

Uso de Drones e Tecnologias Avançadas no Mapeamento Geológico-Geotécnico e Estabilização de Taludes: Estudo de Caso

Dorval Horta ¹; Laiz Falcão ²; Guilherme Silveira ³; Felipe Thum ⁴; Cláudio da Silva ⁵; Flávia de Alencar Andrade ⁶.

Resumo – O avanço tecnológico tem consolidado o uso de drones como uma ferramenta essencial para o mapeamento geológico-geotécnico, sobretudo em áreas de difícil acesso. Este trabalho apresenta os resultados da aplicação dessa tecnologia em uma pedreira de gnaiss, localizada em Belo Horizonte/MG. As imagens de alta resolução capturadas por drones foram processadas para gerar modelos tridimensionais detalhados, que serviram como base para a análise estrutural do maciço e o estudo da estabilidade dos taludes. Esses modelos permitiram o mapeamento preciso das descontinuidades estruturais e a realização de análises cinemáticas, identificando zonas críticas de instabilidade e possibilitando a compartimentação do maciço rochoso. As análises integraram ferramentas especializadas, como PixPro, Sirovision e RocFall, assegurando maior precisão nos diagnósticos e fundamentando propostas de engenharia eficazes. Os resultados reforçam a relevância dos drones no aprimoramento da segurança e da eficiência de projetos geotécnicos, promovendo decisões embasadas em dados confiáveis e a mitigação de riscos operacionais.

Abstract – Technological advancements have established the use of drones as an essential tool for geological-geotechnical mapping, particularly in hard-to-reach areas. This study presents the results of applying this technology to a gneiss quarry located in Belo Horizonte/MG, Brazil. High-resolution images captured by drones were processed to generate detailed three-dimensional models, which served as a foundation for the structural analysis of the rock mass and the study of slope stability. These models enabled precise mapping of structural discontinuities and kinematic analyses, identifying critical instability zones and allowing for the segmentation of the rock mass. The analyses integrated specialized tools such as PixPro, Sirovision, and RocFall, ensuring greater accuracy in diagnostics and supporting effective engineering proposals. The results highlight the importance of drones in improving the safety and efficiency of geotechnical projects, fostering data-driven decisions and mitigating operational risks.

Palavras-Chave – Mapeamento Geológico-Geotécnico, Drones, Estabilidade de Taludes, Análise Cinemática.

¹ Eng. Geól., Universidade Federal de Ouro Preto, (31) 99749-1100, dorval.horta@statum.eng.br
STATUM GEOTECNIA: Belo Horizonte – Minas Geras

² Geól., Universidade Federal de Minas Gerais, (31) 99465-6892, laiz.falcao@statum.eng.br
STATUM GEOTECNIA: Belo Horizonte – Minas Geras

³ Geól., Universidade Federal de Minas Gerais, (31) 97503-8883, guilherme.silveira@statum.eng.br
STATUM GEOTECNIA: Belo Horizonte – Minas Geras

⁴ Geól., Universidade de Belo Horizonte, (31) 97180-9980, felipe.thum@dataminesoftware.com
DATAMINE: Belo Horizonte – Minas Geras

⁵ Eng. Geól., Universidade Federal de Ouro Preto, (31) 99942-0571, claudio.silva@statum.eng.br
STATUM GEOTECNIA: Belo Horizonte – Minas Geras

⁶ Geól., Universidade Federal de Minas Gerais, (31) 98822-3624, flaviaalencar@yahoo.com.br
URBEL: Belo Horizonte – Minas Geras.

1. INTRODUÇÃO

O mapeamento geológico-geotécnico de taludes é uma etapa fundamental para a identificação de condições de instabilidade e a definição de soluções de engenharia adequadas. Nesse contexto, o uso de drones tem se consolidado como uma tecnologia avançada para a aquisição de dados em áreas de difícil acesso, possibilitando análises detalhadas com alta precisão.

Este trabalho apresenta a aplicação integrada de drones e softwares especializados na análise estrutural e na avaliação da estabilidade dos taludes da Pedreira Áurea Madeira Rocha (Pedreira Tupi), uma antiga pedreira de extração de gnaiss localizada em Belo Horizonte/MG. O estudo teve como objetivo caracterizar geológica e geotecnicamente os taludes, utilizando drones para a coleta de dados aerofotogramétricos e *softwares* avançados para modelagem tridimensional e análise geológico-geotécnica. Além disso, o trabalho buscou identificar zonas críticas de instabilidade e realizar análises cinemáticas das descontinuidades estruturais baseadas na compartimentação do maciço rochoso.

