

APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR E Q EM TALUDES NO BAIRRO ENGENHO NOGUEIRA – BELO HORIZONTE E ANÁLISE CINEMÁTICA PARA QUEDA DE BLOCOS E RUPTURA EM CUNHA

Pedro Feldmann TONELLI¹; Talita Caroline MIRANDA²

Resumo – Este trabalho apresenta uma caracterização geotécnica e análise da estabilidade de taludes em uma antiga pedreira localizada no bairro Engenho Nogueira, em Belo Horizonte (MG), atualmente ocupada por um condomínio residencial. O maciço rochoso, composto por gnaisse do Complexo Belo Horizonte, foi dividido em nove setores com base nas características estruturais observadas em campo. Foram aplicados os métodos de classificação geomecânica RMR e Q, além da realização de análises cinemáticas com o software Dips e simulações de queda de blocos e ruptura em cunha com os softwares RocFall e SWedge. Os resultados indicaram setores críticos com risco potencial de instabilidade, especialmente os setores 5, 6, 7 e 9, para os quais são recomendadas intervenções de contenção. O estudo também destaca a influência do regime hidrológico nas condições de estabilidade, sugerindo a importância de monitoramentos sazonais.

Abstract – This study presents a geotechnical characterization and slope stability analysis of an abandoned quarry located in the Engenho Nogueira neighborhood, in Belo Horizonte (Brazil), currently occupied by a residential condominium. The rock mass, composed of gneiss from the Belo Horizonte Complex, was divided into nine sectors based on structural features observed in the field. The RMR and Q geomechanical classification methods were applied, in addition to kinematic analyses using the Dips software and rockfall and wedge failure simulations with RocFall and SWedge. The results identified critical sectors with potential instability risks, particularly sectors 5, 6, 7, and 9, for which containment interventions are recommended. The study also highlights the influence of seasonal rainfall on slope conditions, reinforcing the importance of periodic monitoring.

Palavras-Chave – Classificação geomecânica, análise cinemática, talude urbano, gnaisse.

¹ Geól., Universidade Federal de Minas Gerais, (31) 98523-2536, pedrofeldmann@hotmail.com

² Eng Civil., DSc, Universidade Federal de Minas Gerais, (31) 3409-1794, talita@etg.ufmg.br

1. INTRODUÇÃO

A expansão urbana de Belo Horizonte sempre esteve associada à extração de materiais de construção, como gnaisses e dolomitos provenientes de pedreiras espalhadas pela cidade (Penna, 1997). Com o crescimento desordenado, muitas dessas áreas passaram a ser ocupadas, resultando na construção de edificações em zonas de risco. É o caso de uma antiga pedreira no bairro Engenho Nogueira, região da Pampulha, onde foi implantado um condomínio residencial em área suscetível a movimentos de massa (Figura 1).

Este estudo tem como objetivo a caracterização geotécnica do maciço rochoso dessa pedreira, dividido em setores, com aplicação das classificações geomecânicas RMR (Bieniawski, 1989) e Q (Barton et al., 1974). Adicionalmente, são realizadas análises cinemáticas e simulações de queda de blocos e ruptura em cunha, por meio dos softwares Dips, RocFall e SWedge, visando identificar setores críticos e orientar possíveis intervenções de engenharia.

