

MAPEAMENTO ESTRUTURAL DE MACIÇO ROCHOSO COM USO DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANTS) PARA APOIO AO PLANEJAMENTO DE LAVRA DE ROCHAS ORNAMENTAIS

STRUCTURAL MAPPING OF ROCK MASSES USING UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAVS) TO SUPPORT ORNAMENTAL STONE QUARRY PLANNING

Evandro Fonseca Filgueiras

Aluno de Graduação de Engenharia de Minas, 6º período, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo
Período PIBIC ou PIBITI/CETEM: setembro de 2025 a agosto de 2026
filgueiras.engm@gmail.com

Kayrone Marvila de Almeida

Orientador, Engenheiro de Minas, M.Sc.
kmalmeida@cetem.gov.br

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira

Coorientador, Geólogo, D.Sc.
leolysil@cetem.gov.br

RESUMO

A indústria brasileira de rochas ornamentais possui elevada relevância econômica e destaca-se no mercado internacional. O Espírito Santo é consolidado como principal polo produtor e beneficiador do país. Apesar de sua importância, a atividade apresenta elevada geração de resíduos durante a etapa de lavra, o que gera aproximadamente 121,5 milhões de toneladas de resíduos grosseiros por ano, tornando necessário o desenvolvimento de tecnologias que contribuam para o aumento do aproveitamento do maciço rochoso e a redução das perdas. Nesse contexto, este estudo busca aplicar Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTS) para o mapeamento estrutural de um maciço rochoso em uma lavra de rochas ornamentais, em comparação com o método tradicional com bússola geológica, a fim de avaliar seu potencial como ferramenta de apoio ao planejamento de lavra e à redução da geração de resíduos. O estudo mostrou que as direções de mergulho de ambos os métodos convergiram para o quadrante sudeste, além de resultados semelhantes em mapas de contorno gerados a partir dos polos dos planos de fraturas coletados. Esse resultado aponta para a possibilidade da utilização de VANTS na tomada de decisões no avanço de lavra, de forma a diminuir a geração de resíduos.

Palavras chave: Rochas ornamentais, aerofotogrametria, famílias de fraturas, VANTS.

ABSTRACT

The Brazilian ornamental stone industry plays a significant economic role and holds a prominent position in the international market. The state of Espírito Santo is recognized as the country's leading producer and processor of ornamental stones. Despite its economic importance, quarrying operations generate substantial amounts of waste, with approximately 121.5 million tonnes of coarse waste produced annually, highlighting the need for technologies that improve rock mass utilization and reduce material losses. In this context, this study applied Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for the structural mapping of a rock mass in a ornamental stone quarry and compared the results with those obtained using the conventional geological compass method to evaluate the potential of UAVs as a supporting tool for quarry planning and

waste reduction. The results showed that the dip directions obtained by both methods converged toward the southeastern quadrant, in addition to producing similar density contour maps based on the poles of the mapped fracture planes. These findings indicate that UAV-based structural mapping can support decision-making during quarry advancement, contributing to improved quarry planning and reduced waste generation.

Keywords: ornamental stone, aerial photogrammetry, fracture sets, UAVs.

1. INTRODUÇÃO

A indústria de rochas ornamentais ocupa posição de destaque na mineração brasileira, sendo reconhecida pela elevada competitividade no mercado internacional. Em 2025, o setor alcançou um recorde histórico de exportações, ultrapassando US\$ 1,47 bilhão e mais de 2,1 milhões de toneladas comercializadas. Nesse cenário, o Espírito Santo consolida-se como o principal polo produtor e beneficiador do país, respondendo por 78% do faturamento das exportações brasileiras e concentrando mais de 90% da capacidade nacional de beneficiamento (ABIROCHAS, 2026). Apesar da importância econômica do segmento, a atividade ainda enfrenta um desafio recorrente relacionado à elevada geração de resíduos. No beneficiamento das rochas ornamentais, cerca de 26% do volume de um bloco transforma-se em resíduos finos (FiBRO), estimando-se que aproximadamente 3,5 milhões de toneladas sejam destinadas anualmente a aterros no Brasil (Maurício; Almeida, 2025). Além disso, a etapa de lavra produz cerca de 121,5 milhões de toneladas de resíduos grosseiros por ano, constituídos principalmente por fragmentos e blocos sem aproveitamento comercial (Tavares et al., 2026). Esse cenário evidencia a necessidade de adoção de práticas que promovam maior eficiência no uso dos recursos minerais, em consonância com os princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), que prioriza a não geração e a redução de resíduos.

