

Caracterização geológica estrutural por meio virtual: apoio no planejamento e controle de lavra de rochas ornamentais

Marcos Rogério do Nascimento Júnior^{1*} 

Gleicon Roberto de Sousa Maior² 

Leandro Xavier Maia³ 

Lilian Gabriella Batista Gonçalves de Freitas² 

Raphael Silva Landeiro⁴ 

Felipe Germano Ribeiro⁵ 

Resumo

Os recentes avanços tecnológicos para a geração de modelos 3D's têm contribuído cada vez mais para análises e estudos em diversas áreas. As técnicas fotogramétricas, aliadas a análise geológica estrutural, podem solucionar diversos problemas, inclusive na lavra de rochas ornamentais. Uma das principais falhas nas operações está relacionada ao fraturamento imposto aos maciços rochosos onde são explorados este bem mineral. Objetivando auxiliar nessa problemática, este trabalho aborda o uso e a aplicação da análise estrutural virtual por meio da fotogrametria, no intuito de apoiar o planejamento e controle de uma lavra de rocha ornamental, usando o *Drone* como ferramenta de levantamento. Dos resultados da análise, construiu-se modelos 3D do maciço rochoso expondo-se os planos de descontinuidades identificados na análise geológica estrutural por meio de *softwares* de fotogrametria. Os resultados dos modelos e as representações 3D's corroboram para viabilidade do uso da técnica nesses tipos de estudos de maciços rochosos.

Palavras-chave: Geologia estrutural; Fotogrametria; Lavra de rocha ornamental.

Structural geological characterization by virtual means: support in planning and control of ornamental rocks mine

Abstract

The recent technological advances for the generation of 3D models have increasingly contributed to analysis and studies in several areas. Photogrammetric techniques, combined with structural geological analysis, can solve several problems, including mining of ornamental rocks. One of the main flaws in operations is related to the fracturing imposed on rock masses where this mineral is exploited. Aiming to assist in this problem, this work addresses the use and application of virtual structural analysis through photogrammetry, in order to support the planning and control of an ornamental rock mine, using the Drone as a survey tool. From the analysis results, 3D models of the rock mass were built, exposing the discontinuity plans identified in the structural geological analysis using photogrammetry software. The results of the models and 3D's representations corroborate the feasibility of using the technique in these types of rock mass studies.

Keywords: Structural geology; Photogrammetry; Ornamental rock mine.

1 Introdução

A tecnologia está cada vez mais avançada nos diversos campos, inclusive na área da geociência por usar a fotogrametria em várias análises e construção de modelos. Considerada como uma arte, ciência ou técnica, esse método

consiste em mensurar graficamente um objeto através de um conjunto de imagens e/ou fotografias [1]. Esta tecnologia se desenvolveu nos últimos anos com o avanço da informática, sendo uma técnica com ampla aplicação e muito usada em

¹DF+ Engenharia, Belo Horizonte, MG, Brasil.

²Coordenadoria do Curso Engenharia de Minas, Instituto Federal do Espírito Santo, IFES, Cachoeiro de Itapemirim, ES, Brasil.

³C-Innovation, LLC, Mandeville, Louisiana, Estados Unidos.

⁴Gran Canyon Mineração, Vargem Alta, ES, Brasil.

⁵Pemagran Pedras Mármore e Granitos, Cachoeiro de Itapemirim, ES, Brasil.

*Autor correspondente: mr.nascimento.jr@gmail.com

E-mails: gleicon.maior@ifes.edu.br; leandroxavier.oc@gmail.com; lilian.freitas@ifes.edu.br; raphaellandeiro@gmail.com; felipegermano.work@gmail.com



levantamentos terrestres e aéreos, como os realizados por “*VANT*” - veículo aéreo não tripulado”, conhecido como “*drone*”. Recentemente houve uma grande disseminação de usuários desta ferramenta, no qual atuam em vários seguimentos de mercado e da indústria.

Não diferente, na mineração o “*drone*” e a fotogrametria estão presentes como ferramentas para auxiliar nas tomadas de decisões e suporte técnico especializados desde os projetos básicos de exploração mineral até a fase de projetos executivos, como processos de lavra e de beneficiamento [2].

O setor de rochas ornamentais, é considerado economicamente uma atividade de altos investimentos e alto risco para um empreendimento mineiro, não pode deixar de avaliar a viabilidade econômica do empreendimento. Esta atividade tem seus produtos e valores controlados pelas condições geológicas das jazidas e as oscilações do mercado. O Estado do Espírito Santo é conhecido por ter grandes jazidas de granitos e mármore. Para mais, tem um papel importante na balança comercial por ser o maior produtor e beneficiador nesta área [3]. Contudo, muitos empreendimentos não saem do papel, ou então, lavras em operação são abandonadas em estágio de atividade, originando impactos socioambientais.

A lavra ainda funciona de maneira precária e rudimentar (lavra por tentativa e erro) [4]. Outro fato, é a falta de planejamento na fase inicial, como a pesquisa geológica [5,6].

Para que se estabeleça uma lavra de rochas ornamentais, antes é necessário a pesquisa mineral, considerando os litotipos geológicos, seus jazimentos, a sua formação e estruturação do corpo rochoso, a qualidade, o aspecto ornamental do produto (análise de mercado) e a sua caracterização tecnológica, levando em consideração ainda a abertura e o tipo de método de lavra [7].

No entanto, o que se tem observado, é que muitos empreendedores buscam economia no estudo preliminar da pesquisa mineral, não compreendendo a importância dessa fase. Como consequência, as surpresas podem ser desagradáveis com o avanço da lavra, inviabilizando a extração.