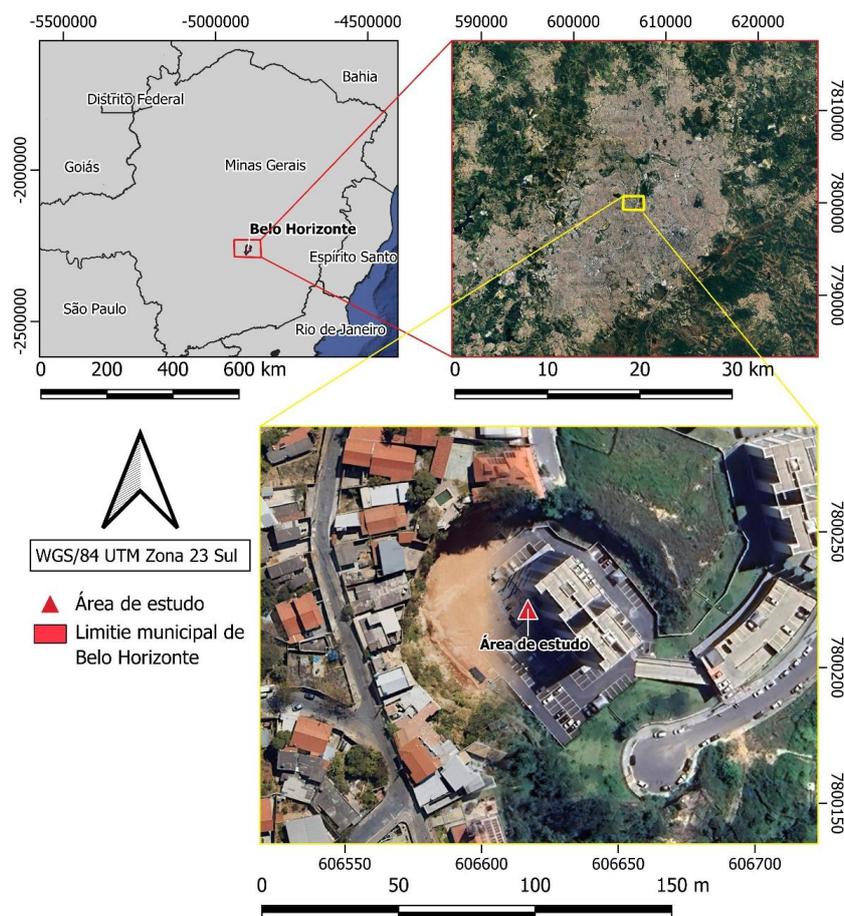


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.

A geologia da Região Metropolitana de Belo Horizonte é marcada por dois grandes domínios litológicos que influenciam diretamente a composição e o comportamento dos maciços rochosos locais. Esses domínios são o Complexo Belo Horizonte, predominantemente composto por gnaisses mesoarqueanos com bandamento composicional e feições de migmatização, e o Supergrupo Minas, formado por rochas metassedimentares paleoproterozoicas como itabiritos, dolomitos, quartzitos, filitos e clorita-xistos (Parizzi, 2021; Baltazar & Zuchetti, 2007). O Complexo Belo Horizonte, que cobre aproximadamente 70% da área, apresenta-se geralmente saprolitizado ou recoberto por manto de intemperismo silto-argiloso, enquanto o Supergrupo Minas forma uma estrutura monoclinial invertida que se estende do Rio Arrudas à Serra do Curral (Silva, 2002). Essa composição geológica complexa determina não apenas a variabilidade litológica da região, mas também o tipo e a intensidade das discontinuidades presentes nos maciços.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste estudo foi estruturada em etapas sequenciais que garantiram a coleta, organização e análise dos dados geotécnicos da área de estudo. Inicialmente, durante o planejamento, foram definidos os objetivos do trabalho, a abordagem metodológica e o local da investigação. Em seguida, no levantamento pré-campo, foram realizadas pesquisas bibliográficas relacionadas à geotecnia e à geologia regional, além de um reconhecimento preliminar da área por meio do software Google Earth. A fase de trabalho de campo envolveu três visitas ao local, com levantamento da geologia local, obtenção de medidas estruturais das discontinuidades com bússola e trena, e realização de voos com drone (modelo Mavic PRO, da DJI) para o registro fotográfico dos taludes. Na etapa de processamento e análise, os dados foram organizados para permitir a interpretação das imagens, o cálculo do RQD e a aplicação das classificações geomecânicas. Por fim, utilizaram-se os softwares Dips, RocFall e SWedge para as análises cinemáticas, de ruptura em cunha e de queda de blocos. Essa sequência de procedimentos garantiu a robustez das informações obtidas e sua aplicação na avaliação da estabilidade dos taludes.

3. RESULTADOS

3.1. Setorização da área de estudo

A subdivisão do talude em setores foi essencial para garantir uma análise mais precisa e direcionada das condições geotécnicas da área. A divisão considerou as variações observadas em campo, como a orientação dos taludes e as características das discontinuidades. Essa abordagem permitiu identificar trechos com comportamento geomecânico diferenciado ao longo do talude. A presença de vegetação densa impossibilitou a coleta de dados em um dos setores, reforçando a necessidade de adaptação metodológica conforme as condições locais. A seguir, a Figura 2 apresenta o mapa da setorização adotada, que serve de base para todas as análises subsequentes.