Foram identificadas dez zonas com diferentes graus de instabilidade, avaliadas a partir do modelamento tridimensional realizado pelo *software* Sirovison e subdivididas conforme a orientação dos taludes (esquerdo, central e direito). As análises cinemáticas indicaram risco predominante de tombamento e rupturas planas, destacando-se a influência das fraturas F2 e F3. Em setores críticos, os blocos apresentavam geometrias e orientações desfavoráveis, com evidências de movimentações anteriores.

As simulações de queda de blocos, realizadas com o *software* RocFall, evidenciaram trajetórias com alto potencial de alcance às edificações a jusante, reforçando a necessidade de intervenções robustas. Foram considerados blocos de dimensões 2,00 x 2,00 x 2,00 m e densidade de 2,812 kg/m³ (conforme indicação do *software* para blocos de gnaiss), resultando em trajetórias com energias cinéticas elevadas.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

A antiga pedreira de gnaiss, objeto deste estudo, está situada na região norte de Belo Horizonte, no Bairro Tupi (Figura 1), com coordenadas UTM E: 613.382 e UTM N: 7.807.011 (Sirgas2000, Zona 23S). O local corresponde a uma pedreira desativada, caracterizada por taludes escarpados que apresentam diferentes níveis de alteração e fraturamento, além de um histórico de processos erosivos e zonas de instabilidade localizadas.

Foram identificados diversos fatores de risco geológico que afetam as edificações situadas na base da pedreira. O principal perigo está relacionado à queda e tombamento de blocos, uma vez que as moradias se encontram muito próximas à encosta, que, por sua vez, apresenta-se acentuadamente verticalizada, aumentando a vulnerabilidade estrutural da área.



Figura 1. Localização da área de estudo. Com destaque em B para a geometria verticalizada da encosta.

2.1. Contextualização Geológico-Geotécnica Regional

A área de estudo está localizada na porção norte de Belo Horizonte (MG), nas proximidades do Quadrilátero Ferrífero (QFe). O substrato geológico da região é composto pelo Complexo Belo Horizonte e por unidades metassedimentares dos Grupos Sabará, Piracicaba e Itabira, além de coberturas quaternárias (Silva *et al.*, 1995).

O Complexo Belo Horizonte, onde se situa a Pedreira Tupi, cobre cerca de 70% do território de Belo Horizonte e é constituído predominantemente por gnaisses arqueanos, parcialmente remobilizados e migmatizados no Paleoproterozóico. Essas rochas apresentam bandamento composicional, granulação variada e feições de milonitização e migmatização, frequentemente saprolitizadas e recobertas por um manto de intemperismo silto-argiloso (Viana, 2000 *apud* Parizzi, 2004). Estruturalmente, o maciço de gnaiss do Complexo Belo Horizonte é caracterizado por juntas e fraturas, que frequentemente se abrem por desconfinamento, e por foliação milonítica associada a corredores de cisalhamento, originando milonitos e ultramilonitos.

As unidades metassedimentares ocorrem principalmente ao sul e sudeste da cidade e incluem itabiritos silicosos e dolomitos do Grupo Itabira e quartzitos, filitos e dolomitos do Grupo Piracicaba. O Grupo Sabará, composto por xistos e filitos intemperizados, é a unidade mais espessa do Supergrupo Minas e se encontra em contato tectônico com os gnaisses do Complexo Belo Horizonte, marcado por intensa deformação cisalhante (Parizzi, 2004). Além dessas unidades, ocorrem rochas intrusivas, como metagabros e anfibolitos, na forma de diques e *sills* intrusivos nos gnaisses.