Outro aspecto importante é a recuperação na lavra, que gira em torno de 20-25% dependendo do tipo de material [7,8]. Ou seja, o percentual de perda pode chegar a aproximadamente 80%. Essa perda elevada se dá principalmente pela exploração mineira predatória e inadequada que ocorre em muitos locais.

Por esta razão, os estudos geológicos estruturais em projetos de mineração têm grande relevância, por oferecerem informações das superfícies de fraqueza (descontinuidades) e sua distribuição espacial, que podem auxiliar desde o planejamento de abertura até no acompanhamento e controle da lavra.

Assim, o objetivo deste trabalho foi a caracterização geológica estrutural das descontinuidades (fraturas) de uma lavra de mármore, por meio da análise virtual de modelos 3D's desenvolvidos a partir do levantamento aéreo por *drone*, usando a fotogrametria.

1.1 Aspectos gerais

1.1.1 Localização

A lavra de mármore fica nos limites do distrito de Itaoca, localizada do município de Cachoeiro de Itapemirim/ES. Está a aproximadamente 11 km de distância do distrito e 39 km da sede municipal. O acesso ao local se dá pela rodovia BR-482, no sentido norte, e em seguida, a rodovia ES-486, no sentido leste (Figura 1).

1.1.2 Geologia da área de estudo

O local de estudo está inserido no contexto geotectônico da faixa móvel Araçuaí-Ribeira em que contextualiza um arcabouço tectônico-estrutural e estratigráfico complexo com rochas de diferentes idades e composições (Figura 2). As rochas que afloram na área de estudo são mármore puros e impuros, pertencentes às rochas metamórficas do complexo Paraíba do Sul. Localmente os mármore são cortados por uma unidade máfica, desenvolvendo diques e veios [9,10]. A lente e/ou camada de mármore orienta-se para nordeste passando pelo distrito de Itaoca e se estendendo para norte, próximo a Prosperidade, distrito do município de Vargem Alta/ES. A geomorfologia é de relevo arrasado, com morros de topo aplainados, vales abertos e solo espesso [10].

2 Materiais e métodos

Como primícias para o desenvolvimento deste trabalho, foi escolhido um local de atividade de lavra que expusesse alguma dificuldade relacionada a extração, especialmente relacionada as descontinuidades (fraturas) impostas a rocha.

Os equipamentos usados no desenvolvimento foram: *drone* tipo multrotor, modelo *DJI Phantom 4 Advancend*, equipado com câmera fotográfica de 20 *megapixels* e sistema *GPS (Global Positioning System)* integrado; *GPS trekking*, modelo *Garmim Monterra*, precisão de até 1 metro, equipado com barômetro e câmera fotográfica de 8 *megapixels*.

Utilizou-se também ferramentas computacionais, os *softwares* de aquisição e processamento fotogramétrico de imagens e análise virtual: *Drone Deploy* versão gratuita, *Agisoft Photoscan Metashape 1.5.5* com licença experimental de 30 dias, o *Recap Autodesk* com licença estudantil limitada, o *CloudCompare 2.9.1* e o *Stereonet 10*, ambos do tipo *Open Source* (código aberto).

2.1 Aquisição de imagens

Inicialmente foi planejado duas formas de aquisição de imagens (aérea e em solo) e a locação dos pontos de controle. Com o aplicativo *Drone Deploy* (Figura 3) foi realizado plano de voo de 25 m de altitude, resolução de 1,1 cm/pixels e tomada de 328 cenas de imagens.

