas de mapeamento geológico-geotécnico na escala de 1:100 de maneira convencional para validar as informações obtidas com o *software*. O mapeamento seguiu a mesma setorização proposta para o modelo virtual, visando facilitar a comparação dos resultados. Durante a primeira etapa, foi realizada a obtenção dos dados estruturais no segundo nível da bancada, seguindo as linhas de amostragem equivalentes aos setores B1, B2, B3, B4 e B5 (Figura 5). Na segunda etapa de campo foram coletados os dados estruturais da primeira bancada, seguindo os intervalos equivalentes a A1, A2, A3, A4 e A5 (Figura 5).

Em campo foi realizada a descrição da rocha e coleta dos dados estruturais. Foram obtidas informações de resistência do maciço usando a estimativa de ISRM (1977), classificação do tipo de descontinuidade, incluindo orientação e mergulho, espaçamento, abertura entre os planos de fratura (ISRM, 1977), persistência (ISRM, 1977), classificação da rugosidade (Barton, 1978), tipo de material de preenchimento e evidências de percolação de água.

Além disso, também foram obtidas fotografias de feições importantes que indicassem aumento da instabilidade no maciço, como locais com maior percolação de água, zonas de falhas, blocos rochosos que aparentavam estar na iminência de ruptura etc.

3.2.6 Análise Cinemática

Após mapear as descontinuidades, as medidas foram inseridas no software *Dips* 7.0 (*Rocscience*) em formato *dip/dip direction* e então foi gerado um diagrama de densidade. Com isso, foi possível separar as diferentes famílias de descontinuidades no maciço rochoso, além de desconsiderar os pontos isolados que aparentavam não pertencer a nenhuma família.

Para fazer a análise cinemática, foram definidos os limites críticos baseados na origem dos dados, ou seja, para as medidas obtidas com o *Sirovision*, foram utilizadas as informações sobre a direção e ângulo do talude estimadas com o software. Por não ser possível obter os parâmetros sobre a resistência do maciço com o drone, foi definido o ângulo de atrito de 30°, valor considerado padrão, para a análise cinemática das descontinuidades obtidas remotamente, enquanto para as medidas obtidas em campo, foi adotado o ângulo de atrito estimado a partir da correlação do valor de GSI com a constante mi proposto por (Marinos e Hoek, 2000).

Durante a interpretação, optou-se por utilizar a análise quantitativa proposta por Admasu (2010), em que consiste somar o número total de planos ou interseções críticas e dividir pelo número total de descontinuidades. Apesar do autor ter utilizado uma tolerância de índice máximo de 0,3, foi adotado para este trabalho um valor limite de 0,1 para identificar com maior robustez as possibilidades de ocorrência de rupturas nos taludes rochosos.

3.2.7 Classificação Geomecânica

Para uma melhor compreensão das condições geomecânicas do maciço, foi aplicada a classificação *Q-slope* em cada setor mapeado. Os parâmetros utilizados na análise estão detalhados na Tabela 5.

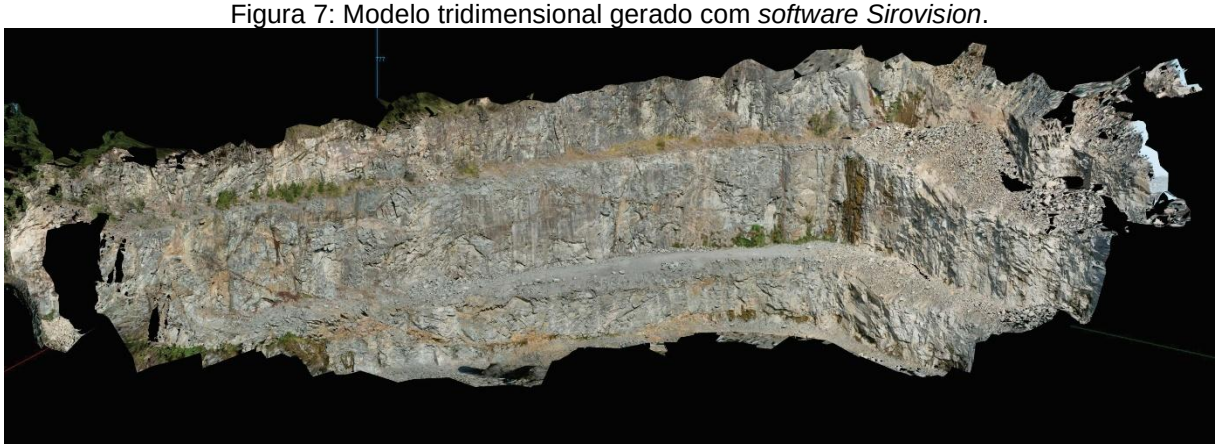
4 RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DO LEVANTAMENTO REALIZADO COM DRONE (ETAPA 1)

As fotografias obtidas na primeira etapa de aerolevantamento foi focando nos detalhes da bancada, objetivando visualizar as estruturas mapeáveis do talude. Nesta etapa foram tiradas 657 fotos a uma distância média de 20 metros da frente de lavra. A segunda etapa de aerolevantamento foi feita logo após a primeira e buscou obter informações mais generalistas das bancadas, nela adotou-se uma distância de aproximadamente 40 metros.

Foram mapeados remotamente no modelo digital (Figura 7) um total de 111 descontinuidades, incluindo fraturas, falhas e contato litológico entre a rocha encaixante e o dique. A distribuição dos pólos das descontinuidades está plotada no estereograma de Schimidt-Lambert no item “a” da Figura 8. Deste levantamento foram individualizadas 8 famílias de descontinuidade, que estão demonstradas em estereograma no item “b” da Figura 8 e suas orientações médias na Tabela 13.

Figura 7: Modelo tridimensional gerado com *software Sirovision*.



Com *Sirovision* foi possível observar mergulho e direção das feições, inferir sobre a natureza das descontinuidades e obter informações sobre o espaçamento e persistência dos planos. Apesar de serem parâmetros muito importantes para uma caracterização geotécnica, devido à ausência de detalhamento suficiente, não foi

possível inferir sobre a rugosidade, abertura e preenchimento entre planos de descontinuidade. Não foi possível obter informações sobre a litologia que compunha a mina através do *software*, apesar de inevitavelmente saber que se tratava de um gnaisse devido a visita de campo no dia do aerolevantamento. Apesar de se ter evitado fazer observações muito detalhadas sobre a geologia durante o levantamento com drone, também já se sabia previamente da ocorrência de um dique que passava pelos setores A5 e B5.

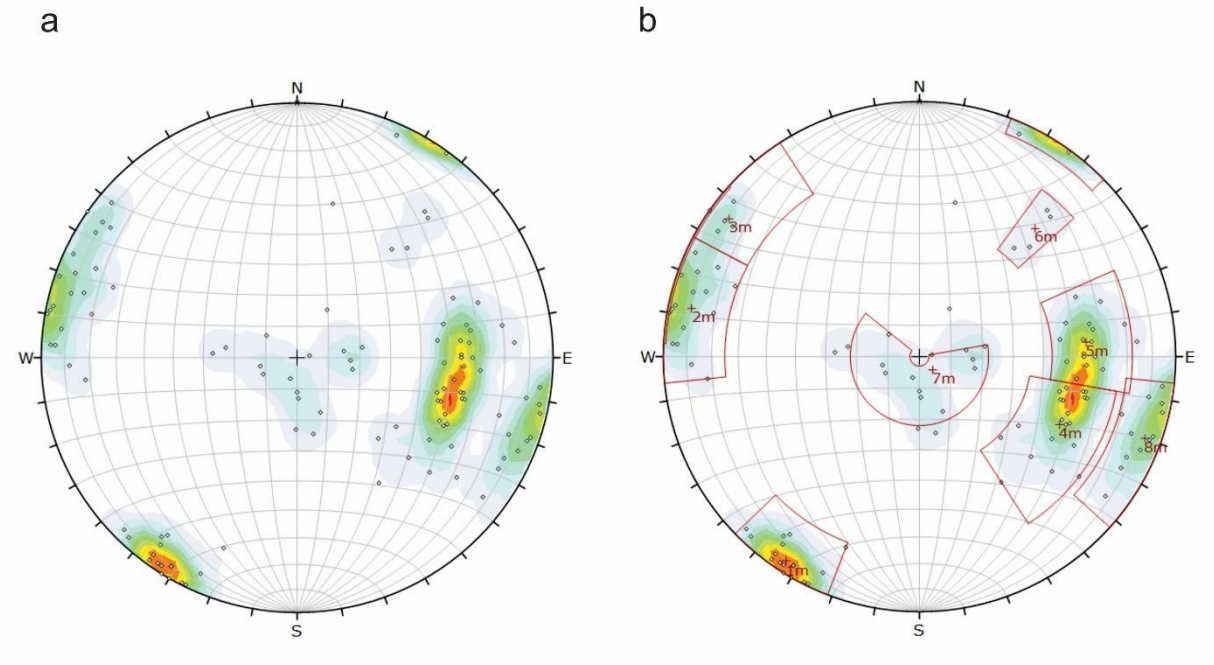


Figura 8: Estereograma de densidade das descontinuidades. (a) apenas pólos e (b) pólos e planos das principais famílias mapeadas remotamente, considerando todas as linhas de varredura.

Tabela 13: Orientação média das famílias de descontinuidades mapeadas com uso do sirovision.

Famílias de fraturas				
Famílias	Plano médio	Persistência	Espaçamento	Setor
1	N32/86	Média	Muito grande	A4, A5, B1, B4 e B5
2	N103/80	Média	Extremamente grande	A2, A3, A4, B1, B2 e B3
3	N131/80	Média	Extremamente grande	A1, A4, B1, B2 e B3
4	N296/51	Média	Muito grande	A1, A2, A3, A5, B1 e B5
5	N265/55	Média	Muito grande	A1, A2, A3 e B1
6	N222/57	Média	Grande	B4
7	N317/6	Muito alta	Muito grande	A1, A2, A3, A5, B2, B3 e B5
8	N290/83	Média	Extremamente grande	A3, B2 e B3

O setor A1 engloba um intervalo de amostragem de aproximadamente 33,6 metros ao longo da bancada, que possui uma altura medida de aproximadamente 12,7 metros e orientação geral N40/79. Neste intervalo foram mapeados 17 planos de descontinuidades, dos quais 16 foram interpretados como fraturas e 1 como falha. Das 8 famílias de fraturas identificadas em todo o maciço, 5 afloram neste setor, sendo elas as famílias 3, 4, 5, 7 e 8. O espaçamento entre as fraturas varia de 0,5 a 7 metros, entretanto a média estimada é de 3 metros. A persistência observada nas descontinuidades variou entre 3,6 e 12,3 metros, adquirindo uma média de 8,13 metros para este setor. Utilizando a Equação 7, foi possível calcular o valor do RQD, obtido a partir da contagem de 14 fraturas que interceptavam a linha de varredura que percorre todo o setor. O valor do RQD resultante foi de 99,92%.

Não foi apontado potencial para ocorrência de deslizamento planar, pois nenhum polo ficou dentro da zona crítica. Já para deslizamento em cunha, houve 10 interseções críticas de um total de 136, significando um IDC (Equação 1) igual a 0,074. A análise de tombamento apontou um potencial significativo, com 27 interseções críticas na zona 1 e 1 interseção críticas nas zonas 2. Totalizando um IT (Equação 3) igual a 0,19.

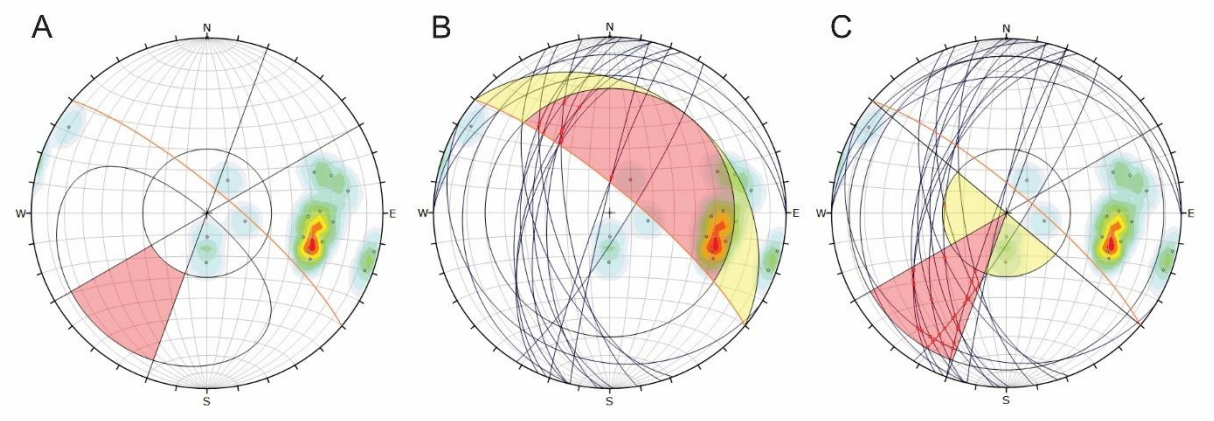


Figura 9: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor A1.

O setor A2 engloba uma extensão da frente de lavra de 22,6 metros, com altura estimada em 13 metros e direção e mergulho da face do talude de N33/83. Neste setor, foram traçadas ao todo 11 descontinuidades, as quais são pertencentes as famílias 2, 4, 5, 6 e 7. O espaçamento entre as descontinuidades varia entre 1 e 4 metros, com uma média de 3 metros. Já a persistência das fraturas apresenta valores entre 3,5 e 13,5 metros, com a média de 8 metros. Traçando uma linha de varredura

horizontal pelo setor, foram interceptadas 9 descontinuidades, significando um valor de RQD igual a 99,8.

Não foram encontrados condicionantes para a ocorrência de deslizamento planar. Para deslizamento em cunha, foram observadas 6 interseções críticas de um total de 36, resultando em um IDC (Equação 2) igual a 0,17. Na análise de tombamento, foram observadas 3 interseções críticas dos 36 totais, resultando em um IT (Equação 3) igual a 0,07.

