

Avaliação de Queda de Blocos em Encosta Urbana com Modelagem 3D: Morro da Boa Vista, Vila Velha/ES

Victor Tozato Cunha

Geólogo, Solution IPD, Curitiba/PR, Brasil, victortozato@solution-ipd.com

Diogo Peixoto Cordova

Professor Adjunto, UFRGS, Porto Alegre/RS, Brasil, diogo.cordova@ufrgs.br

José Waldomiro Jiménez Rojas

Professor Adjunto, UNIPAMPA, Caçapava do Sul/RS, Brasil, joserojas@unipampa.edu.br

Fernando Alves Cantini Cardozo

Professor Adjunto, UNIPAMPA, Caçapava do Sul/RS, Brasil, fernandocardozo@unipampa.edu.br

RESUMO: Este estudo analisa a suscetibilidade a quedas de blocos rochosos no Morro da Boa Vista, em Vila Velha (ES), área de relevo acidentado, ocupação urbana desordenada e com histórico de eventos em 2016 e 2019. Os objetivos foram realizar uma retroanálise do evento de 2016, caracterizar a encosta geotecnicamente e avaliar a estabilidade dos blocos rochosos, calculando seus fatores de segurança (FS). A metodologia baseou-se na criação de um Modelo Virtual de Afloramento (MVA). Devido a restrições no espaço aéreo que impediram a cobertura completa da área de estudo com um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), optou-se pela utilização de dados do Google Earth, processados nos softwares Blender, Micromine e RocSlope. Foram mapeadas as descontinuidades estruturais e identificados cinco blocos principais. O Bloco 1, o maior, tem um volume estimado de 41 mil m³. O Bloco 5, que se deslocou em 2016, foi usado como referência para a calibração dos parâmetros de resistência. A estabilidade foi avaliada pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb em cenários saturados. Os fatores de segurança calculados variaram entre 1,68 e 2,61, indicando uma condição geral de estabilidade. O estudo demonstra a viabilidade técnica das ferramentas utilizadas e reforça a importância de análises preventivas para a gestão de risco geológico e o planejamento urbano.

PALAVRAS-CHAVE: estabilidade de encostas; queda de blocos; modelagem discreta 3D; fator de segurança

ABSTRACT: This study analyzes the susceptibility to rockfalls on Morro da Boa Vista, in Vila Velha (ES), an area with rugged terrain, disorderly urban occupation, and a history of events in 2016 and 2019. The objectives were to perform a back-analysis of the 2016 event, geotechnically characterize the slope, and evaluate the stability of the rock blocks by calculating their safety factors (SF). The methodology was based on the creation of a Digital Outcrop Model (DOM). Due to airspace restrictions that prevented full coverage of the study area with an Unmanned Aerial Vehicle (UAV), the study opted for the use of data from Google Earth, processed with Blender, Micromine, and RocSlope software. Structural discontinuities were mapped, and five main blocks were identified. Block 1, the largest, has an estimated volume of 41,000 m³. Block 5, which was displaced in 2016, was used as a reference for calibrating the resistance parameters. Stability was evaluated using the Mohr-Coulomb failure criterion in saturated scenarios. The calculated safety factors ranged from 1.68 to 2.61, indicating a general condition of stability. The study demonstrates the technical feasibility of the tools used and reinforces the importance of preventive analyses for geological risk management and urban planning.

KEYWORDS: slope stability; rockfall; discrete 3D block modeling; safety factor

1 INTRODUÇÃO

O estudo da estabilidade de encostas e blocos rochosos é de grande importância em áreas urbanas, onde a ocupação desordenada aumenta o risco de desastres. No Espírito Santo, assim como em outras partes do

Brasil, a falta de planejamento leva a população a morar em áreas de risco. No município de Vila Velha, por exemplo, a ocupação de regiões de relevo acidentado, com alterações na vegetação e no terreno, pode desestabilizar encostas que já possuem um risco natural de movimentação de solo e rocha.

