

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES ROCHOSOS COM USO DE DRONE NA PEDREIRA CENTRAL, CAMPO LARGO (PR)

Filipe Bento de Godoi ¹; Adriana Ahrendt Talamini ²; Andres Miguel Gonzalez Acevedo³

Resumo – O presente trabalho apresenta um estudo sobre a utilização de drones para o mapeamento geológico-geotécnico e a análise cinemática de taludes rochosos na Pedreira Central/PR. O objetivo é discutir os principais resultados obtidos a partir do mapeamento realizado com o uso dessa tecnologia. A metodologia empregada envolve o levantamento aerofotogramétrico com drone, o processamento de dados para a geração de um modelo 3D da frente de lavra, o mapeamento remoto de dados estruturais – como orientação e espaçamento de descontinuidades – e a realização de análises cinemáticas para avaliar os riscos de ruptura planar, em cunha e por tombamento. Os resultados demonstram um elevado potencial de instabilidade por deslizamento em cunha e por tombamento em diversos setores, enquanto o risco de deslizamento planar foi identificado apenas no setor B1. A análise do índice RQD classificou os setores entre muito ruim e regular, indicando uma baixa qualidade do maciço rochoso. Dessa forma, os drone se mostram uma ferramenta promissora, pois permitem a coleta de um grande volume de dados em um curto intervalo de tempo, especialmente em áreas de difícil acesso. No entanto, ainda há limitações na obtenção de informações detalhadas, resultando ausência de parâmetros importantes como rugosidade e material de preenchimento. Por isso, acredita-se que o uso de drone em mapeamento geológico-geotécnico é mais bem aproveitado quando realizado de forma conjunta com métodos de mapeamento convencional, garantindo maior precisão e confiabilidade nos estudos geotécnicos.

Abstract – This paper presents a study on the use of drones for geological-geotechnical mapping and kinematic analysis of rock slopes in Pedreira Central/PR. The objective is to discuss the main results obtained from the mapping carried out using this technology. The methodology employed involves aerial photogrammetric surveying with drone, data processing to generate a 3D model of the mining front, remote mapping of structural data – such as orientation and spacing of discontinuities – and kinematic analyses to assess the risks of planar, wedge and overturning failure. The results demonstrate a high potential for instability due to wedge sliding and overturning in several sectors, while the risk of planar sliding was identified only in sector B1. The analysis of the RQD index classified the sectors between regular and very poor, indicating a low quality of the rock mass. Thus, drones prove to be a promising tool, as they allow the collection of a large volume of data in a short period of time, especially in areas of difficult access. However, there are still limitations in obtaining detailed information, resulting in the absence of important parameters such as roughness and fill material. Therefore, it is believed that the use of drones in geological-geotechnical mapping is best used when carried out in conjunction with conventional mapping methods, ensuring greater precision and reliability in geotechnical studies.

Palavras-Chave – Drone; mapeamento geológico-geotécnico; análise cinemática.

¹ Geól., Universidade Federal do Paraná, (41) 99719-0213, filipebento.godoi@gmail.com

² Geól., Dra., Universidade Federal do Paraná, (41) 3361-3384, adrianatalamini@ufpr.br

³ Eng. Geól., Dr., Universidad Central de Venezuela, (41) 99201-7080, amga@intertechne.com.br

1. INTRODUÇÃO

A realização do mapeamento geológico-geotécnico, visando à compreensão das propriedades geomecânicas do maciço rochoso, é uma etapa fundamental em projetos de engenharia. Esse processo é essencial tanto para a execução de obras de infraestrutura quanto construção de rodovias e atividades de mineração. Para garantir a estabilidade de taludes rochosos, é comum a atuação do geólogo-geotécnico em campo, caracterizando as principais estruturas que condicionam rupturas. A observação dos parâmetros geotécnicos e a consequente análise de estabilidade são indispensáveis para o planejamento e execução de obras, permitindo a avaliação das características geomecânicas da rocha, minimizando riscos materiais e protegendo vidas humanas. No entanto, em certos contextos, a realização do mapeamento convencional pode ser dificultada, seja devido à instabilidade avançada do maciço rochoso, à inacessibilidade de descontinuidades situadas em grandes alturas ou à limitação de tempo para a coleta completa dos dados em grandes extensões de frente de mapeamento. Nesse cenário, cresce o interesse por ferramentas que possam auxiliar o método clássico de mapeamento geológico-geotécnico. Com o avanço das geotecnologias, o uso de drones tem se destacado como uma solução eficaz para a obtenção de dados estruturais de forma remota e detalhada. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo apresentar e discutir os principais resultados obtidos a partir do mapeamento geológico-geotécnico realizado com o uso de drone em duas bancadas da frente de lavra da Pedreira Central (PR), bem como os resultados das análises cinemáticas associadas.