Embora diferentes fatores influenciem o aproveitamento do maciço rochoso, as descontinuidades naturais, como fraturas e juntas, exercem papel determinante na recuperação de blocos comerciais. A distribuição e a orientação dessas estruturas condicionam o dimensionamento dos blocos e o direcionamento dos cortes, podendo comprometer significativamente o rendimento da lavra (Martini, 2018). Em muitos empreendimentos, a recuperação do material varia entre 20% e 30%, enquanto as perdas podem atingir até 80% do volume explotado (Nascimento Júnior et al., 2025). Nesse contexto, a caracterização das famílias de fraturas torna-se uma importante ferramenta para o planejamento de lavra, permitindo identificar áreas mais favoráveis à extração, orientar o avanço das frentes de lavra e aumentar o aproveitamento do recurso mineral, com reflexos na redução da geração de resíduos (Nascimento Júnior et al., 2025).

Os avanços recentes das geotecnologias ampliaram as possibilidades de aquisição e análise de informações geológicas em ambientes de mineração. Entre essas tecnologias, destacam-se os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), associados à fotogrametria digital e à técnica Structure from Motion (SfM), que permitem a obtenção de modelos tridimensionais de alta resolução para o mapeamento de descontinuidades em maciços rochosos. Além de proporcionar maior rapidez e segurança nas atividades de campo, essa abordagem possibilita análises estruturais com ampla cobertura espacial, constituindo uma alternativa promissora ao levantamento convencional realizado com bússola geológica (Maior et al., 2024; Hoffmann, 2024). Entretanto, ainda são escassos os estudos que avaliam essa aplicação em lavras de rochas ornamentais no Espírito Santo e que comparem, de forma direta, os resultados obtidos pelos dois métodos. Diante desse cenário, torna-se relevante investigar o potencial das geotecnologias baseadas em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) como ferramenta de apoio ao mapeamento estrutural em lavras de rochas ornamentais, avaliando sua aplicabilidade no planejamento de lavra e comparando seus resultados aos obtidos pelo método convencional de levantamento com bússola geológica.

2. OBJETIVOS

Realizar o mapeamento estrutural de um maciço rochoso em uma lavra de rochas ornamentais por meio da aerofotogrametria com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), comparando os resultados obtidos com o levantamento convencional realizado por bússola geológica, a fim de avaliar seu potencial como ferramenta de apoio ao planejamento de lavra e à redução da geração de resíduos.

3. METODOLOGIA

Inicialmente, foi realizada a caracterização geológica da área de estudo, uma lavra de rochas ornamentais, a partir do Mapa Geológico do Estado do Espírito Santo, disponibilizado pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB). Os dados vetoriais foram processados no software QGIS, permitindo a análise das unidades litológicas e dos principais lineamentos estruturais presentes na região, servindo como base para a interpretação das descontinuidades observadas em campo.

Em seguida, foi realizado o levantamento estrutural convencional nas frentes de lavra utilizando bússola geológica, registrando-se a direção de mergulho (Dip Direction) e o mergulho (Dip) das descontinuidades identificadas. Posteriormente, foi executado o levantamento aerofotogramétrico da área com 8,8 ha, por meio de um veículo aéreo não tripulado (VANT), utilizando drone, cujas imagens foram processadas no software Agisoft Metashape para geração da nuvem de pontos densa, posteriormente exportada no formato .las.

A nuvem de pontos foi processada no software CloudCompare, onde foram empregados os plugins Facets, para segmentação automática de superfícies planares, e Compass, para identificação, validação e determinação das atitudes estruturais. Os planos obtidos foram validados com base nas estruturas observadas durante o levantamento de campo e tiveram suas atitudes estruturais exportadas para o software Stereonet. Os dados provenientes da bússola geológica e da fotogrametria foram analisados separadamente, sendo elaborados estereogramas de grandes círculos, estereogramas de polos e diagramas de contorno de densidade. O diagrama de rosas (Rose Diagram) foi elaborado utilizando direções de mergulho (Dip Direction) das descontinuidades, por meio do software OpenStereo. Os estereogramas e os diagramas de contorno foram utilizados para identificar as famílias de descontinuidades e avaliar sua distribuição espacial, enquanto os diagramas de rosas, permitiram determinar a orientação predominante das famílias de fraturas e comparar os resultados obtidos pelos dois métodos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise do Mapa Geológico do Estado do Espírito Santo permitiu identificar que a área de estudo está inserida em um contexto estrutural marcado pela presença de lineamentos regionais com orientação preferencial noroeste-sudeste (NW–SE), interceptando a região da lavra.