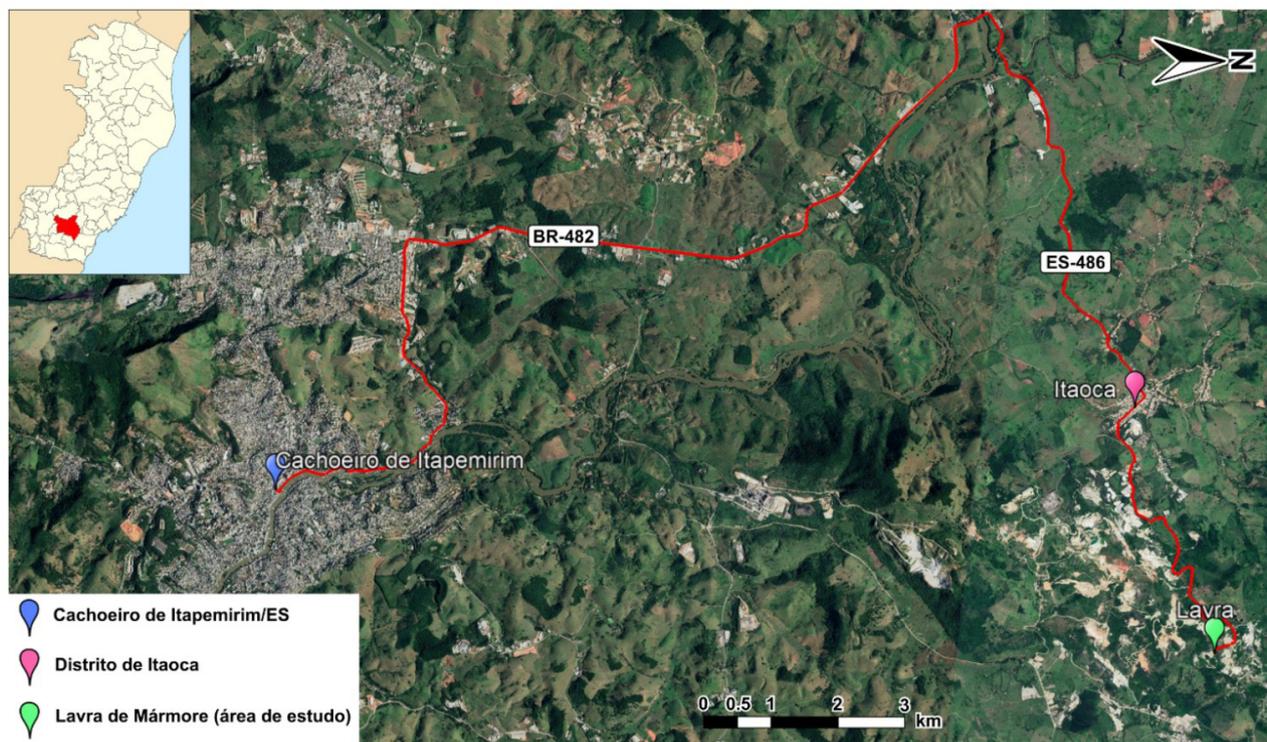


Figura 1. Localização da área de estudo.

Subsequente foi feita a aferição em solo dos pontos de controle com o auxílio do *GPS* e a tomada de 199 fotos de algumas bancadas da lavra.

2.2 Processamento

Após a coleta dos dados, realizou-se o processamento fotogramétrico, aerotriangulação das imagens e dos pontos de controle, geração de nuvem de pontos e modelagem 3D dos locais alvos, usando os *softwares Photoscan Metashape* e o *Recap*. Esses dois *softwares* utilizam-se da técnica *Structure From Motion* (SFM), que constrói estruturas 3D's a partir de um conjunto de cenas e/ou imagens 2D, usando algoritmos que identificam vários pontos em comuns nos pares de imagens [11,12].

2.3 Análise geológica estrutural virtual

Com os resultados da etapa anterior, foi exportada a nuvem de pontos e o modelo 3D para o *CloudCompare*. As ferramentas desse aplicativo são multitarefas com base em algoritmos de plataforma de código aberto. Com esse procedimento foi possível mensurar a orientação do traço da fratura e, a mesma tarefa, foi realizada no *Photoscan Metashape*. Também foi realizado a geração dos planos dos traços de fraturas identificadas anteriormente, a correção da orientação dos planos e a aferição das atitudes. No *Stereonet* foram importados os dados das atitudes dos planos de fraturas para a criação das representações estereográficas.

3 Resultados e discussão

A lavra, alvo deste estudo, tem aproximadamente 8.000 m² e está no centro da lente de mármore descrita por Silva [10]. A região é espremida pela concentração de muitas lavras. As cotas altimétricas variam entre 295 e 270 metros, sendo que as bancadas têm aproximadamente 5 metros de altura, onde são extraídos blocos pelo método de bancada baixa.

O levantamento das imagens aéreas levou em consideração a exposição das faces das bancadas e, através da aerotriangulação da nuvem de pontos gerada e dos pontos de controle, foi possível a espacialização geográfica do local. A Figura 4 a malha texturizada (*Textured Mesh*) com as informações de textura obtidas pela fotogrametria, e o modelo 3D *DEM* (*Digital Elevation Model*) do local da lavra.

Avaliou-se em campo duas faces de bancada da frente de lavra onde se fez a aquisição de imagens no solo. Esses dados permitiram a identificação mais nítida das fraturas. Foram construídos modelos 3D's das bancadas (Figura 5) para auxiliar a análise do modelo 3D obtido pelas imagens do levantamento aéreo.

Os planos de descontinuidades determinados na análise em ambiente virtual, proporcionou a aferição das suas atitudes. As mesmas foram projetadas nos modelos 3D's (Figura 6), proporcionando a visualização em subsuperfície.

As atitudes dos planos foram lançadas no *Stereonet* para tratamento geológico estrutural, projeção dos pólos e