1.1. Caracterização de maciços rochosos

Segundo Fiori (2015), o maciço rochoso é definido como um meio sólido descontínuo, interrompido por descontinuidades que separam blocos de rocha discretos. Nesse caso, o conceito de descontinuidades é importante, pois elas 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. Segundo Normando *et al.* (2021), as características das descontinuidades são fundamentais para entender o comportamento do maciço rochoso, pois interferem diretamente na resistência geomecânica.

Classificações geomecânicas de maciços rochosos, tais como os sistemas RMR de Bieniawski (1974), Q de Barton (1978), Romana (1985) e Q-Slope (revisado por Bar & Barton, 2024), são usualmente utilizadas para enquadrar o maciço rochoso em classes de qualidade e a partir daí indicar soluções para os diferentes comportamentos geomecânicos esperados e orientar soluções de engenharia para sua estabilização, contenção e até mesmo para as formas mais adequadas de escavação.

Para analisar diretamente a estabilidade de rupturas planares, em cunha ou por tombamento em taludes rochosos, utiliza-se a análise cinemática, a qual leva em consideração a correlação entre planos de descontinuidade, plano do talude de escavação e ângulo de atrito das descontinuidades. A análise é realizada através de representação estereográfica, conforme recomendado por diferentes autores, destacando-se: Goodman (1989), Fiori & Carmignani (2009) e Fiori (2015).

Admassu (2010) sugere uma análise quantitativa para as descontinuidades condicionantes de movimentos de massa obtidas através da análise cinemática. Ele propõe a utilização da razão entre o número total de planos e/ou interseções críticas e o número total de descontinuidades medidas, cujos resultados geram índices de estabilidade para rupturas planares (IDP), rupturas em cunhas (IDC) e tombamentos (IT). O autor adotou em seu trabalho o índice máximo entre 0,1 e 0,3 para a ocorrência de rupturas; ou seja, acima desses limites, a estabilidade passa a ser inaceitável.

1.2. Drone aplicado às geociências

Conforme Lozano e Alonzo (2016), inicialmente o uso de drones era restrito à obtenção de imagens aéreas e à geração de Modelos Digitais de Terrenos (MDT). 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*), ampliou significativamente 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 diretamente georreferenciadas. Aliado a isso, atualmente é possível fazer modelos tridimensionais de terrenos e objetos a partir de sobreposição de uma série de imagens de duas dimensões georreferenciadas levantadas a partir de um sensor em movimento (Viana, 2015). Esta técnica é conhecida como *SfM* (*Structure from Motion*), e com ela 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 algoritmo *SfM* tem a função de gerar dois produtos: o reconhecimento da posição e parâmetros da câmera e geração de nuvem de pontos 3D, formando a geometria da cena.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

2.1. Localização

A área de estudo encontra-se dentro da Pedreira Central, que fica localizada no município de Campo Largo/PR, próximo à divisa com Curitiba (Figura 1). Como base para os estudos foram selecionadas duas bancadas, localizadas em uma porção temporariamente desativada a sudeste da Mina, conforme indicado na Figura 1. As bancadas possuem cerca de 230 metros de extensão e orientação aproximada de N55W.