O levantamento estrutural convencional (bússola geológica), realizado em campo, possibilitou a obtenção de 17 medidas de planos de fraturas distribuídas nas diferentes frentes de lavra analisadas, onde foi observado como maior e menor mergulho (Dip), respectivamente, 44° e 14°. O levantamento aerofotogramétrico possibilitou a extração de diversos planos de fratura extraídos com ajuda do software, dos quais 17 planos estruturais foram selecionados após a validação comparativa com o observado em campo, onde foi observado como maior e menor mergulho (Dip), respectivamente, 46,56° e 13,97°.

Os resultados apresentados na Figura 1, estereogramas de grandes círculos, evidenciam elevada concordância entre os levantamentos convencional e aerolevantamento. Em ambos os conjuntos de dados observa-se uma concentração de fraturas com direção de mergulho semelhantes concentradas no quadrante sudeste (SE), indicando a predominância de uma família principal de descontinuidades no maciço estudado. Esse resultado associa-se ao lineamento regional observado na carta geológica.

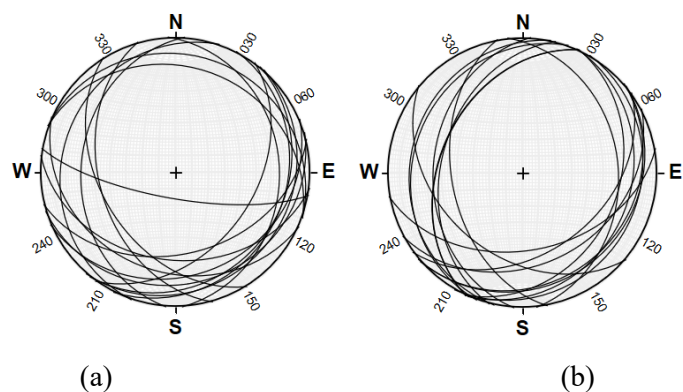


Figura 1: Estereogramas de grandes círculos para os dados obtidos por (a) bússola geológica e (b) aerolevantamento.

Os mapas de contorno de densidade, em ambos os métodos, reforçam essa interpretação ao evidenciarem uma concentração dos polos próximos ao quadrante noroeste, partindo do centro do diagrama, que indica a ocorrência de uma família dominante de descontinuidades, compatível com planos que apresentam direção de mergulho preferencial para sudeste, Figura 2.

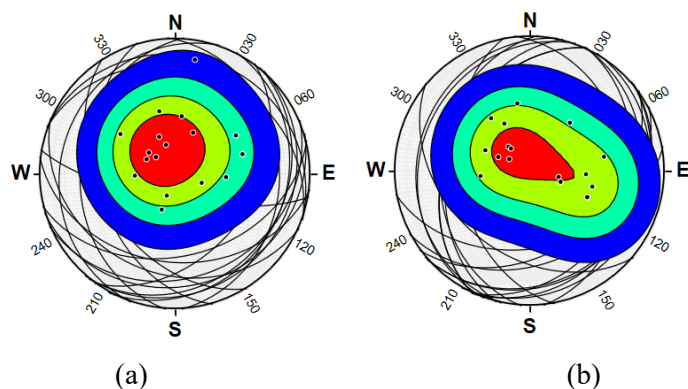


Figura 2: Estereogramas de polos e grandes círculos com mapas de contorno para os dados obtidos por (a) bússola geológica e (b) aerolevantamento.