Figura 2: Mapa da setorização da área de estudo

3.2. Fotografia e descrição dos setores

O registro sistemático das fraturas e características visuais dos taludes foi realizado por meio de medições estruturais e imagens aéreas com drone. Cada setor teve suas famílias de fraturas identificadas com o auxílio de bússola e trena, observando também aspectos como afluência de água. As fotografias captadas foram fundamentais para validar e complementar as informações obtidas em campo. A associação entre dados visuais e estruturais fortaleceu a qualidade das análises geomecânicas aplicadas. A Figura 3 ilustra um exemplo de imagem utilizada, com destaque para as diferentes famílias de fraturas identificadas. Na próxima seção, apresentam-se os resultados da classificação geomecânica baseada nesses dados.

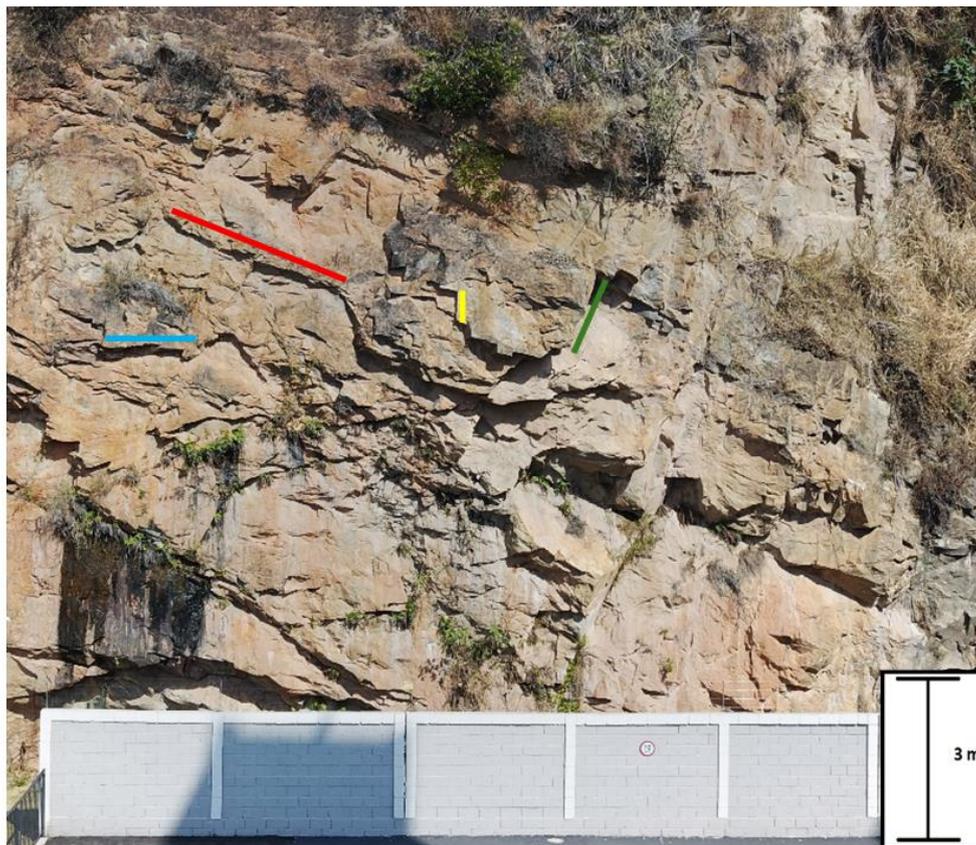


Figura 3: Registro fotográfico por drone do setor 7 com a identificação das famílias de fraturas. Família 1 em vermelho, família 2 em amarelo, família 3 em azul e família 4 em verde.

3.3. Classificações geomecânicas do maciço rochoso

O índice RQD foi estimado com base no método de Palmström (1982), adequado para situações sem dados de sondagem direta. A metodologia utiliza a contagem de descontinuidades visíveis por unidade de volume, permitindo inferir a integridade do maciço. Os resultados revelaram uma variabilidade significativa entre os setores, com RQD variando de 44% (ruim) a 100% (excelente). Essa heterogeneidade reflete as diferenças locais nas condições estruturais e no grau de intemperismo da rocha.