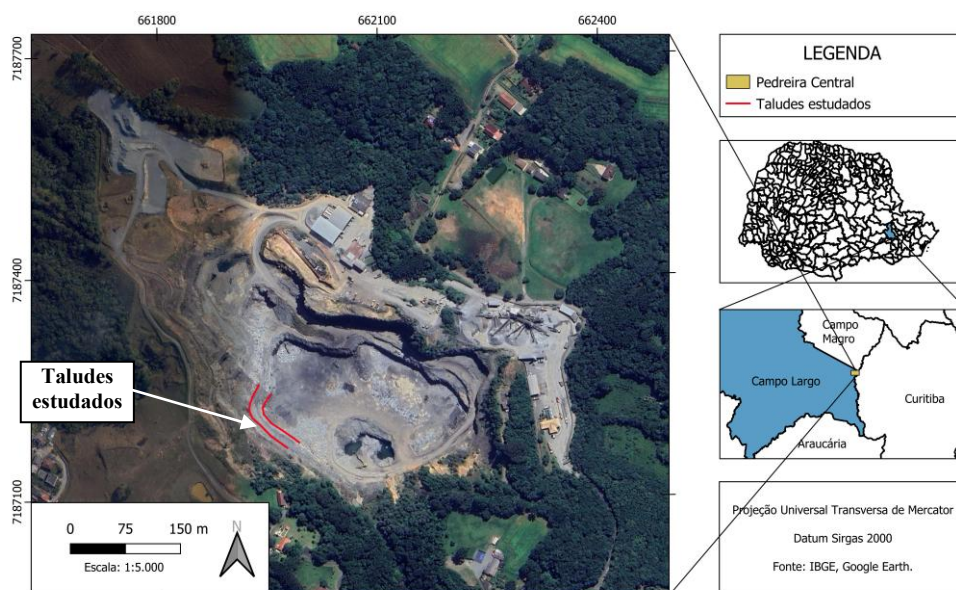


Figura 1. Localização da área de estudo.

2.2. Aspectos Geológicos

A Pedreira Central, área de estudo, é constituída predominantemente por gnaiss são, com relativa variação composicional e granulométrica. Além disso, ocorrem dois diques subparalelos aflorando da mina, com um deles fazendo parte do intervalo onde se realizou o mapeamento geológico-geotécnico.

O gnaiss 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.

O dique de direção 235/75 trata-se de um gabro 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.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de estudos utilizada na pesquisa compreendeu três etapas principais, a saber: i. revisão bibliográfica, definição e reconhecimento da área de estudo; ii. Realização do aerolevanteamento com drone, seguido do processamento destes dados; iii. Setorização dos taludes estudados e definição das linhas de varredura ou *scanlines* para classificação do maciço; iv. Obtenção dos dados estruturais e RQD através da imagem e, v. Realização da análise cinemática para identificar as possibilidades de instabilização do talude em cada setor, bem como a avaliação dos resultados obtidos entre os diferentes setores mapeados.

3.1. Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica abordou temas envolvendo o mapeamento geotécnico e mecânica das rochas, tendo sido consultados os trabalhos de Barton (1974), Bieniawski (1989) e Palmstrom (2005), bem como os métodos de mensuração e análise dos parâmetros geotécnicos, incluindo os tipos e características geotécnicas de descontinuidades, conforme descrito em ISRM (1977); Vallejo (2002) e Normando *et al.* (2021). Além disso, o embasamento teórico voltado para análise cinemática e os tipos de rupturas em maciços rochosos foi obtido por meio dos trabalhos de Hoek e Bray (1981), Admasu (2010), Fiori (2015) e Cerri (2018), entre outros.

A busca por trabalhos científicos envolvendo o uso de drone e geotecnologias teve como objetivo fundamentar a compreensão sobre as qualidades e limitações da ferramenta, servindo de base para a tomada de decisões durante a execução do levantamento aerofotogramétrico e escolha dos *softwares* computacionais para o processamento dos dados e análises. As principais referências foram Takano (2022) para aerolevanteamento e processamento de dados, e Lozano & Alonso (2016) e Viana (2015) para a evolução do drone no meio científico.

3.2. Levantamento aerofotogramétrico

O levantamento aerofotogramétrico foi realizado com o drone *DJI Air 2S* (Tabela 1), operado manualmente pelo aplicativo *DJI Fly*. Considerando que 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, o voo foi iniciado por volta das 10:00 horas da manhã em um dia parcialmente nublado e sem ocorrência de chuva. A tomada de fotos durante o aerolevanteamento foi feita de forma totalmente manual e adotando uma taxa de sobreposição em relação a imagem anterior entre 70 e 80%. As fotografias foram obtidas de duas maneiras distintas: inicialmente, foram capturadas imagens mais próximas das bancadas, destacando os detalhes das estruturas mapeáveis. Em seguida, um novo aerolevanteamento foi realizado a uma distância maior do que a anterior, a fim de captar imagens com uma visão geral da área. No total, o levantamento aerofotogramétrico foi realizado de forma expedita, durando aproximadamente uma hora.