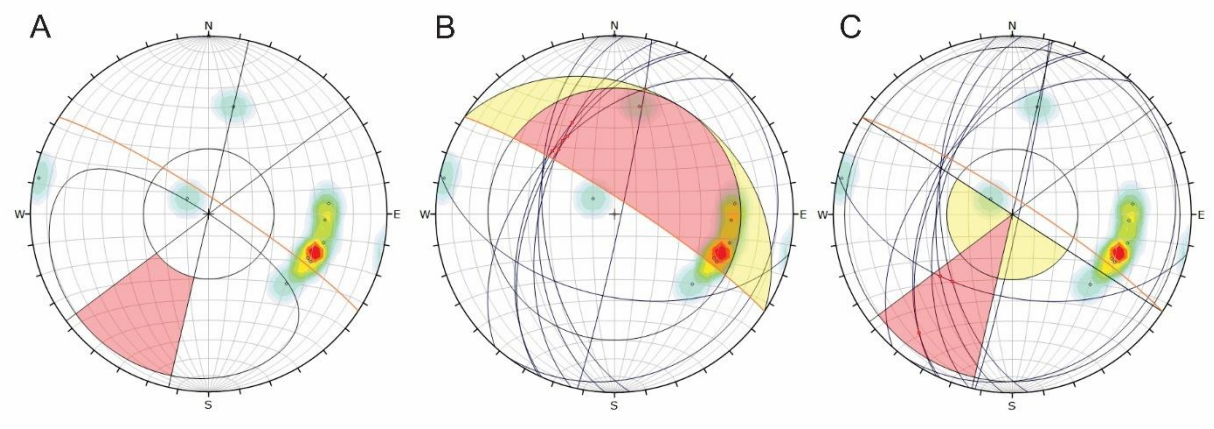


Figura 10: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor A2.

O intervalo da frente de lavra correspondente ao setor A3 possui direção de N43/88, compreende uma extensão de 36 metros da frente de lavra e uma altura de talude aproximada de 14 metros. Foram traçados um total de 18 planos de descontinuidades, sendo 16 planos de fraturas e 2 planos de falha. As descontinuidades traçadas foram correlacionadas às famílias 2,7,4 e 5. A persistência das juntas neste setor varia de 4,2 a 12 metros, com a média de 7 metros. O espaçamento entre as descontinuidades varia entre 1 e 6 metros, ficando com uma média de 3 metros de distância entre as fraturas. A linha de varredura horizontal traçada no setor interceptou um total de 12 descontinuidades, resultando em um valor de RQD igual a 99,94.

Durante a análise cinemática, não foi observado condicionantes para a ocorrência de deslizamento planar. A análise de deslizamento em cunha apontou 19 interseções críticas de um total de 153, resultando em um IDC (Equação 2) igual a 0,12. Na análise de tombamento, foram observadas 7 interseções críticas dos 171 totais, resultando em um IT (Equação 3) igual a 0,04.

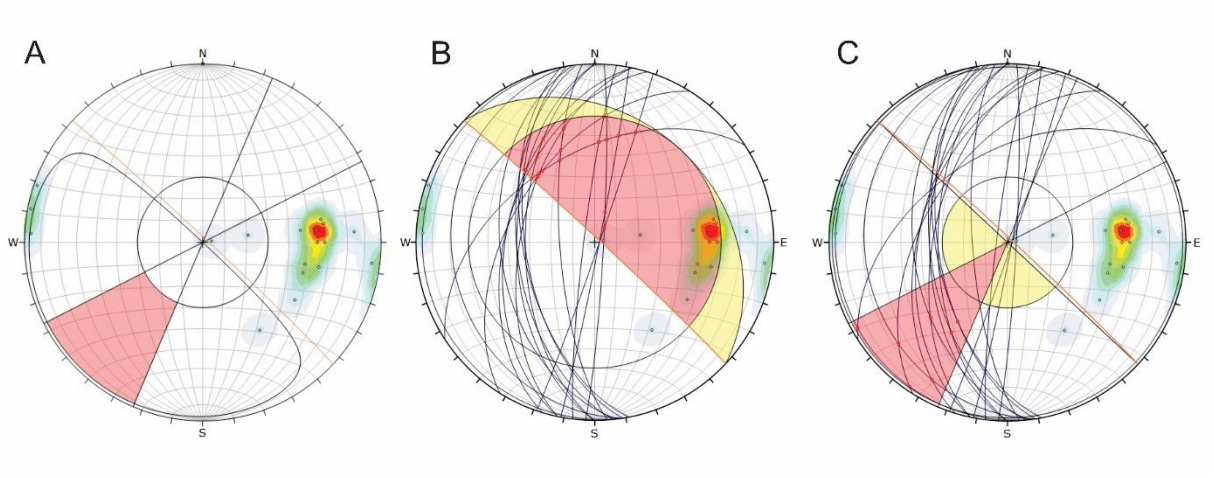


Figura 11: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor A3.

O setor A4 possui a extensão de 9,5 metros, altura aproximada de 15 metros e sua direção e mergulho é de N88/85. Por se tratar de um intervalo de menor extensão, apenas 4 descontinuidades foram traçadas neste setor, sendo duas pertencentes a família 1 e duas da família 3. O espaçamento médio observado é de 4 metros, enquanto a persistência média é de 5,2 metros. A linha de varredura horizontal no setor interceptou um total de 4 descontinuidades, resultando em um RQD igual a 99,96.

Neste setor, não foram observadas condicionantes para a ocorrência de deslizamento planar ou tombamento de blocos. Entretanto, houve 6 interseções críticas de um total de 6 possíveis, resultando em IDC (Equação 2) igual a 1,0.

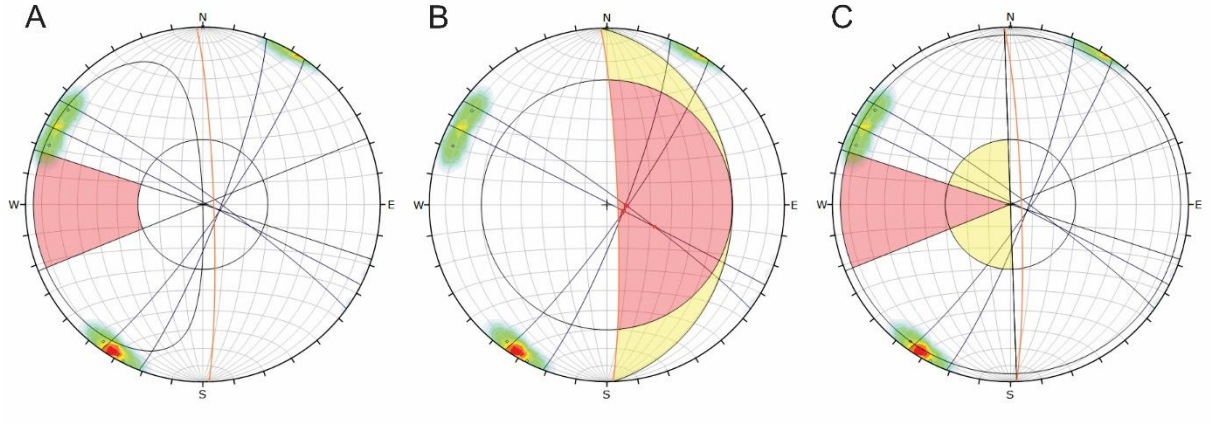


Figura 12: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor A4.

O setor A5 possui orientação de N115/78, 16,4 metros e extensão e altura de aproximadamente 14 metros. Foram medidas 8 fraturas, sendo elas pertencentes as famílias de fraturas 1, 4 e 7. A persistência das descontinuidades variam entre 5 e 10

metros, obtendo uma média de 7 metros. O espaçamento médio observado é de 3,5 metros. A linha de varredura traçada horizontalmente no setor interceptou 5 descontinuidades, resultando em um RQD igual a 99,95.

Não foram encontradas condicionantes para a ocorrência de deslizamento planar. Entretanto, para deslizamento em cunha houve 4 interseções críticas de um total de 28, indicando um IDC (Equação 2) igual a 0,14. Na análise de tombamento, foi observada 9 interseções críticas de um total de 36 interseções totais resultando no IT (Equação 3) igual a 0,25.

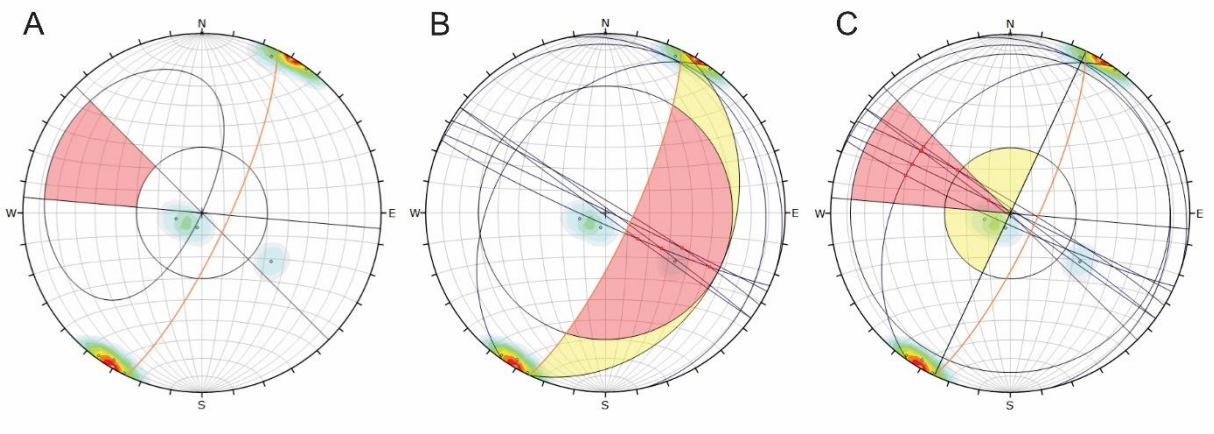


Figura 13: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor A5.

O setor B1 mapeado possui uma extensão horizontal de 36,2 metros e altura aproximada de 22 metros. A orientação da face do talude é de N36/81. Neste trecho foram mapeadas 9 fraturas, as quais puderam ser enquadradas nas famílias 1, 2, 3, 4 e 5. O espaçamento observado neste trecho é muito variável e não foi possível inferi-lo com precisão, além disso, a orientação das descontinuidades da família 1 é subparalela à direção da face do talude, expondo somente os planos de fraturas e dando a impressão de um espaçamento muito maior do que realmente é. Dessa forma, foi inferido um espaçamento médio de 6,95 metros e persistência média de 11,9 metros. Com a linha de varredura horizontal de 36,2 metros foram interceptadas 9 descontinuidades, resultando em uma nota RQD igual a 99,96.

A análise de deslizamento planar indicou a ocorrência de três planos de descontinuidade dentro da zona crítica, resultando no IDP (Equação 1) igual a 0,33. As condicionantes para a ocorrência de deslizamento em cunha também foram atendidas, com 26 interseções crítica da 36 possíveis, indicando um IDC (Equação 2) igual a 0,61. Foi observado na análise de tombamento, 7 interseções críticas, resultando em um IT (Equação 3) de 0,22.

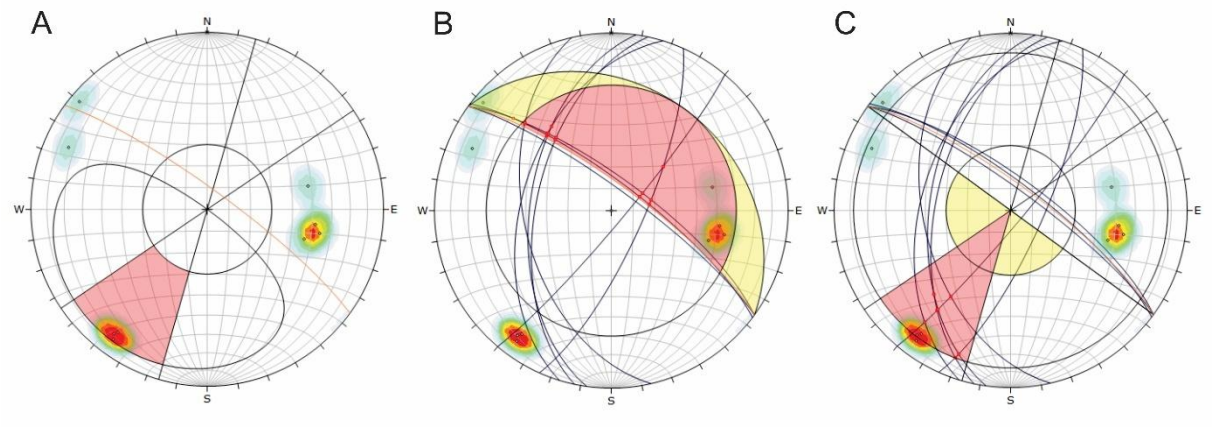


Figura 14: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor B1.

O setor B2 tem 21 metros de extensão e altura de talude de aproximadamente 22,5 metros. A orientação da bancada neste setor é N34/82. Foram traçados 17 planos de descontinuidades neste setor, sendo elas correspondentes as famílias de descontinuidades 2 e 8. O espaçamento médio das descontinuidades é de aproximadamente 1,7 metros e a persistência é equivalente a 10 metros. Traçando a *scanline* horizontal de 21 metros, foi interceptado 14 descontinuidades. Resultando na nota RQD de 99,79.

Neste setor não foram atendidas as condicionantes para a ocorrência de deslizamento planar. Todavia, na análise de deslizamento em cunha houve 44 interseções críticas de um total de 136, resultando no valor IDC (Equação 2) equivalente a 0,32. A análise de tombamento direto apontou 19 de 136 possíveis interseções críticas, mas não foi observado a ocorrência de um conjunto de planos horizontais que poderiam condicionar o tombamento de blocos. O IT para este setor é igual a 0,14.