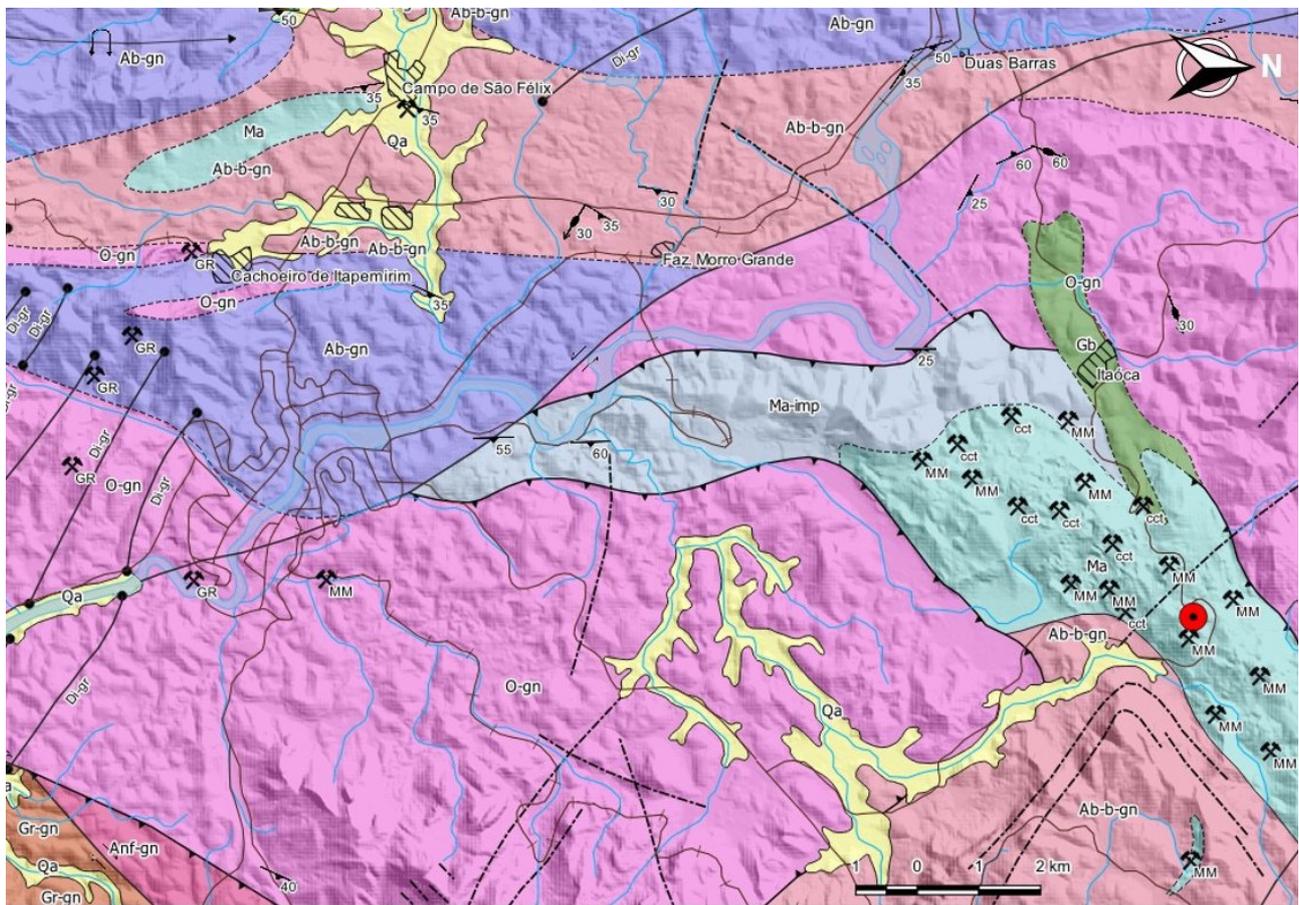


Figura 2. Geologia da área de estudo. Modificado de Silva [10].

contornos de planos de cada frente de bancada, assim como planos médios gerais (Figura 7).

Com os dados obtidos, foi elaborado um modelo geológico estrutural (Figura 8). Os elementos estruturais foram projetados na base do modelo 3D, planos de discontinuidades e estereogramas estruturais de cada frente de bancada da lavra, assim como o estereograma geral e planos médios de fraturas.

Identificou-se 62 planos de discontinuidades, sendo que em todas as frentes de lavra, ou seja, nos taludes de bancada, foram observadas a presença de fraturas que inviabilizam a retirada de pranchas e a individualização de blocos. Destaca-se o fraturamento na frente de lavra da bancada a montante, letras d, e, f da Figura 8. Também nas frentes de lavra onde existe o dique máfico, letras a, g, j, k da Figura 8. Nota-se ainda a continuidade do dique



Figura 3. Etapas do levantamento. a) plano de voo do local de estudo no aplicativo *Drone Deploy*; b) pontos de controle; c) GPS usado; d) posicionamento das imagens.

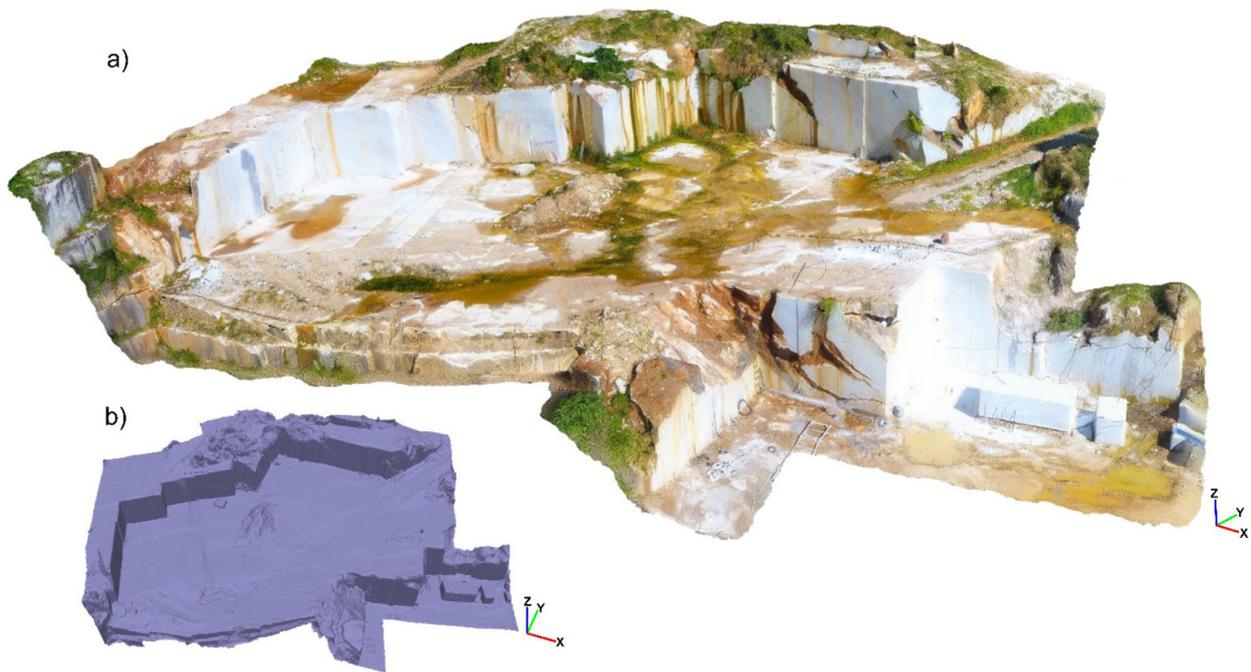


Figura 4. Resultados da etapa de processamento. a) malha texturizada (*Textured Mesh*); b) modelo 3D *DEM* da lavra.

máfico no piso da lavra, possivelmente se estendendo para a bancada a jusante.