Tabela 1. Especificações do drone *DJI Air 2S* e câmera utilizados. 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	
Pixels 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

3.3. Processamento dos dados

Utilizando-se da técnica SfM, foi possível elaborar o modelo tridimensional com a utilização do *software Agisoft Metashape (Agisoft LLC/Russia – Trial de 30 dias)*. A geração do modelo foi relativamente simples e pode ser resumida nas seguintes etapas: Importação de fotos para o *software*, alinhamento das fotos, criação de nuvem de pontos, criação do modelo e criação de textura. Finalizada a geração do modelo tridimensional, foi então exportado em formato .obj (objeto 3D – *Wavefront*) para posteriormente importá-lo no *software Sirovision (Datamine®)*.

Após a importação do modelo no *Sirovision (Datamine®)* foi definido a setorização das bancadas, ou seja, intervalos de análise individualizados conforme o padrão de fraturamento dos taludes de escavação (Figura 3). Os setores de amostragem foram definidos por análise visual, tendo como critérios o padrão de fraturamento, a direção da face do talude e os diferentes litotipos. Para cada setor foi definida uma linha de varredura ou *scanline*, conforme método proposto por Read & Stacey (2022), que serviu como referência para quantificação dos dados estruturais e geotécnicos.

Os principais parâmetros que foram observados e mensurados a partir do levantamento com drone, sendo em uma descontinuidade ou um conjunto delas foram: orientação, persistência ou continuidade (ISRM, 1981), espaçamento (ISRM, 1977) e RQD (Palmstrom, 2005).

No *software Sirovision (Datamine®)*, o mapeamento das descontinuidades foi realizado por meio da ferramenta “*Trace*”, que permitiu delinear as estruturas com sucessivos cliques do botão esquerdo do *mouse* na superfície das descontinuidades identificadas na imagem. O método é demonstrado na Figura 2. Esse processo possibilita a obtenção da direção e do mergulho das estruturas. Para cada plano mapeado, foi gerada uma linha na tabela “*Table View*” com informações como tipo de descontinuidade, persistência e atitude do plano (*dip* e *dip direction*).



Figura 2. Representação das descontinuidades mapeadas com “*Trace*”, no *Sirovision (Datamine®)*.

Após o mapeamento no *Sirovision*, os dados estruturais foram organizados e inseridos no software *Dips 7.0 (Rocscience®)*, em formato *dip/dip direction*, para geração do diagrama de densidade. Com isso, foi possível identificar as diferentes famílias de descontinuidades (Figura 4) a partir das concentrações claras de polos (pontos pretos), indicando conjuntos de descontinuidades com orientação semelhante, caracterizando uma família estrutural. Também foi possível realizar a análise cinemática para verificar a possibilidade de deslizamento planar, deslizamento em cunha e tombamento de blocos direcional para cada setor individualmente. Essa análise foi realizada com base nas recomendações de Fiori e Carmignani (2009).

Como o levantamento por drone não permite a obtenção direta dos parâmetros de resistência do maciço, foi utilizado, para a análise cinemática, o círculo de atrito de 30°, valor considerado padrão quando não há medições diretas disponíveis. A direção e o ângulo de mergulho do talude utilizados na análise foram determinados com a ferramenta “*Plane*” do *Sirovision (Datamine®)*, conforme descrito anteriormente.

Durante a interpretação, adotou-se a análise quantitativa proposta por Admassu (2010), que consiste em calcular a razão entre o número total de planos ou interseções críticas pelo número total de descontinuidades ou interseções. Embora o autor tenha utilizado um limite máximo de 0,3 para esse índice, neste estudo foi adotado um valor máximo mais conservador de 0,1, visando a uma identificação mais precisa e robusta das possíveis instabilizações nos taludes rochosos.

4. RESULTADOS

Ao todo, foram capturadas 863 fotografias da face dos taludes, sendo 657 fotos obtidas visando o detalhamento das estruturas mapeáveis, com distância média de 20 metros da frente da frente de lavra, e 206 fotografias foram obtidas com o objetivo de obter uma visão geral. Neste último caso, a distância média adotada foi de 40 metros.