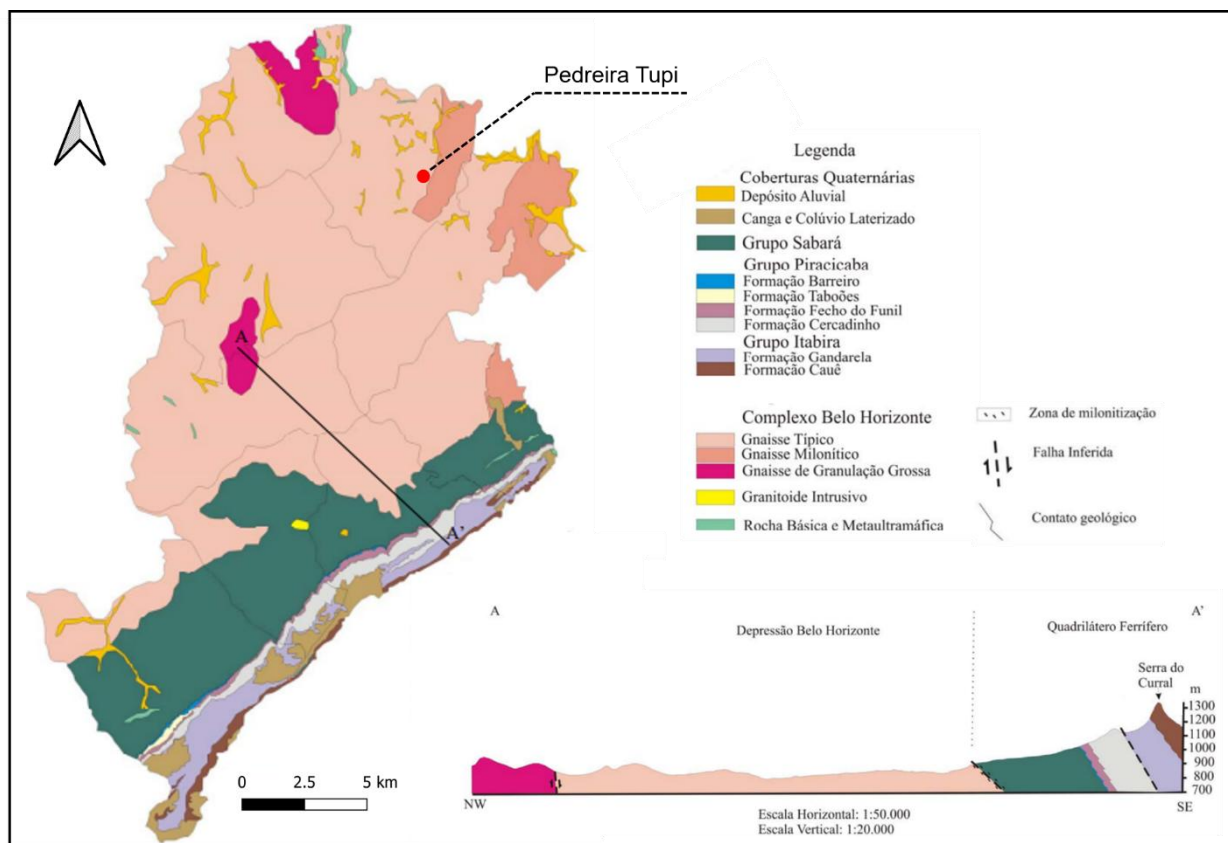


Figura 2. Mapa geológico do município de Belo Horizonte (Modificado de Parizzi, 2004).

3. METODOLOGIA E TRATAMENTO DE DADOS

A metodologia adotada no presente estudo envolveu a aplicação de levantamento aerofotogramétrico, com enfoque na coleta de dados geológicos e geotécnicos para a caracterização estrutural e a avaliação da estabilidade dos taludes da Pedreira Áurea Madeira Rocha. O processo foi estruturado em três etapas principais, sendo elas: levantamento aerofotogramétrico com enfoque no mapeamento geológico-geotécnico, tratamento dos dados coletados por drone em campo e, por fim, a partir dos resultados, foram realizadas análise cinemáticas e estudos sobre a trajetória dos blocos. Para o desenvolvimento do estudo foram empregados softwares como Agisoft Metashape, PixPro, Sirovison e RocFall, visando à identificação de zonas críticas de instabilidade.

3.1. Levantamento Aerofotogramétrico e Mapeamento Geológico-Geotécnico

Com o objetivo de obter uma caracterização precisa do maciço rochoso e avaliar a estabilidade dos taludes da pedreira, foram realizados, de forma integrada, o levantamento aerofotogramétrico e o mapeamento geológico-geotécnico.

O levantamento aerofotogramétrico foi executado com drone DJI Mavic 2 Pro, equipado com câmera de 20 MP e sensor CMOS de 1", utilizando o software DroneDeploy para planejamento de voos automatizados. As imagens foram capturadas nos modos NADIR (perpendicular ao terreno) e oblíquo, com altitude variando entre 60 e 100 m, e sobreposição de 80% longitudinal e 70% lateral. O georreferenciamento foi feito com pontos de controle terrestre (GCPs) obtidos por GPS RTK COMNAV T300, garantindo precisão centimétrica. Por fim, os dados coletados foram processados nos softwares Agisoft Metashape e PixPro (Datamine), resultando na geração da nuvem de pontos, do Modelo Digital de Superfície (MDS), ortomosaico georreferenciado e modelo tridimensional (3D) do maciço, que forneceram uma base cartográfica e permitiram uma análise geotécnica de alta precisão.

Concomitantemente, o mapeamento geológico-geotécnico foi realizado com base em inspeções de campo nas áreas acessíveis, e complementado por análise do modelo 3D – gerado pelo levantamento aéreo – nas áreas de difícil acesso. Por meio das imagens, foram identificadas as litologias predominantes e avaliados aspectos como mineralogia, textura e grau de alteração. Além disso, buscou-se avaliar a condição superficial dos taludes, com a identificação de evidências de instabilidade, processos erosivos e blocos potencialmente instáveis.