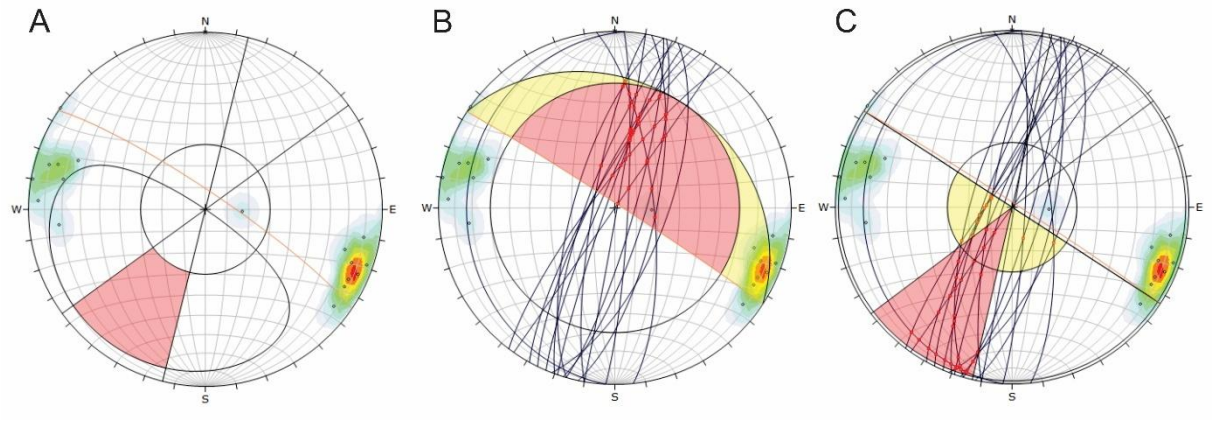


Figura 15: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor B2.

O setor B3 possui o intervalo de 33 metros de extensão horizontal e altura aproximada de 22,5 metros. A direção da face deste talude é de N45/82. Foram traçados um total de 8 planos de descontinuidades, sendo eles pertencentes as famílias de fratura 2, 3, 7 e 8. A persistência média dos planos de descontinuidades é de 15,6 metros. Este setor é caracterizado por possuir poucas fraturas evidentes, que se concentram nas porções mais altas do talude, por isso espaçamento médio, neste caso, é de 6 metros. Traçando uma *scanline* horizontal de 33 metros na frente de lavra interceptou-se 4 fraturas, resultando em um RQD igual a 99,9.

Não foram encontradas condicionantes para a ocorrência de deslizamento planar. Entretanto, houve 4 interseções críticas de um total de 28 interseções, resultando no índice IDC (Equação 2) igual a 0,14. Na análise de tombamento houve somente uma interseção crítica na zona 1 e duas interseções na zona 3, indicando a possibilidade para a ocorrência de tombamento oblíquo, resultando no IT (Equação 3) de 0,08.

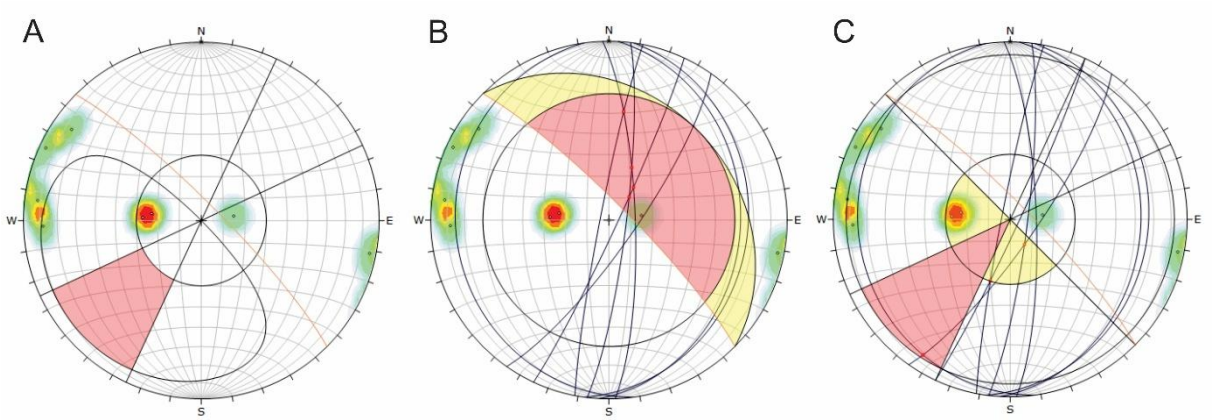


Figura 16: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor B3.

O setor B4 possui 22 metros de extensão e 22 metros de altura. A face do talude neste setor está orientada em N101/86. Utilizando o *sirovision*, foi possível mapear 8 descontinuidades, sendo elas pertencentes as famílias 1 e 6. Vale destacar que a família de fraturas 6 aflora somente neste setor. A persistência média das descontinuidades traçadas neste setor é de 8 metros, enquanto o espaçamento estimado é de 5 metros. A linha de varredura horizontal interceptou 6 planos de descontinuidades, resultando no valor RDQ de 99,96.

Durante a realização da análise cinemática, não foi observado condicionantes para a ocorrência de deslizamento planar. Todavia, observou-se 1 interseção crítica dos 28 totais para deslizamento em cunha, resultando no IDC (Equação 2) igual a

0,04. Na análise de tombamento ocorrem 10 interseções críticas das 28 possíveis. Como resultado, o valor IT (Equação 3) é igual a 0,36.

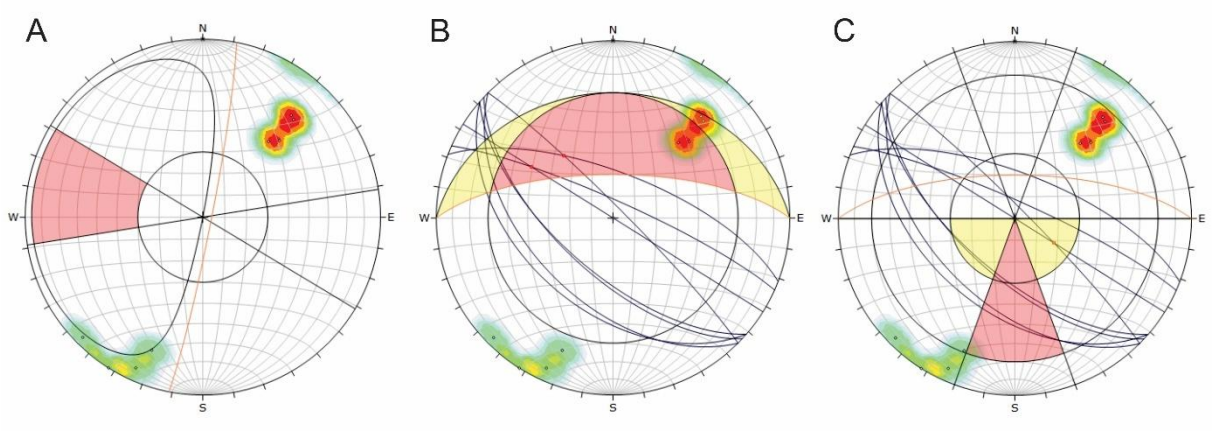


Figura 17: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor B4.

O setor B5 possui orientação N114/84 e foi o último a ser mapeado com o *Sirovision*. Além disso, a extensão horizontal é de 22,5 metros e altura é de 20 metros. Nele, foram mapeados 14 planos de descontinuidades, dos quais são 13 fraturas e 1 contato litológico. O contato pôde ser inferido no *software* a partir da variação do padrão de fraturamento no intervalo B5 e pela sutil variação de cor que pode ser observada no modelo. Neste setor, as fraturas observadas pertencem as famílias 1, 4 e 7. O espaçamento médio observado entre as fraturas é de 4 metros e a persistência é de aproximadamente 10 metros. Traçando a linha de varredura horizontal neste setor, interceptou-se 7 no intervalo de 22,5 metros, resultando na nota RQD igual a 99,34.

Não foram identificadas condicionantes para a ocorrência de deslizamento planar para este setor. Todavia, observou-se 7 interseções críticas de um total de 78 interseções, resultando no IDC (Equação 2) igual a 0,09. Para a análise de tombamento também houve o cumprimento de condicionantes, com 37 interseções críticas dos 78 totais. Como resultando, o valor do IT (Equação 3) é igual a 0,47.

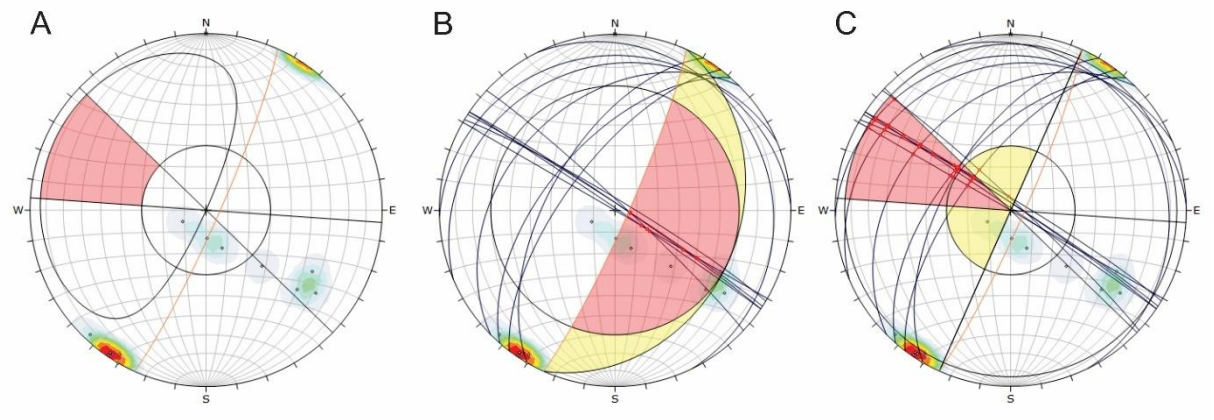


Figura 18: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor B5.

A tabela 13 apresenta os resultados de RQD e análise cinemática obtidos com uso do sirovision em cada setor. Percebe-se que, de forma geral, não há potencial para a ocorrência de deslizamento em cunha exceto pelo setor B1, cujo IDP é 0,33. Ao contrário disso, há potencial para deslizamento em cunha significativo por quase toda frente de lavra, exceto pelos setores A1, B4 e B5, que apesar de apresentarem tendência para ocorrência deste tipo de ruptura, ficaram abaixo do limite crítico de 0,1. Oito setores apresentaram condicionantes para a ocorrência de queda de blocos, entretanto os setores A2, A3 e B3 obtiveram o índice de tombamento inferior a 0,1. Destaca-se também o setor A4, que não apresentou nenhuma interseção crítica para este tipo ruptura.

Ao contrário dos índices de ruptura que apresentaram resultados bastante variados, o valor de RQD foi unânime para todos os setores pois apresentou valores próximo aos 99% por todo o maciço, sendo qualificado com excelente pela classificação *Q-slope* (Bar e Barton, 2024).

Tabela 14: Tabela resumo dos índices e RQD dos setores.

Setor	RQD	IDP	IDC	IT
A1	Excelente	0	0,07	0,19
A2	Excelente	0	0,17	0,07
A3	Excelente	0	0,12	0,04
A4	Excelente	0	1,0	0
A5	Excelente	0	0,14	0,25
B1	Excelente	0,33	0,61	0,22
B2	Excelente	0	0,32	0,14
B3	Excelente	0	0,14	0,08
B4	Excelente	0	0,04	0,36
B5	Excelente	0	0,09	0,47

4.2 RESULTADOS DO MAPEAMENTO CONVENCIONAL (ETAPA 2)

4.2.1 Aspectos Geológicos

A Pedreira Central é constituída predominantemente por um gnaisse são com relativa variação composicional e granulométrica. Além disso, ocorrem dois diques aflorando da mina, com um deles fazendo parte do intervalo onde se realizou o mapeamento geológico-geotécnico, mais especificamente nos setores A5 e B5 (Figura 5).

O gnaisse ocorre de duas maneiras distintas, nos setores A3, A4, B1, B2, B3 e B4, o gnaisse é composto por quartzo (40%) e plagioclásio (30%) de tamanho milimétrico (até 4 mm) nas bandas de leucossoma e anfibólio (20%) e biotita (10%) nas bandas de melanossoma. O bandamento gnáissico nestes setores possui o caráter levemente anastomosado e espessura variável de 0,2 a 2 cm, sendo as bandas quartzo-feldspáticas as que possuem maior espessura.

Já nos setores A1 e A2, o gnaisse é composto por cristais grossos de feldspato potássico (40%), quartzo (30%), plagioclásio (15%), anfibólio (10%), epidoto (5%) e pirita (Tr). O bandamento composicional da rocha torna-se bastante sutil e espaçado, com as bandas quartzo-feldspáticas tendo espessura de até 7 cm e bandas de melanossoma de até 0,3 cm pouco contínuas. Os cristais de feldspato potássico e plagioclásio são subédricos a euédricos, com tamanho de até 4 cm. Os cristais de quartzo são anédricos e de granulometria de até 1,5 cm. Os cristais de anfibólio são subédricos a anédricos e de tamanho de até 3 cm. O epidoto ocorre na forma de pequenos veios de espessura milimétrica a submilimétrica (até 2 mm) retilíneos a levemente anastomosados (item “c” da Figura 19).

O dique trata-se de um gabro de direção N235/75 composto por 70% de piroxênio (egirina) e minerais máficos, 20% de plagioclásio e 10% de quartzo. A rocha contém textura fanerítica e estrutura maciça. Eventualmente, observa-se a ocorrência de calcita preenchendo planos de fraturas.