Com o software *Sirovision (Datamine®)*, as bancadas foram devidamente setorizadas, sendo denominados setores A1 a A5 na bancada inferior e setores B1 a B5 na bancada superior. O modelo tridimensional, bem como a setorização empregada, pode ser visualizado na Figura 3.

Através do modelo digital, foram mapeadas 111 descontinuidades (Figura 4 (a)), incluindo fraturas, falhas e contato litológico entre a rocha encaixante e o dique. Também foi possível individualizar seis famílias de descontinuidades, que podem ser observadas nos estereogramas da Figura 4 (b).

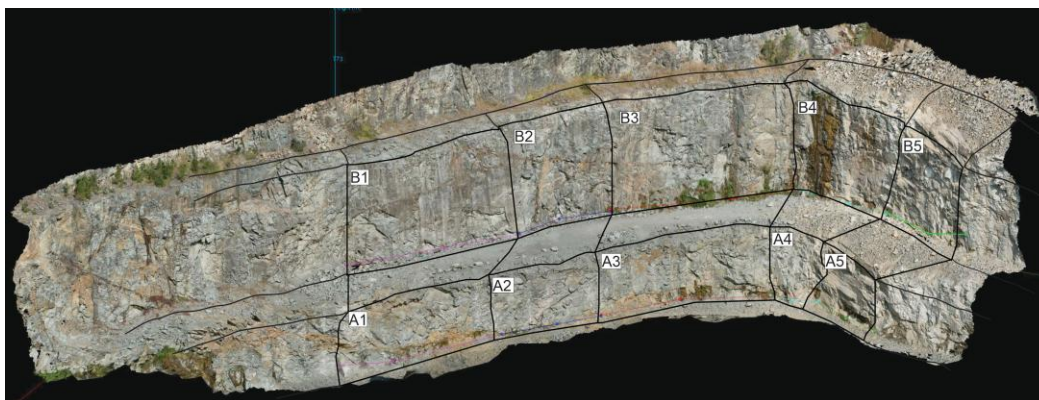


Figura 3. Modelo tridimensional das bancadas e setorização proposta para análise.

Com *Sirovision (Datamine®)*, foi possível observar a direção e mergulho das feições, inferir sobre a natureza das descontinuidades e obter informações sobre o espaçamento e persistência dos planos. Essas informações podem ser acessadas na Tabela 2.

Outros parâmetros geotécnicos importantes para caracterização geológica-geotécnica do maciço, e que embasam as classificações geomecânicas tradicionais como os sistema Q de

Barton (1978) e RMR de Bieniavski (1973), não puderam ser obtidos através da análise das imagens devido à ausência de detalhamento suficiente. Portanto, parâmetros como abertura, rugosidade, preenchimento entre planos de descontinuidade, percolação de água e grau de alteração não foram avaliados. Além disso, o *software* não permitiu a identificação direta da litologia da mina. No entanto, com base em informações prévias fornecidas pela mina, sabe-se que a rocha predominante é gnaiss, e que esta é cortada por um dique que atravessa os setores A5 e B5.

