

## CARACTERIZAÇÃO E PARAMETRIZAÇÃO GEOMECÂNICA DA ZONA DE DANO RELACIONADA À DETONAÇÃO PARA CORTE DE TALUDES ROCHOSOS

Maria Eduarda A.F. Ramos <sup>1</sup>; Daniel T. Gradim <sup>2</sup>

**Resumo** – A detonação para corte em maciços rochosos é uma técnica comumente empregada em obras civis, apresentando ótimos resultados quando aplicada em rochas maciças e resistentes. Entretanto, quando mal dimensionada ou executada, pode comprometer a integridade do maciço, originando uma Zona de Dano (ZD) ao redor dos furos de detonação, onde há fraturamento da rocha e diminuição da qualidade geomecânica do maciço. A distinção entre o maciço no seu estado natural e o maciço afetado pela ZD, bem como sua caracterização geológico-geotécnica individualizada, são importantes para que as análises de estabilidade sejam mais fiéis à realidade e forneçam fatores de segurança confiáveis, guiando o planejamento de soluções eficientes para mitigação dos riscos associados à instabilidade. Este estudo tem enfoque na caracterização e parametrização geomecânica da zona de dano observada em um extenso talude de corte às margens da ferrovia, que apresenta evidências de instabilidade. Trata-se de um maciço rochoso de granito-gnaiss da Formação Borrachudos, localizado no município de Nova Era – Minas Gerais.

**Abstract** – Blasting for rock mass excavation is a technique commonly employed in civil engineering works, yielding excellent results when applied to massive and competent rocks. However, when poorly designed or executed, blasting can compromise the rock mass integrity, generating a Damage Zone (DZ) around the blast holes, characterized by fracturing and reduction in the rock's geomechanical quality. The distinction between the intact rock mass and the portion affected by the DZ, along with its individualized geological and geotechnical characterization, is essential for conducting stability analyses that more accurately reflect real conditions and provide reliable factors of safety. These analyses are fundamental for guiding the design of effective mitigation interventions against instability-related risks. This study focuses on the geomechanical characterization and parameterization of the damage zone observed in an extensive cut slope adjacent to a railway, which exhibits signs of instability. The slope is composed of a granite-gneiss rock mass from the Borrachudos Formation, located in the municipality of Nova Era, state of Minas Gerais, Brazil.

**Palavras-Chave** – Taludes rochosos; Detonação para corte; Zona de dano.

---

<sup>1</sup> Geól., MSc, GEOESTÁVEL CONSULTORIA E PROJETOS: Belo Horizonte – Minas Gerais, (31) 99525-3588, maria.ramos@geoestavel.com.br

<sup>2</sup> Geól., M.Eng. Geotécnica, GEOESTÁVEL CONSULTORIA E PROJETOS: Belo Horizonte – Minas Gerais, (31) 99145-9403, daniel.gradim@geoestavel.com.br

## 1. INTRODUÇÃO

A detonação para corte é uma técnica comumente empregada em obras de engenharia civil, incluindo taludes de corte em maciços rochosos. Consiste basicamente na detonação simultânea de uma sequência de furos carregados com explosivos, dispostos de forma linear, delimitando um plano de corte. A carga explosiva deve ser controlada e o espaçamento entre os furos bem projetado, de forma a minimizar a formação de fissuras e trincas em direções indesejáveis, diferentes do plano de corte. É um método que apresenta excelentes resultados em maciços rochosos resistentes e maciços – sem muitas descontinuidades.

Quando bem planejada e executada, a detonação de corte resulta em um talude com superfície regular, plano de face claramente definido e boa estabilidade. A face do corte geralmente exibe as marcas deixadas pelos furos de detonação, conhecidas como “meias-canais”. Quanto mais contínuas e visíveis essas marcas forem, indicam uma melhor qualidade da execução do corte e menor impacto da detonação sobre o maciço rochoso. Por outro lado, quando mal dimensionada, a detonação de corte pode causar danos estruturais indesejados, causados pela propagação das ondas de choque e gases sob alta pressão gerados pela explosão, permitindo inclusive a abertura de descontinuidades geológicas. Tais efeitos resultam na formação de uma zona de dano (ZD) ao redor dos furos, onde é comum a geração de planos de descontinuidades com variadas aberturas, além de blocos com dimensões diversificadas, que impactam negativamente a qualidade geomecânica e a estabilidade do maciço.