No que se refere a caracterização estrutural do maciço, essa se deu a partir da utilização do software Sirovision da Datamine, o qual permite a identificação das principais descontinuidades do maciço rochosos (fraturas, juntas e planos de cisalhamento) a partir da análise das imagens aéreas e modelos 3D gerados pela aerofotogrametria. Nesse sentido, considerou-se parâmetros como orientação (*Dip Direction/Dip*), espaçamento, persistência, rugosidade e grau de preenchimento das descontinuidades identificadas.

Por fim, a partir dos dados estruturais e do padrão de fraturamento, os taludes foram compartimentados em setores geotécnicos distintos, considerando o grau de intemperismo, a resistência do maciço, e a relação entre a orientação das descontinuidades e a geometria dos taludes.

3.2. Análise Cinemática

A análise cinemática é um método bastante utilizado para avaliar deslizamentos estruturalmente controlados em maciços rochosos. Para isto, realiza-se uma comparação entre a atitude dos planos de descontinuidades presentes e a atitude do plano da vertente em relação a um ângulo de atrito interno que é intrínseco à rocha que constitui o talude. A representação gráfica deste tipo de análise é feita a partir de um Diagrama de Igual Área (ou rede de Schmidt-Lambert), em que as estruturas planares e lineares obtidas em campo são plotadas e o resultado ou a configuração final destas feições pode ser interpretado (Lima *et al.*, 2018).

Os quatro mecanismos básicos de movimentação em taludes de rocha são (Figura 3): ruptura circular, planar, em cunha e tombamento de blocos (Hoek & Bray, 1981). Nesse sentido, a análise cinemática foi conduzida utilizando os dados estruturais coletados no mapeamento por drone, processados no software Sirovision da Datamine, considerando a orientação das descontinuidades em relação à geometria dos taludes.

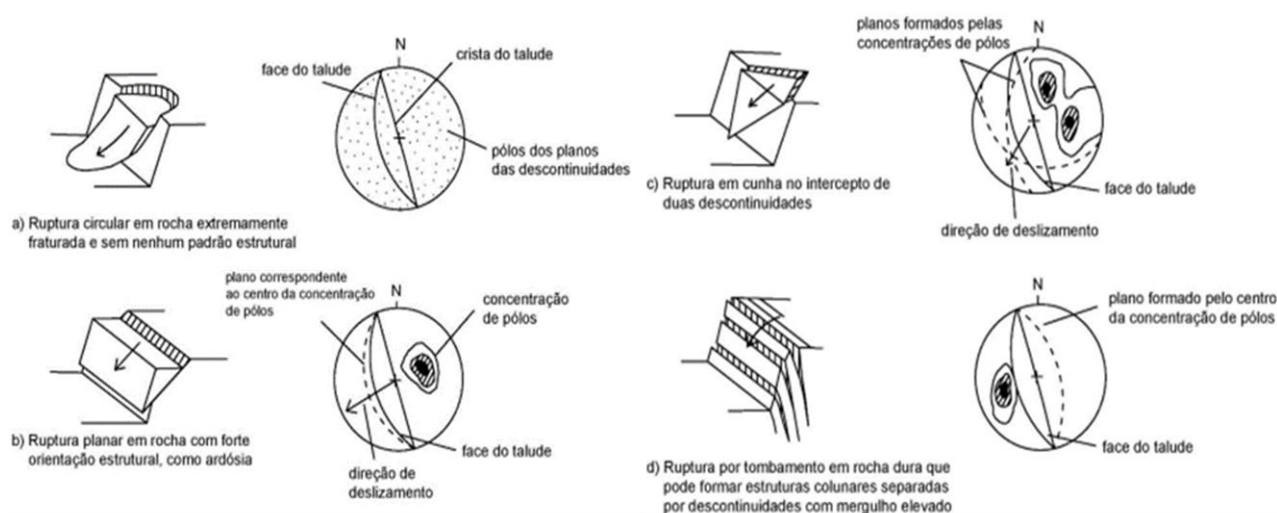


Figura 3. Principais tipos de deslizamentos em vertentes e os estereogramas que evidenciam estes tipos de movimentos. Modificado de Hoek & Bray (1981).

3.3. Estudo da Trajetória de Blocos

O movimento de blocos rochosos ao longo de uma encosta pode ocorrer sob quatro formas principais: queda livre, salto, rolamento e deslizamento. Esses movimentos são influenciados pelas características do meio físico e, principalmente, pela geometria e inclinação do talude. Em taludes íngremes, como os formados por gnaisses foliados e fraturados, as descontinuidades estruturais favorecem a ocorrência de quedas de blocos.

Segundo Ritchie (1963), inclinações acima de 76° favorecem quedas livres; à medida que a inclinação diminui, ocorrem saltos e, por volta de 45° , rolamentos (Figura 4). O autor destaca que deslizamento ocorre nas fases inicial ou final do movimento. Por fim, conforme Bozzolo e Pamini (1986), o ciclo pode reiniciar caso a inclinação da encosta aumente.