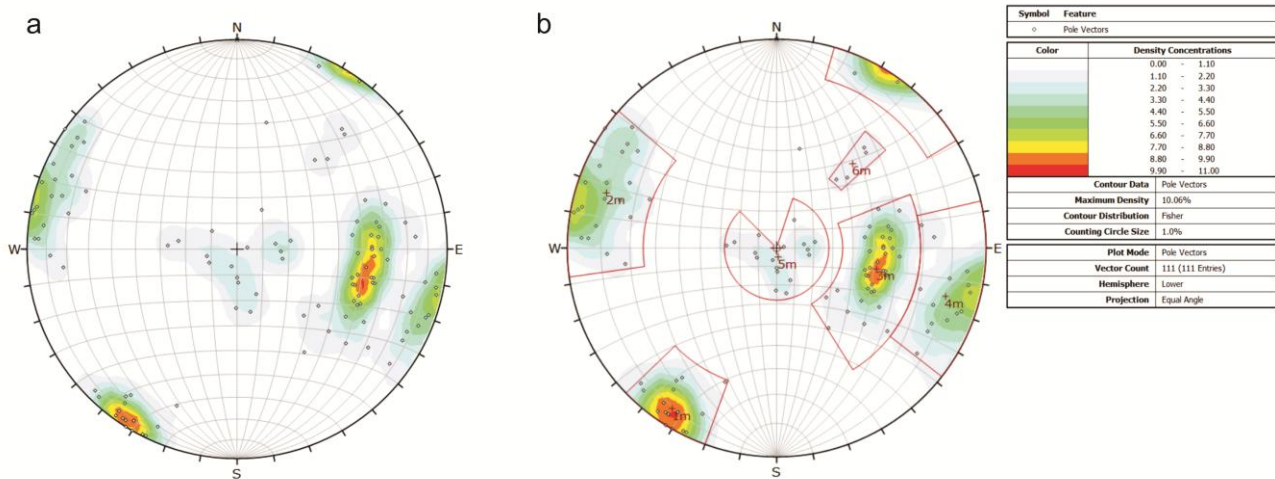


Figura 4. Estereogramas de densidade das descontinuidades. (a) apenas pólos e (b) pólos e identificação das famílias mapeadas remotamente em todos os setores.

Com base na Tabela 2, observa-se que as famílias de descontinuidades 1 a 5 estão presentes em praticamente todos os setores, abrangendo tanto o talude superior (B) quanto o inferior (A), com exceção da família 4, que ocorre em apenas três setores, e da família 6, registrada exclusivamente no setor B4. No que se refere à persistência, verificou-se uma distribuição bastante uniforme em toda a área estudada, enquanto o espaçamento das descontinuidades varia de muito pequeno a moderado.

Tabela 2. Resumo das características observadas em cada família de descontinuidade.

Características das famílias de fraturas				
Famílias	Direção	Persistência (ISRM, 1981)	Espaçamento (ISRM, 1977)	Setor de ocorrência
1	32/86	Média	Pequeno	A4, A5, B1, B4 e B5
2	108/81	Média	Moderado	A1, A2, A3, A4, B1, B2 e B3
3	282/52	Média	Pequeno	A1, A2, A3, A5, B1 e B5
4	286/80	Média	Moderado	A3, B2 e B3
5	350/05	Média	Moderado	A1, A2, A3, A5, B2, B3 e B5
6	222/57	Média	Muito pequeno	B4

Para cada setor, foi realizada a análise cinemática de deslizamento planar, deslizamento em cunha e tombamento direto utilizando o *software Dips 7.0 (Rocscience®)*. Com o método quantitativo de Admassu (2010), foram analisados os índices de estabilidade para ruptura planar, em cunha e tombamento, considerando-se valores acima de 0,1 como críticos para a ocorrência de ruptura.

Análise de deslizamento planar mostrou que não há problemas significativos para este tipo de ruptura, uma vez que os valores de IDP foram iguais a zero na maioria dos setores, com exceção do setor B1, que foi o único a apresentar um Índice de Deslizamento Planar (IDP)

superior a 0,1, conforme o critério de Admassu (2010). A análise de deslizamento em cunha indicou que quase todos os setores estão sujeitos a essa condição de instabilidade, uma vez que o Índice de Deslizamento em Cunha (IDC) ultrapassou o limite máximo aceitável de 0,1 nos setores A2, A3, A4, A5, B1, B2 e B3. Na análise de tombamento direto, os setores A1, A5, B1, B2, B4 e B5 apresentaram índices acima do limite máximo de 0,1 estabelecido para essa condição.

Complementarmente, foi calculado o RQD (*Rock Quality Designation*) para avaliar a qualidade do maciço rochoso, conforme Palmstrom (2005). Como resultado, os setores A1 e A2 foram os mais mal avaliados, sendo classificados, conforme Barton (1974), como “muito ruim (<25%)”, seguidos pelos setores A5 e B4, classificados como “ruim (25 - 50%)”. Os demais setores foram classificados como “regular (50 – 75%)”. Esses resultados para o RQD refletem uma boa correlação com as características de espaçamento e persistência.