A identificação das discontinuidades aponta um fraturamento pronunciado no local, onde se pode presumir que existe um certo grau de causa relacionada a abertura da lavra. No entanto há fraturas preexistentes do maciço condicionadas pela história evolutiva local, assim como as fraturas provocadas pela injeção de diques máficos que cortam a rocha e que, ocasionalmente, se encontram alterados.

Não foi escopo deste trabalho entender o processo que causou o fraturamento da rocha. Mas percebe-se, pelos

estereogramas das bancadas, que a falta de padrão das discontinuidades pode ter relação com o método de corte, adotado por uma mineração instalada anterior a lavra atual, que usava explosivo.

Salienta-se a atividade da lavra, mesmo com a ocorrência de fraturas e a presença de diques e bolsões máficos. O avanço do corte está sendo realizado na bancada a jusante. Percebe-se que o interesse dos responsáveis pela lavra é realizar o avanço até onde for possível retirar material e posteriormente rebaixar o nível atual a um nível mais baixo.

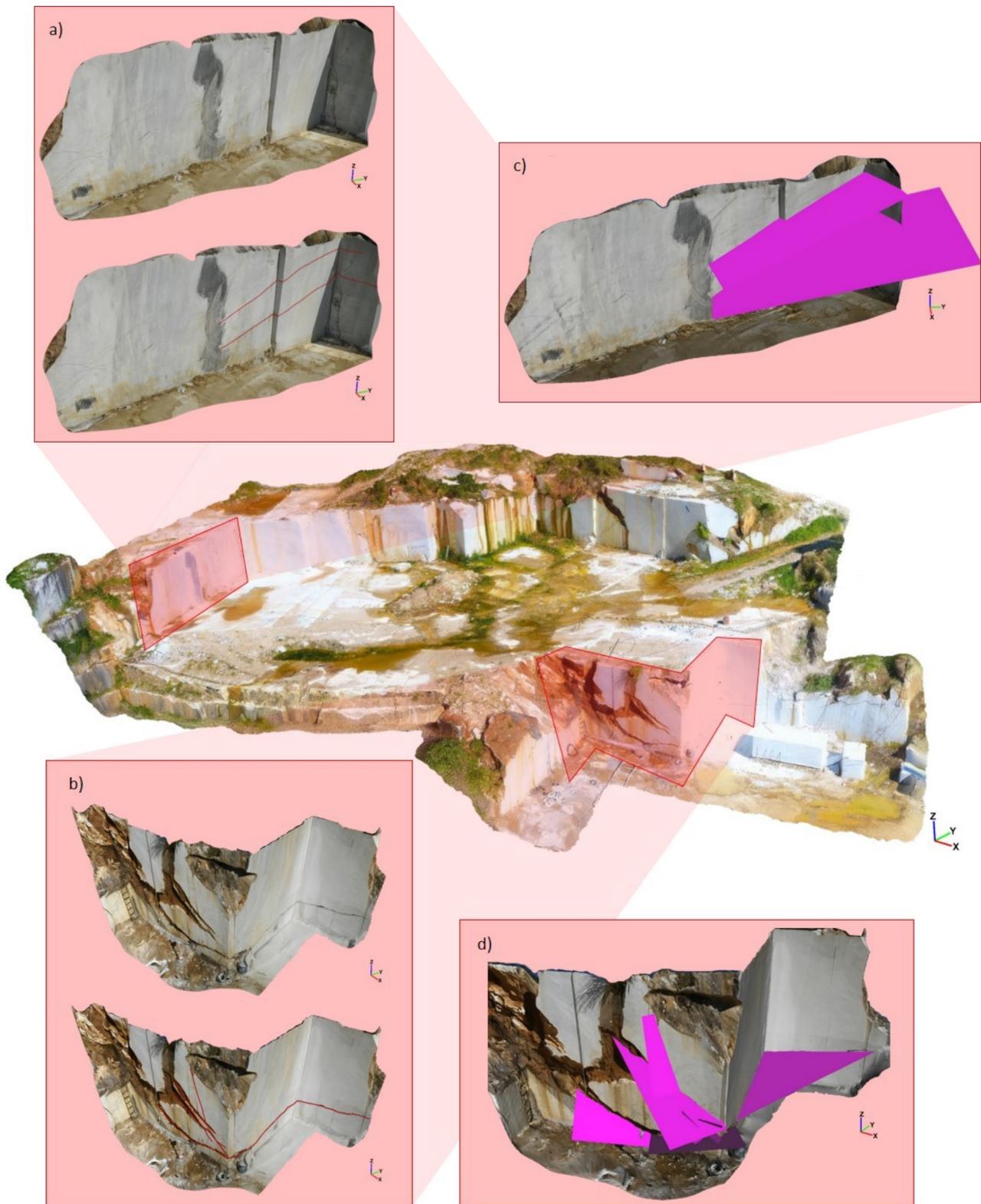


Figura 5. Representações 3D de malhas texturizadas da lavra com as interpretações das discontinuidades. a) frente de lavra, bancada a montante; b) frente de lavra, bancada a jusante; c) projeção dos planos identificados na bancada a montante; d) projeção dos planos identificados na bancada a jusante.