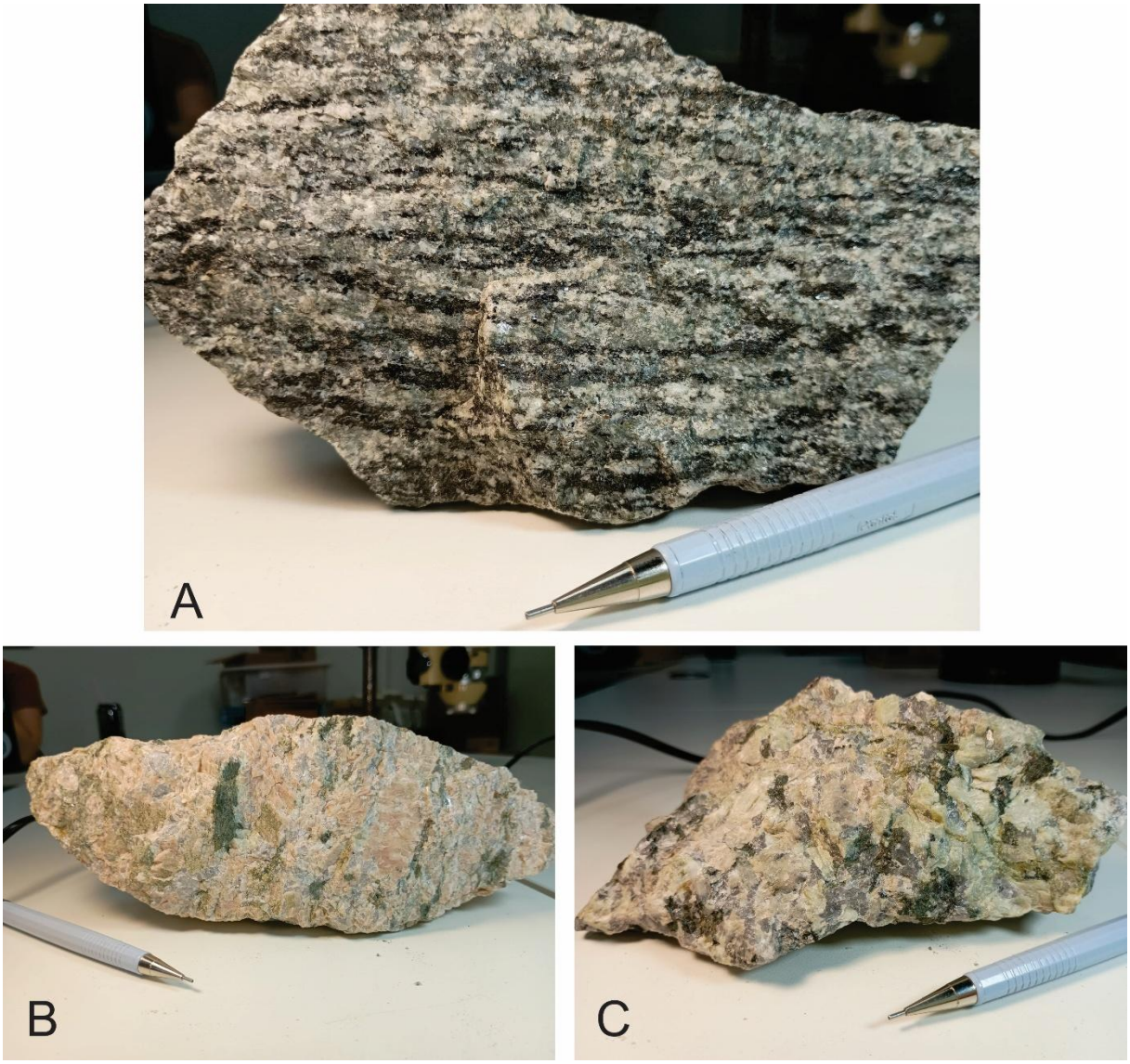


Figura 19: Amostras tipos, com: A) gnaisse encontrado na maioria dos setores, com bandamento metamórfico proeminente e pouco espaçado; B) gnaisse enriquecido em feldspato potássico com destaque para o anfibólio de tamanho centimétrico; C) amostra de gnaisse enriquecido em plagioclásio e bandamento ausente.

4.2.2 Caracterização das Descontinuidades

Como resultado do mapeamento de campo foram medidas ao todo 149 descontinuidades, onde a imensa maioria são fraturas (129), mas também falhas (18) e contato litológico (2). Durante o campo, os diferentes planos de descontinuidades foram classificados em famílias individualmente por setores mapeados, não considerando o contexto geral das descontinuidades do maciço. Somente no momento de tratamento dos dados é que foi feita a separação das famílias verdadeiramente. O método se deu da mesma maneira com os dados obtidos com o

drone, onde as informações estruturais foram inseridas nos diagramas de Schimidt-Lambert em forma de polos e então foi feita a separação das famílias por atitudes semelhantes. Para tal, optou-se por chamar as famílias 1, 2, 3 etc. de maneira correlata as famílias classificadas com o *sirovision*, para facilitar a comparação.

É importante pontuar que durante todas as etapas de separação das famílias, a medida do contato litológico entre o dique e o gnaisse não foi considerado, somente durante a análise cinemática ele volta a ser inserido junto com as demais descontinuidades nos estereogramas, pois este tipo de descontinuidade também pode representar planos de fraqueza e condicionar rupturas.

Ao todo foram classificadas 10 famílias de fraturas ao longo dos 10 setores e duas bancadas. Além disso, para cada família foi coletado informações de direção e mergulho, abertura, espaçamento, persistência, rugosidade, alteração, preenchimento e sinais de percolação de água.

Diferentemente da apresentação dos dados obtidos na Etapa 1, as observações de campo, bem como a própria descrição das descontinuidades permitiu um melhor detalhamento das características das famílias, portanto, optou-se por apresentá-las individualmente nesse item. Posteriormente, a análise cinemática será apresentada para cada setor, a fim de permitir a comparação entre os resultados das duas formas de análise.

A família 1 foi identificada nos setores A4, A5, B1, B2, B4 e B5, das quais foram coletadas 24 medidas em campo e resultando no plano médio é N34/85, que está representado no estereograma de densidade na Figura 20. A abertura é moderada com preenchimento de fragmentos de rocha de tamanho areia grossa a grânulos. O espaçamento foi caracterizado como moderado, enquanto a persistência média é de 12 metros, podendo ser classificada como alta. As paredes são escalonadas lisa e estavam úmidas.

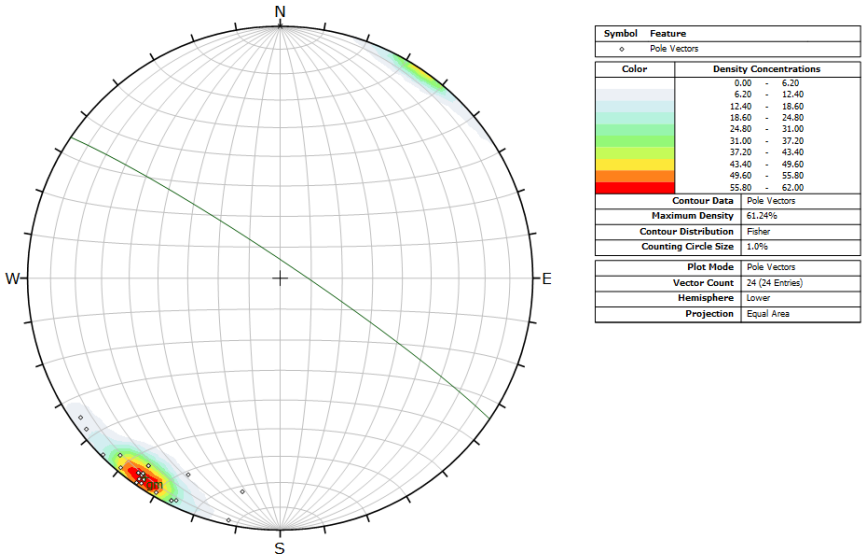


Figura 20: Estereograma da família 1.

A família de fraturas 2 ocorre nos setores A1, A3, B3 e B5, com 10 medidas obtidas em campo, a atitude do plano médio é N91/80, representado na Figura 21. A abertura é fechada e ocasionalmente as paredes estão preenchidas por calcita. A persistência da família é média e espaçamento varia entre 2,5 e 5 metros, podendo ser classificado como muito grande. A rugosidade das paredes é escalonada lisa, pouco oxidadas a inalteradas e frequentemente úmidas, com exceção do setor B3, onde foram observadas paredes bastante molhadas e com gotejamento.

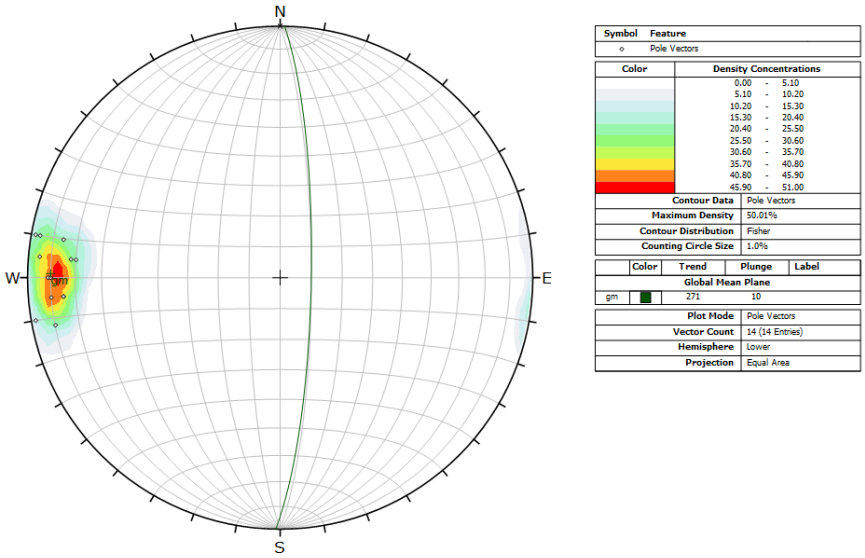


Figura 21: Estereograma da família 2.

A família 3 ocorre nos setores A1, A2, A3, A5, B1, B2, B3, B4 e B5, sendo a família de fraturas mais penetrativa de todas. Em campo, foram coletadas um total de 30 medidas, resultando na atitude média dos planos em N119/77, como pode ser observado na Figura 22. A abertura, neste caso, é moderadamente aberta e eventualmente preenchida com calcita. O espaçamento é grande e a persistência média é de 12 metros, sendo classificada como alta. A rugosidade observada é ondulada lisa e as paredes das fraturas geralmente estão secas e sãos.

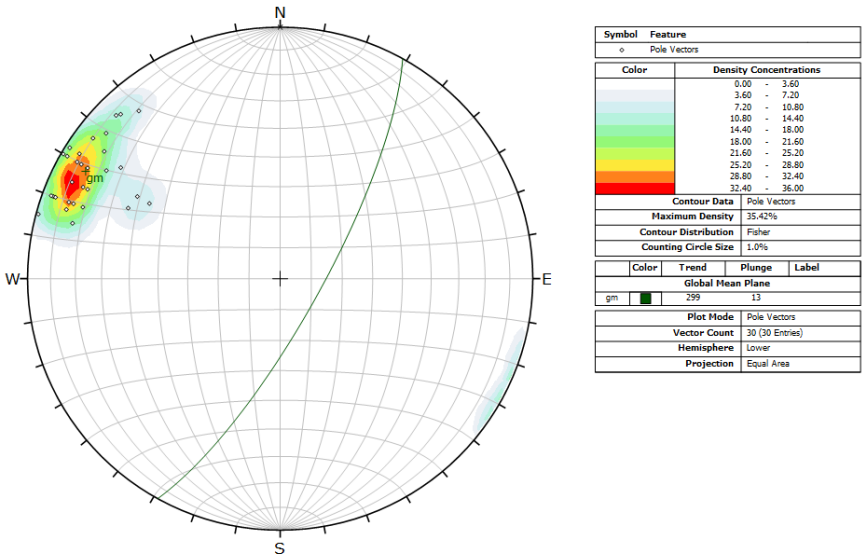


Figura 22: Estereograma da família 3.

A ocorrência da família 4 se dá nos setores A1, A5 e B5, ao todo foram medidos 8 planos de fraturas para esta família e obteve-se um plano médio N316/58, demonstrado na Figura 23. Esta família é caracterizada por ter a abertura muito fechada e sem preenchimento observado. O espaçamento é grande e a persistência é baixa, com cerca de 1,5 metros. A rugosidade é classificada como planar lisa e as paredes são secas e sem sinais de percolação de água evidente, a não ser pela leve alteração nas paredes desta família observadas no setor A1.

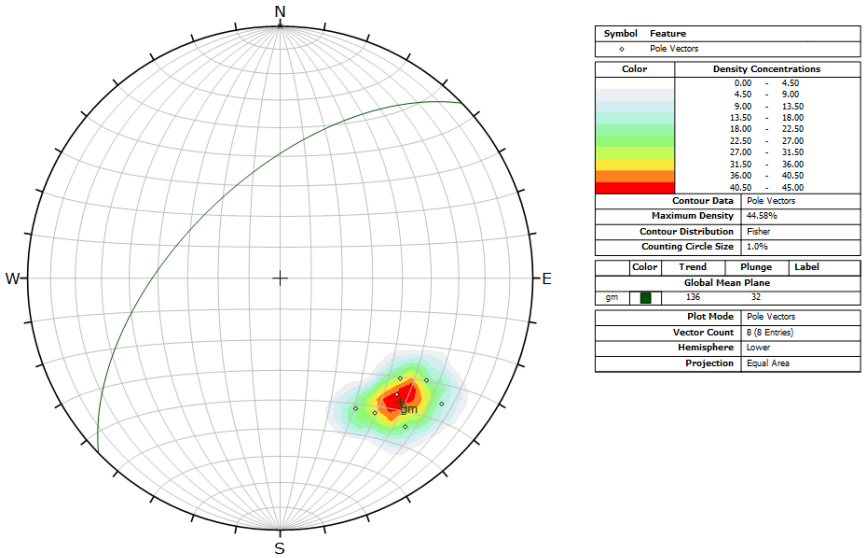


Figura 23: Estereograma da família 4.

A família 5 aflora nos setores A1, A2, A3, B1, B2 e B4 e conta com 24 fraturas medidas, dos quais se obteve um plano médio N286/54, representado na Figura 24. A abertura é de até 5 mm, podendo ser classificada como muito fechada e sem preenchimento. O espaçamento entre as fraturas é grande e a persistência é considerada alta. A rugosidade das paredes é escalonada lisa e sem sinais de passagem significativa de água.