O método Q incorporou os mesmos dados de resistência à compressão e uma classificação de SRF compatível com o cenário de tensões médias, conforme Ávila (2012). A escolha desse parâmetro evitou a penalização excessiva dos resultados, que ocorreria com classificações mais conservadoras. Os resultados indicaram que a maioria dos setores apresenta maciço classificado como "bom" ou "regular", com exceção do setor 9, avaliado como "ruim". A Tabela 1 sintetiza esses resultados, os quais reforçam a consistência da classificação obtida via RMR. A seguir, são apresentadas as análises cinemáticas para avaliar os tipos de ruptura esperados.

Tabela 1. Resultados do RQD e da Classificação Q obtidos em cada setor.

Setor	RQD (%)	Qualidade da rocha	Q	Classificação do maciço rochoso
1	57%	Razoável	9,5	Regular
2	74%	Razoável	12,3	Bom
3	98%	Excelente	16,3	Bom
4	91%	Excelente	15,2	Bom
5	88%	Bom	14,7	Bom
6	76%	Bom	9,5	Regular
7	74%	Razoável	7,4	Regular
8	100%	Excelente	16,7	Bom
9	44%	Ruim	2,4	Ruim

O método RMR foi aplicado utilizando os dados estruturais de campo, complementados por valores de resistência à compressão obtidos por Ávila (2012). A classificação revelou que todos os setores se enquadram majoritariamente na classe II (rocha boa), com algumas variações para classe I (excelente) e III (regular). Essa avaliação leva em conta tanto a qualidade das descontinuidades quanto sua orientação em relação aos taludes, tornando-se mais representativa das condições reais de estabilidade. A Tabela 2 apresenta os valores médios por setor, indicando os pontos mais críticos e mais estáveis do maciço. É válido pontuar que o resultado apresentado é o RMR ajustado considerando a relação da orientação das descontinuidades com a orientação do talude.

Tabela 2. Média dos valores de RMR e suas classes em cada setor.

Setor	Nota da F1	Nota da F2	Nota da F3	Nota da F4	Média do setor
1	48	73	73	-	65
Classe	III	II	II	-	II
2	48	73	69	-	63
Classe	III	II	II	-	II
3	75	79	50	-	68
Classe	II	II	III	-	II
4	70	75	81	-	75
Classe	II	II	I	-	II
5	67	76	67	-	70
Classe	II	II	II	-	II
6	59	64	-	-	62
Classe	III	II	-	-	II
7	52	71	71	70	66
Classe	III	II	II	II	II
8	81	72	84	-	79
Classe	I	II	I	-	II
9	64	66	60	-	63
Classe	II	II	III	-	II

3.4. Análises cinemáticas

As análises cinemáticas foram realizadas com o software Dips 8.0, com base em todas as medições estruturais obtidas. As rupturas em cunha foram determinadas pela interseção de planos de fraturas dentro da zona crítica, definida por ângulo de atrito de 35°. O mesmo valor foi adotado para simulações de tombamento de blocos e rupturas planares, com limite lateral de 20°. As zonas críticas identificadas nas estereonet permitiram prever a suscetibilidade de cada setor aos diferentes modos de instabilidade. A Figura 4 apresenta os resultados gráficos de um dos setores analisados. Para verificar a mobilidade dos blocos, foram realizadas simulações no RocFall, conforme descrito a seguir.