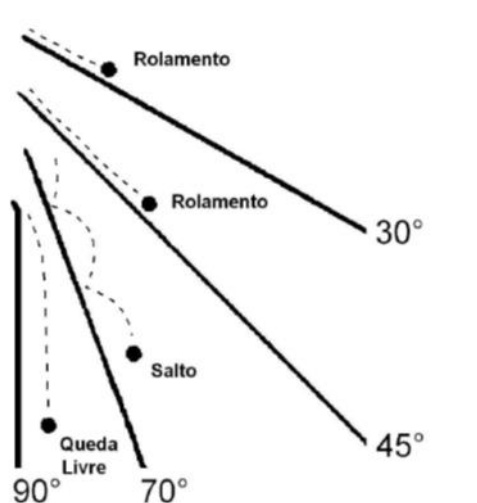


Figura 4. Tipos de movimento em função da inclinação (modificado de Ritchie, 1963).

A principal causa das quedas de blocos em taludes rochosos consiste na presença de fraturas com perda de coesão, resultantes de tensões internas na rocha associadas à desagregação intempérica, essas favorecem o desprendimento progressivo de blocos. Em maciços de gnaiss, o grau de fraturamento é o principal fator desencadeador desses processos (Gomes *et al.*, 2014).

Na análise da trajetória dos blocos, estes são considerados corpos rígidos, sem deformações internas, e as equações do movimento são aplicadas com base nas interações de contato. Sendo assim, para estimar os riscos é necessário prever o alcance e a trajetória dos blocos, a fim de quantificar e compreender os possíveis danos associados e projetar medidas de contenção. Os principais parâmetros utilizados nas análises são: o ângulo de atrito e os coeficientes de restituição normal (R_n) e tangencial (R_t), que indicam, respectivamente, a resistência ao movimento e a perda de energia nas colisões.

Neste estudo, foram realizadas simulações utilizando o *software* Rocfall, foi analisado um talude de rochas gnáissicas com blocos quadrados ($2,00\text{ m} \times 2,00\text{ m} \times 2,00\text{ m}$) e densidade de $2,812\text{ kg/m}^3$. Os valores adotados no estudo foram: $R_n = 0,40$, $R_t = 0,80$, atrito dinâmico = 1 (ângulo de atrito de 45°). Por fim, os resultados mais relevantes para avaliação do risco consistem na energia cinética máxima, a altura de salto e a distância horizontal até as edificações à jusante da Pedreira Tupi.

4. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Levantamento Aerofotogramétrico e Mapeamento Geológico-Geotécnico: O levantamento topográfico da área foi realizado por meio de aerolevantamento com drone (DJI Mavic 2 Pro), com apoio de pontos de controle obtidos via GPS geodésico com tecnologia RTK, permitindo a geração de ortofotos e modelos tridimensionais de alta resolução. Essa base cartográfica foi essencial para a segmentação da pedreira em dez setores distintos, considerando a orientação dos taludes (esquerdo, central e direito – Figura 5) e suas respectivas características estruturais. O

mapeamento geológico-geotécnico indicou a presença de um maciço gnáissico são a pouco alterado (W1-W2), com alta resistência (R5 a R6) e GSI estimado em 82, classificando-o como um maciço intacto a blocado com descontinuidades em boas condições. Foram identificadas famílias de fraturas específicas por setor, com variações em persistência, espaçamento e orientação, sendo observadas estruturas críticas com potencial de instabilização, especialmente nos setores 2, 4, 7 e 8, onde se concentram blocos segmentados e fraturamentos intensos.



Figura 5. Mapa de segmentação dos taludes da Pedreira Tupi.

Análise Cinemática: A análise cinemática dos taludes foi conduzida a partir da modelagem tridimensional e mapeamento estrutural realizados com o *software* Sirovision, considerando as principais famílias de fraturas e a orientação das faces dos taludes. Foram identificados três mecanismos principais de instabilidade: ruptura planar, tombamento e ruptura em cunha. A ruptura planar ocorreu principalmente nas fraturas F1 e F3, com planos orientados favoravelmente em relação à face dos taludes. O mecanismo de tombamento foi predominante nas fraturas verticais da família F2, com maior relevância nas regiões centrais dos taludes esquerdo e central. A possibilidade de ruptura em cunha foi identificada em pontos onde há interseção entre famílias estruturais distintas, notadamente entre F2 e F3, embora com menor recorrência. As análises mostraram zonas críticas de instabilização, onde blocos segmentados por fraturas apresentam potencial de deslocamento, o que fundamentou o dimensionamento das futuras soluções de contenção. As Figuras 6, 7 e 8 apresentam a distribuição espacial das fraturas identificadas nos taludes esquerdo, central e direito, respectivamente, bem como o estereograma elaborado para cada setor.