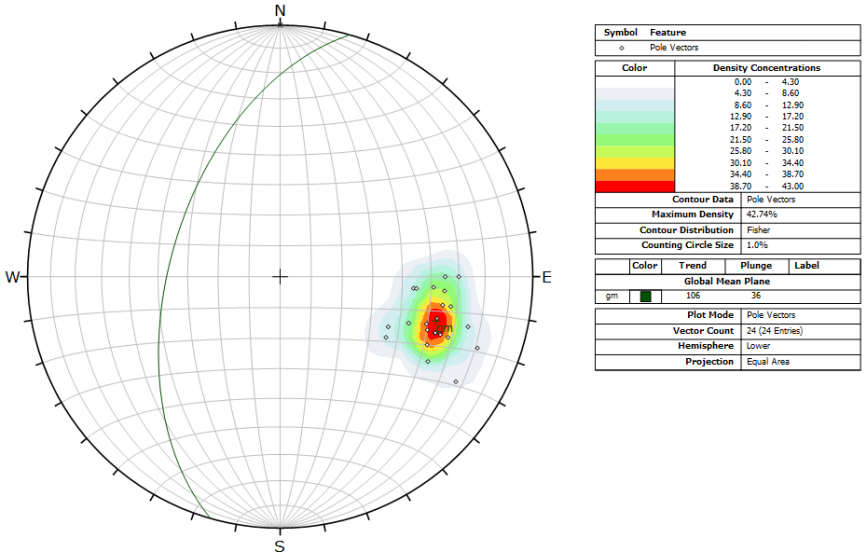


Figura 24: Estereograma da família 5.

A família 6 aflora nos setores A1, A2, A3 e B4 e conta com 10 fraturas medidas, resultando no plano médio N214/36, demonstrado na Figura 25. Possui abertura

cerrada e por isso não foi possível observar preenchimento. O espaçamento varia de 0,5 a 1 metros, sendo considerado grande e a persistência é de 10 metros, classificada como continuidade alta. A rugosidade é escalonada lisa e as paredes se encontravam úmidas, mas sem fluxo de água aparente.

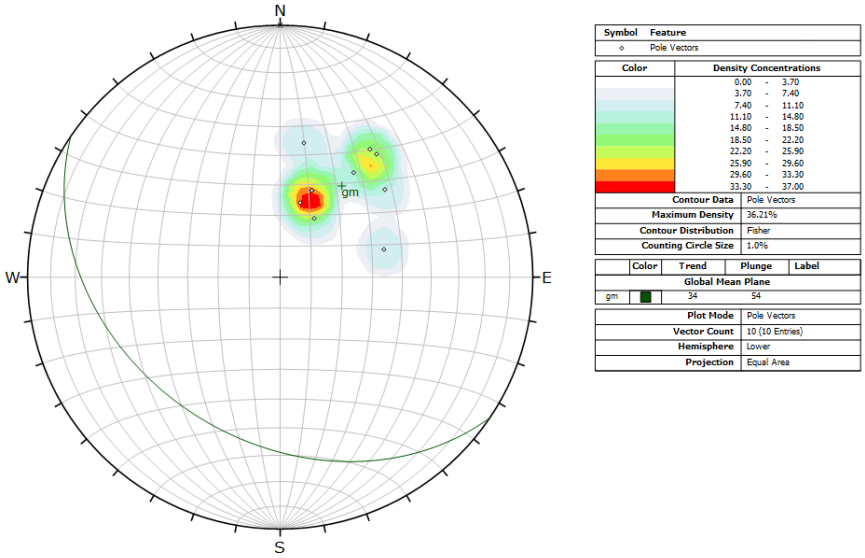


Figura 25: Estereograma da família 6.

A família 7 aflora nos setores A1, A2, A3, A4 e A5 e na verdade trata-se da ocorrência de duas falhas subparalelas na qual foi possível caracterizá-las em detalhe no setor A1 (Figura 27), entretanto devido ao fato das falhas mergulharem suavemente para nordeste, a secundária mergulhou em subsuperfície e não aflorou novamente em outros setores, ao contrário da falha principal que tem continuidade por toda frente de lavra do piso inferior. Ao todo foram obtidas 19 medidas, resultando na direção média N46/09, demonstrado na Figura 26. A abertura é de 7 cm no setor A1 e tende a fechar ao longo do talude, chegando à abertura de 0,1 cm no setor A4 e A4, no geral, pode ser classificada como fechada. O preenchimento observado é de fragmentos de rocha cominuídos que variam de tamanho desde argila até grânulos. O espaçamento observado entre as duas falhas é caracterizado como grande e a persistência é muito alta. A falha é rugosa ondulada e nela é frequente a ocorrência de paredes molhadas e com gotejamento, resultando em paredes bastante alteradas oxidada.

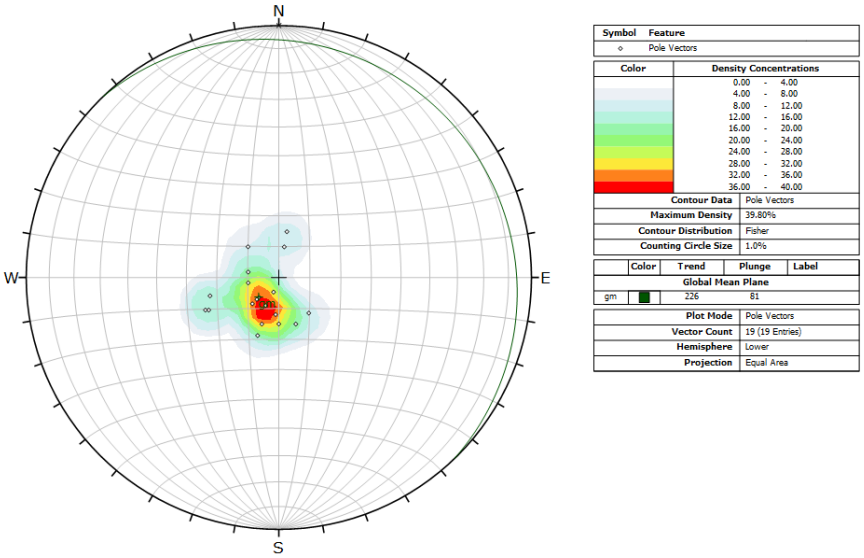


Figura 26: Estereograma da família 7.

Figura 27: (a) Falhas primária (acima) e secundária (abaixo) subparalelas no setor A1. (b) Correspondentes a família 7.

A família 8 ocorre nos setores A1, B1 e B2 e dela foram obtidas 8 medidas de fraturas, resultando no plano médio igual a N292/85, como pode ser observado na Figura 28. A abertura observada é fechada de até 0,2 cm e com material de preenchimento ausente. O espaçamento é grande, com 1 metro de média e a persistência é em média 15 metros, podendo ser classificada como alta. A rugosidade é planar lisa e com as paredes secas, ou seja, sem sinais de percolação significativa de água.

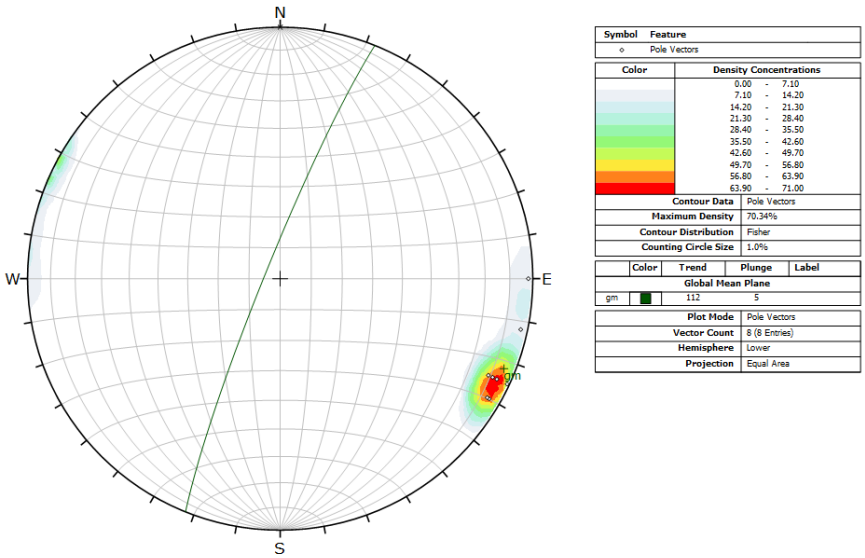


Figura 28: Estereograma da família 8.

A família 9 ocorre nos setores A1, A3, A4 e B1 das quais foram coletadas 7 medidas. Como ilustrado na Figura 29, o plano médio é de N242/74. A abertura é muito fechada e sem material de preenchimento. O espaçamento é grande e a persistência alta, com a continuidade das fraturas sendo em média 10 metros. A rugosidade é escalonada polida e com as paredes úmidas.

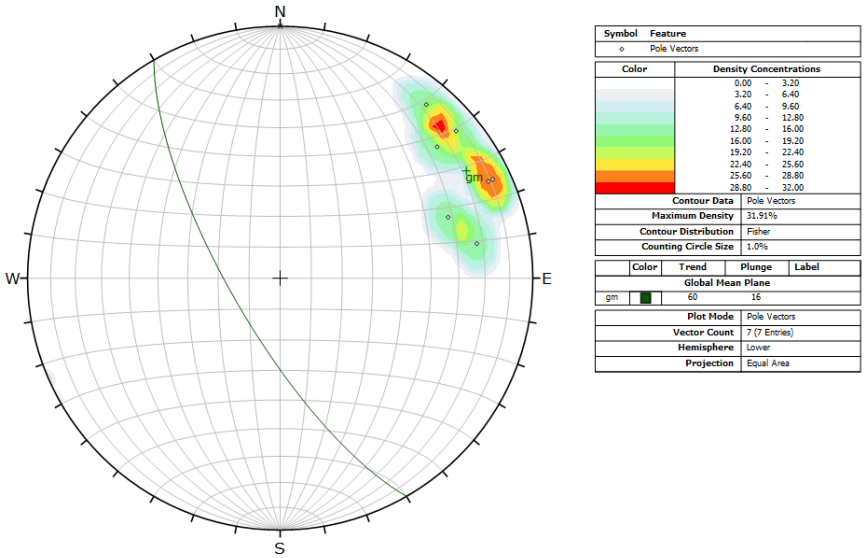


Figura 29: Estereograma da família 9.

A família 10 aflora exclusivamente no setor B5 e foram coletadas 4 medidas em campo, como resultado o plano médio é de N96/35 (Figura 30). A abertura é cerrada e por isso não foi possível identificar a existência de material de preenchimento. O espaçamento é moderado e a persistência é considerada alta. A rugosidade é plana lisa e as paredes estavam secas e sem sinais de percolação de água.

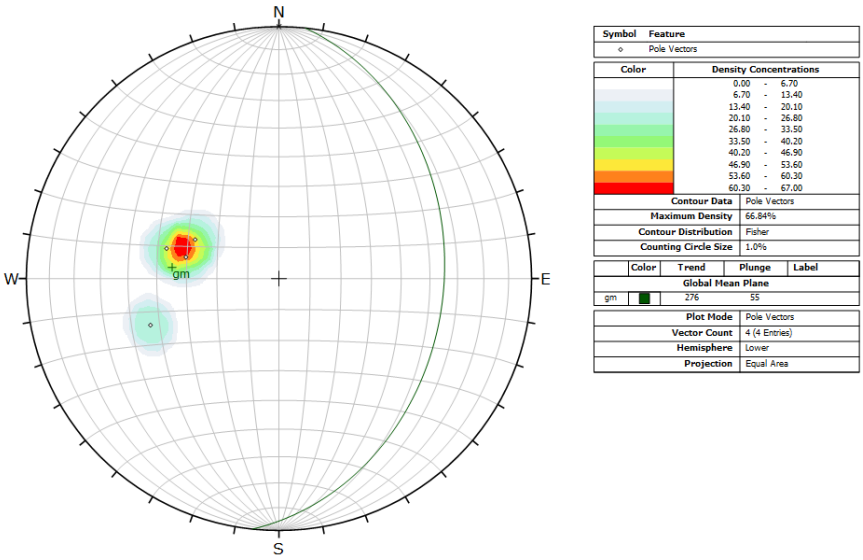


Figura 30: Estereograma da família 10.

O resultado da caracterização das descontinuidades também pode ser observado na Tabela 15.

Tabela 15: Tabela resumo das famílias de fraturas.

Família	Plano médio	Abertura	Preenchimento/ Alteração	Espaçamento	Persistência	Rugosidade	Umidade
1	N34/85	Moderadamente fechada	Fragmentos de rocha	Moderado	Alta	Escalonada lisa	W2
2	N91/80	Fechada	Calcita	Muito grande	Média	Escalonada lisa	W3
3	N119/77	Moderadamente aberta	Calcita	Grande	Alta	Ondulada lisa	W1
4	N316/58	Muito fechada	Paredes localmente alteradas	Grande	Baixa	Plana lisa	W1
5	N286/54	Muito fechada	Ausente	Grande	Alta	Escalonada lisa	W1
6	N214/36	Cerrada	Ausente	Grande	Alta	Escalonada lisa	W2
7	N46/09	Fechada	Fragmentos de rocha e paredes alteradas	Grande	Muito alta	Rugosa ondulada	W3
8	N292/85	Fechada	Ausente	Grande	Alta	Planar lisa	W1
9	N242/74	Muito fechada	Ausente	Grande	Alta	Escalonada polida	W2
10	N96/35	Cerrada	Ausente	Moderado	Alta	Plana lisa	W1

4.2.3 Classificação Geomecânica *Q-Slope*

A partir do mapeamento geológico-geotécnico e a consequente caracterização das descontinuidades, foi possível realizar a classificação geomecânica para todos os 10 setores mapeados. Como a classificação utilizada neste trabalho é o Q-slope, proposto por Barton (2015), foram inferidos para cada setor avaliado os valores RQD utilizando a Equação 7, o número de famílias de fraturas J_n aflorantes por setor, o número J_r da rugosidade da família de juntas de orientação menos favorável em cada setor, o número de alteração da junta J_a, a influência de percolação de água J_{wice} e o índice de influência do estado de tensões do maciço *SRF*.

Tabela 16: Resultados dos parâmetros da classificação geomecânica *Q-slope*.