A urgência desse tipo de análise ficou evidente em Vila Velha após as quedas de blocos rochosos no Morro da Boa Vista (Figura 1), ocorridas em 2016 e 2020. Esses eventos serviram de alerta para a comunidade e os órgãos públicos sobre o perigo geológico presente no local. Em consequência direta desses acidentes, surgiu a necessidade de aprofundar o conhecimento sobre as características geológicas e geotécnicas da área para prevenir futuras tragédias.

Para realizar essa análise, a tecnologia moderna oferece ferramentas eficientes e de baixo custo. O uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), ou drones, permite mapear locais de difícil acesso e criar modelos tridimensionais detalhados, otimizando o tempo e os custos do projeto. As imagens obtidas por drones, complementadas por dados de satélite para uma cobertura mais ampla, são fundamentais para elaborar estudos de relevo e geologia com alta qualidade, auxiliando no planejamento e na gestão de riscos.

Nesse contexto, o objetivo geral deste trabalho é analisar o risco geológico no Morro da Boa Vista, localizado no bairro São Torquato, em Vila Velha, ES. Especificamente, busca-se elaborar um Modelo Virtual de Afloramento da área, identificar e caracterizar blocos rochosos potencialmente instáveis, analisar os possíveis mecanismos de ruptura (planar, cunha e tombamento), calcular o volume e a massa desses blocos e, por fim, determinar seus respectivos fatores de segurança quanto à ruptura.

A área de estudo está inserida no contexto geológico local no Maciço Vitória, que se trata de um maciço representado por vários corpos individualizados de Granito Porfíritico, envolvendo megacristais de 3x1cm de dimensões, exibe foliação de fluxo magmático e intrusões de diques basálticos (SGB, 2014).