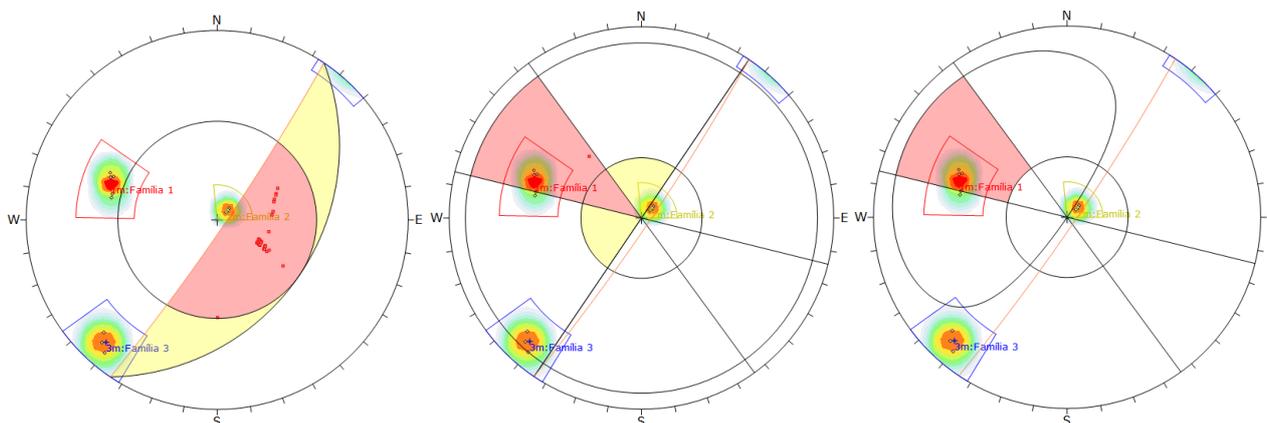


Figura 4: Análises cinemáticas realizadas no setor 5 para ruptura em cunha, tombamento de blocos e ruptura planar, respectivamente.

3.5. Análises com RocFall

As simulações com o software RocFall consideraram blocos de 100 kg (± 50 kg) com velocidade inicial de 0,1 m/s, partindo de uma área geradora no topo dos taludes. As propriedades físicas da rocha e do solo foram definidas com base em valores de literatura e da biblioteca do software, com densidade da rocha estimada em 2812 kg/m^3 . Com relação ao ângulo de atrito, foram definidos 35° para rocha e 13° para solo. A análise indicou que os setores 4, 5, 6 e 9 apresentaram os maiores alcances dos blocos, em alguns casos ultrapassando 7 metros, alcançando estruturas do entorno como muros de estacionamento. A Figura 5 ilustra os resultados para o setor 9, onde os blocos atingiram até 12 metros, revelando a necessidade de medidas de contenção. Na sequência, as simulações no SWedge complementaram a avaliação da estabilidade.

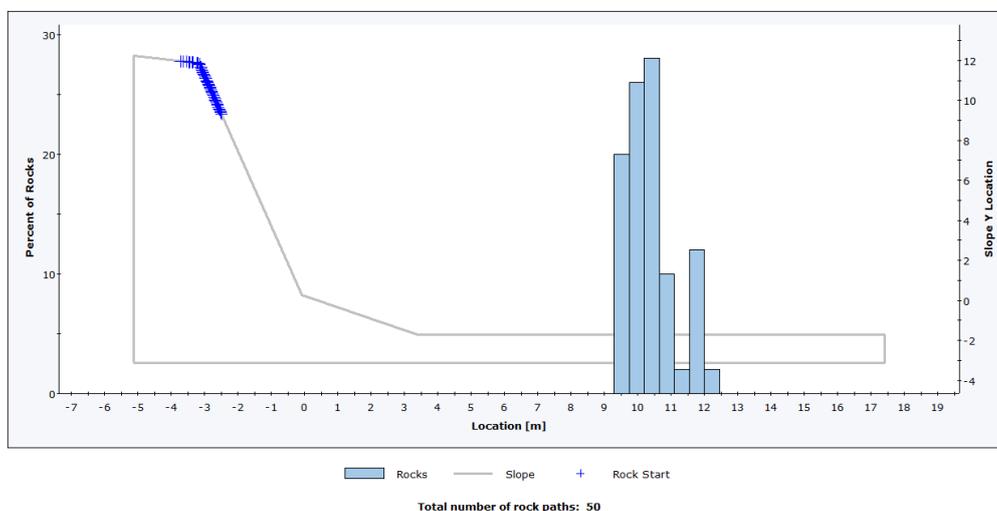


Figura 5: Resultado da análise do RocFall para o setor 9 ilustrando a distribuição final da posição dos blocos.