Setor	RQD	J_n	J_r	J_a	Fator O	J_{wice}	SRF	Q
A1	95	15	3	4	0,8	0,5	5	0,39
A2	99	15	3	4	0,8	0,5	2,5	0,79
A3	100	15	1,5	4	0,8	0,5	2,5	0,40
A4	97	9	3	4	0,75	0,5	2,5	1,21
A5	100	15	2	4	0,5	0,5	2,5	0,33
B1	100	15	3	2	0,5	0,5	2,5	1,00
B2	100	15	3	3	0,25	0,5	2,5	0,33
B3	100	9	1,5	4	0,75	0,5	2,5	0,62

B4	100	15	1,5	4	0,25	0,5	2,5	0,12
B5	98	15	1,5	4	0,25	0,5	2,5	0,12

4.2.4 Análise Cinemática

Com os dados coletados em campo de forma convencional, realizou-se a análise cinemática para deslizamento planar, deslizamento em cunha e tombamento. O estudo da possibilidade de ruptura foi feito utilizando o *software Dips* 7.0 e aplicado individualmente para cada um dos 10 setores. O ângulo de atrito foi obtido a partir do método proposto por Marinos e Hoek (2000), que correlacionam as estimativas de GSI com a constante de material m_i para se obter o ângulo de atrito de maciços rochosos. Dessa forma, o ângulo de atrito estimado para este trabalho é de 35°. A análise foi feita individualmente para cada setor e apresentou os seguintes resultados:

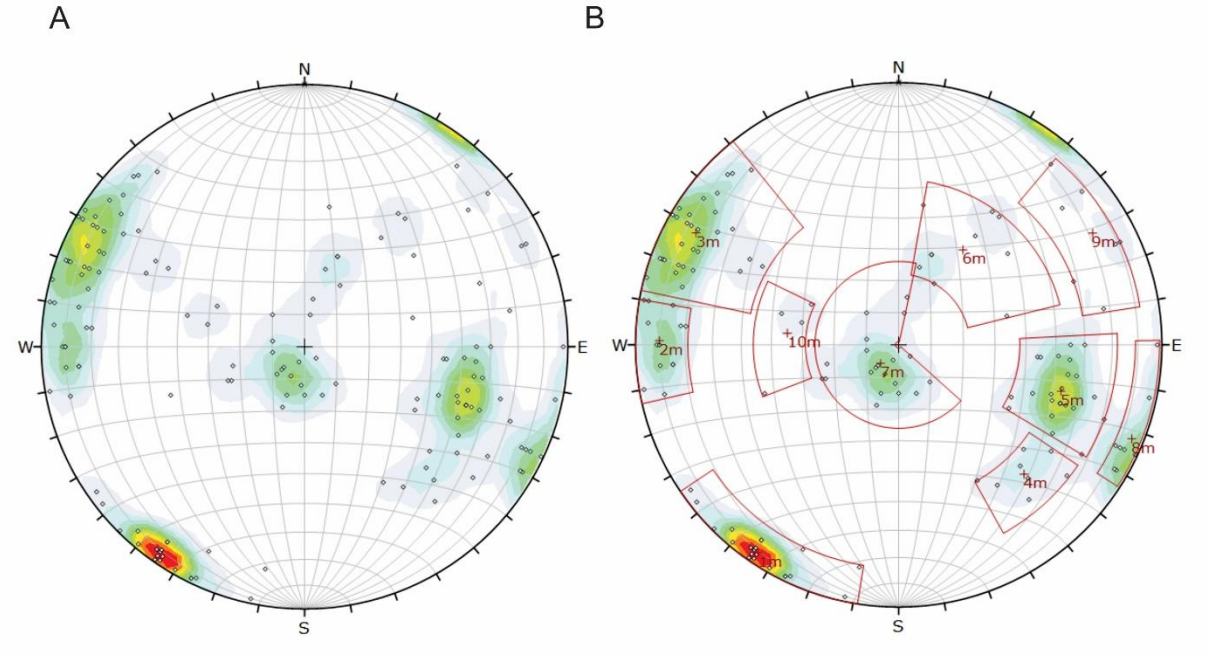


Figura 31: Estereograma de densidade das descontinuidades. (a) apenas pólos e (b) pólos e planos das principais famílias mapeadas remotamente, considerando todas as linhas de varredura.

O setor A1 apresenta direção e mergulho N46/86, extensão de 32,0 metros, altura de 20 metros e nele aflora as famílias de fraturas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 10. Durante a análise cinemática não foram observadas condicionantes para deslizamento planar, resultando no IDP igual a 0,00. Para a análise de deslizamento em cunha, o IDC

(Equação 2) resultou no valor igual a 0,13 e para tombamento o índice IT (Equação 3) é igual a 0,11.

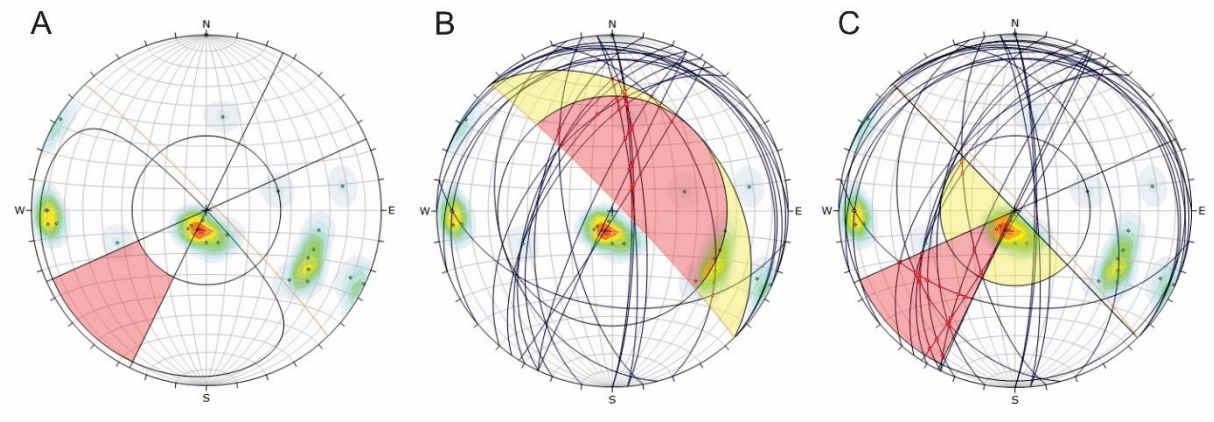


Figura 32: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor A1.

No setor A2, a direção e mergulho são N38/89, enquanto a extensão e altura são de 19,0 e 20 metros, respectivamente. Neste setor foram identificadas as famílias de fraturas 3, 5, 6, 7 e 10. Além disso, a análise de deslizamento planar não apontou condicionante para a ocorrência de deslizamento planar, já para deslizamento em cunha houve somente duas interseções críticas, resultando no IDC (Equação 2) igual a 0,01. Já para análise de possibilidade de tombamento, houve 43 interseções críticas, resultando no IT (Equação 3) igual a 0,28.

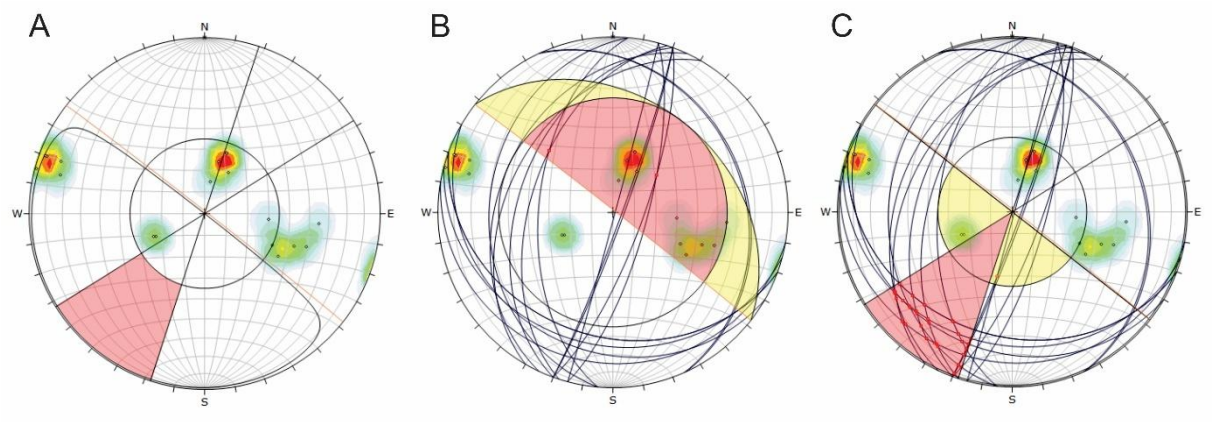


Figura 33: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor A2.

O setor A3 possui direção e mergulho de N35/89, a extensão estimada é de 33,0 metros e altura de 20 metros. Neste intervalo afloram as famílias 2, 3, 5, 6, 7 e 9. As análises cinemáticas neste setor não demonstraram a ocorrência de planos que pudessem condicionar o deslizamento planar. Entretanto, foi apontado a possibilidade

de deslizamento em cunha e tombamento, com o IDC (Equação 2) igual a 0,16 e IT (Equação 3) igual a 0,33.

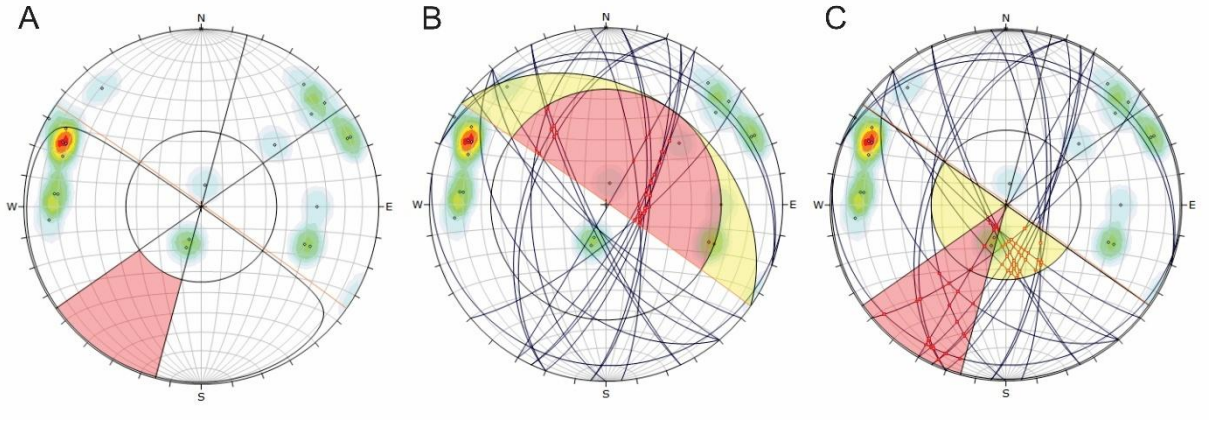


Figura 34: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor A3.

O setor A4 possui direção e mergulho N102/89 e apresenta uma extensão de 7,6 metros e altura de 20 metros. Foram medidas identificadas as fraturas pertencentes as famílias 1, 7 e 9. Não foi identificado planos que pudessem condicionar a ocorrência de rupturas planares, entretanto, a análise de deslizamento em cunha e tombamento resultaram nos IDC (Equação 2) igual a 0,14 e IT igual a 0,31 (Equação 3) respectivamente.

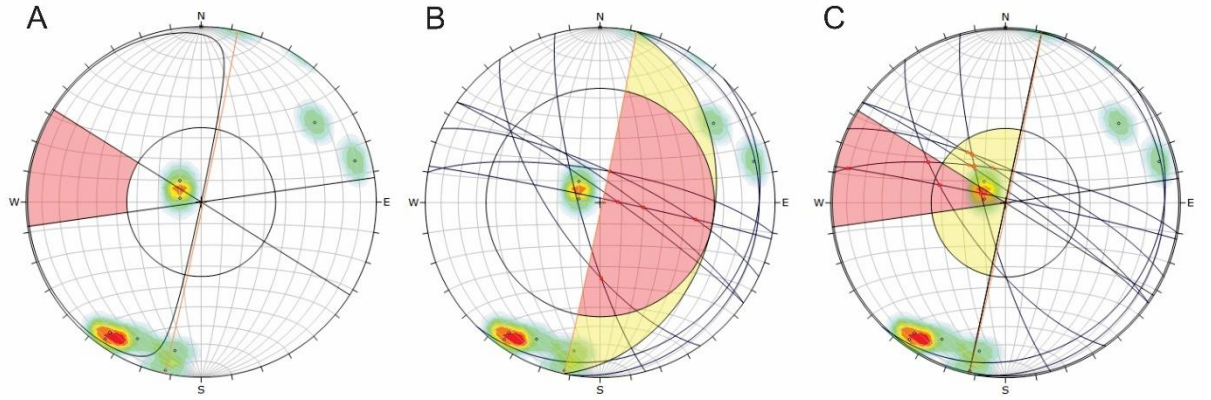


Figura 35: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor A4.

No setor A5, cuja direção e mergulho são N120/89, a extensão é de 18,4 metros e a altura é de aproximadamente 20 metros. Neste intervalo foi medido as fraturas pertencentes as famílias 1, 3, 4, 7 e 10. Excepcionalmente, entre as bancadas do primeiro andar a análise de deslizamento em cunha resultou no valor IDP (Equação 1) igual a 0,20. Além disso, também houve condicionantes a ocorrência de

deslizamento em cunha, com IDC (Equação 2) resultando em 0,38 e foram atendidas as condicionantes para a ocorrência de tombamento, com IT (Equação 3) igual a 0,23.

