

ESTUDO DE CASO DE TALUDE NO BAIRRO ESTORIL: RELAÇÃO ENTRE CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇO E ANÁLISE CINEMÁTICA

Ana Carolina Dos Reis Marra¹
Lorena Lins Santos Silva²
Luiz Carlos da Cruz³

Grupo 01 – Uso de tecnologia para monitoramento ambiental

Resumo

Belo Horizonte, como muitas outras cidades do Brasil enfrenta constantes riscos geológicos, em especial deslizamentos de terra e rochas. A geologia e a morfologia da região são fatores que contribuem significativamente para tais ocorrências. Este trabalho apresenta uma análise das condições de estabilidade de um talude localizado no Bairro Estoril, na região metropolitana de Belo Horizonte, MG. Foram levantados parâmetros que permitem a identificação do grau de resistência da rocha a fim de entender o comportamento geomecânico do maciço. A análise incluiu a coleta e avaliação de dados bibliográficos e de campo, possibilitando uma percepção sobre os fatores que influenciam na estabilidade do talude e que geraram o rompimento parcial.

Palavras-chave: Talude; Ruptura; Estabilidade; Geomecânica; Risco Geotécnico.

INTRODUÇÃO

O Bairro Estoril, localizado na região oeste de Belo Horizonte destaca-se pela sua verticalização, tanto em construções quanto em taludes e morros. Além disso, a região tem experimentado uma crescente urbanização marcada pela construção de grandes prédios, edifícios e vias de acessibilidade que, sem estarem associadas a um planejamento adequado podem acarretar riscos geotécnicos, dada a acentuada declividade morfológica e geológica

¹ *Graduanda do curso de Geologia do Centro Universitário de Belo Horizonte (UniBH). Email: acarolmarra@gmail.com*

² *Graduanda do curso de Geologia do Centro Universitário de Belo Horizonte (UniBH). Email: lorenalins210@gmail.com*

³ *Orientação: Centro Universitário de Belo Horizonte (UniBH). Departamento de Geologia. Email: luiz.c.cruz@ulife.com.br*

REALIZAÇÃO

da região.

Este estudo detalha o maciço rochoso na rua Mario Werneck, próximo ao número 515 – bairro Estoril e visa aplicar uma análise cinemática além de classificar geomecanicamente para avaliar a estabilidade e probabilidade de rupturas, além de identificar possíveis impactos para quem acessa a via.

De acordo com Almeida (1977), a área de estudo está inserida no contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero (QFe), no extremo sul do Cráton São Francisco, uma das regiões mais complexas e ricas em evolução tectônica e sedimentar do Brasil.

A estratigrafia da região é caracterizada por sequências metassedimentares supracrustais do Paleoproterozóico, conhecidas como Supergrupo Minas (Dorr, 1969; Babinski et al., 1995; Machado et al., 1996). Dentro do Supergrupo Minas, a área de estudo está inserida no Grupo Sabará, que se destaca como a unidade de maior espessura, podendo atingir entre 3.000 e 3.500 metros (Dorr, 1969).

As litologias predominantes no Grupo Sabará incluem pelitos e grauvacas, além de conglomerados, quartzitos, filito grafitoso, tufitos e rochas vulcânicas máficas e ácidas (Costa, 1961; Barbosa, 1968; Dorr, 1969; Ferrari, 1981). Notavelmente, os conglomerados do Grupo Sabará contêm, pela primeira vez na sequência do Supergrupo Minas, seixos de granito e gnaiss, indicando significativas mudanças na paleogeografia, como o soerguimento de novas áreas fontes, aumento da erosão e alterações no gradiente de transporte.

Os sedimentos do Grupo Sabará são interpretados como flysch (Barbosa, 1968; Dorr, 1969), refletindo a dinâmica sedimentar da região durante esse período geológico. Por fim, a evolução geotectônica do Quadrilátero Ferrífero, incluindo a área do talude em estudo, é marcada por uma série de eventos que se estendem desde o Arqueano até o Proterozoico. Durante o Arqueano, a região foi caracterizada pela formação da crosta continental primordial com a criação de crátons estáveis compostos principalmente por rochas graníticas e gnaisses, que serviram de base para os eventos geológicos subsequentes.

METODOLOGIA

Para este estudo, foi realizado um mapeamento geológico e geotécnico para classificar o maciço e entender seu comportamento mecânico. O mapeamento ocorreu durante os três primeiros finais de semana de maio de 2024, com a análise de 15 pontos na base do talude, espaçados a cada 5 metros, totalizando 70 metros.