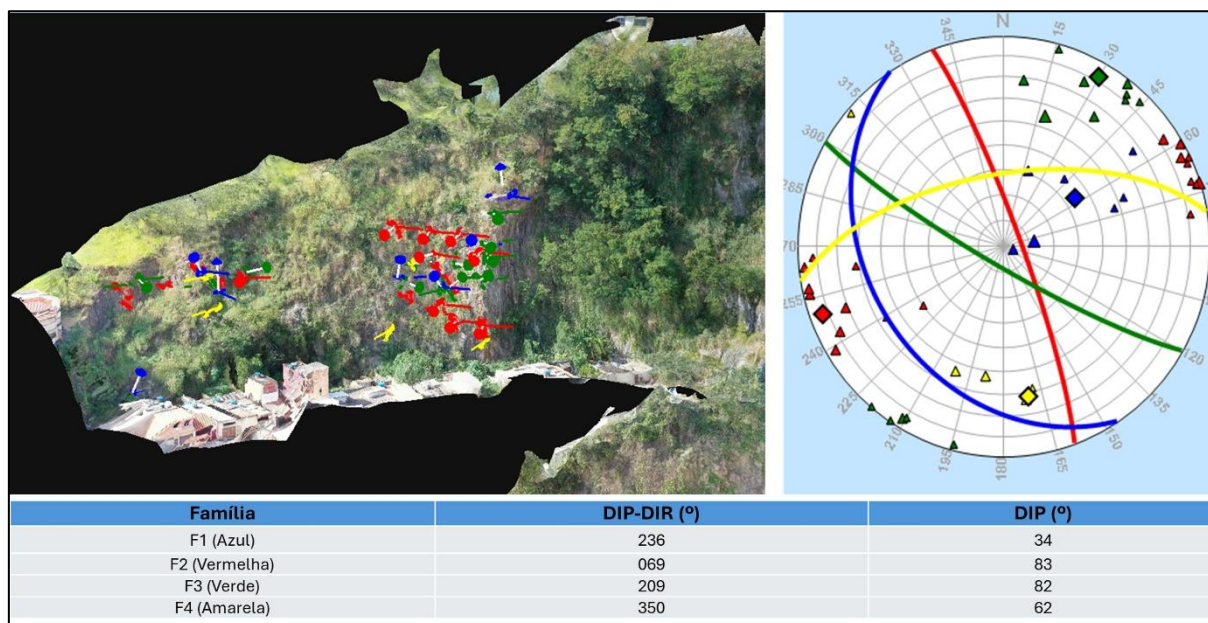


Figura 6. Distribuição estrutural das famílias de fraturas mapeadas no talude esquerdo.

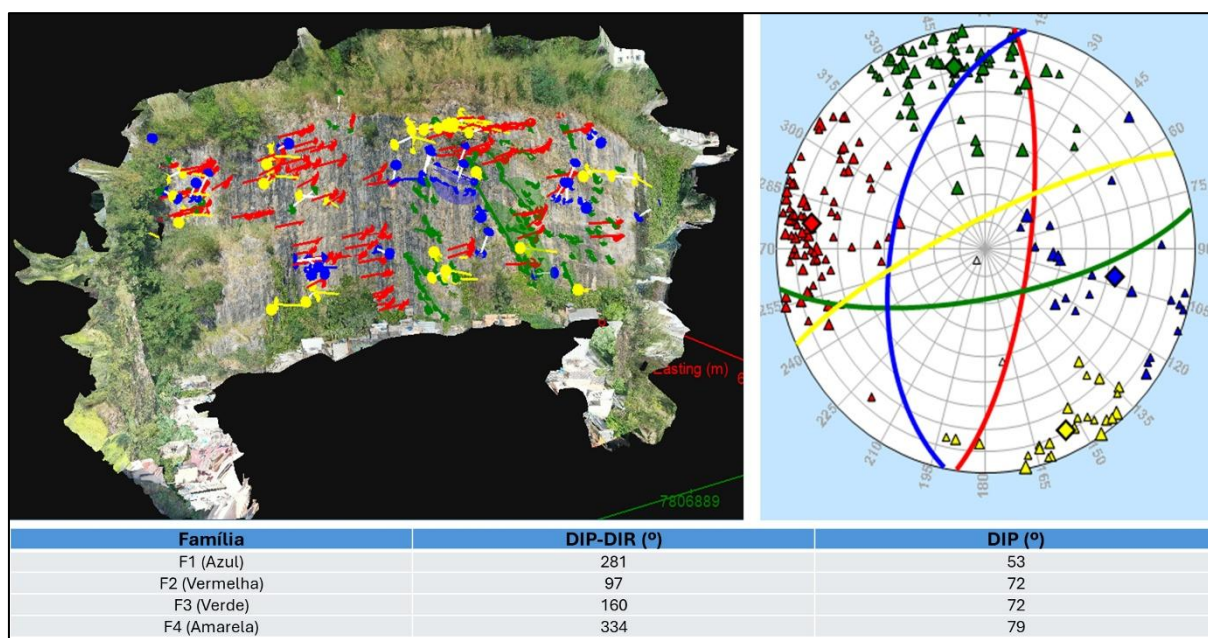


Figura 7. Distribuição estrutural das famílias de fraturas mapeadas no talude central.