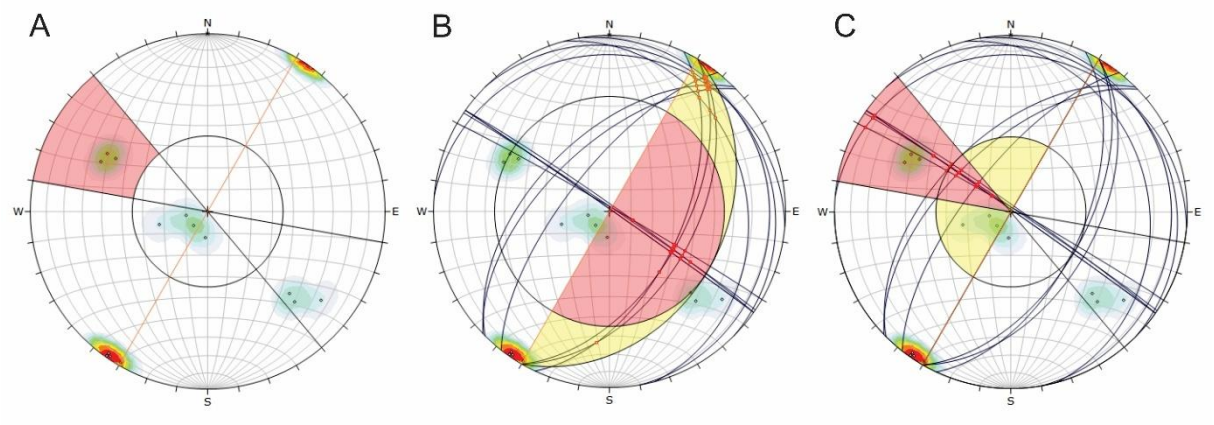


Figura 36: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor A5.

No segundo andar das bancadas, o setor B1 apresenta direção e mergulho N30/81, extensão de 36,1 metros e altura de 20 metros. As famílias de fraturas que afloram são a 1, 3, 5, 8 e 9. Não foi observado condicionantes para a ocorrência de deslizamento planar, todavia, a análise de deslizamento em cunha apontou 24 interseções críticas, resultando no IDC (Equação 2) igual a 0,23. A análise de tombamento apontou 52 interseções críticas, significando um IT (Equação 3) equivalente a 0,50.

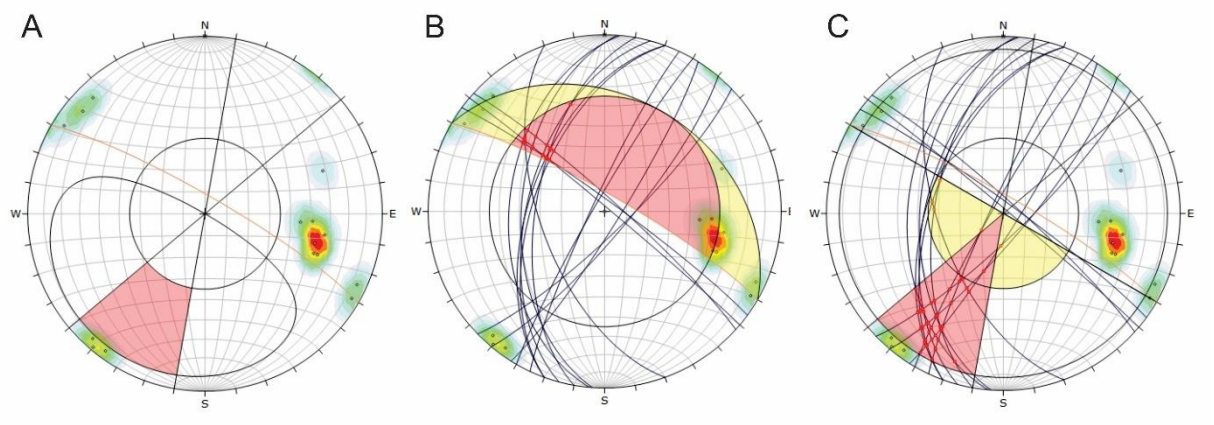


Figura 37: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor B1.

O setor B2 possui direção e mergulho N33/86, a extensão é de 19,4 metros e altura equivalente a 20 metros. Neste setor foi observado as famílias de fraturas 1, 3, 5 e 8. Durante a análise cinemática, observou-se planos que condicionam rupturas planares, apresentando o IDP (Equação 1) igual a 0,18. Para a análise de deslizamento em cunha, houve 27 interseções críticas, resultando no IDC (Equação

2) igual a 49. Também ocorreram interseções críticas que condicionam rupturas por tombamento, com isso o IT (Equação 3) é igual a 0,29.

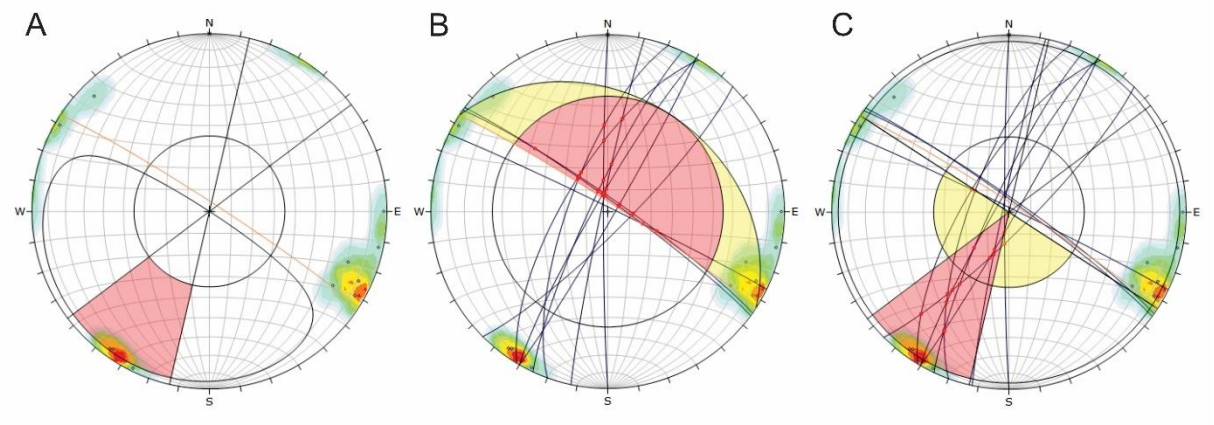


Figura 38: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor B2.

Já o setor B3 apresenta direção e mergulho de N42/80, extensão de 37,0 metros e altura de 20 metros. Neste intervalo aflora as famílias 2, 3 e 7. Durante este setor não foi observado condicionantes para a ocorrência de deslizamento planar, todavia o índice de deslizamento em cunha (Equação 2) é igual a 0,50, enquanto o IT (Equação 3) é igual a 0,10.

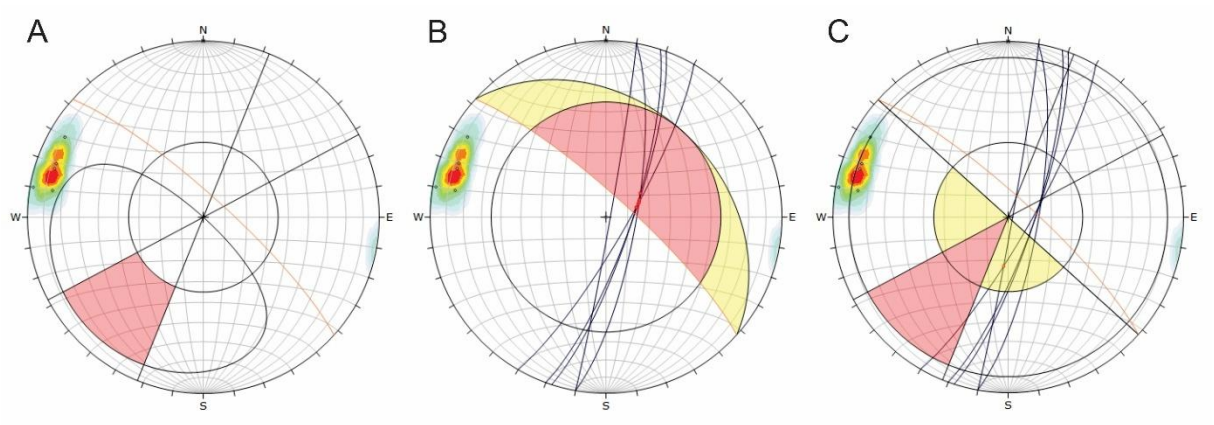


Figura 39: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor B3.

O setor B4 possui direção e mergulho N107/88, extensão de 31,5 metros e altura de 20 metros, envolvendo as famílias de fraturas 1, 3, 5 e 6. A análise cinemática para a ocorrência de deslizamento planar apontou um IDP (Equação 1) igual a 0,33, equivalente a isto, foi observado a ocorrência de interseções críticas que condicionam deslizamento em cunha, resultando no valor IDC (Equação 2) igual a 0,36. Durante a análise de tombamento, foi observado somente 1 interseção crítica, resultando no IT (Equação 3) de apenas 0,06.

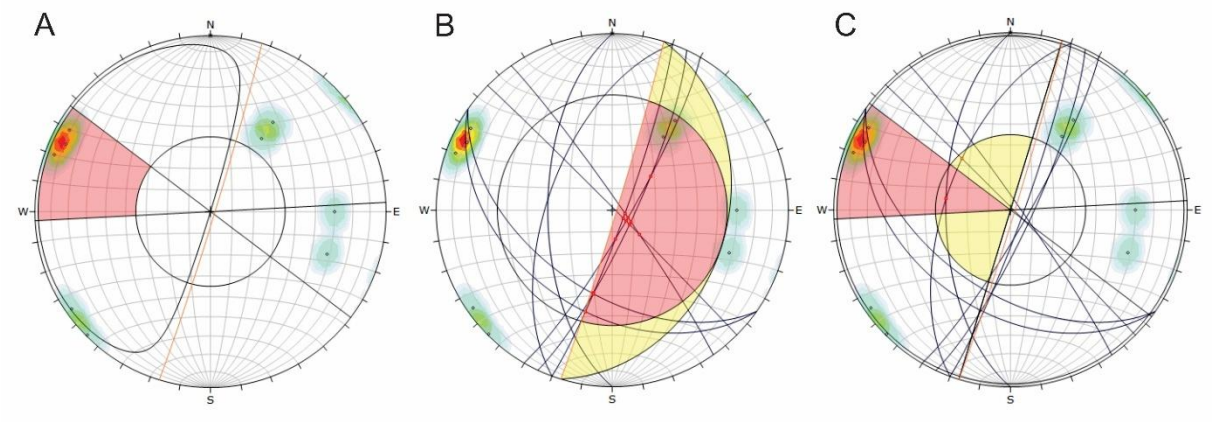


Figura 40: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor B4.

Por fim, o setor B5, cuja direção e mergulho são N113/89, apresenta extensão de 31,3 metros, altura de 20 metros e aflora as famílias de fraturas 1, 2, 3, 4 e 10. Durante a análise cinemática, foi observado o cumprimento das condicionantes para deslizamento planar, em cunha e tombamento. A análise de deslizamento planar resultou no IDP (Equação 1) igual a 0,25, quanto para a análise de deslizamento em cunha o IDC (Equação 2) é de 0,44 e IT (Equação 3) 0,21.

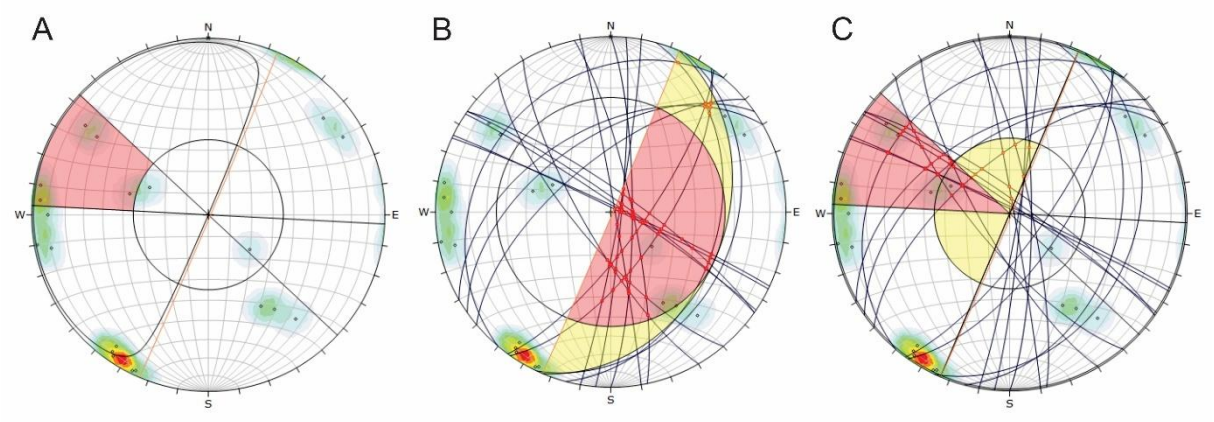


Figura 41: Análise de deslizamento (a) planar, (b) cunha e (c) tombamento no setor B5.

Os resultados das análises cinemáticas podem ser visualizados de maneira resumida na Tabela 17.

Tabela 17: Resultados obtidos com mapeamento convencional.

Setor	Direção e mergulho	Extensão	Altura	Famílias	IDP	IDC	IT
A1	N46/86	32,0	20	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 10	0,00	0,13	0,11
A2	N38/89	19,0	20	3, 5, 6, 7 e 10	0,00	0,01	0,28
A3	N35/89	33,0	20	2, 3, 5, 6, 7 e 9	0,00	0,16	0,33
A4	N102/89	7,6	20	1, 7 e 9	0,00	0,14	0,31
A5	N120/89	18,4	20	1, 3, 4, 7 e 10	0,20	0,38	0,23

B1	N30/81	36,1	20	1, 3, 5, 8 e 9	0,00	0,23	0,50
B2	N33/86	19,4	20	1, 3, 5 e 8	0,18	0,49	0,29
B3	N42/80	37,0	20	2, 3 e 7	0,00	0,50	0,10
B4	N107/88	31,5	20	1, 3, 5 e 6	0,33	0,36	0,06
B5	N113/89	31,3	20	1, 2, 3, 4 e 10	0,25	0,44	0,21

5 DISCUSSÃO

A proposta deste trabalho foi desenvolver uma análise comparativa crítica entre o mapeamento geológico-geotécnico de maneira convencional e utilizando o drone. Assim sendo, o desenvolvimento relativamente recente de *softwares* de modelamento utilizando técnicas de *Structure from Montion* como o *Agisoft Metashape* e *softwares* de análise e mapeamento de estruturas como o *Sirovision*, desempenhado um papel fundamental para a popularização do uso do drone como alternativa a atividades de campo convencionais.