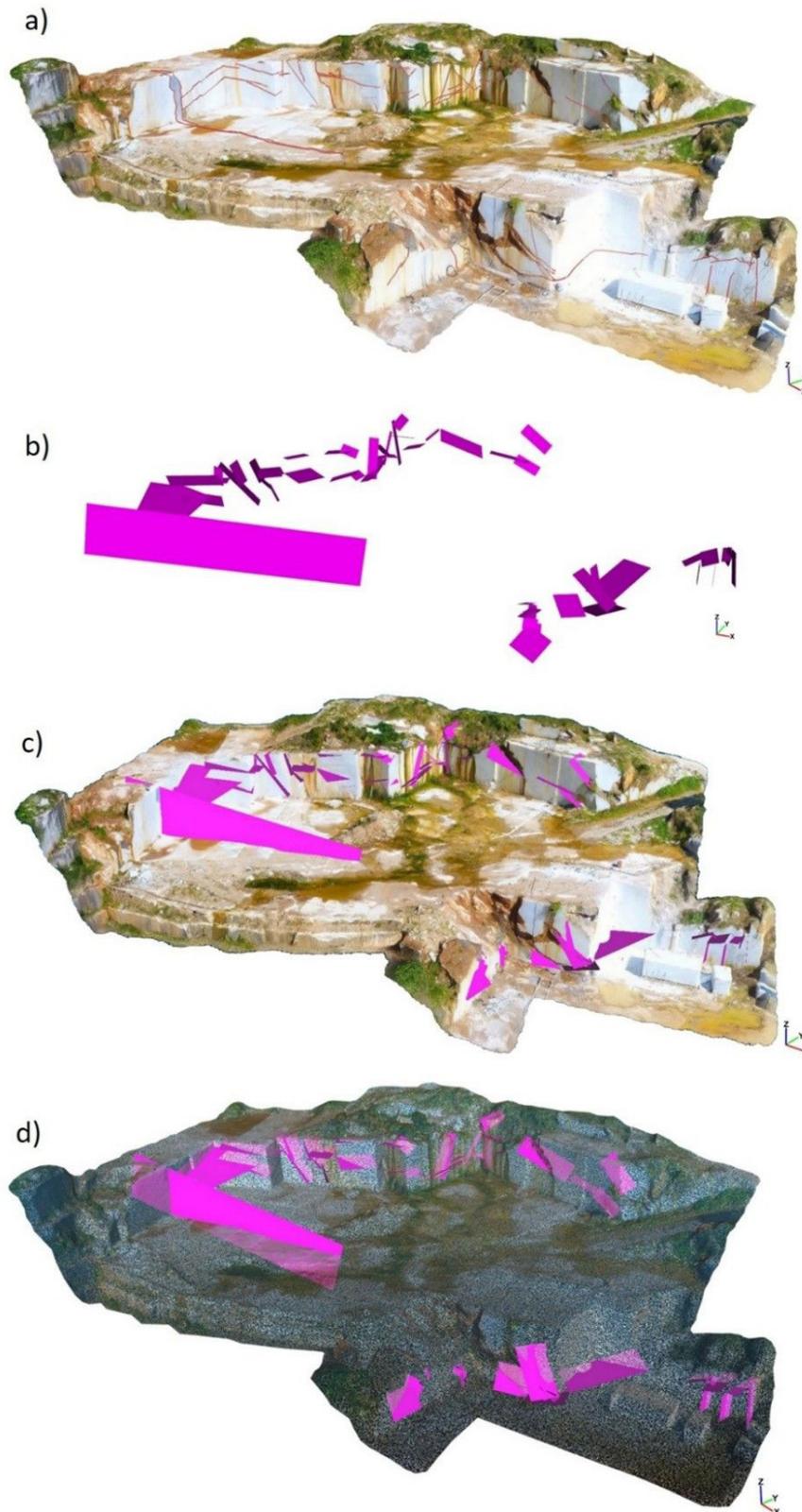


Figura 6. Representações 3D's de malha texturizada da lavra e interpretações estruturais. a) traços estruturais; b) planos espacializados; c) projeção dos planos no modelo 3D de malha texturizada da lavra; d) projeção dos planos na nuvem de pontos densa.