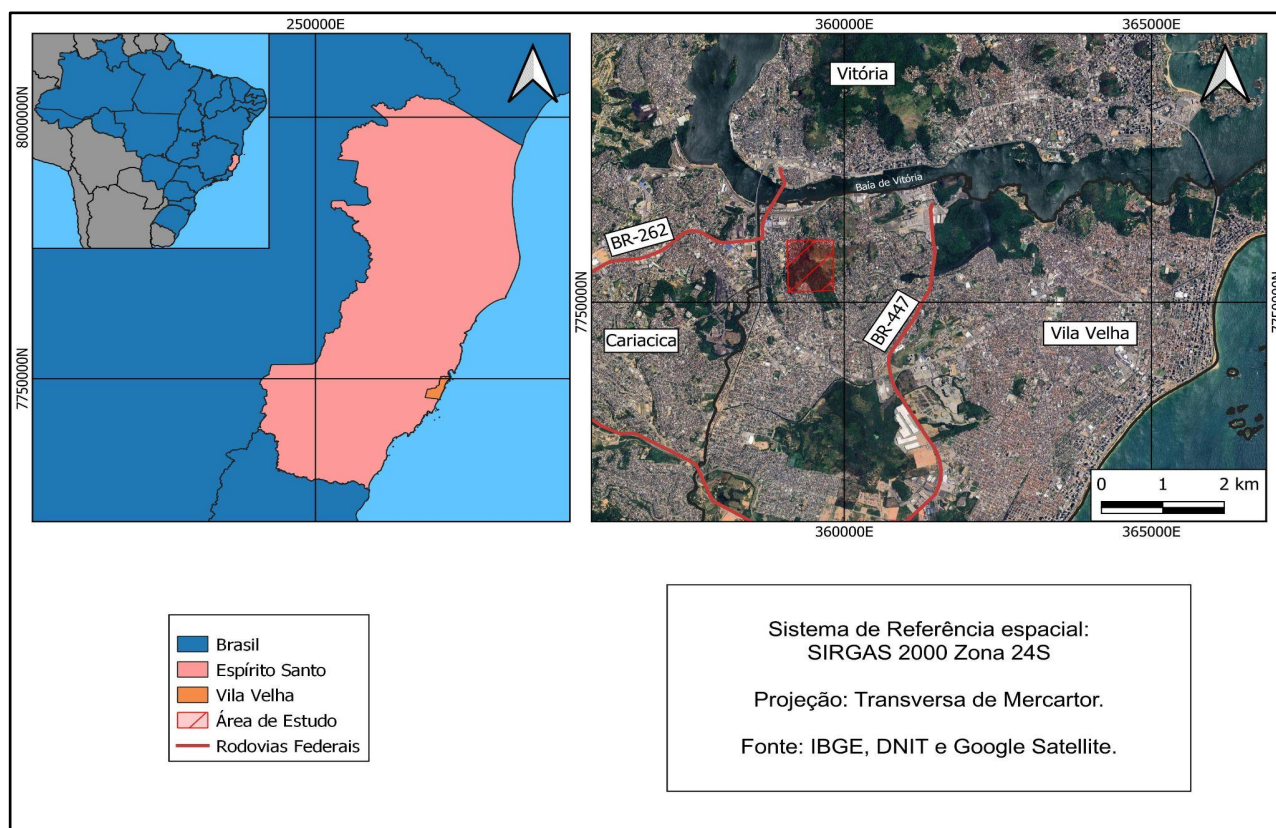


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Caracterização de discontinuidades e mecanismos de ruptura

Segundo Fiori (2015), discontinuidade é considerada um plano de fraqueza nas rochas, ao longo do qual o material rochoso é estruturalmente descontínuo e apresenta uma menor resistência ao cisalhamento, que pode



mesmo ser nula, dependendo da frequência e natureza do preenchimento das descontinuidades presentes, como falhas, juntas, planos de acamamento, laminação, planos de foliação, zonas de cisalhamento, fendas de tração e veios ou diques.

Dois aspectos são de extrema relevância quando se trata da influência da orientação das juntas na estabilidade de vertentes rochosas: a) se as juntas ou as interseções entre elas surgem na vertente com um ângulo igual ou menor que a inclinação da própria vertente ou talude, e b) se o ângulo de inclinação das juntas ou o declive das interseções das juntas supera o ângulo de atrito ao longo das superfícies. Portanto, o mero fato de as descontinuidades e suas interseções emergirem nas vertentes dos taludes é de significativo interesse para a estabilidade delas.

De acordo com Fiori (2015), a estabilidade de taludes rochosos tem como base as atitudes dos planos de fraqueza em relação à atitude da vertente ou talude, levando-se em consideração o ângulo de atrito atuante ao longo do plano de fraqueza. Muitos blocos em talude estão em condições estáveis, embora contenham planos de fraqueza muito inclinados. Essa condição ocorre quando não há liberdade de movimentação ao longo da superfície de fraqueza, pois, pode haver impedimentos para sua movimentação (Fiori, 2015). Porém, uma vez retirado este impedimento, o bloco ficará livre para movimentar-se. Esta movimentação ou ruptura em blocos rochosos podem ocorrer de quatro formas diferentes, que serão citadas abaixo.

A ruptura planar é um dos mecanismos mais comuns de instabilidade em maciços rochosos. Para que ocorra, a geometria das descontinuidades deve ser desfavorável em relação à orientação do talude (Hoek; Bray, 1981). Segundo Wyllie e Mah (2004), são necessárias cinco condições geométricas e de resistência: o plano de fraqueza deve ter direção aproximadamente paralela à face do talude; a inclinação desse plano deve ser menor que a da face do talude, permitindo que ele aflore; a inclinação deve ser maior que o ângulo de atrito da descontinuidade; limites laterais devem existir para isolar o bloco; e a superfície de ruptura deve aflorar na parte superior do talude ou terminar em uma fenda de tração.