3.6. Análise com SWedge

No SWedge, foram simuladas possíveis cunhas geradas pelas combinações entre famílias de fraturas, considerando geometria e orientação de cada talude. Por uma abordagem conservadora, foram utilizados os menores valores de coesão e ângulo de atrito interno obtidos nos intervalos de resultados do método RMR. A análise revelou que nos setores 1, 2, 5, 6, 8 e 9 não houve formação de cunhas significativas. Por outro lado, os setores 3, 4 e 7 apresentaram instabilidades potenciais, com destaque para o setor 7, onde uma cunha gerada pelas famílias 1 e 4 apresentou fator de segurança inferior ao recomendado pela norma NBR 11682:2016. Esses

resultados corroboram os achados das análises cinemáticas e de queda de blocos, reforçando a necessidade de intervenção nos setores mais críticos (Figura 6).

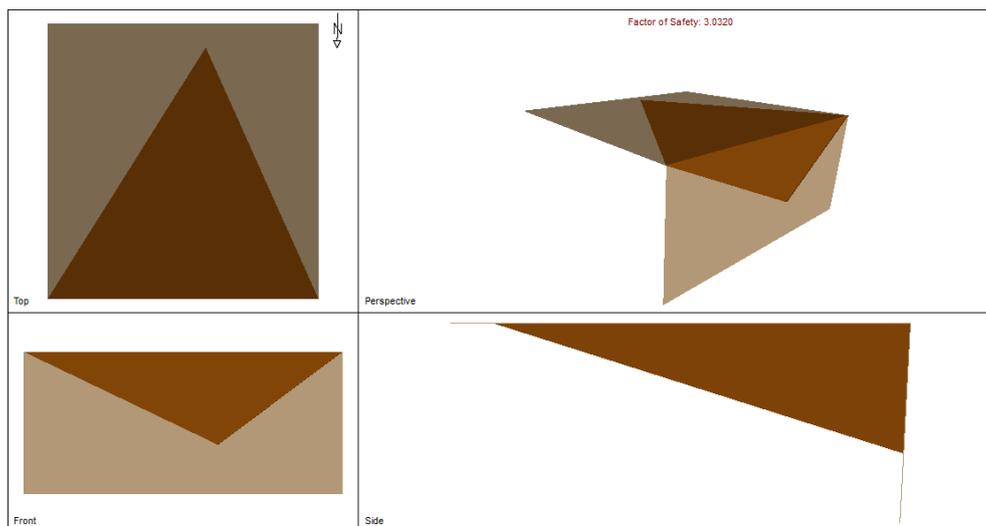


Figura 6: Representação da cunha gerada pela interseção das famílias 1 e 2 do setor 3.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A classificação geomecânica do maciço rochoso permitiu avaliar a qualidade dos diferentes setores analisados com base nos métodos RMR e Q. Pelo método RMR (Bieniawski, 1989), todos os setores foram classificados como rocha boa (classe II), com destaque para o setor 8, que apresentou a melhor avaliação, e o setor 6, com desempenho mais próximo do limite inferior da classe. O método Q (Barton et al., 1974), por sua vez, indicou maior variação entre os setores, com predominância de classificações “boa” e “regular”, sendo o setor 9 classificado como “ruim”. A diferença entre os métodos está relacionada à forma como cada um considera as características estruturais do maciço, sendo o RMR mais sensível à orientação das descontinuidades em relação aos taludes, o que o torna mais apropriado ao contexto deste estudo.

As análises cinemáticas realizadas com o software Dips 8.0 evidenciaram os modos de ruptura mais prováveis em cada setor. No caso do tombamento de blocos, observou-se que cerca de um terço das interseções no setor 2 são críticas, enquanto nos setores 5, 6, 7 e 8 a ocorrência desse tipo de instabilidade está associada a diferentes famílias de fraturas. As rupturas em cunha mostraram-se mais frequentes nos setores 3, 5 e 6, enquanto as rupturas planares foram mais críticas nos setores 5, 6 e 8. Esses resultados revelam a importância da orientação das descontinuidades na definição da estabilidade local e reforçam a necessidade de intervenções específicas nos setores mais vulneráveis.