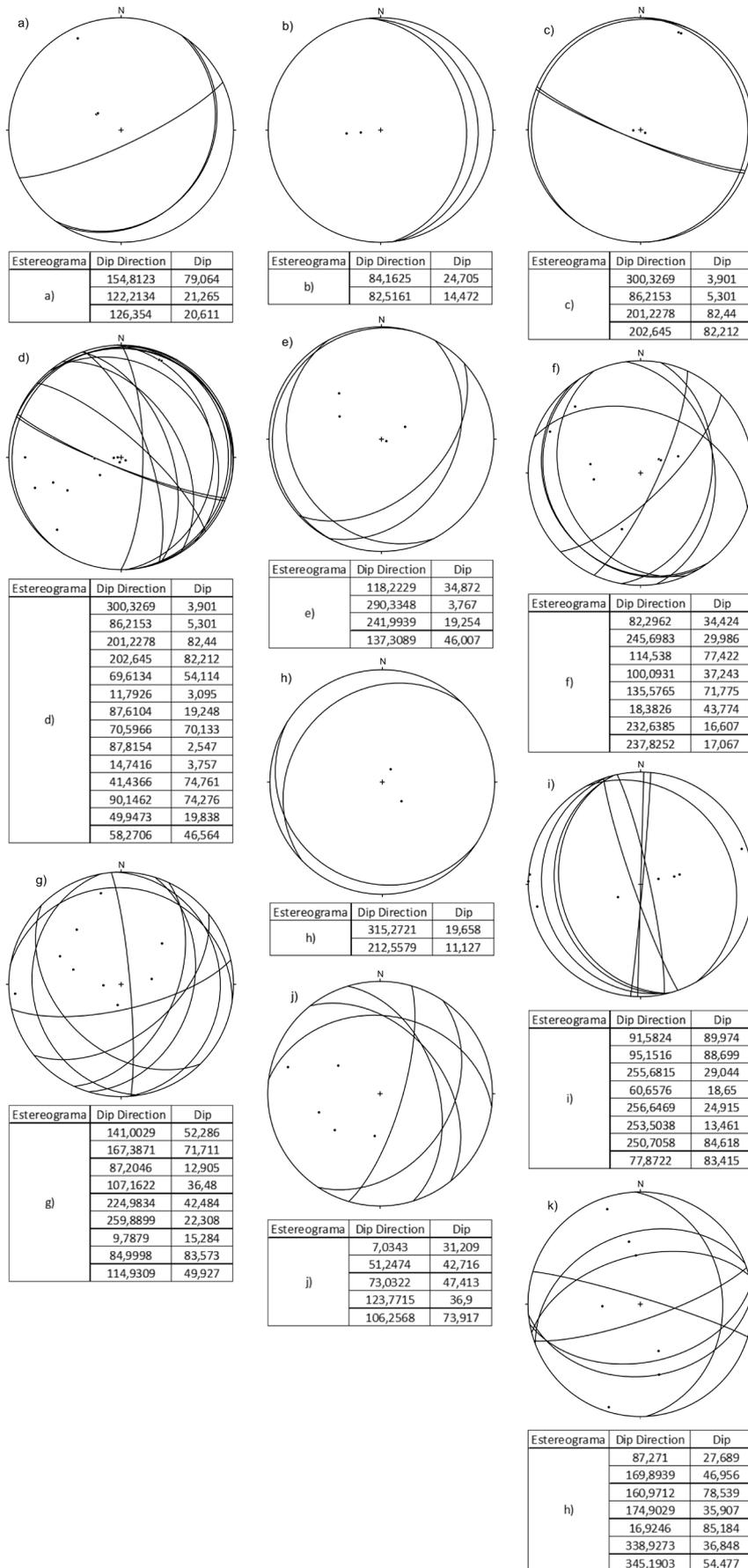


Figura 7. Projeções estereográficas das descontinuidades mapeadas.

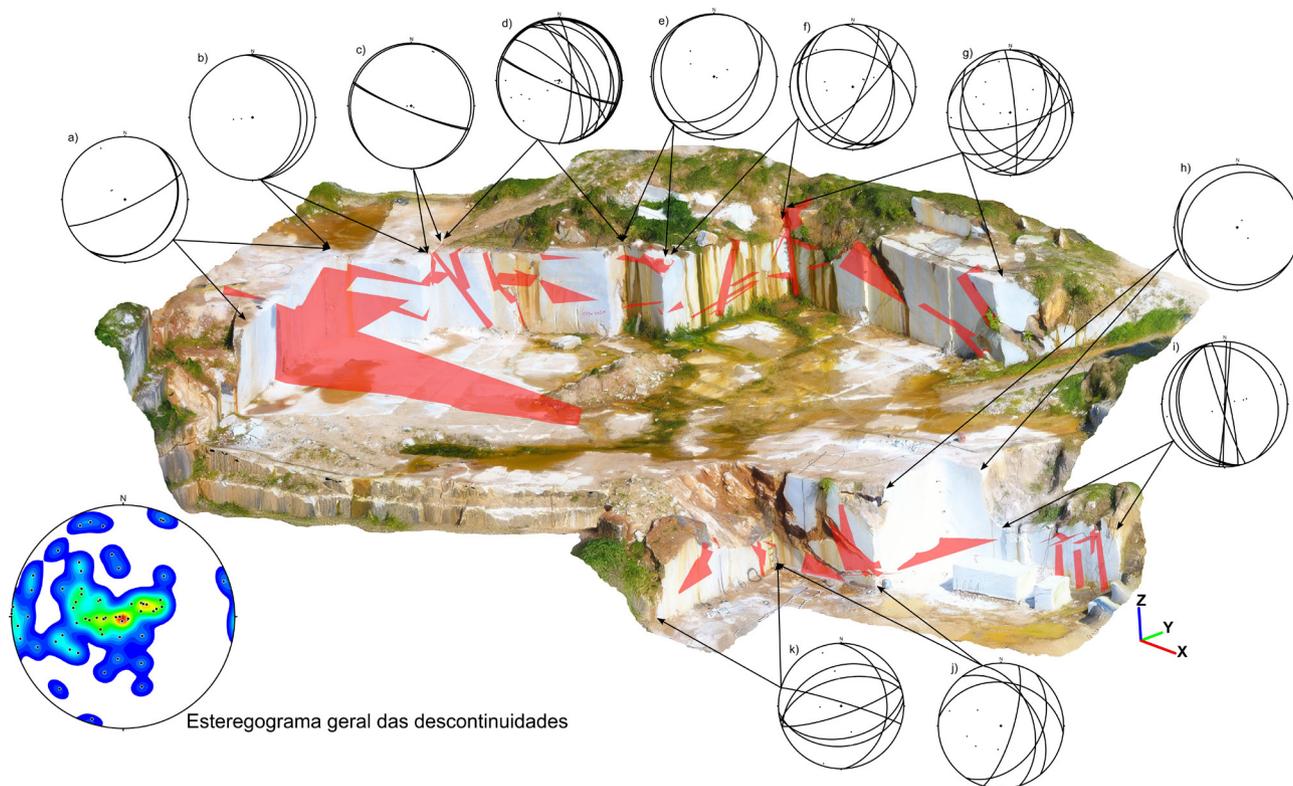


Figura 8. Modelo geológico estrutural da lavra com as representações estereográficas.