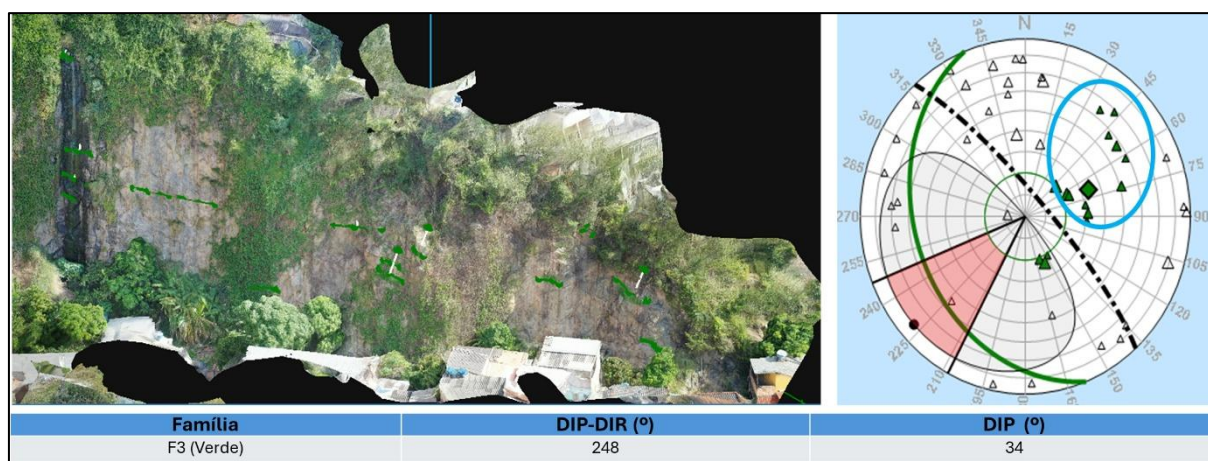


Figura 8. Distribuição estrutural das famílias de fraturas mapeadas no talude direito.

Estudo da Trajetória de Blocos: As simulações da trajetória de blocos foram realizadas no software RocFall (Figura 9), considerando blocos de dimensões 2,00 x 2,00 x 2,00 m e densidade de 2,812 kg/m³. Os parâmetros adotados nas simulações incluíram coeficientes de restituição normal (0,40) e tangencial (0,80), ângulo de atrito de 45°, e geometria baseada nos dados reais obtidos em campo. Os resultados indicaram que os blocos, ao se desprenderem, possuem potencial para atingir as áreas ocupadas a jusante da pedreira, com trajetórias caracterizadas por quedas livres, saltos e rolamentos, conforme a geometria do talude. As análises evidenciaram a necessidade de contenção eficiente para absorção de energia e retenção de blocos. Com base nos resultados obtidos, foram propostas soluções de contenção passiva com chumbadores GEWI Ø32 mm ancorados em profundidades de até 6,00 m, malhas de aço tipo Steelgrid HR50 (ou similar) e, em setores específicos, muros em gabião. O fator de segurança global calculado para os sistemas de contenção variou até 1,84, superando o valor mínimo de 1,50 exigido pelas normas técnicas para áreas com alto risco à vida humana, garantindo a eficácia das medidas adotadas.