Os deslizamentos em cunha envolvem escorregamentos translacionais ao longo de pelo menos dois conjuntos de planos que se intersectam (Fiori, 2015). E ainda seguindo as afirmações de Fiori (2015), os deslizamentos em cunha devem satisfazer três condições: As superfícies de deslizamento deverão intersectar ou aflorar na face; A linha de intersecção dos dois planos de deslizamento deverá aflorar na face; O caimento da linha de intersecção deverá ser maior que o ângulo de atrito dos planos.

O tombamento de blocos não está ligado a escorregamento propriamente dito, segundo Fiori (2015), trata-se de blocos individuais, ou um conjunto de blocos que rotacionam sobre eixos fixos tombando sobre a face livre da vertente, e para tal, deve-se haver três condições, que são: Deverá haver duas famílias de descontinuidades que se entrecruzam, inclinadas uma a favor e outra contra a inclinação da face; As condições mais favoráveis ao tombamento aparecem quando a família que mergulha contra a face é inclinada a ângulos maiores que $(90 - \phi)$ (Hoek; Bray, 1981), enquanto a família que mergulha a favor deverá ter inclinações menores que o ângulo de atrito interno; Os rumos de mergulho desses planos deverão se situar dentro de 20° do rumo de mergulho da face do talude.

Por conta da compartimentação de maciços causados por intemperismo em faces de taludes naturais ou escavados, pode ocorrer o desprendimento de matacões gerando assim rolamentos de blocos. Os blocos em forma de matacões que ficam expostos na superfície em razão da erosão do solo adjacente podem perder a estabilidade, rolando encosta abaixo (Queiroz, 2016).

2.2 Estudos anteriores no local

Na região de estudo, existem alguns trabalhos feitos com o objetivo de delimitar áreas de risco geológico, como o feito pelo Serviço Geológico do Brasil - SGB (2012), que visou delimitar áreas de alto e muito alto risco de enchentes e movimentos de massa. Em 2020 a prefeitura municipal de Vila Velha fez o Plano Municipal de Redução de Risco, onde foi delimitado setores de risco de rolamento de blocos e deslizamento translacional raso.

Em 2017, Cunha *et al.* Analisou a metodologia das obras emergenciais (Figura 2) que foram executadas nas rochas das regiões afetadas pelo deslocamento do bloco em 2016, portanto é possível saber quais setores foram contemplados pelas obras de contenção e mitigação de danos geológicos.



Figura 2. Obras de contenção de bloco rochoso sendo executado. Fonte: Cunha *et al* (2017).

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho se divide em 4 etapas, a primeira etapa consiste na revisão bibliográfica e do levantamento a campo. Já a segunda etapa trata da geração do modelo 3D do afloramento, georreferenciamento e melhoria da malha de triangulação para a realização das próximas etapas. Por sua vez a terceira etapa consiste em obter informações sobre os blocos, como volume, massa a partir dos planos de descontinuidade identificados, e por fim na última etapa onde é calculado o fator de segurança.

Inicialmente, realizou-se um levantamento em campo com VANT para a obtenção de imagens de alta resolução do maciço rochoso. Contudo, durante o plano de voo, constatou-se que a porção superior da encosta não pôde ser imageada devido a restrições do espaço aéreo, relacionadas à proximidade com a rampa de descida do aeroporto de Vitória. Diante dessa limitação, as imagens do VANT foram utilizadas como apoio visual e reconhecimento da área. Para a análise quantitativa e a geração do modelo 3D, utilizado nos cálculos de estabilidade, optou-se pela metodologia de captura de dados do Google Earth, permitindo a representação completa da encosta.

Durante a segunda etapa foi utilizado o software RenderDoc para capturar a imagem do Google Earth através do navegador Google Chrome. Após foi utilizado o software Blender para importar o modelo obtido e exportar no formato em que pudesse ser executado pelo software Micromine e então georreferenciar o modelo e corrigir erros na malha de triangulação.