Assim, o uso desta metodologia pode melhor auxiliar a decisão a ser tomada sobre o planejamento dos avanços, visto que há o conhecimento estrutural da frente de lavra, favorecendo a produção e com isso pode-se ter um aumento da produtividade e recuperação do bem mineral.

4 Conclusão

Neste trabalho foi possível usar o “*drone*” e a fotogrametria como ferramentas de auxílio na análise geológica estrutural para estudos de fraturas em rochas. Pode-se concluir pelos resultados obtidos, que a análise geológica estrutural, por meio virtual, pode contribuir para engenharia de mina na orientação do corte e no planejamento das frentes de lavra de rocha ornamental.

No sentido de orientar, a ferramenta fornece através do modelo, uma visualização dinâmica das fraturas que podem interferir no corte e retirada de uma prancha. No entanto, não foi intuito deste estudo definir as posições de corte já que é sabido que o padrão estético é o que mais importa neste mercado. Dessa maneira, a ideia é usar os modelos estruturais para ajudar a planejar as bancadas ou os níveis que serão realizados com o avanço e a operação da lavra.

Destaca-se ainda a facilidade da atualização dos modelos, assim como se faz necessário em todo projeto de lavra. A necessidade dessa atualização desempenha papel importante na visualização dos obstáculos (fraturas, diques, veios) e na segurança geotécnica da operação.

Essa metodologia pode ser usada em qualquer fase de implantação do empreendimento mineiro, mas é fundamental nas fases iniciais de pesquisas e abertura de uma lavra. A análise estrutural é um complemento dos estudos preliminares para entender o comportamento do maciço rochoso antes do estabelecimento da lavra.

São poucos os estudos sobre esse tema, principalmente voltados a rochas ornamentais. Assim, a técnica usada neste trabalho pode servir de base para outros estudos, como estudos geotecnia/geomecânica voltados para o setor de rochas ornamentais, dentre outras funcionalidades.

Por fim, os resultados mostraram a importância do conhecimento geológico estrutural nos estudos das fraturas da rocha, fato que não pode ser desconsiderado numa análise preliminar para a instalação de uma lavra de rochas ornamentais. Assim, este trabalho contribui para enriquecer os estudos de lavra em rocha ornamental e sugere outros estudos com a mesma linha de pesquisa, abordando as temáticas desenvolvidas aqui.

Referências

- 1 American Society of Photogrammetry. Manual of Photogrammetry. Virginia, EUA; 1966.
- 2 Pasetto GA, Santos EG, Guadagnin F, Gonçalves I. Uso da aerofotogrametria como ferramenta na mineração. In: Anais do X Salão Internacional de Ensino. Bagé: UNIPAMPA; 2018. p. 1-6.
- 3 Sardou Filho R, Matos GMM, Mendes VA, Iza ERHF. Atlas of dimension stones of the Espírito Santo – Escala 1:400.000. Brasília: CPRM; 2015.
- 4 Souza DV, Vidal FWH, Fernández Castro N. Estudo comparativo da utilização de teares multilâmina e multifio no beneficiamento de rochas ornamentais. In: XX Jornada de Iniciação Científica. Rio de Janeiro: CETEM; 2012. p. 1-6.
- 5 Silva Neto R, Silvestre BDS. Inovação tecnológica como agente de redução de impactos ambientais da indústria de rochas ornamentais no estado do Rio de Janeiro. Ambiente Construído. 2013;13:235-252.
- 6 Sales FACB, Morais JO. Proposta metodológica de pesquisa para rochas ornamentais. In: Anais do IV Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, Fortaleza. CETEM/SBG; 2003. p. 2-12.
- 7 Vidal FWH, Castro NF, Azevedo HCA. Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI; 2013. Pesquisa e Lavra de rochas ornamentais; p. 99-257.
- 8 Silva HV, Castro NF. Aproveitamento de resíduos de pedreiras de rochas ornamentais como agregados para base e sub-base de pavimentos. In: V Jornada do Programa de Capacitação Interna do CETEM. Rio de Janeiro. Anais. CETEM/MCTIC; 2016.
- 9 Pedrosa-Soares AC, Wiedemann CM, Fernandes MLS, Faria LF, Ferreira JCH. Geotectonic significance of the Neoproterozoic granitic magmatism in the Araçuaí belt, Eastern Brazil: a model and pertinent questions. Revista Brasileira de Geociências. 1999;29(1):57-64.
- 10 Silva JN. Texto Explicativo da Folha SE.24-V-A-V, Cachoeiro de Itapemirim. In: Silva JN, editor. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Brasília: DNPM/CPRM; 1993. p. 1-50.
- 11 Snavely N. Bundler: Structure from Motion (SfM) for Unordered Image Collections [Internet]. 2020 [acesso em 14 fev. 2020]. Disponível em: phototour.cs.washington.edu/bundler
- 12 Turner D, Lucieer A, Watson C. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds. Remote Sensing. 2012;4:1392-1410.

Recebido em: 23 Mar. 2025

Aceito em: 3 Abr. 2025

Editor responsável: André Carlos Silva 