Tabela 3. Tabela resumo dos índices de deslizamento e RQD dos setores

Setor	Índice RQD	Classe RQD (Barton, 1974)	IDP	IDC	IT
A1	22	Muito ruim	0	0,07	0,19
A2	5	Muito ruim	0	0,17	0,07
A3	60	Regular	0	0,12	0,04
A4	66	Regular	0	1	0
A5	49	Ruim	0	0,14	0,25
B1	54	Regular	0,33	0,61	0,22
B2	71	Regular	0	0,32	0,14
B3	60	Regular	0	0,14	0,08
B4	44	Ruim	0	0,04	0,36
B5	60	Regular	0	0,09	0,47

5. DISCUSSÃO

O levantamento realizado mostrou que apenas no setor B1 foi obtido o índice de deslizamento planar maior do que 0,1. No entanto, considerando o grande número de descontinuidades mapeadas em cada setor, é pouco provável que apenas a bancada B1 seja condicionada para a ocorrência de rupturas planares. Uma explicação mais plausível é que descontinuidades com mergulho voltado para a vertente do talude sejam mais difíceis de serem visualizadas no modelo tridimensional.

Na análise do Índice de Deslizamento em Cunha (IDC), o setor A4 mostrou-se o mais crítico, com o IDC igual a 1, ou seja, todas as interseções que ocorrem entre descontinuidades nesse setor são críticas. Contudo, os setores A2, A3, A5, B1, B2 e B3 também apresentaram índices superiores a 0,1, indicando a tendência para rupturas em cunha. Os demais setores, apesar de apresentarem interseções críticas, não ultrapassam o limite máximo estabelecido de 0,1.

Quanto à possibilidade de tombamento direto, os setores B5 e B4 foram os mais críticos, seguidos por A5, B1, A1 e B2. O dique presente nos setores A5 e B5 apresentou valores particularmente elevados de tombamento direto em comparação com os demais tipos de instabilidade analisados nesses setores.

De forma geral, os setores que apresentaram índices superiores a 0,1 demonstram, ainda que de maneira preliminar, uma tendência mais pronunciada à ocorrência dos respectivos tipos de ruptura, o que justifica uma atenção especial a essas áreas nas etapas de planejamento e execução de medidas de estabilização.

Os valores de RQD calculados apresentaram pouca correlação com os resultados das análises cinemáticas. Os setores A1 e A2 obtiveram os piores índices RQD, mesmo assim apresentaram resultados pouco expressivos na análise cinemática. O contrário também ocorre quando se observa os resultados mais críticos da análise cinemática, sendo os setores B1, A4 e B5 os que tiveram a soma dos índices mais alto. Todavia, estes mesmos setores foram classificados como RQD regular, conforme Barton (1974). É normal que ocorra pouca relação de

resultados neste caso, uma vez que são utilizados parâmetros diferentes das descontinuidades para cada tipo de análise.

De forma geral, o drone se mostrou uma ferramenta bastante ágil, capaz de coletar um grande volume de informações estruturais em um curto intervalo de tempo. Durante o levantamento aerofotogramétrico, centenas de fotos foram capturadas em menos de uma hora. Além disso, esse método permitiu o mapeamento de descontinuidades localizadas a dezenas de metros acima da superfície, algo inviável pelo método convencional de mapeamento geológico-geotécnico.

6. CONCLUSÕES

A utilização do drone para mapeamento geológico-geotécnico mostrou-se bastante promissora. Com o auxílio dele, foi possível identificar as principais famílias de descontinuidades, possibilitando inferir sobre os tipos de instabilidades, além de permitir calcular o índice RQD de cada setor. Contudo, essa técnica ainda apresenta limitações devido a resolução e ao nível de detalhe, o que impossibilita a observação de características que são mais bem descritas a olho nu, como abertura, material de preenchimento da descontinuidade e rugosidade.

Dessa forma, acredita-se que a tecnologia de drones pode ser mais bem aproveitada quando utilizada de forma a auxiliar no mapeamento com métodos convencionais. Uma estratégia eficiente para complementar o mapeamento geológico-geotécnico seria realizar um levantamento aerofotogramétrico preliminar, processar os dados obtidos, traçar as descontinuidades e conduzir a análise cinemática. Com informações prévias sobre as principais famílias de fraturas, direção e mergulho das descontinuidades, altura dos taludes e setores com maior potencial de ruptura, o geólogo pode atuar em campo de forma mais objetiva. Isso otimiza o tempo que seria gasto na medição manual da altura e orientação dos taludes, tornando o processo mais eficiente e preciso.