A terceira etapa ainda no software Micromine foi o mapeamento dos planos de descontinuidades e por consequência a identificação dos blocos para análises posteriores. Dessa forma foi obtido o volume dos blocos formados e as orientações das principais descontinuidades bem como suas localizações. Por fim, na última etapa foi utilizado o software RocSlope para definir o fator de segurança dos blocos a partir da calibração dos parâmetros de resistência, a partir do bloco já deslizado, portanto uma retroanálise de parâmetros.

3.1 Criação do modelo 3D e mapeamento de descontinuidades

Para a realização deste trabalho, serão empregados *softwares* para a criação do modelo 3D a ser obtido, os quais incluem: Google Earth, onde será obtida a imagem de satélite em 3D da área de estudo; RenderDoc, um depurador gráfico utilizado para capturar a imagem do Google Earth e o Blender, será utilizado para importar o modelo obtido no Google Earth e exportar no tipo de arquivo “.fbx”;

O mapeamento das discontinuidades estruturais foi realizado de forma digital sobre o Modelo Virtual de Afloramento (MVA) no software Micromine. Utilizando as ferramentas de medição e criação de planos do software, foram identificadas as principais famílias de fraturas visíveis na superfície do modelo 3D. Para cada plano representativo de uma discontinuidade, foram medidos seus parâmetros de orientação, como a direção do mergulho (*Dip direction*) e o ângulo de mergulho (*Dip*). A intersecção desses planos mapeados permitiu a individualização dos blocos rochosos, cujos volumes foram calculados automaticamente pelo software com base na geometria delimitada.

3.2 Software de análise de estabilidade

Para analisar a estabilidade dos blocos no maciço e as características da ruptura, caso ocorra, será utilizado o *software* RocSlope da empresa RocScience, para definir os planos de discontinuidades e blocos rochosos em modelos 3D e analisar estabilidade deles.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados da observação de campo

Na visita de campo foi realizado um voo de VANT, com o acompanhamento e intermédio da Defesa Civil Municipal para maior segurança. O plano de voo foi efetuado e foram obtidas imagens do maciço (Figura 3 “a” e “b”), porém, na porção superior do maciço não foi possível sobrevoar, pois o espaço aéreo é bloqueado por conta da rampa de descida do aeroporto de Vitória.



Figura 3. Imagens obtidas pelo levantamento feito com o drone. a) vertente do maciço com alta inclinação; b) bloco que deslizou em 2016.

4.2 Modelo 3D

Após obtenção do modelo 3D, foi necessário tratar a malha (*wireframe*) para importação no *software* RocSlope de análise de estabilidade e de queda de blocos. O volume dos blocos rochosos de interesse foi calculado e as informações dos planos das principais discontinuidades do maciço foram medidos com as ferramentas de planos do Micromine. Os planos medidos são mostrados na Tabela 1, abaixo.



Tabela 1. Descontinuidades medidas.

Descontinuidade	Dip(°)	Dip direction(°)
1	25	254
2	89	330
3	87	339
4	45	205
5	50	59
6	90	346
7	35	105
8	32	211

Ainda no software Micromine, com a intersecção dos planos destas descontinuidades, foram identificados 5 blocos rochosos com diferentes tamanhos, os quais podem ser observados na vista 3D do modelo (Figura 4).

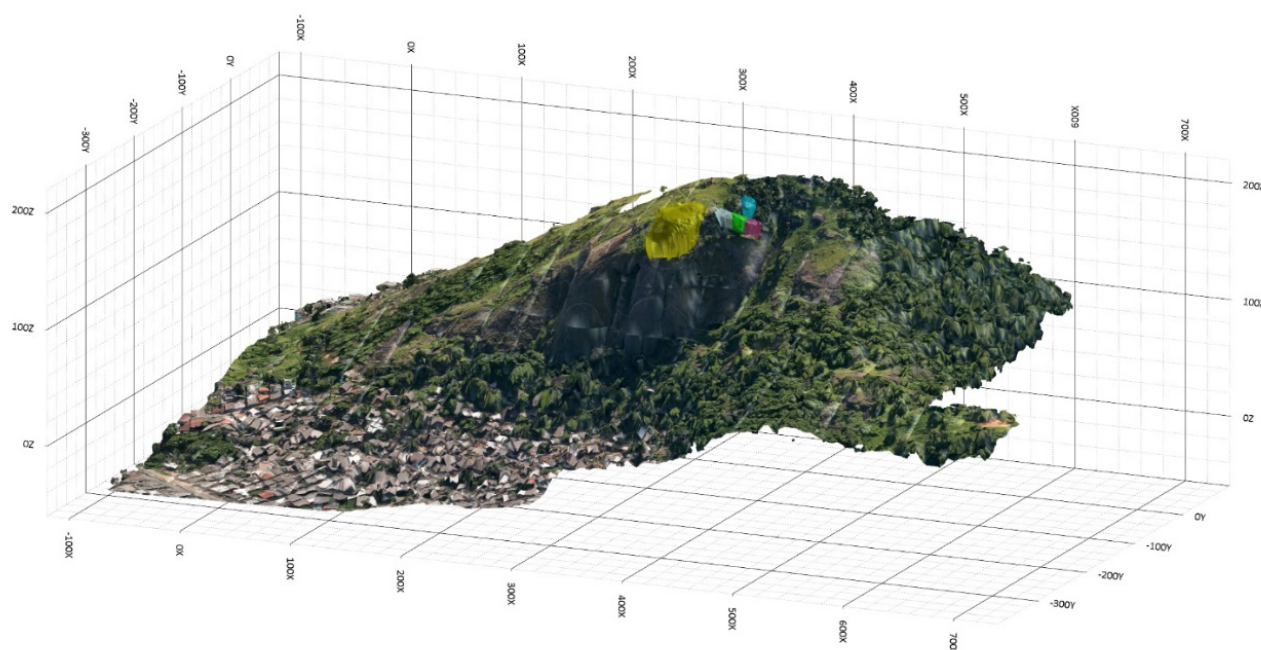


Figura 4. Vista do modelo no Micromine com os blocos rochosos em evidência.

4.3 Retroanálise e fatores de segurança

Para a análise do fator de segurança (FS), foi realizada a importação do modelo 3D no *software* RocSlope juntamente com as descontinuidades obtidas. Dessa forma, com a intersecção dos planos destas descontinuidades, foram identificados 5 blocos rochosos com diferentes tamanhos (Tabela 2) conforme mostra a Figura 5. O bloco número 5, em cor azul é o bloco o qual sofreu ruptura e queda no ano de 2016.

Tabela 2. Dimensões dos blocos e FS analisado para situação seca e saturada.

Bloco	Volume (m ³)	Massa (ton)	FS seco	FS saturado
1	41.614	112.357	1,79	1,68
2	4.153	11.544	2,61	2,29
3	1.682	4.675	100	100
4	2.210	6.143	100	100
5	331	921	1,41	0,99

Foram atribuídos inicialmente valores de resistência para as descontinuidades do maciço, baseados na tabela publicada por Barton *et al.* (1974). Estes parâmetros de resistência, juntamente com a pressão de água

no maciço foram calibrados utilizando-se o bloco 5 como referência, ou seja, os parâmetros foram variados até que o FS do bloco 5 fosse próximo a 1 (indicando ruptura), de forma a simular a condição real para os outros blocos ainda existentes. Dessa forma as propriedades de resistência definidas foram coesão = 0.025 MPa e ângulo de atrito = 35°.

É importante ressaltar que o bloco 2 foi contemplado com obra emergencial visando sua estabilização no ano de 2016. Consequentemente, os blocos 3 e 4 só podem se movimentar caso o bloco 2 os libere. Portanto, o principal interesse é observar o fator de segurança do bloco 1, principalmente dada sua grande dimensão e possíveis riscos. Observa-se que o FS mesmo na pior condição saturada apresenta fator de segurança próximo a 1,7 o que nos permite dizer dadas as condições analisadas de simplificação e suavização do modelo, de que se encontra em situação de estabilidade segundo os princípios da NBR 11682 – Estabilidade de encostas.

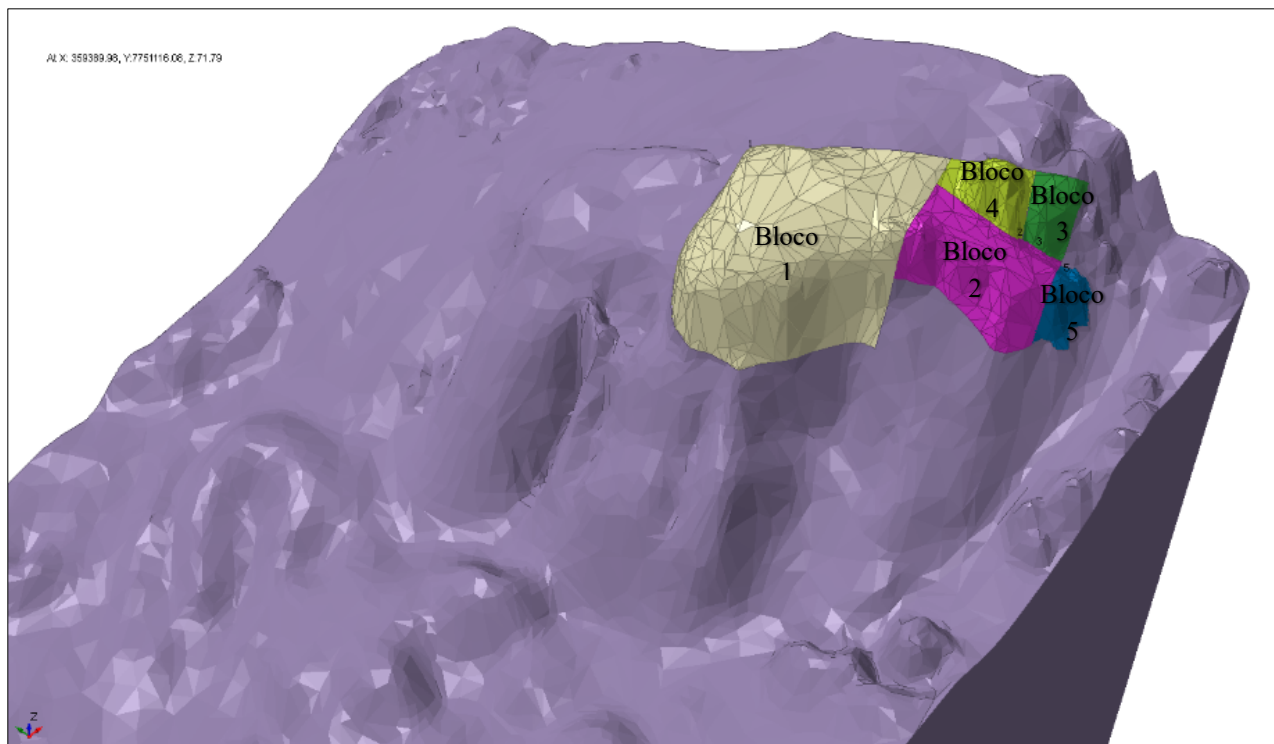


Figura 5. Vista para nordeste do modelo 3D no software RocSlope com os cinco blocos discretizados.

5 CONCLUSÕES

A utilização de modelos virtuais de afloramentos, derivados de ferramentas gratuitas como as do Google Earth, mostrou-se satisfatória para a análise de características físicas de interesse, apesar da baixa resolução se comparado a levantamentos obtidos por VANT. Foram medidos os volumes dos blocos de interesse, incluindo aquele que já se deslocou e outros quatro blocos ao redor. Os blocos apresentaram volumes expressivos, especialmente o bloco de maior interesse no estudo, o Bloco 1, que apresentou um volume de aproximadamente 41,6 mil m³ e uma massa de aproximadamente 112 mil toneladas.

Foi realizada a calibração das propriedades de resistência para o modelo, seguindo o Fator de Segurança (FS) do Bloco 5, que já havia se deslocado, até atingir um valor próximo a 1. Com esse ajuste das propriedades, foi possível obter um FS mais próximo do real para o Bloco 1. O Bloco 2 foi alvo de obras emergenciais, portanto, seu fator de segurança é maior do que o calculado pelo RocSlope. Os Blocos 3 e 4 estão apoiados pelo bloco contido pela obra, de modo que seu deslocamento só ocorreria caso o Bloco 2 fosse liberado.

O Bloco 1 apresentou um fator de segurança 1,68, mesmo em situação de grande saturação de descontinuidades, indicando um grau de estabilidade considerado estável. Entretanto, por conta da resolução do modelo e das suavizações feitas no mesmo, este valor pode variar, desta maneira, ainda existe a possibilidade de que em caso de queda de blocos menores na região do Bloco 1 estes possam chegar até as áreas construídas, consideradas áreas de risco conforme dados da própria defesa civil.



É importante ressaltar as limitações inerentes a esta metodologia. A principal delas reside na resolução do modelo 3D gerado a partir do Google Earth, que, embora funcional para uma análise preliminar, é inferior àquela obtida por levantamentos com VANT ou laser scanner. Essa menor resolução pode levar a uma suavização da topografia real e à omissão de descontinuidades de menor porte, o que pode influenciar a precisão do cálculo dos volumes e dos fatores de segurança. Além disso, a definição dos parâmetros de resistência foi baseada em uma retroanálise de um único evento de ruptura, o que é uma simplificação, visto que as propriedades podem variar ao longo das diferentes descontinuidades do maciço. Portanto, os resultados devem ser interpretados como uma avaliação de estabilidade em escala de talude, indicando a necessidade de investigações geotécnicas mais detalhadas para projetos de contenção definitivos.

Portanto, a utilização de modelos virtuais 3D livres, como Google Earth, em algumas situações preliminares pode ser considerada como uma ferramenta de análise. Principalmente em contextos em que o uso de VANTs não é possível, contribuindo significativamente para a avaliação de riscos e planejamento de medidas mitigadoras em áreas susceptíveis a deslocamentos de blocos rochosos.

AGRADECIMENTOS

As empresas Rocscience e Micromine pelo fornecimento de licenças educacionais e a defesa civil do estado e do município pelo acompanhamento a campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J. (1974) Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, v. 6, n. 4, p. 189–236.
- Cunha, R. T., Moreira, A. C. M., Menegheli, G. S., Oliveira, R. M., Barbosa, M. C. R. (2017) Métodos de Contenção utilizados em deslizamento de bloco rochoso: Estudo de Caso do Morro Boa Vista, Espírito Santo. In: COBRAE 2017, Florianópolis. *Anais... ABMS*.
- Fiori, A. P. (2015) *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes*. São Paulo: Oficina de Textos. 576p.
- Hoek, E., Bray, J. W. (1981) *Rock Slope Engineering*, 3º ed., London: The Institution of Mining and Metallurgy, 368p.
- Queiroz, R. C. (2016) *Geologia e geotecnia básica para engenharia civil*. São Paulo: Blucher. 416p.
- Serviço Geológico do Brasil – SGB (2012). *Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a enchentes e movimentos de massa: Vila Velha – Espírito Santo*. Belo Horizonte.
- Serviço Geológico do Brasil – SGB (2014). *Carta Geológica – Escala 1:100.000 Folha SF - 24B – I*. Vitória.
- Wyllie, D. C., Mah, C. W. (2004) *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*. 4. ed. New York: Spon Press. 431 p.