Enquanto o levantamento convencional depende do acesso físico ao maciço e da seleção manual das superfícies medidas, a aerofotogrametria permite analisar um maior número de descontinuidades por meio do modelo tridimensional, ampliando a cobertura espacial e reduzindo limitações operacionais. De forma integrada, os resultados evidenciam a predominância de uma família principal de descontinuidades, com elevada concordância entre os levantamentos convencional e aerofotogramétrico, demonstrada pela similaridade dos estereogramas e dos mapas de contorno de densidade. Além disso, a orientação predominante das fraturas mostrou-se compatível com o principal lineamento regional de direção NW–SE observado na carta geológica, indicando que as estruturas locais refletem o controle estrutural regional e confirmando o potencial da aerofotogrametria associada ao processamento de nuvens de pontos como ferramenta confiável para a caracterização estrutural e o possível planejamento de lavra.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo indicam que a aerofotogrametria associada ao processamento digital de nuvens de pontos foi capaz de representar de forma consistente as principais orientações das descontinuidades identificadas no levantamento convencional, apresentando compatibilidade entre os padrões observados nos estereogramas de grandes círculos e mapas de contorno de densidade. Ambos indicaram que as principais famílias de fraturas, nos dois métodos, possuem direções de mergulho semelhantes NW–SE, o que converge com o observado

na carta geológica regional. Além da concordância entre os métodos, a utilização da aerofotogrametria demonstra potencial como ferramenta de apoio à caracterização estrutural de maciços rochosos em lavras de rochas ornamentais, o que oferece vantagens relacionadas à visualização das superfícies expostas e à análise em ambiente tridimensional. Dessa forma, a aplicação integrada dessas geotecnologias pode contribuir para o planejamento futuro de lavra e para a caracterização estrutural em áreas de mineração. Como continuidade deste trabalho, recomenda-se a ampliação da base de dados e a realização de análises quantitativas que permitam avaliar, de forma mais detalhada, a precisão e a confiabilidade dos levantamentos fotogramétricos em relação ao método convencional e contribuir para a tomada de decisões no avanço de lavra, de forma a diminuir a geração de resíduos.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq, aos meus orientadores, à VENAGRAN – Venda Nova Granitos LTDA., à minha família, em especial à minha irmã Elisa, pelo apoio incondicional. Agradeço também ao CREA Jr-ES, pela imensa contribuição no estudante que sou, e, especialmente, a Alex Vinicius Soares Robles, pelo apoio único, pela presença inquestionável que fizeram o caminho o melhor que poderia ser.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS (ABIROCHAS). Balanço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais de janeiro a dezembro de 2025. Informe 12/2025. Brasília, DF, 2026.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Câmara dos Deputados, 2010.

HOFFMANN, V. H. Análise geomecânica em rochas carbonáticas com auxílio de drone: aplicação em mineração na Formação Irati. 2024. 71 p. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2024.

MAIOR, G. R. S.; PERONI, R. L.; MARIZ, J. L. V.; ZAGÔTO, J. T.; VALE, D.; KUCKARTZ, B. T.; NOVAES, R. Caracterização semiautomatizada de fraturas para otimizar a mineração de rochas ornamentais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA A CÉU ABERTO E MINA SUBTERRÂNEA, 12., 2024, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: IBRAM, 2024.

MARTINI, L. Caracterização de descontinuidades com o auxílio de VANT aplicada à pesquisa de rocha ornamental no Complexo Metamórfico Palma, São Gabriel (RS). 2018. 43 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2018.

MAURÍCIO, T. B.; ALMEIDA, K. M. Estudo da viabilidade de uso do resíduo fino do beneficiamento de rochas ornamentais (FiBRO) em massa cerâmica para produção de piso e porcelanato. In: Jornada de iniciação científica do CETEM, 33., 2025, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, RJ, Brasil: CETEM/MCTI, 2025.

NASCIMENTO JÚNIOR, M. R.; MAIOR, G. R. S.; MAIA, L. X.; FREITAS, L. G. B. G.; LANDEIRO, R. S.; RIBEIRO, F. G. Caracterização geológica estrutural por meio virtual: apoio no planejamento e controle de lavra de rochas ornamentais. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 22, e3234, 2025.

TAVARES, D. P.; ROCHA, A. M. D. S.; NOVAES, R. C.; ZAGÔTO, J. T.; FAZOLO, D. Z. (Org.). A engenharia de Minas e o direito da mineração: desafios, responsabilidades e caminhos para uma mineração responsável e integrada ao desenvolvimento sustentável. Vitória, ES: Gráfica e Editora GSA, 2026.