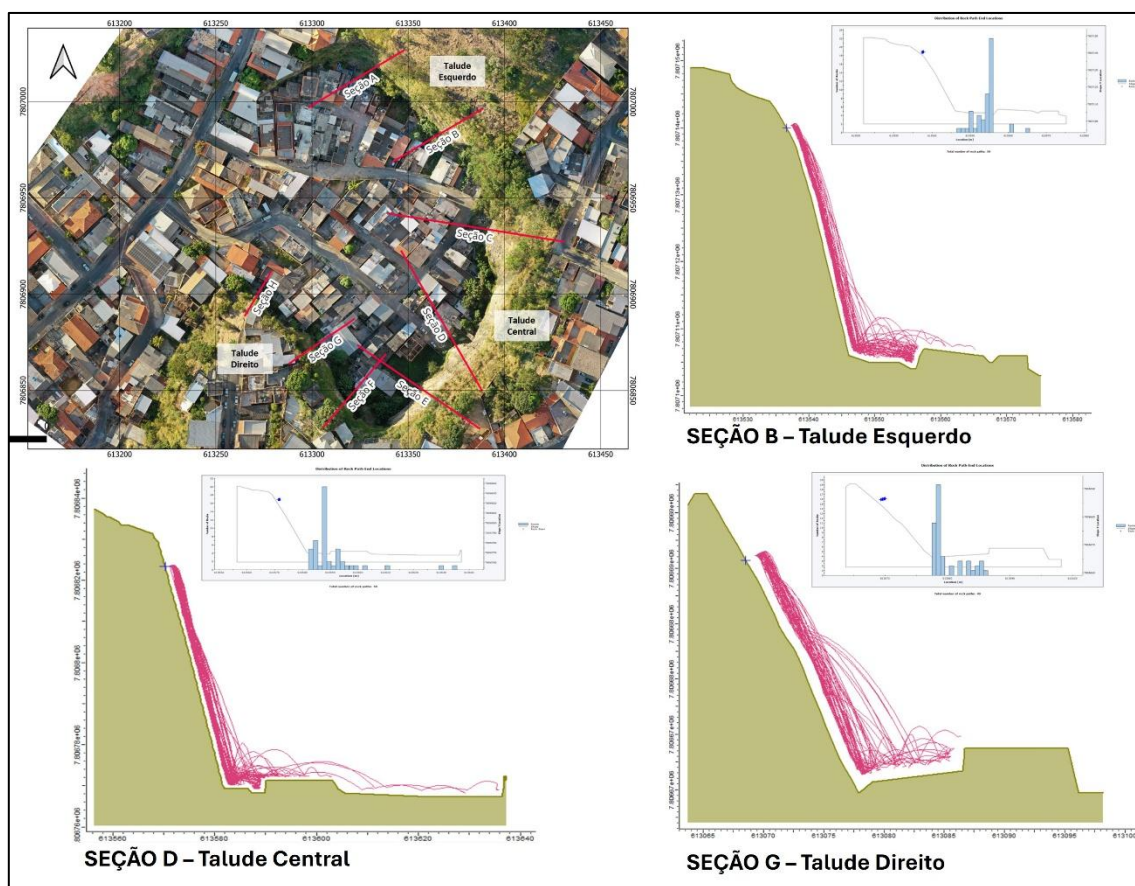


Figura 9. Simulações da trajetória de blocos realizadas no software RocFall.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam sua gratidão à STATUM e ENERGEO pela oportunidade de desenvolver projetos que incorporam tecnologias inovadoras, contribuindo para a excelência técnica e o aprimoramento contínuo, tanto individual quanto coletivo. A parceria com a empresa permitiu a aplicação de metodologias avançadas, ampliando a qualidade das análises e fortalecendo a integração entre pesquisa e prática profissional.

Agradecemos também à DATAMINE pelo suporte fundamental na disponibilização de softwares especializados, indispensáveis para o processamento e a interpretação dos dados. Além disso, reconhecemos o importante apoio técnico fornecido pela empresa sempre que necessário, permitindo o aprimoramento das análises e a obtenção de resultados mais robustos. Por fim, estendemos nossos agradecimentos à URBEL pela disponibilização de informações essenciais para o desenvolvimento do estudo, cuja contribuição foi determinante para a contextualização geotécnica da área e para a fundamentação das análises realizadas.

REFERÊNCIAS

Bozzolo, D., Pamini, R. (1986) "*Simulation of rock falls down a Valley Site*", Acta Mechanica, 63, 113–130 p.

Gomes, L. E. S., & Sobreira, F. G. (2013) "*Avaliação do perigo de queda de blocos em encostas rochosas rodoviárias*". Este estudo discute a avaliação do perigo de queda de blocos em taludes rochosos, abordando fatores como fraturamento e intemperismo".

Hoek, E. and Bray, J. (1981) "*Rock Slope Engineering*", Revised 2nd Edition, The Institution of Mining and Metallurgy, London.

Lima, M. (2018) "*Análise cinemática de taludes da Pedreira São Jorge, Curitiba-PR*" Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Paraná.

Parizzi, M. G. (2004) "*Condicionantes e Mecanismos de Ruptura em Taludes da Região Metropolitana de Belo Horizonte, MG*", Universidade Federal de Ouro Preto.

Ritchie, A. M. (1963) "*Evaluation of rock fall and its control*", Highway Res. Rec. 17, HRB, National Research Council, Washington, D.C., 13–28 p.

Silva, A. S. Carvalho, E. T, Fantinel, L. M., Romano, A. W. Viana, C. S. (1995) "*Estudos Geológicos, Hidrogeológicos, Geotécnicos e Geoambientais Integrados no Município de Belo Horizonte*", Convênio: PMBH, SMP, FUNDEP/ UFMG, 490p.