Os dados geotécnicos foram coletados conforme normas metodológicas que distinguem entre rochas resistentes (classificação RMR - Rock Mass Rating) e rochas brandas (classificação WR - Weak Rocks). Utilizaram-se normas da ISRM (Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas) para determinar parâmetros como litologia, cor, textura, resistência, grau de intemperismo, fraturamento, compartimentação do maciço (J_n), número de famílias de fratura (J_v), índice de qualidade da rocha (RQD) e GSI (Geological Strength Index).

Para as descontinuidades, foram considerados os seguintes aspectos:

- **Tipos de estruturas:** foliação, fraturas, lineações, etc.
- **Atitude ou orientação espacial:** direção e mergulho dos planos estruturais.
- **Persistência:** comprimento do traço das estruturas planas, estimado visualmente com base na altura do talude.
- **Espaçamento:** distância entre planos estruturais da mesma família, calculada pela relação inversa da frequência da descontinuidade (exemplo: $F=4/m$ resulta em 0,25 m de espessamento).
- **Abertura:** distância entre as paredes da descontinuidade preenchida por ar ou água.
- **Rugosidade:** grau de irregularidade da superfície da descontinuidade, comparado com perfis padrão e quantificado pelo índice J_r .
- **Grau de intemperismo:** alteração das paredes da descontinuidade descrita pelo índice J_a .

EXTREMOS CLIMÁTICOS: IMPACTOS ATUAIS E RISCOS FUTUROS

- **Preenchimento:** presença de material mole, duro ou ausência de preenchimento.

Segundo Cella et al. (2020), rochas brandas são aquelas com resistência à pressão uniaxial variando entre 0,25 e 10 MPa, e foram coletadas informações em campo sobre litologia, resistência, intemperismo, cor, textura e dados estruturais.

Para a classificação geomecânica do maciço (Tabela 01), foi utilizada a metodologia de Bieniawski (1989) e sua modificação de 2011. Neste método, são atribuídas notas aos parâmetros de descontinuidade, e a soma dos pesos gera um índice, RMR ou WR, que classifica a qualidade do maciço como boa ou ruim. A tabela modificada (2011) relaciona RQD e espaçamento com os pesos dos outros parâmetros de descontinuidade.

Tabela 01: Classificação Geomecânica – “Rock Mass Rating” (RMR)

A - PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO E FAIXAS DE VALORES									
1	Resistência do material intacto	Índice de resistência a carga pontual (MPa)	> 10	4 - 10	2- 4	1 - 2	Somente para compressão simples		
		Resistência a compressão uniaxial (MPa)	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	< 1
		Peso	15	12	7	4	2	1	0
2	Qualidade do testemunho	RQD (%)	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25		
		Peso	20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades	Espaçamento	> 2 m	0,6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
		Peso	20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades	Persistência	<1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	>20 m		
		Peso	6	4	2	1	0		
		Abertura	0	<0,1 mm	0,1 - 1 mm	1 - 5 mm	>5 mm		
		Peso	6	5	4	1	0		
		Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Ondulada	Suave		
		Peso	6	5	3	1	0		
		Preenchimento (mm)	Nenhum	Duro (<5mm)	Duro (>5mm)	Mole (<5 mm)	Mole (>5mm)		
Peso	6	4	2	2	0				
5	Água subterrânea	Alteração	Nenhuma	Levemente	Moderadamente	Muito	Decomposta		
		Peso	6	5	3	1	0		
		Condições gerais	Completament e seco	Úmido	Molhado	Gotejamento	Fluxo		
Peso	15	10	7	4	0				
C - CLASSE DE MACIÇOS ROCHOSOS DETERMINADA PELA SOMATÓRIA DOS PESOS									
Somatória dos Pesos			100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20		
Classe nº			I	II	III	IV	V		
Descrição			Muito bom	Bom	Regular	Pobre	Muito Pobre		

Fonte: Classificação Geomecânica de Bieniawski (1989), modificada por Bieniawski (2011).

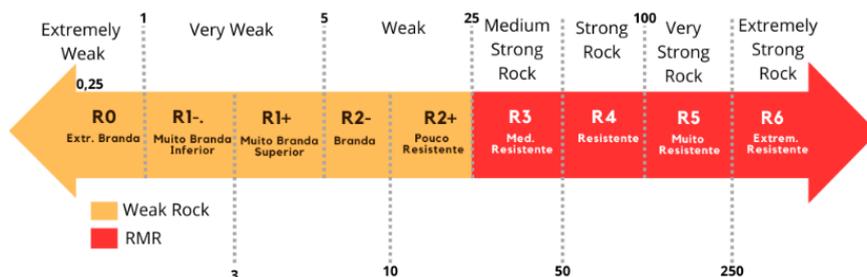
No livro “Guideline for Open Pit Slope Design in Weak Rocks” (Martin & Stacey,

EXTREMOS CLIMÁTICOS: IMPACTOS ATUAIS E RISCOS FUTUROS

2018), as rochas brandas (*Weak rocks*), são citadas como uma forma de classificar o maciço em relação a resistência da rocha intacta, obtida pelo ensaio de compressão uniaxial, a qual determina o comportamento deste conjunto de materiais.

Seguindo esse conceito e as normas da ISRM (Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas), foi desenvolvido a imagem a seguir para melhor entendimento no sentido de correlacionar resistência, valores de compressão uniaxial e as classificações do maciço.

Figura 01: Definição dos limites de resistência com relação a compressão uniaxial



Fonte: Definição do limite de resistência para *Weak Rocks* (modificado de ISRM, 1981 apud Cella et al. 2020)

Dessa forma, é importante destacar que os parâmetros de descontinuidades são levantados apenas para pontos onde a resistência é maior que R2+. Para os pontos com uma resistência de até R2+, levantou-se apenas os parâmetros para cálculo de Weak rock.

Durante o mapeamento, para levantamento dos dados foram utilizados testes empíricos na rocha in situ por meio de riscador/canivete, martelo, unha e quebra manual, testes estes que permitiram identificação do grau de resistência da rocha. Após tal fase, os dados estruturais mapeados foram analisados com o Software Dips que permitiu uma observância das descontinuidades geológicas e identificando preliminarmente locais de potencial instabilidade estrutural do talude.

Através de técnicas de projeção estereográfica, o programa gerou análises consistentes com as observações de campo, revelando propensão para rupturas em cunha, correspondendo a uma probabilidade de ruptura de 1,44% e a partir desta etapa, definiu-se o ponto de maior probabilidade de rompimento.

EXTREMOS CLIMÁTICOS: IMPACTOS ATUAIS E RISCOS FUTUROS

Na tabela a seguir é possível verificar como esses dados foram coletados em campo:

Tabela 02- Avaliação do Grau de Resistência (GR)

RESISTÊNCIA	DESCRIÇÃO		UCS (Mpa)	AVALIAÇÃO DE CAMPO						
				MARTELO	RISCO COM O RISCADOR	QUEDA COM A PONTA DO RISCADOR	RASPAGEM COM O RISCADOR	RISCO COM A UNHA	PRESSÃO MANUAL	OBSERVAÇÕES
R6	Extremamente resistente		>250	Lascada	-	-	-	-	-	Somente lascas com vários golpes de martelo. Fragmentos com bordas cortantes. Impenetrável por lâmina de aço/riscador.
R5	Muito resistente		100-250	Quebra com dificuldade com vários golpes	-	-	-	-	-	Quebra com dificuldade com vários golpes de martelo. Não riscável por lâmina de aço/riscador.
R4	Resistente		50-100	Quebra com vários golpes	-	-	-	-	-	Quebra com vários golpes de martelo. Lâmina de aço/riscador dificilmente provoca sulcos.
R3	Medianamente resistente (Concreto Especial)		25-50	Quebra com dificuldade e com um golpe	Risco Superficial	-	Raspa com muita dificuldade	-	-	Quebra com dificuldade a um golpe do martelo. As bordas do fragmento não podem ser quebradas por pressão manual. Lâmina de aço/riscador provoca sulcos rasos.
R2	R2+ (Concreto)	Pouco resistente	10-25	Quebra com um golpe	Risca	Ponto pequeno	Raspa com dificuldade	-	-	Quebra facilmente a um golpe do martelo. Somente as bordas do fragmento podem ser quebradas por pressão manual. Lâmina de aço/riscador provoca sulcos rasos.
	R2- (Solo-Cimento)	Branda	5-10	Fragmenta com um golpe		Ponto grande	Produz pó	Risco superficial	-	Fragmenta com um golpe do martelo. Facilmente penetrável por lâmina de aço/riscador.
R1	R1+ (Tijolo)	Muito branda superior	3-5	-	Risca fundo	-	Facilmente produz muito pó	Risca	Quebra pontualmente	Fragmenta com um golpe do martelo. A lâmina de aço provoca sulcos profundos.
	R1- (Saprólito)	Muito branda inferior	1-3	Desagrega	Corta (Separa)	Penetra	Descasca entalha	Penetra	Quebra as bordas	Desagrega ao golpe do martelo. Desagrega sob pressão manual.
R0	Extremamente branda (Saprólito)		0.25-1	-	-	Penetra	-	Corta	Desagrega	Desagrega facilmente sob pressão manual.

Fonte: Adaptado de ISRM, 1981 pela BVP Engenharia em 2012 apud Franca et al., 2018.

Os parâmetros analisados tiveram como fonte a parte III do Livro Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas, e foram armazenados em um modelo de template produzido por Lorena Silva, autora do trabalho. O template visou armazenar os dados e agilizar o processo de cálculo para a metodologia RMR e WR.

Para o estudo do comportamento mecânico do talude, optou-se por realizar uma análise cinemática. Foram lançadas as medidas estruturais no Software Dips da Rocscience.

Dessa forma, obteve-se como resultado estereogramas com as estruturas medidas sendo possível calcular a probabilidade de alguns tipos de ruptura.

Na análise de estabilidade utilizou-se a projeção estereográfica, que consiste em uma esfera de referência na qual seu plano equatorial é horizontal e sua orientação é fixa em relação ao norte. As descontinuidades foram representadas por meio de planos, linhas ou pontos, assim como a face do talude. Um meio alternativo de representar a orientação de um plano é o polo e uma limitação importante das projeções estereográficas é que elas consideram apenas relações angulares entre linhas e planos e não representam a posição ou tamanho do elemento.

A figura 2 a representa os quatro tipos de rupturas consideradas clássicas e gráficos típicos de polos de condições geológicas que provavelmente levarão a tais rupturas. No descrito da mesma são apresentados os principais tipos de ruptura em taludes e condições geológicas estruturais que podem ocasionar a essas falhas, sendo: (a) ruptura planar em rocha contendo juntas persistentes que se projetam para fora da face; (b) ruptura em cunha em duas descontinuidades que se cruzam; (c) ruptura por tombamento em rocha forte contendo descontinuidades mergulhando abruptamente na face; (d) ruptura circular em enrocamento, rocha branda ou rocha muito fraturada com descontinuidades orientadas aleatoriamente.

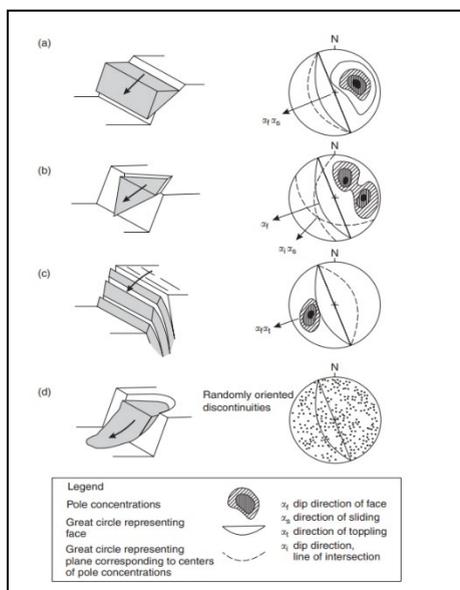


Figura 02: Os tipos de rupturas
Fonte: WYLLIE, D.C. & MAH, C.W. (2004).
Rock Slope Engineering: Civil and Mining. 4th
Edition, Spon Press, London, UK, 36p.

Ao avaliar a estabilidade, a face de corte do talude deve ser incluída no gráfico estéreo, uma vez que o deslizamento só pode acontecer como resultado do movimento em direção a face livre criada pelo corte. É importante destacar os tipos de ruptura de taludes, pois existe um tipo específico de análise de estabilidade para cada um.

Para geração dos resultados foram levados em considerações as observações em campo, a metodologia de Classificação Geomecânica de Bieniawski (1989) e (2011), e a análise cinemática realizada no *Software Dips* da Rocscience.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A compreensão da evolução geotectônica e da estratigrafia do Grupo Sabará foi necessária para a análise da estabilidade do talude foco deste estudo. As rupturas observadas no talude são resultados das complexas interações tectônicas e dos processos sedimentares que moldaram a região ao longo de bilhões de anos. A alta vegetação e os riscos de queda de blocos soltos são consequências da erosão e do intemperismo que afetam as unidades geológicas frágeis e altamente deformadas.

A análise geotécnica e estratigráfica (Figura 03) fornecida pelo estudo permitiu uma melhor compreensão dos fatores que influenciam a estabilidade do talude e destaca a importância de considerar a geologia completa da região ao avaliar os riscos e planejar intervenções de engenharia.

Figura 03: Representação das discontinuidades foliação e famílias de fraturas.
Figuras 04 e 05: Foto da rocha *In Situ*.



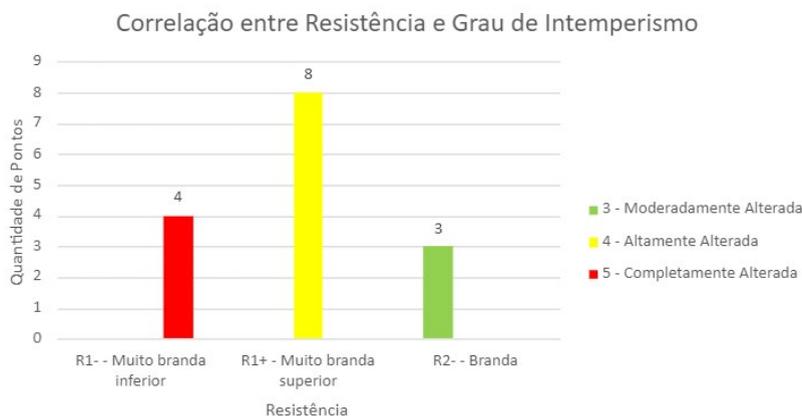
REALIZAÇÃO

Fonte: Fotos retiradas por Ana Carolina Marra, 2024.

Após a coleta e análise das informações de campo notou-se que todos os pontos apresentaram valores de resistência menores que R2+, que segundo Cella et al. (2020), se enquadram dentro do mundo das Weak Rocks (Figuras 04 e 05). Tal observação se deu em função ao correlacionar o grau de resistência e o grau de intemperismo a fim de validar os dados de mapeamento. Estes dados foram lançados na planilha de cálculo para serem classificados como RMR ou WR e com isso proporcionou um maior entendimento sobre o comportamento mecânico do talude.

Para rochas brandas, a validação dos dados (Gráfico 01) ocorreu por meio de uma correlação entre os valores de grau de resistência e grau de intemperismo, isto a fim de evitar o uso de dados incoerentes. Um exemplo de dado inconsistente seria uma rocha extremamente resistente (R6) com um grau de intemperismo como solo residual (6).

Gráfico 01- resultados do mapeamento de campo.



Fonte: Lorena Silva, 2024.

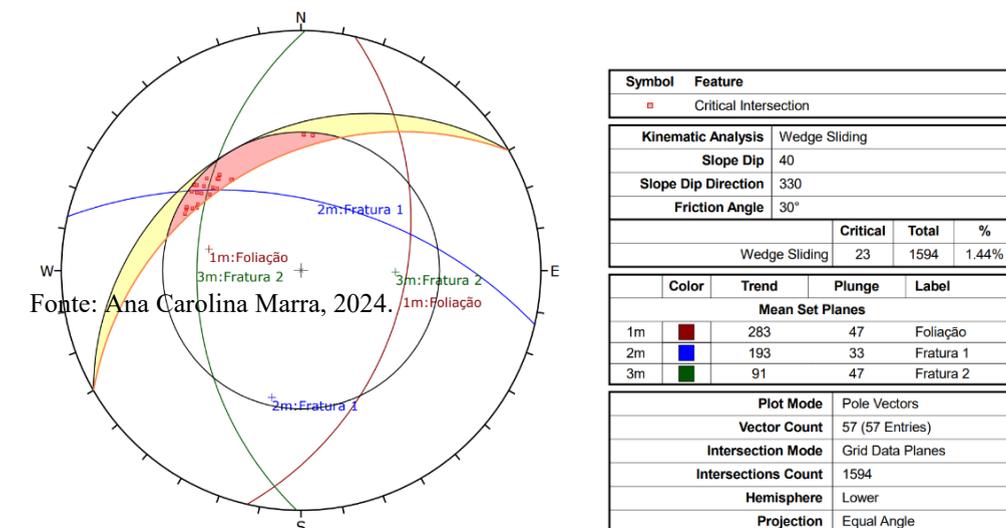
Com base no gráfico é possível observar que todos os pontos realizados em mapeamento apresentaram valores de resistência coerentes com o grau de intemperismo. Além disso, para os dados estruturais foi realizado uma análise cinemática. Optou-se então por utilizar o desvio padrão de 30 graus recomendado no Software Dips, gerando assim, resultados mais conservadores. Para o limite lateral, segundo Wyllie, D.C. & Mah, C.W.

(2004), o recomendado para rupturas planares é 20 graus, valor este que foi utilizado para rodar todas as análises, já que não foi encontrado um valor exato para outros tipos de ruptura.

O talude estudado apresenta uma orientação 330/40, a foliação e as duas famílias de fraturas foram inseridas nas análises (Gráfico 02). Foram rodadas análises para as rupturas: planar, cunha, plano circular, flexural e tombamento.

Os gráficos que não deram resultados significativos foram colocados como anexo. O resultado que nos interessa está representado a seguir:

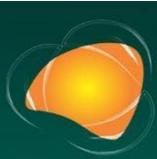
Gráfico 02: Análise de Ruptura em Cunha



Fonte: Análise rodada em *Software Dips* (Lorena Silva, 2024).

Após a análise, observou-se que o resultado coincide com as observações de campo, isto porque há uma propensão para rupturas em cunha no talude, onde do total de 1594 possibilidades que o *software* rodou, 23 são críticas o que corresponde a 1,44% de probabilidade de ruptura. Para os demais tipos de rompimento, nota-se que a probabilidade é baixa.

CONSIDERAÇÕES FINAIS



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

Com base no exposto, entende-se que apesar de se tratar de rocha branda, onde se espera um comportamento mais próximo a solos, as rupturas são condicionadas pelas descontinuidades, assim como o comportamento de rochas. Dessa forma, se vê a importância de estudos futuros sobre as Weak Rocks.

É importante ressaltar que a região apresenta riscos, que não se pode mensurar em escala de tempo, até porque este é influenciável por diferentes fatores como temperatura, pluviometria e ação antrópica, mas necessita-se de monitoramento continuado, pois a região incorre em um fluxo contínuo de transeuntes tanto na parte superior do talude quanto na base do mesmo. Além disso, o talude apresenta angulações variadas, com trechos de ângulos maiores que 40° e vegetação densa no topo. Dessa forma, se faz necessário um retaludamento igualando os ângulos, e assim, tornando a região mais segura.

REFERÊNCIAS

ALKMIM F. F. & MARWHAK S. 1998. Transamazonian orogeny in the Southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90:29-58.

ALMEIDA L. G. 2004. Estratigrafia e geologia estrutural da porção central do sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais. Dissertação de mestrado, Dep. de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto, 109 p.

BARBOSA O. 1949. Contribuição à geologia do centro de Minas Gerais. *Mineração e Metalurgia*, 14(79): 3-19. Barbosa A. L. M. 1968. Contribuições recentes à Geologia do Quadrilátero Ferrífero. Ouro Preto, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 68 p.

BARBOSA A. L. 1969A. Mapa geológico das quadrículas de Ouro Preto e Santa Rita de Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil. Washington, USGS/ DNPM. Professional Paper 641-A, plate 9.

REALIZAÇÃO



EXTREMOS CLIMÁTICOS: IMPACTOS ATUAIS E RISCOS FUTUROS

BIENIAWSKI Z.T. (1989). Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons, New York, 251 p.

BIENIAWSKI, Z. T. (1979). The geomechanics classification in rock engineering applications. In 4th ISRM Congress. OnePetro.

BIENIAWSKI, Z.T. (2011). Errores en la aplicación de las clasificaciones Geomecánicas y su corrección. Jornada sobre la Caracterización Geotécnica del Terreno. Madrid: ADIF. 35p.

BROWN, E.T. (ED.) (1981) Rock Characterization, Testing and Monitoring: International Society for Rock Mechanics (ISRM) Suggested Methods. Pergamon Press, Oxford, UK.

BROWN, T., BOOTH, A. Risk management. In: READ, J., STACEY, P. (Ed.). Guidelines for open pit slope design. Netherlands: CSIRO Publishing and CRC, 2009. Ch. 13, p. 381-400.

CELLA, P., CASTRO, L., CARTER, T. (2020). Mining Slopes in Weathered and Weak Rocks. In: Kanji, M., He, M., Ribeiro e Sousa, L. (eds) Soft Rock Mechanics and Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29477-9_13

ULUSAY, R. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014. ISRM (International Society of Rock Mechanics) and Springer Publishing, 2015, 280p.

REALIZAÇÃO