Os resultados obtidos com o RocFall indicaram que os setores 4, 5, 6 e 9 apresentaram as maiores distâncias de projeção dos blocos, com alcance superior a 7 metros. No setor 9, a presença de um aterro ao pé do talude contribuiu para a aceleração dos blocos, resultando em distâncias de até 12 metros, com potencial de impacto em estruturas como muros e cercas. É importante ressaltar que o comportamento dos blocos nas simulações mostrou-se bastante sensível aos parâmetros definidos pelo usuário, como propriedades dos materiais e localização da zona geradora, destacando a necessidade de calibragem cuidadosa do modelo para cenários realistas.

As análises no software SWedge revelaram instabilidades relevantes, especialmente no setor 7, onde foi identificada uma cunha formada pelas famílias 1 e 4 com fator de segurança de 1,2, abaixo do valor mínimo recomendado pela NBR 11682:2016 (1,5). Outros setores, como o 3 e o 4, apresentaram cunhas com fatores de segurança satisfatórios. Esses dados complementam os resultados cinemáticos e de queda de blocos, indicando coerência entre as diferentes abordagens e reforçando a criticidade do setor 7.

Outro aspecto relevante diz respeito ao período em que o estudo foi conduzido, que coincidiu com a estação seca. Mesmo nessas condições, foram observados pontos de afluência de água nas fraturas, o que sugere que, durante a estação chuvosa, o risco de instabilidade pode se intensificar. Considerando que a precipitação acumulada anual pode atingir até 1400 mm na Região Metropolitana de Belo Horizonte (INMET, 2017), é recomendável reavaliar as condições hidrológicas e geomecânicas da área em épocas de maior pluviosidade.

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se um estudo mais detalhado para a obtenção de uma base de dados completa – especialmente nos setores 5, 6, 7 e 9, considerados os mais críticos – para que, a partir dele, seja definida qual a solução de engenharia mais apropriada para cada setor.

Para estudos futuros, a caracterização mais detalhada do gnaisse, com obtenção direta de propriedades geomecânicas, permitirá calibrar melhor os modelos utilizados. Além disso, a utilização de drones para o mapeamento automatizado das descontinuidades e a aquisição de topografia 3D do terreno permitirão o uso de ferramentas tridimensionais mais precisas, como o RocFall 3. Por fim, a realização de visitas em períodos chuvosos permitirá comparar a classificação geomecânica sob diferentes condições sazonais, aprimorando a análise de estabilidade ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. NBR 11682:2016 – (2016) “*Projetos de estabilidade de taludes e cortes em solos e rochas*”, Rio de Janeiro.

ÁVILA, C.R de. (2012) “*Determinação das propriedades mecânicas de maciços rochosos e/ou descontinuidades utilizando classificações geomecânicas – uma comparação entre os diversos métodos de classificação*”, Ouro Preto, Tese (mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-graduação em Geotecnia.

BALTAZAR, O.F., ZUCCHETTI, M. (2007) “*Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits*”, Ore Geology Reviews, 32:471-499.

BARTON, N., LIEN, R., LUNDE, J. (1974), “*Engineering classification of rock masses for the design of rock support*”, Rock Mechanics 6, 1974, pp. 189-236.

BIENIAWSKI, Z.T. (1989), “*Engineering rock mass classifications: a complete manual*”, John Wiley & Sons, New York.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, INMET. (2017) “*Nota Técnica 004/17*”, 5º Distrito de Meteorologia. Belo Horizonte, Minas Gerais.

PALMSTRÖM, A. (1982) “*The volumetric joint count - a useful and simple measure of the degree of jointing*”, Proc. IV Int. Congr. IAEG, New Delhi, pp.221-228.

PARIZZI, M. G. (2021) “*Riscos geológicos e hidrológicos no município de Belo Horizonte, MG*”, Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA) – Vol. 11, nº 2.

PENNA, O. (1997) “*Notas Cronológicas de Belo Horizonte*”, Belo Horizonte, Fundação João Pinheiro.

SILVA, H.A. (2002) “*Mapeamento geológico, avaliação geológico-geotécnica e proposta de reabilitação de áreas degradadas por movimentos de massa e erosão, com o uso de técnicas de bioengenharia nos bairros Belvedere e Olhos D’água, Belo Horizonte/MG*”, Belo Horizonte, IGC, Trabalho de Graduação, 143 p.