AGRADECIMENTOS

Obrigado à Universidade Federal do Paraná e Departamento de Geologia por viabilizar a realização deste trabalho. Meu sincero agradecimento também à Pedreira Central, que gentilmente abriu as portas da mina para que pudéssemos conduzir a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ADMASU, Y. (2010) *Developing design methodology for cut slopes in Ohio*. Tese de Doutorado, Kent State University, 645p.
- BAR, N.; BARTON, N. (2024) *Q-Slope: Rock Slope Engineering 10 Years on*. Springer, Oslo, Noruega, ago.
- BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. (1974) *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.
- BARTON, N. (1978) *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, v.15, p.319-368, jan.
- BIENIAWSKI, Z. T. (1974) *Engineering Classification of Jointed Rock Masses*. The Civil Engineering in South Africa, v.15, p.335-344, dez.
- BIENIAWSKI, Z. T. (1989) *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. Nova York: John Wiley & Sons.

- 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, v.77, p.325-341.
- FALEIROS, F. M.; FERRARI, V. C.; COSTA, V. S.; CAMPANHA, G. A. C. (2011) *Geoquímica e Petrogênese de Metabasitos do Grupo Votuverava (Terreno Apiaí, Cinturão Ribeira Meridional): Evidências de uma Bacia Retroarco Calimiana*. Boletim IG USP, Série Científica, v.11, p.135-155.
- FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. (2009) *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: Aplicações na estabilidade de taludes*. 2. ed. rev. e atual. Curitiba: Editora UFPR; São Paulo: Oficina de Textos.
- FIORI, A. P. (2015) *Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas: Aplicações na estabilidade de taludes*. São Paulo: Oficina de Textos, 576p.
- GOODMAN, R. E. (1989) *Introduction to Rock Mechanics*. Nova York: John Wiley & Sons, 99p.
- HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A. C.; CAMPOS NETO, M.; SILVA, L. C.; TROUW, R. A. J.; JANASI, V. C. (2004) *O Desvendar de um Continente: A Moderna Geologia da América do Sul e o Legado da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, p.203–234.
- HOEK, E.; BRAY, J. W. (1981) *Rock Slope Engineering*. Londres: Institution of Mining and Metallurgy, 358p.
- ISRM. (1977) *Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, v.15, p.47-51.
- ISRM. (1981) *Rock Characterization, Testing and Monitoring*. In: BROWN, E. (ed.). Oxford: Pergamon Press, 211p.
- LOZANO, J. F.; GUTIÉRREZ-ALONSO, G. (2016) *Aplicaciones Geológicas de los Drones*. Revista de la Sociedad Geológica de España, v.29, p.89-105.
- NORMANDO, L. C.; SILVEROL, A. C.; BORN, C. R. (2021) *Mecânica das Rochas*. Porto Alegre: SAGAH, E-book, ISBN 9786556901657.
- PALMSTROM, A. (2005) *Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD)*. Tunnels and Underground Space Technology, Noruega.
- READ, J.; STACEY, P. (2022) *Guia para projetos de taludes de minas a céu aberto*. 1ª ed. São Paulo: ABGE. Traduzido por GAMBETTI, D. L. G.; PACHECO, I. B.
- ROMANA, M. (1985) *New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes*. In: Proceedings of the International Symposium on the Role of Rock Mechanics in Excavations for Mining and Civil Works. International Society of Rock Mechanics, Zacatecas, p.49-53.
- SIGA JR, O. (1995) *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.
- SOARES, M. A. R. (2023) *Caracterização de descontinuidades em pedra por meio de extração semiautomática com o uso de drone*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- TAKANO, C. E. (2022) *Extração automatizada de dados estruturais em maciço rochosos a partir de fotogrametria com drone*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- VALLEJO, L. I. G.; MERCEDES, F.; ORTUNO, L.; OTEO, C. (2002) *Ingeniería Geológica*. Madrid: Isabel Capella.
- VIANA, C. D. (2015) *Análise estrutural de descontinuidades baseada em técnicas de structure from motion: Aplicação em mina a céu aberto*. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo.