

ANÁLISE DE ESTABILIDADE POR TOMBAMENTO EM TALUDES DE QUARTZITO FRIÁVEL COM NÚCLEOS ROCHOSO MAIS COMPETENTES

Arthur SILVA¹; Daniel GRADIM²; Andreatta GOMES³

Resumo – Na Geologia de Engenharia, a realização de análises de estabilidade em taludes compostos por rochas friáveis apresenta elevada complexidade em diversos contextos de projetos geotécnicos. Tal complexidade decorre da elevada variabilidade dos parâmetros geomecânicos dessas rochas, que podem exibir comportamento ora semelhante ao de solos — com resistência ao cisalhamento descrita pelos critérios de Mohr-Coulomb — ora compatível com o de maciços rochosos, cuja ruptura pode ocorrer tanto através da matriz rochosa quanto ao longo de suas descontinuidades estruturais. Nesse cenário, os critérios de Hoek-Brown e Barton-Bandis tornam-se apropriados para a caracterização do comportamento mecânico da rocha intacta e das descontinuidades, respectivamente. A principal questão técnica reside na correta identificação do comportamento predominante do material em análise, que servirá como base para a modelagem do processo de instabilização. Em determinadas situações, o gatilho da instabilidade pode não estar intrinsecamente relacionado às propriedades do maciço, mas sim a fatores externos, especialmente de origem antrópica, como a ausência de cobertura vegetal e a inexistência de dispositivos de drenagem superficial adequados. Este artigo apresenta o estudo de um talude constituído, essencialmente, por quartzito friável, intercalado com núcleos mais compactos do mesmo litotipo. Observou-se que as porções mais competentes do quartzito apresentavam geometrias visualmente desfavoráveis em relação à face do talude, o que potencializava a ocorrência de instabilidades. Serão discutidas, ao longo do trabalho, as principais variáveis envolvidas nesse tipo de análise, as limitações observadas nos softwares de modelagem geotécnica comumente utilizados e as estratégias de engenharia recomendadas para mitigar os riscos identificados.

Abstract – In Engineering Geology, the assessment of slope stability in friable rock masses is notably complex across various geotechnical project scenarios. This complexity arises from the high variability in the geomechanical parameters of the material, which may exhibit behavior akin either to soils — with shear strength governed by the Mohr-Coulomb criterion — or to rock masses. Within the context of rock mechanics, slope instabilities may occur through the rock mass itself or along its structural discontinuities. Accordingly, the Hoek-Brown criterion and the Barton-Bandis model are commonly applied to represent the mechanical behavior of the intact rock and its discontinuities, respectively. The central challenge lies in accurately identifying the predominant behavior of the material under analysis, which will serve as the basis for defining the failure mechanism. In certain cases, instability may be triggered not solely by the intrinsic properties of the rock mass, but rather by external, anthropogenic factors, such as the lack of vegetation cover and the absence of adequate surface drainage systems. This article presents a case study involving a slope composed predominantly of friable quartzite, interbedded with more competent cores of the same lithology. It was observed that the more resistant rock portions exhibited geometries visually unfavorable with respect to the slope face, which may enhance the likelihood of failure. This study discusses the key variables involved in such analyses, the limitations encountered in commonly used geotechnical modeling software, and the engineering solutions proposed to mitigate the identified risks.

Palavras-Chave – Instabilidade de taludes; rocha friável; talude rochoso, mecânica de rochas, critério de Hoek-Brown

¹ Geól., Geoestável Consultoria e Projetos: Belo Horizonte – Minas Gerais, (31) 971786621, arthur.silva@geoestavel.com.br

² Geól., Geoestável Consultoria e Projetos: Belo Horizonte – Minas Gerais, (31) 991459403, daniel.gradim@geoestavel.com.br

³ Eng., Vale: Belo Horizonte – Minas Gerais, (31) 996565234, andreatta.costa@vale.com

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho foi desenvolvido ao longo das atividades de descaracterização de uma barragem de mineração. À medida que as obras de descaracterização avançaram, os taludes remanescentes não apresentaram uma geometria regular, principalmente na margem esquerda do antigo reservatório, onde a presença de rochas, com foliações mergulhando para o interior do talude, permitiram a formação de superfícies irregulares no topo do reservatório. As porções mais elevadas eram mais preocupantes, pois ocorriam a formações de geometrias negativas que, a princípio, poderiam gerar instabilidades neste talude, conforme Figura 1.



Figura 1. Vista frontal do talude estudado, com destaque na região em vermelho, com a presença de alguns topos rochosos.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

2.1. Geologia Local

A região do empreendimento se encontra na aba oeste do Quadrilátero Ferrífero, flanco invertido do Sinclinal Moeda, no contato geológico entre as três formações, sendo Moeda (margem esquerda), Batatal (porção central) e Cauê (margem direita), que são compostas por quartzitos, filitos e formações ferríferas, respectivamente. À oeste do empreendimento ocorre uma falha de empurrão (primeira ordem) de orientação N-S, que marca o contato tectônico entre o Sg. Minas e Sg. Rio das Velhas, e à nordeste ocorre uma série de falhas de segunda ordem que variam de direção NE-SW e NW-SE, conforme Figura 2.

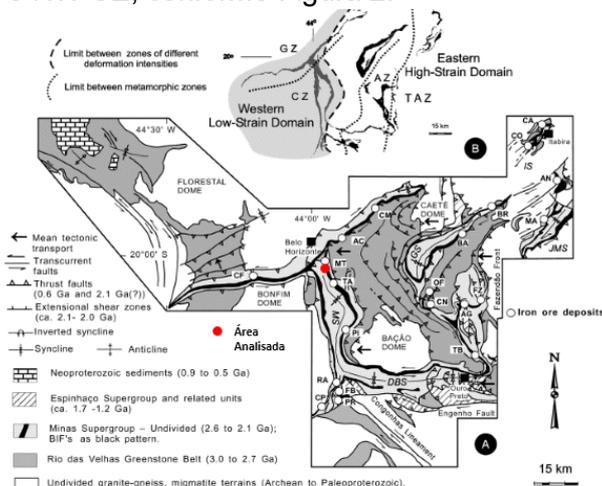


Figura 2. Contextualização regional da área avaliada. Fonte: Baars & Rosière (1994).

O talude avaliado, é composto por quartzito com intercalações de filito, o que demonstra um contato gradacional entre as Fms. Batatal e Moeda. De forma geral, os núcleos rochosos se apresentam levemente a medianamente intemperizadas (W2/W3), medianamente a muito

resistentes (R3/R5) e extremamente a medianamente fraturadas (F5/F3). As descontinuidades são fechadas e possuem superfícies lisas e pouco rugosas, principalmente nas porções onde ocorrem intercalações com o filito.

Nas porções mais elevadas do talude, observa-se escarpas de quartzito formadas por porções mais resistentes da rocha. O fato desse material mais competente não aflorar de forma contínua no talude, indica que os horizontes de filito, entre o quartzito, se degradaram mais rapidamente devido a ação do intemperismo, e podem ter contribuído para a formação desse padrão intercalado de afloramentos rochosos. Já a porção menos competente do quartzito, que é o material predominante no talude, possui resistência branda a muito branda (R2-/R1+), podendo apresentar regiões inconsolidadas (R0) devido ao processo de ciclagem sofrido por essas rochas quando expostas a variações climáticas. Os dois tipos de quartzitos identificados são apresentados na Figura 3.



Figura 3. A imagem da esquerda representa o quartzito mais competente, que aflora em formato de escarpa no talude estudado. A imagem da direita, apresenta o quartzito friável e mais brando que predomina na maior parte do talude.

2.2. Comportamento geomecânico do material

Apesar da porção friável do quartzito apresentar comportamento análogo a solo, principalmente após sofrer os processos de ciclagem, não foi objetivo deste trabalho avaliar essa unidade. Portanto, optou-se por fazer uma parametrização geomecânica dessa unidade, subdividindo-a conforme características de alteração e resistência. Foi realizada o levantamento de parâmetros do maciço rochoso, a partir do critério de Hoek-Brown, e das descontinuidades, através do critério de Barton-Bandis. A Tabela 1 apresenta o compilado destes dados.

Os parâmetros de Hoek-Brown foram obtidos empiricamente a partir de avaliações de campo. Foi utilizado esclerometria para a determinação de um valor de resistência mediana (σ_c) dos maciços medianamente intemperizados. Os valores de GSI foram estimados com base na classificação de Marinos, 2017 para maciços heterogêneos. Para o fator de dano (D), optou-se por incrementar o valor base de 0,7, referentes a escavações mecânicas. Isso ocorreu devido ao maciço não ter sido protegido após o processo de remoção de material e pelo fato de a escavação não ter sido bem executada. O valor de m_i foi obtido a partir da tabela do RocData-Rocscience (versão 4.014).

Os valores que influenciam os resultados de a , m_b , s e E_m são principalmente: GSI, m_i e D. Para o cálculo desses parâmetros, utilizou-se as formulas apresentadas na Figura 4. A resistência à compressão uniaxial, não possui influência representativa uma vez que se admite que a ruptura ocorrerá pelas descontinuidades do maciço e não pela matriz

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \sigma_3 / \sigma_{ci} + s \right)^a$$

$$m_b = m_i \exp(GSI - 100 / 28 - 14D)$$

$$s = \exp(GSI - 100 / 9 - 3D)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$

$$E_m (GPa) = \left(1 - \frac{D}{2} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{((GSI - 10) / 40)}$$

Figura 4. Equações sugeridas por Hoek et al. (2002), para obtenção dos parâmetros utilizados no critério generalizado de Hoek-Brown.

Já para a determinação dos parâmetros da principal descontinuidade avaliada, utilizou-se os critérios de Barton-Bandis. Para obtenção do JCS, considerou-se um valor de 70% da resistência uniaxial, pois os valores obtidos por esclerometria nas descontinuidades foram próximos ao da matriz. O JRC, coletado em campo com o medidor de ressaltos (Pente de Barton). Por fim, o ângulo de atrito foi estimado a partir das correlações entre o Jr e Ja, propostas por Barton et al., 1974. Desta forma, considerou-se o valor de 45° como o ângulo de atrito aparente.

Tabela 1. Parâmetros geomecânicos do quartzito.

Materiais			Peso Específico		Parâmetros de Resistência								Parâmetros de Resistência	
					Maciço Rochoso								Descontinuidades	
					Hoek-Brown								Barton-Bandis	
Litotipo	Descrição	Sigla	Nat.	Sat.	σ_c	D	mi	GSI Médio	m _b	s	a	Erm	Foliação (Sn) - Seções NE-SW	
					(Mpa)								JCS	JRC Médio
					(Mpa)						(Gpa)	(MPa)		
Quartzito da Formação Moeda	Maciço Rochoso de Quartzito Altamente Intemperizado (W4)	QAI	20	20	5	1	20	15	0,05	7,039E-07	5,611E-01	0,1491	-	-
	Maciço Rochoso de Quartzito Medianamente Intemperizado (W3)	QMI	20	20	50	1	20	50	0,56	2,404E-04	5,057E-01	3,54	35	1

Apesar de apresentar geometrias desfavoráveis com formação de negativos, não foram observados maiores sinais de instabilidades nesses taludes. De forma geral, esses afloramentos apresentam descontinuidades mais fechadas e avançam para o interior do talude. Para que ocorresse o tombamento dessas estruturas, seria necessário que houvesse o deslocamento da rocha através das suas descontinuidades, ou uma zona de fraqueza (fratura ou falha) que atravessasse, essa região e permitisse o desprendimento de blocos grandes de rocha da fundação. Em campo, não foram observados nenhum desses dois indícios naturais de instabilidade.

2.3. Análises de estabilidade

Os taludes em rocha, na maioria dos casos, têm sua instabilidade condicionada pelas descontinuidades. O sistema de descontinuidades pode ou não formar um mecanismo de ruptura cinematicamente admissível. Caso exista um mecanismo a estabilidade, será função das características de resistência das descontinuidades e das solicitações. Nos estudos apresentados neste tópico serão admitidos que estejam atendidas as condições cinemáticas para ruptura do talude sempre ao longo de descontinuidades, ou seja, a resistência do material intacto é de tal ordem de grandeza que não permita a ruptura. No caso de maciços extremamente fraturados ou

muito intemperizados a cinemática de ruptura pode não ser explicitamente definida pelas descontinuidades. Nestas situações o comportamento dos maciços admite similaridade com o comportamento dos solos.

Um estudo de estabilidade de taludes em rocha envolve usualmente duas fases:

- 1.A análise cinemática: identificação dos modos de ruptura, por tombamento, cinematicamente admissíveis;
- 2.A verificação da estabilidade: realizada através do cálculo de um Fator de Segurança (FS) obtido por diferentes métodos. No estudo, foi aplicado o método por equilíbrio limite.

De acordo com Fiori e Carmignari (2009), o processo de tombamento de blocos (*toppling*) envolve mecanismos diferentes de movimentação das massas rochosas, não ligados à algum tipo de escorregamento. Blocos individuais, ou conjunto de blocos, sofrem uma rotação sobre eixos fixos, tombando assim na face livre da vertente. Para que ocorra o tombamento de blocos, é essencial a presença de planos estruturais bem definidos como acamamento, xistosidade, falhas, juntas etc.

Em um talude rochoso, a face do talude é a direção da tensão principal maior. Se as camadas possuem ângulo de atrito ϕ , o deslizamento entre as camadas ocorrerá apenas se a direção da compressão aplicada fizer um ângulo maior que o ângulo de atrito ϕ com a direção normal das camadas (GOODMAN, 1989). Em uma projeção estereográfica o tombamento pode ser detectado caso o vetor normal (N) esteja inclinado menos de ϕ graus em relação a face do talude (Figura 5). Além disso, o tombamento pode ocorrer somente se a direção das camadas é aproximadamente paralela a direção da face, com desvio máximo de 30° (GOODMAN, 1989).

Com o objetivo de identificar regiões potencialmente instáveis, com possibilidade para o desenvolvimento de rupturas por tombamento, foram realizadas análises cinemáticas para o material rochoso de quartzito na margem esquerda do reservatório. Ressalta-se que, no presente estudo, o ângulo de atrito (Φ), utilizado na análise cinemática foi nulo (zero), tendo como objetivo avaliar quaisquer tipos de possibilidades geométricas de ruptura. Para as análises de cinemática, utilizou-se o software *Dips* na versão 6.008. Utilizou-se uma atitude média para o comportamento da face do talude de 30/223 (mergulho/direção do mergulho).

A Figura 6 apresenta a rede estereográfica com o resultado das análises de cinemática para rupturas por tombamento. A descontinuidade com principal potencial de sofrer ruptura por tombamento é a J1. Conforme a Figura 6 demonstra, não foi identificado potencial de instabilidade a partir dessa geometria de descontinuidade. Vale ressaltar que essa é uma descontinuidade que ocorre paralela a foliação principal. Assim para se obter um fator de segurança para este cenário, utilizou-se o software RocTopple 1.0 para executar as análises. A Figura 7 mostra o FS obtido. Vale ressaltar que, essa simulação não é muito aderente com a realidade, pois o software apresenta limitações quanto aos dados de *input* que podem ser inseridos. Além disso, ele considera que as descontinuidades estão abertas, enquanto, em campo, observou-se que elas se apresentam fechadas.

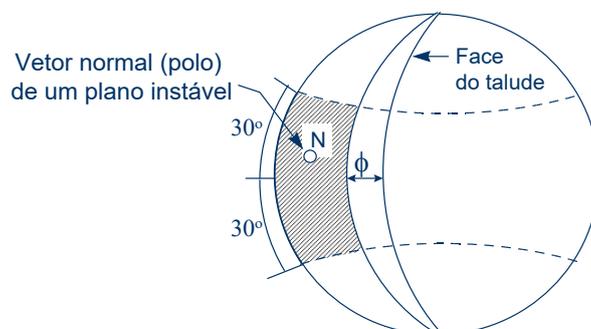


Figura 5. Fator de segurança para ruptura por tombamento. Adaptado de GOODMAN, 1989.

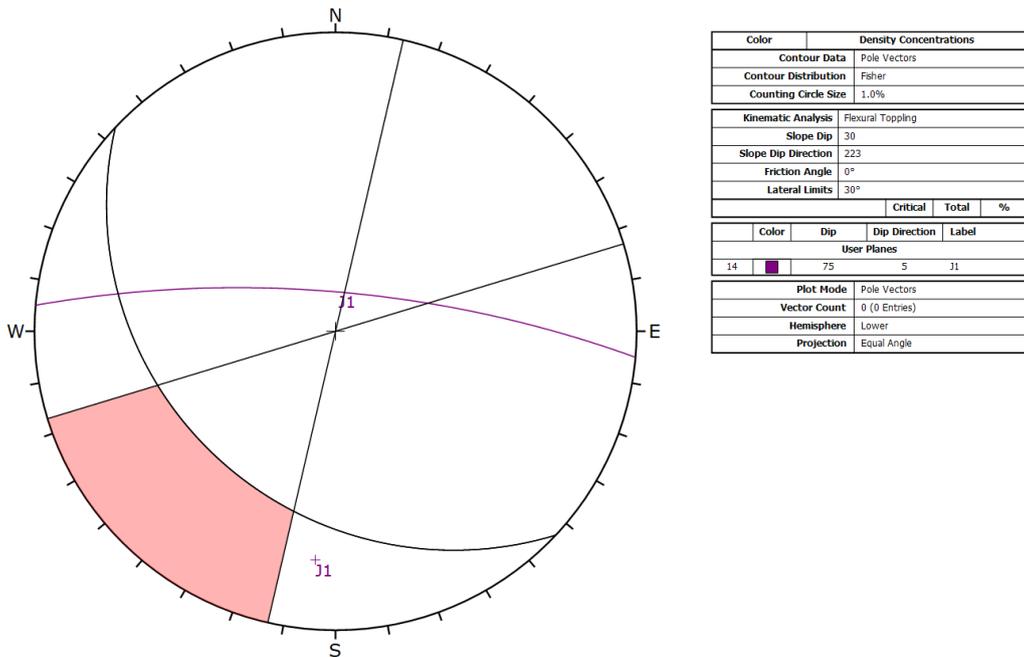


Figura 6. Análise de cinemática para ruptura por tombamento do talude.

Após os trabalhos de descaracterização da barragem, está previsto a implantação de um Plano de Recuperação de Área Degradada (PRAD). Para isso, projetou-se um aterro neste talude com o objetivo de proteger o material autóctone da ação do intemperismo e de processos erosivos. Apesar de não ser o objetivo deste artigo, o material utilizado para a construção do aterro foi indicado com características geotécnicas específicas de forma a garantir a estabilidade da estrutura.

Desta forma, foi realizada uma nova análise de estabilidade restrita ao local de ocorrência das escarpas rochosas. Nessa simulação, considerou-se uma altura de talude menor, pois a parte inferior seria recoberta por aterro. Conforme observado na Figura 8, o fator de segurança aumentou com a redução da altura do talude. Devido as limitações do software já expostas anteriormente, entende-se que, na prática, os fatores de segurança para esses taludes sejam superiores aos obtidos nesse estudo. Já a Figura 9, apresenta uma seção geológica-geotécnica elaborada após a implantação do aterro na margem esquerda e regularização das escavações na margem direita do antigo reservatório.

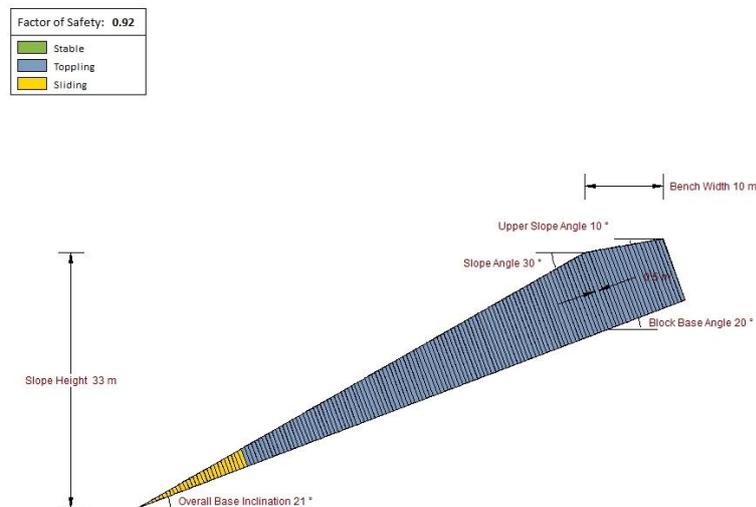


Figura 7. Fator de segurança para ruptura por tombamento no talude.

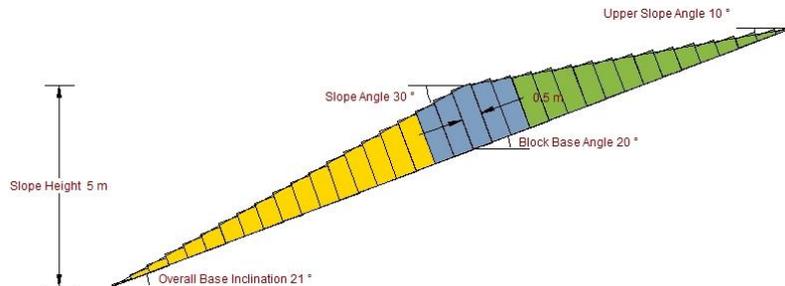
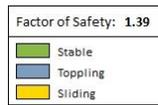


Figura 8. Fator de segurança para ruptura por tombamento na região das escarpas rochosas do talude.

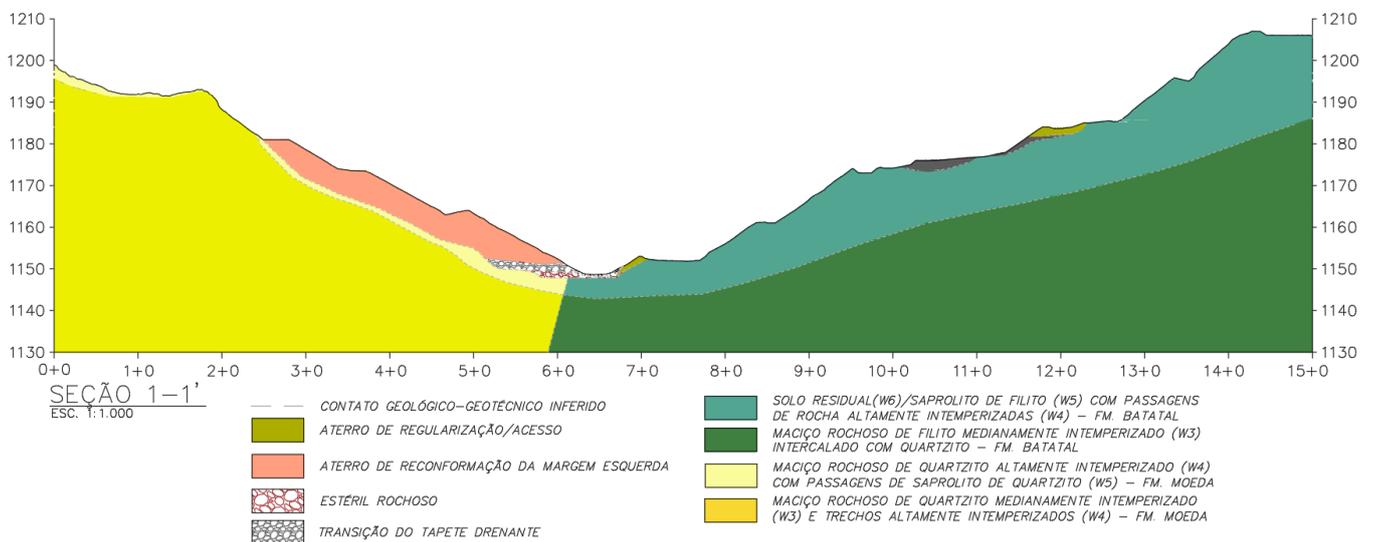


Figura 9. Seção geológica-geotécnica após a implantação do aterro na margem esquerda.

3. CONCLUSÕES

Com o avanço dos estudos, verificou-se que a realização de análises de estabilidade em taludes compostos por intercalações de rochas friáveis e compactas apresenta limitações significativas. No caso apresentado neste artigo, os principais agentes deflagradores de potenciais processos de instabilidade foram decorrentes de ações antrópicas, como a ausência de revegetação, a inexistência de dispositivos de drenagem superficial e a utilização de escavadeiras com conchas do tipo garra, que promoveram a escarificação do maciço, intensificando os processos erosivos.

Durante a execução das obras de descaracterização, a adoção de equipamentos não tripulados comprometeu o controle da geometria dos taludes, resultando em superfícies irregulares nas áreas escavadas. Além disso, a carência de informações precisas sobre a geomorfologia do fundo do reservatório dificultou a elaboração de um projeto que previsse adequadamente a configuração final dessas estruturas.

A margem esquerda foi a mais impactada, em virtude da presença de rochas com foliações mergulhantes em direção ao interior do talude, o que favoreceu a formação de superfícies irregulares no topo do reservatório. As porções superiores apresentaram maior criticidade, pois desenvolveram-se geometrias negativas que, preliminarmente, indicavam risco potencial de instabilização do maciço. Complementarmente, grande quantidade de material inconsolidado — remanescente das escavações — permaneceu depositado sobre os taludes. Tais materiais, frequentemente compostos por fragmentos de rocha, apresentavam risco de deslocamento para as porções inferiores, onde havia tráfego de pessoas e atividades operacionais, gerando condições inseguras à continuidade das obras.

Considerando os passivos ambientais e geotécnicos resultantes das obras de descaracterização da barragem, foi elaborado um projeto de recuperação de áreas degradadas. Como uma das etapas desse projeto, realizaram-se análises de estabilidade nos taludes compostos por quartzito, com o objetivo de identificar as principais condicionantes associadas a eventuais instabilidades. Além de promover a reconfiguração estrutural e a mitigação de riscos, torna-se imprescindível a implantação de dispositivos de drenagem superficial e de técnicas adequadas de revegetação, de modo a prevenir a evolução de processos erosivos e garantir a estabilidade de longo prazo das estruturas.

REFERÊNCIAS

- BAARS, F.J. & ROSIÈRE, C.A., 1997. Geological map of the Quadrilátero Ferrífero. In Baars, F. J. The São Francisco Craton. In De Wit, M. J., Ashwal, L. A. (eds.). Greenstone Belts, Oxford Monographs on Geology and Geophysics Series, Oxford University Press, 529-557;
- BARTON, N., CHOUBEY, V. The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock mechanics, v. 10, n. 1-2, p. 1-54, 1977;
- BARTON, N., LIEN, R., LUNDE, J. (1974). Engineering Classification of Rock Masses for Design of Tunnel Support. Rock Mechanics, 6: 189-236;
- BARTON, N.R., & BANDIS, S.C. 2017. Characterization and modeling of the shear strength, stiffness and hydraulic behavior of rock joints for engineering purposes. Rock Mechanics and Engineering, 1, 3-40;
- BIENIAWSKI, Z.T. (1989). Engineering Rock Mass Classification: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering. John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 251p;
- DORR II, J.V. 1969. Physiographic stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. USGS Professional Paper 614-A, 1969. 110 p;
- FIORI, A.P.; CARMIGNANI, L. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas - Aplicações na estabilidade de taludes. 2ª edição. Oficina de Textos & UFPR, 602 p., 2009;
- GOODMAN, R.E. (1989) Introduction to rock mechanics. 2nd ed. Wiley, New York. 562p;
- HOEK, E.; CARTER, T.G.; DIEDERICHS, M.S. 2013. Quantification of the Geological Strength Index chart. Proc. 47th US Rock Mech./Geomech. Symp. San Francisco, ARMA 13-672;
- ISRM - International Society for Rock Mechanics Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. 1978. Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15(6): 319–368;
- SILVA, A. A. B. Caracterização Geotécnica dos Taludes Rochosos da Praia da Paciência, Salvador, Bahia. Trabalho de Graduação. UFBA. Salvador. 2018.