É evidente que o drone é uma ferramenta bastante ágil, capaz de coletar grande volume de informações estruturais em um curto intervalo de tempo. No caso deste trabalho, centenas de fotos foram capturadas em menos de uma hora de aerolevantamento. Em comparação, a realização de mapeamento de modo tradicional demandou dois dias de campo, totalizando uma carga horária de 14 horas de atividade.

Apesar disso, o nível de detalhamento dos parâmetros estruturais obtidos com drone é consideravelmente menor quando comparado ao método convencional. Com a fotogrametria foi possível obter informações de direção e mergulho, persistência e espaçamento das descontinuidades, além de RQD. Contudo, não foi possível inferir sobre rugosidade, alteração, percolação de água, tipo de material de preenchimento e, obviamente, a dureza do maciço. A ausência destes parâmetros impossibilitou a realização da classificação geomecânica *Q'* nos setores avaliados remotamente, permitindo somente a separação das famílias de fraturas e análise cinemática.

Foram mapeadas com drone 8 famílias de fraturas e a partir do mapeamento de campo convencional foi possível validar a existência de todas elas, além de identificar mais duas famílias pouco penetrativa (Tabela 18). Comparando a direção dos planos médios de cada família, observou-se que não havia variação da direção média maior do que 21°, sendo que a oscilação média entre as famílias equivalentes foi de 11°. Entretanto, para esta análise não foi considerada a família 7, visto que

resultou em 89° de diferença na direção do plano médio obtido com drone e de modo convencional. Acredita-se que esta variação anômala se deve ao fato de as falhas serem sub-horizontais e onduladas, representando uma grande variação de direção e dificultando o traçado preciso no *sirovision*, contribuindo para que as medidas tenham alto grau de dispersão.

Percebe-se também que, com exceção das famílias 6, a diferença de mergulho entre famílias equivalentes é bastante baixa, não ultrapassando os 7°. Acredita-se que a variação mais significativa no mergulho da família 6 ocorreu porque a direção dos planos de descontinuidade é voltada para sudeste, ou seja, para o interior da face do talude, dificultando a visualização e o traçado dos planos de fraturas no modelo tridimensional. Essa ideia é corroborada pelo fato de que, no Sirovision, foram identificados apenas 4 planos de fraturas pertencentes à família 6.

Tabela 18: Comparação dos planos médios entre as famílias de fraturas equivalentes mapeadas com drone e de maneira tradicional.

Plano médio das famílias de fraturas			
Mapeamento com drone		Mapeamento convencional	
Família 1	N32/86	Família 1	N34/85
Família 2	N103/80	Família 2	N91/80
Família 3	N131/80	Família 3	N119/77
Família 4	N296/51	Família 4	N316/58
Família 5	N265/55	Família 5	N286/54
Família 6	N222/57	Família 6	N214/36
Família 7	N317/6	Família 7	N46/09
Família 8	N290/83	Família 8	N292/85
-	-	Família 9	N242/74
-	-	Família 10	N96/35

A persistência inferida para as famílias de fraturas mapeada com o sirovision foi definida como média de forma quase unanime, exceto pela família 7 cuja continuidade foi classificada como muito alta. Todavia, a persistência inferida em campo apresentou maior dispersão nos resultados, com a famílias 4 e 2 classificadas com persistência baixa e média respectivamente, as famílias 3, 5, 6, 8, 9 e 10 como com persistência alta e a família 7 com persistência muito alta. Esta diferença de resultados pode ser explicada ou pelo fato de que em campo é possível observar a continuidade das fraturas mesmo quando elas estão pouco evidentes, de maneira que não seriam vistas no modelo tridimensional, ou porque a persistência foi somente

inferida visualmente durante o mapeamento convencional, contribuindo para um resultado menos preciso e com maior variação.

Comparando os resultados obtidos a partir da análise de deslizamento planar, o drone identificou um Índice de Deslizamento Planar (IDP) superior a 0,1 apenas no setor B1. Por outro lado, o mapeamento convencional identificou índices de deslizamento planar superiores a 0,1 nos setores A5, B2, B4 e B5. Cabe destacar que o mapeamento convencional não apontou a possibilidade de deslizamento planar no setor B1, provavelmente porque os planos de fraturas apresentaram um mergulho ligeiramente superior à inclinação da face do talude, mascarando a possibilidade desse tipo de ruptura.

Os resultados da análise de deslizamento em cunha se mostraram pouco mais equivalentes, pois com drone foi identificado o IDC superior a 0,1 em 7 dos 10 setores mapeados, de modo que os setores A1, B4 e B5 foram os únicos a apresentarem o valor índice inferior a 0,1. Já os resultados de campo convencional apontaram a possibilidade de deslizamento em cunha em todos os setores, exceto o A2 que resultou no IDC igual 0,01.

Ao todo, seis setores demonstraram a possibilidade de ocorrência de ruptura por tombamento a partir da análise feita com drone, sendo os setores A2, A3, A4 e B3. Todavia, a mesma análise para os resultados de campo convencional demonstrou o IT superior a 0,1 em 9 dos 10 setores mapeados, com somente o setor B4 como exceção.

Tabela 19: comparação entre os resultados de índice de deslizamento, deslizamento em cunha e tombamento. Em vermelho, os índices superiores a 0,1.

Comparativo dos índices de ruptura						
Setor	Resultados com drone			Resultados convencional		
	IDP	IDC	IT	IDP	IDC	IT
A1	0	0,07	0,19	0,00	0,13	0,11
A2	0	0,17	0,07	0,00	0,01	0,28
A3	0	0,12	0,04	0,00	0,16	0,33
A4	0	1,0	0	0,00	0,14	0,31
A5	0	0,14	0,25	0,20	0,38	0,23
B1	0,33	0,61	0,22	0,00	0,23	0,50
B2	0	0,32	0,14	0,18	0,49	0,29
B3	0	0,14	0,08	0,00	0,50	0,10
B4	0	0,04	0,36	0,33	0,36	0,06
B5	0	0,09	0,47	0,25	0,44	0,21

Os resultados demonstram que o drone pode ser uma ferramenta bastante útil durante o mapeamento geológico-geotécnico, pois além de ser possível coletar um grande volume de informações de maneira expedita, também pode ser traçado as descontinuidades em lugares onde não seria viável obter medidas da forma tradicional. Um exemplo disso é o setor B3, que durante o mapeamento de campo observou-se planos de descontinuidades aflorando muitos metros acima do alcance, mas que virtualmente já haviam sido traçadas virtualmente. É importante considerar que a utilização do drone fornece mais segurança, pois nesses casos é dispensada a necessidade do profissional se colocar ao pé de taludes rochosos que estejam na iminência de rupturas.

Todavia, algumas dificuldades na utilização do drone foram identificadas, como a necessidade de *hardwares* mais robustos para processarem o alto volume de informações coletadas. O tempo necessário para processar os dados pode ser significativamente longo, variando conforme as especificações técnicas do computador e a resolução desejada para o modelo, podendo alcançar até 12 horas de processamento.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do drone para realizar o mapeamento geológico-geotécnico mostrou-se bastante eficaz na identificação das famílias de descontinuidades, sendo identificadas 8 das 10 famílias de descontinuidades observadas em campo. Apesar disso, os resultados dos índices de rupturas obtidos por meio do drone e pelo método convencional, de forma geral, demonstraram pouca compatibilidade, exceto nos resultados do IDC.

Embora seja possível gerar modelos de altíssima resolução que permitem a identificação dos aspectos das descontinuidades com grande precisão, ainda é muito difícil caracterizar, com o mesmo nível de detalhe do mapeamento convencional, uma fratura ou família de fraturas. Elementos como estrias, material de preenchimento, evidências de percolação de água, entre outros, continuam sendo difíceis de identificar em modelos virtuais de afloramento.

Os valores de RQD obtidos tanto pelo drone, quanto pelo mapeamento convencional foram bastante altos, com a maioria atingindo o 100% e classificando o maciço rochoso como excelente. Confirmando o pensamento de Barton (1974) de que

somente a classificação RQD usada de forma isolada não é suficiente para definição da estabilidade do maciço rochoso.

Por isso, acredita-se que a tecnologia de drones pode ser mais bem aproveitada no âmbito da geologia quando utilizada em conjunto com métodos já estabelecidos. Uma boa forma de complementar o mapeamento geológico-geotécnico seria realizar um levantamento aerofotogramétrico preliminar, processar os dados obtidos, traçar as descontinuidades e realizar a análise cinemática. Já tendo informações sobre as principais famílias de fraturas, direção, mergulho e altura dos taludes, além de conhecer os intervalos que apresentam os maiores índices de rupturas, o geólogo pode atuar em campo de forma muito mais objetiva, otimizando o tempo que seria gasto na medição de dimensões de setores ou na determinação da altura e direção do talude.

REFERÊNCIAS

Admassu, Y. 2010. Developing design methodology for cut slopes in Ohio. Tese de Doutorado. Kent State University. 645p.

BAR, N; Barton, N. **Q-Slope: Rock Slope Engineering 10 Years on**. Springer. Oslo, Noruega. Ago. 2024.

Barton, N; LIEN, R; LUNDE, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. **Journal of Soil Mechanics and Foundations**, Nova York, v.87, n.2, p.71-99, 1974.

BARTON, N. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses: International Society for Rock Mechanics. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics.** Vol 15, pp. 319-368. Jan. 1978.

Bieniawiski, Z. T. Engineering Classification of Jointed Rock Masses. **The Civil Enginering in South Africa**. v. 15, pp. 335-344, dez. 1974.

BIENIAWSKI, Z. T. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. Nova York: John Wiley & Sons, 1989.

CAMPOS, F. Estudo da Estabilidade de um Talude de Filito na Região Metropolitana de Belo Horizonte. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2020.

CARDOSO, L. Roteiro e Normas Gerais para Ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. Jun. 2020.

CERRI, R.I., Reis F.A.G.V., Gramani, M.F., Rosolen V., Luvizotto G.L., Giordano L.C., Gabelini B.M. 2018. Assessment of landslide occurrences in Serra do Mar mountain range using kinematic analyses. Environmental Earth Sciences, 77:325-341.

DEERE, D. U. Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes. **Rock Mechanics and Engineering Geology**, v. 1, n. 1, p. 16–22, 1 jan. 1963.

FALEIROS, M. F. Evolução de terrenos tectono-metamórficos da Serrania do Ribeira e Planalto Alto Turvo (SP, PR). Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências. São Paulo, 318p. 2008.

FALEIROS, F. M., Ferrari, V. C., Costa, V. S., Campanha, G. A. C. Geoquímica e Petrogênese de Metabasitos do Grupo Votuverava (Terreno Apiaí, Cinturão Ribeira Meridional): Evidências de uma Bacia Retroarco Calimiana. Boletim IG USP, série científica. 11:135-155. 2011.

FILHO, F. J. P. D. Estudos da Influência de Parâmetros Geomecânicos na Determinação do Rock Mass Rating. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Araxá. 2019.

FIORI, A. P. **Fundamentos de Mecânica dos Solos e das rochas** - Aplicações na estabilidade de taludes. São Paulo, Oficina de Textos, 576 p. 2015.

FREITAS, S. B. N. Caracterização Geomecânica e Classificações RMR (Bieniawsky) e SMR (Romana) de Maciços Rochosos em Taludes do Funchal. Dissertação de Mestrado.

HEILBRON, M., PEDROSA-SOARES, A. C., CAMPOS NETO, M., SILVA, L. C., TROUW, R. A. J. & JANASI, V. C. A Província Mantiqueira: In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C. D. R. & Brito Neves, B. B. (eds) O Desvendar de um Continente: A Moderna Geologia da América do Sul e o Legado da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Beca, São Paulo, 203–234. 2004.

HOEK, E., & Bray, J. W. Rock Slope Engineering. London, United Kingdom: Institution of Mining and Metallurgy, 358p. 1981.

HUDSON, J. A., S. D. PRIEST. Discontinuities and Rock Mass Geometry. Great Britain. Vol. 16, pp. 339-362. 1979.

ISRM. Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression.Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech..15, 47-51. 1977.

ISRM. Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15, 319-368. 1978.

ISRM. Rock Characterization Testing and Monitoring. Brown, E., Ed., Pergamon Press, Oxford, 211 p. 1981

LOZANO, J. F., GUTIÉRREZ-ALONSO G. Aplicaciones Geológicas de los Drones. Revista de la Sociedad Geológica de España. Vol. 29, pp. 89-105. 2016.

MARINOS, P., HOEK, E. GSI. A Geologically Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation. National Technical University of Athens. 2000.

NORMANDO, Lanna C.; SILVEROL, Aline C.; BORN, Cristiano R.; et al. **Mecânica das Rochas**. Porto Alegre: SAGAH, 2021. *E-book.* p.Capa. ISBN 9786556901657. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786556901657/. Acesso em: 06 dez. 2024.

Romana M. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. Proceedings of the International Symposium on the Role of Rock Mechanics in Excavations for Mining and Civil Works. International Society of Rock Mechanics, Zacatecas, pp. 49-53. 1985.

Siga Jr, O. Domínios Tectônicos do sudeste do Paraná e nordeste de Santa Catarina: Geocronologia e evolução crustal. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências, 212p. 1995.

SOARES, M. A. da R. Caracterização de descontinuidades em pedreira por meio de extração semiautomática com o uso de drone. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2023.

SOARES, G. B., PISSATO, E., LIMA, L. R. Utilização de Método Gráfico para Classificação Geomecânica Pelo Sistema Slope Mass Rating (SMR) – Aplicação na Mina de Santa Luz (BA). Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. 2014.

TAKANO, C. E. Extração automatizada de dados estruturais em maciço rochosos a partir de fotogrametria com drone. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2022.

VALLEJO, L. I. G., MERCEDES, F., ORTUNO, L., OTEO, C. Ingeniería Geológica. Madrid. 2002.

ZENÓBIO, A. A. Avaliação Geológica-Geotécnica de Encostas Naturais Rochosas por meio de Classificações Geomecânicas: Área Urbana de Ouro Preto (MG) Escala1:5.000. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Carlos 2000.