Na região de Nova Era, no estado de Minas Gerais, há um extenso talude de corte em maciço rochoso de granito-gnaiss às margens da ferrovia. Este talude apresenta alguns trechos com manifestações claras de patologias geotécnicas, tanto antigas quanto recentes, que possivelmente estão associadas à ZD gerada durante os processos de detonação de corte, em conjunto com fatores relacionados à percolação de água pluvial, crescimento de vegetação nas fendas abertas e vibração induzida devido à proximidade da ferrovia. Este estudo tem o objetivo de avaliar a importância da correta delimitação e caracterização da ZD, assim como sua parametrização geomecânica, e sua influência sobre o Fator de Segurança (FoS) do talude.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

### 2.1. Localização

O talude estudado está localizado no município de Nova Era - MG, dentro da faixa de domínio da Estrada de Ferro Vitória-Minas – EFVM, próximo à rodovia MG-120, que liga Nova Era a Itabira.

### 2.2. Caracterização geológica

O talude estudado é um talude de corte em uma vertente rochosa, tendo cerca de 915 m de comprimento e altura média de cerca de 25 m (Figura 1A). Está situado em um trecho sinuoso da ferrovia, tendo direção que varia de W-E a NW-SE, com mergulho para N e NE. Seu mergulho é vertical na maior parte da sua extensão, com trechos negativos. A distância entre o pé do talude e o boleto da ferrovia é da ordem de 2,0 m.

A área de estudo está inserida no contexto geológico do Bloco Guanhões, a sudeste do Cráton São Francisco e a oeste do Orógeno Araçuaí, muito próximo à borda nordeste do Quadrilátero Ferrífero, uma importante província mineral brasileira. De acordo com o Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais (Silva et al., 2020), ali ocorre uma associação de rochas metavulcanossedimentares da Formação Serra Negra de Guanhões (Grupo Guanhões) com rochas graníticas da Suíte Borrachudos.

O talude foi escavado em um maciço rochoso regionalmente atribuído à Suíte Borrachudos, uma unidade intrusiva de grande expressividade regional, relacionada à abertura do rifte Espinhaço e datada em 1,7 bilhões de anos (Ga) (Endo et al., 2020). Consiste em granitos e gnaisses anorogênicos, de composição monzo a sienogranítica. Os granitos têm tipicamente granulação média a grossa e apresentam homogeneidade composicional.

As figuras 1B e 1C mostram o material rochoso aflorante no talude, que foi classificado como um granito-gnaisse. É uma rocha composta principalmente por quartzo, feldspato e biotita, com granulação média, apresentando-se maciça ou bandada, com cor variando de bege a cinza claro. Na face do talude estudado, assim como nas encostas naturais, há uma fina capa de alteração com cor cinza escura.

O contato solo-rocha é abrupto. Sotopostos ao maciço rochoso, ocorrem horizontes de saprolito (espessura média de 5,0 m), solo residual (espessura média de 3,5 m) e colúvio (espessura média de 2,0 m). Neste estudo, o maciço terroso não será abordado, apenas o maciço rochoso.

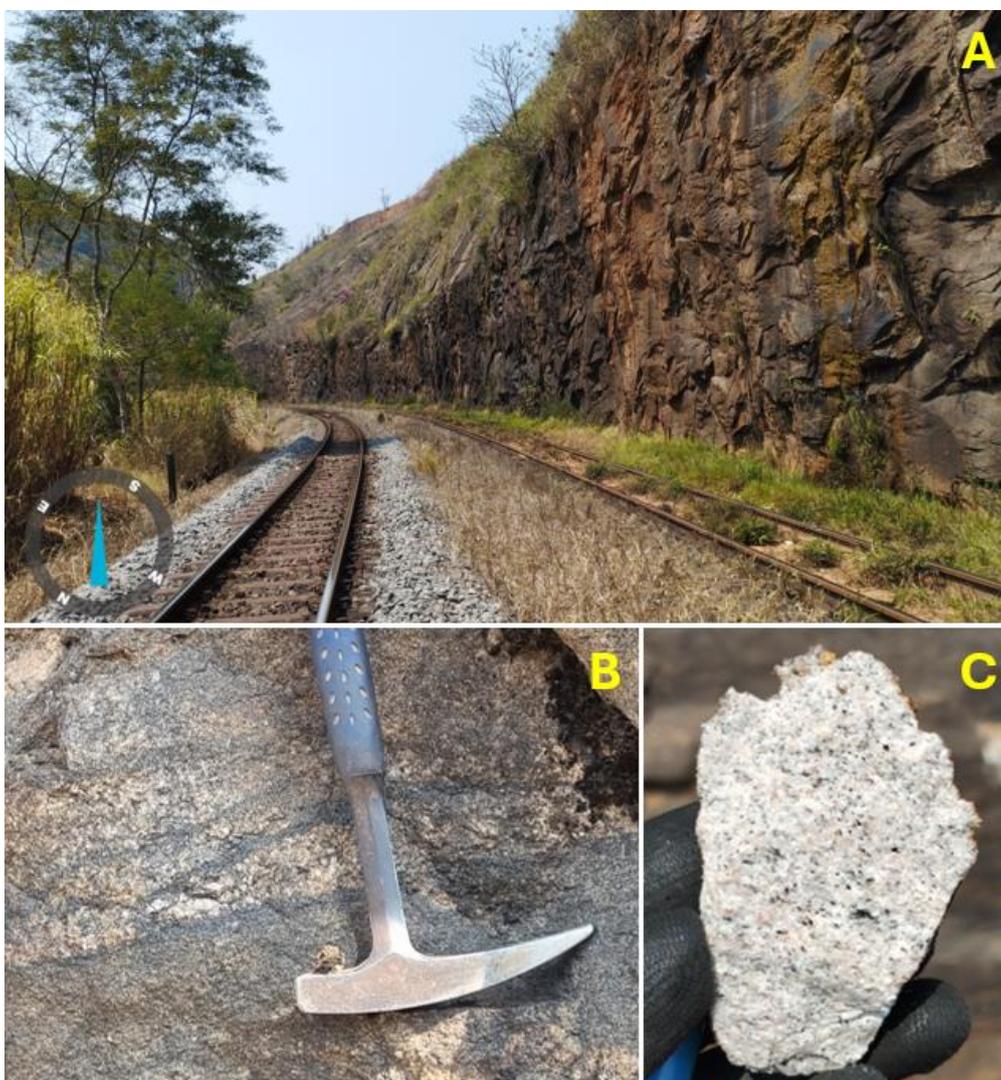


Figura 1: A: Aspecto geral do talude, ilustrando sua grande extensão e corte com mergulho vertical. B: Granito-gnaisse aflorante no talude em escala de afloramento. C: Granito-gnaisse em escala de detalhe.

As estruturas geológicas identificadas no maciço rochoso foram: bandamento composicional (Sb), que está levemente ondulado ao longo do afloramento, mas sempre sub-horizontal (máximo em 206/12 - Figura 2); juntas de alívio (Ja) de grande persistência, abundantes, que mergulham para fora do talude (máximos em 345/43; 057/51 e 027/16 - Figura 2); e fraturas (Figura 2),

havendo uma família principal (Fr1) (máximo em 025/83), uma segunda família (Fr2) (máximo em 153/60) e uma terceira família (Fr3) (máximo em 071/89), ambas em notação direção de mergulho/mergulho.

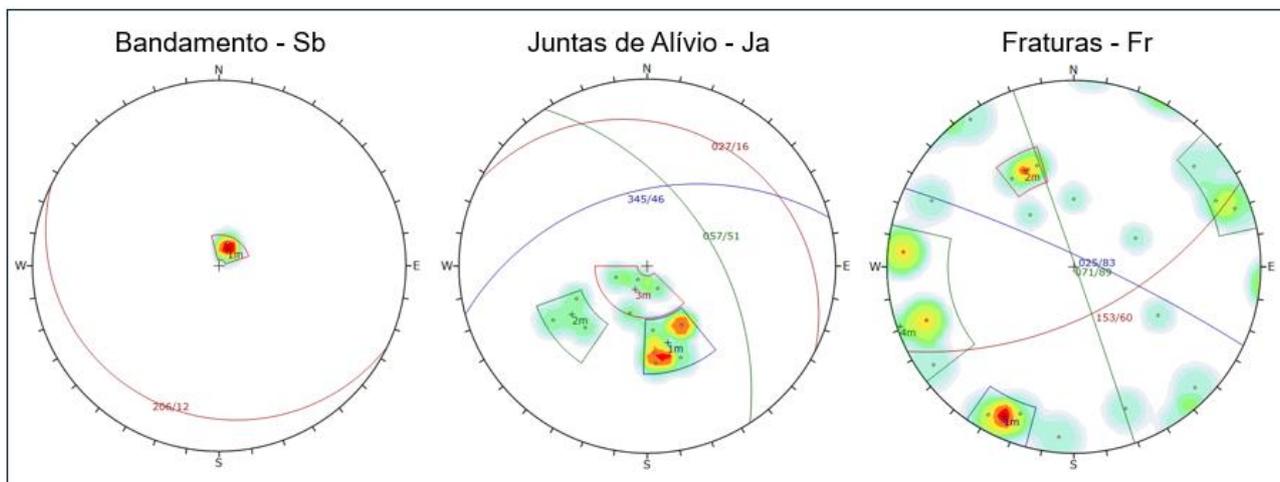


Figura 2: Estereogramas do bandamento (Sb), juntas de alívio (Ja) e fraturas (Fr) medidas no talude.

### 3. COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DO MACIÇO ROCHOSO ESTUDADO

A caracterização geotécnica do maciço rochoso foi realizada conforme os índices ABGE (1983), sendo avaliado o grau de coerência, além da alteração mineralógica, fraturamento e rugosidade das superfícies das discontinuidades. O GSI para maciços homogêneos (Hoek & Marinos, 2000) também foi determinado.

Ao longo do talude de estudo, foram identificados dois principais núcleos rochosos mais resistentes, com coerência C2/C1 (resistente a muito resistente; 50-250Mpa) e pouca alteração mineralógica. Nas bordas destes núcleos, tanto no topo quanto nas laterais, o maciço rochoso apresenta coerência gradualmente diminuído, variando de C3 (medianamente resistente; 25-50Mpa), e pouca alteração mineralógica gradando para alteração mineralógica moderada. Os gradientes de alteração e resistência foram determinados a partir de avaliação tátil-visual dos afloramentos e testes com uso de martelo geológico.

Os graus de fraturamento predominantes variam de maciço (espaçamento médio entre as discontinuidades superiores a 200cm) a pouco fraturado (espaçamento médio entre as discontinuidades de 60-200cm), com trechos moderadamente fraturados (espaçamento médio entre as discontinuidades de 20-60cm). De forma geral, o GSI para maciços homogêneos (Hoek & Marinos, 2000) na porção inferior do talude possui entre 85-90 pontos, indicando um maciço rochoso muito bom, com discontinuidades esparsas. Na porção superior, o GSI possui entre 65 e 80 pontos, indicando um maciço bom, com formação de blocos a partir da interseção de três discontinuidades diferentes, com paredes ásperas. Foram observados muitos blocos de dimensões decimétricas a métricas, tanto caídos ao pé do talude, quanto blocos-chave pendurados no topo dele.

As discontinuidades são, em geral, onduladas rugosas, têm abertura < 5 mm e não têm preenchimento. Estavam, em sua maioria, secas à época do levantamento.

Foram realizadas análises cinemáticas baseadas exclusivamente em critérios geométricos, considerando o ângulo de atrito igual a 1°, com o objetivo de identificar os possíveis mecanismos de ruptura no talude, assim as análises cinemáticas não foram apresentadas com a cônica de atrito. Os resultados indicam que a maioria das instabilidades potenciais está associada às juntas de alívio (Ja), discontinuidades presentes exclusivamente na zona de dano (ZD), conforme mostrado na Figura 3.

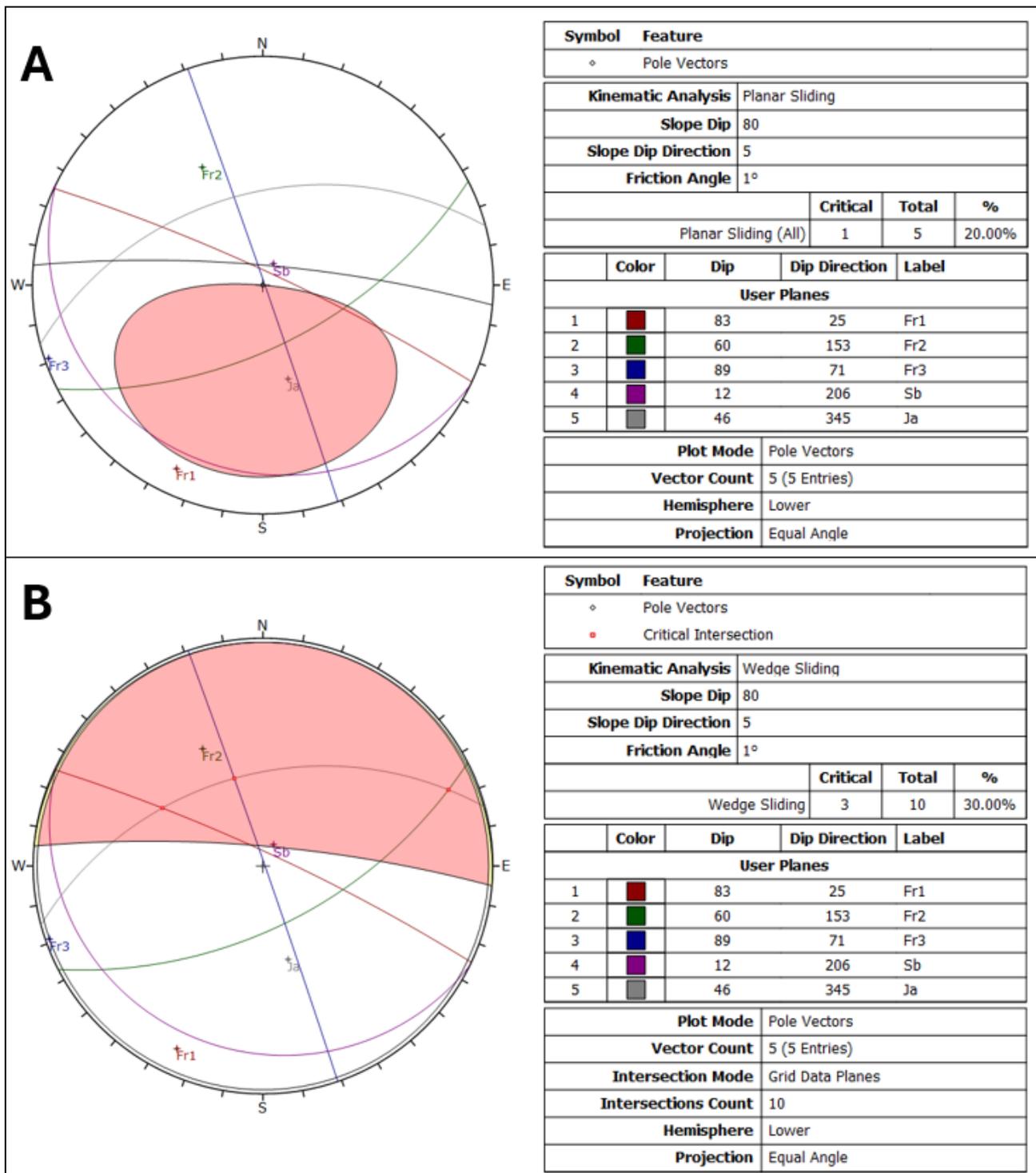


Figura 3: A: Análise cinemática para ruptura planar, apontando ruptura em Ja. B: Análise cinemática para ruptura em cunha, apontando ruptura nas interseções de Ja x Fr1, Ja x Fr2 e de Ja x Fr3.

### 3.1. Zona de dano

O maciço rochoso do talude, de forma geral, apresenta matriz com boa resistência e fraturado em variados graus. Em determinados trechos, observa-se um plano de corte limpo e homogêneo, com meias-canas inteiramente preservadas e ausência da zona de dano (ZD), apresentando apenas as descontinuidades naturais do maciço, como indicado na Figura 4A.

As porções do talude afetadas pela ZD foram mapeadas a partir da observação de planos de corte muito irregulares, apresentando juntas de alívio a meia altura e próximas ao pé do talude. Juntas em profundidades desta ordem não estão associadas aos processos intempéricos, os quais são responsáveis por juntas de alívio na superfície do maciço rochoso, próximo ao contato

solo-rocha, que também são observadas no topo dos taludes. As juntas associadas à ZD que são muito persistentes e pouco espaçadas, aumentam o grau de fraturamento do maciço, como mostra a Figura 4B. A espessura da ZD foi estimada em aproximadamente 2,5 m, com base na observação dos afloramentos.



Figura 4: A: Talude sem influência da ZD, onde a detonação para corte foi bem dimensionada e bem executada, sendo possível observar as meias-canas B: Talude afetado pela ZD, apresentando juntas de alívio pouco espaçadas e abertas em sua porção superior, com formação de blocos e cicatrizes de rupturas. Sua porção inferior é claramente menos afetada pela ZD.

A Figura 5 apresenta uma seção esquemática do talude, mostrando que o maciço rochoso foi dividido em quatro regiões:

- Zona de Dano Superior (ZDS): topo da face do talude, onde o efeito dano (D) foi considerado como 1,0 (Detonação Ruim) e o GSI médio do maciço como 65 pontos;
- Zona de Dano Inferior (ZDI): meia-altura e pé do talude, onde o efeito dano (D) foi considerado como 1,0 (Detonação Ruim) e o GSI médio do maciço como 85 pontos;
- Núcleo Rochoso Superior (NRS): maciço rochoso abaixo do saprolito, não afetado pela detonação, onde o efeito dano (D) foi considerado como 0 (Sem Detonação) e o GSI como 90 pontos;
- Núcleo Rochoso Inferior (NRI): maciço rochoso em profundidade, não afetado pela detonação, onde o efeito dano (D) foi considerado como 0 (Sem Detonação) e o GSI como 90 pontos.

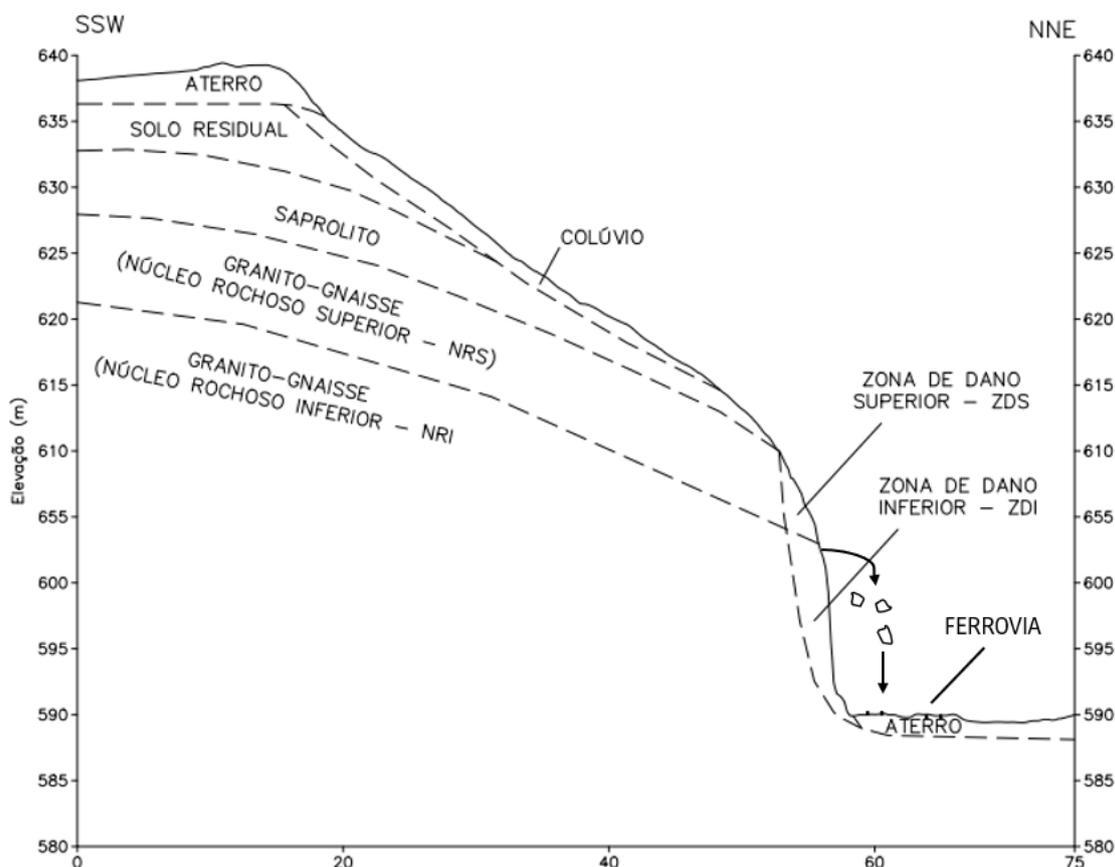


Figura 5: Seção geológico-geotécnica esquemática do talude estudado, mostrando as unidades geológico geotécnicas mapeadas e seus contatos. A potencial projeção de blocos sobre a ferrovia é ilustrada na porção direita da figura.

Os parâmetros geomecânicos de resistência do maciço rochoso foram estimados para cada uma das quatro regiões do núcleo rochoso de granito-gnaisse. Os valores de resistência a compressão uniaxial (RCU) para a matriz rochosa e descontinuidades (JCS), foram obtidos através da estimativa de valores de resistência sugeridos pela ABGE (1983). Para cálculo e obtenção dos parâmetros da matriz do maciço rochoso para o critério de Hoek-Brown ( $m_b$ ,  $m_i$ ,  $s$ ,  $a$ ,  $D$ ,  $GSI$ ), foram utilizadas as equações e informações sugeridas por Hoek et al. (2002). Quanto ao critério Barton-Bandis para as descontinuidades, estima-se que os valores de JCS, sejam similares aos valores de RCU da matriz de cada unidade Geomecânica, devido à característica do gnaisse. Os valores de JRC aplicados nas análises foram os ranges médios das características observadas em campo. Os ângulos de atrito ( $\phi$ ) foram estimados com base na equação sugerida por Barton et al. (1974;  $\text{tg}-1(J_r/J_a)$ ).

Para a rocha intacta na porção superior do maciço, o peso específico considerado foi de  $23 \text{ kN/m}^3$ , estimado com base na literatura, e a resistência a compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ) da matriz foi de  $50 \text{ Mpa}$ , aproximadamente. Para a rocha intacta na porção inferior do maciço, o peso específico considerado foi de  $24 \text{ kN/m}^3$ , estimado com base na literatura, e a resistência a compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ) da matriz foi estimada em  $100 \text{ MPa}$ . A altura média do talude considerada foi de  $25 \text{ m}$ , conforme observado em campo. A tabela 1 mostra os parâmetros estimados.

Tabela 1: Parâmetros dos maciços rochosos estimados para os critérios de ruptura de Hoek-Brown e de Barton-Bandis. ZDS: Zona de Dano Superior; NRS: Núcleo Rochoso Superior; ZDI: Zona de Dano Inferior; NRI: Núcleo Rochoso Inferior.

Região	Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )	Parâmetros de Resistência												
		Hoek-Brown										Barton-Bandis		
		$\sigma_c$ (MPa)	GSI Médio	$m_i$	D	MR	$E_i$ (MPa)	$m_b$	s	a	Erm (MPa)	JCS (MPa)	JRC	$\Phi$ (°)
ZDS	23	50	65	28	1	525	26.250	2,298	0,0029	0,502	4.294,31	50	8	56
NRS	23	50	90	28	0	525	26.250	19,591	0,3292	0,500	25.153,69	50	8	56
ZDI	24	100	85	28	1	525	52.500	9,591	0,0821	0,500	19.761,37	100	8	76
NRI	24	100	90	28	0	525	52.500	19,591	0,3292	0,500	50.327,39	100	8	76

A parametrização individualizada das regiões do maciço rochoso afetadas e não afetadas pela ZD permite a realização de análises de estabilidade mais confiáveis, que retratam as propriedades do maciço em condições mais próximas da realidade.

### 3.2. Tratativas

A combinação do potencial geométrico de formação de blocos de grandes dimensões, devido à orientação e espaçamento das descontinuidades, com o alto ângulo de mergulho do talude, praticamente verticalizado, e com sua grande altura, em média de 25 m, representam uma situação de instabilidade com risco de queda de blocos.

Duas soluções foram apontadas para melhorar a segurança e estabilidade do talude rochoso. Uma delas consiste na instalação de rede metálica galvanizada de dupla torção, confinando a trajetória de eventuais desprendimentos de blocos, de modo a trajetória de queda fique contida rente a face do ativo, sem que haja projeção e/ou rolamento de blocos para a área dos trilhos da ferrovia. A outra solução envolve a aplicação localizada de chumbadores em regiões críticas do talude rochoso associado a revestimento cortical, onde um sistema de telas de alta resistência trabalham em conjunto com os chumbadores, evitando o desprendimento de blocos e aumentando a estabilidade do talude.

Apesar se não ser o foco deste trabalho, as três soluções apontadas para o maciço terroso envolvem: aplicação de manta de proteção e grampos curtos; grampeamento com concreto projetado; e grampeamento com revestimento verde.

É essencial enfatizar que, independentemente da solução adotada, seu adequado funcionamento demanda inspeções e manutenções periódicas ao longo de toda a vida útil do talude.

## 4. CONCLUSÕES

Devido à grande altura (em média 25 m) e verticalidade do talude, combinada com sua proximidade ao boleto da ferrovia (inferior a 2,0 m), torna-se fundamental avaliar e mitigar os riscos associados às rupturas e à queda de blocos. Evidências da ocorrência destes eventos forma observadas em campo, e representam um potencial significativo de bloqueio da via férrea, além de oferecerem risco direto à segurança operacional e à integridade dos usuários e cargas da linha.

A partir do mapeamento geológico-geotécnico do talude, foi possível perceber que a instabilidade da face rochosa está associada às descontinuidades, que se interceptam e formam blocos de dimensão decimétrica a métrica que eventualmente se desprenderão do maciço e podem atingir a ferrovia.

Tal instabilidade é mais crítica na Zona de Dano (ZD) originada como consequência da detonação para corte mal dimensionada, resultado na formação de juntas de alívio (Ja), que são descontinuidades que atuam como plano basal mais comum dos blocos.

Este estudo realizou a caracterização e parametrização geomecânica do maciço rochoso com enfoque na Zona de Dano, com o objetivo de guiar o planejamento de soluções eficientes e direcionadas para a Zona de Dano (ZD), otimizando assim os investimentos necessários para mitigação dos riscos associados à instabilidade do talude de corte na operação ferroviária.

As soluções apontadas envolvem tanto o confinamento da trajetória da queda de blocos, quanto intervenções mais complexas que buscam evitar a queda deles.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à GEOESTÁVEL CONSULTORIA E PROJETOS pelo incentivo e suporte oferecidos.

## REFERÊNCIAS

ABGE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL. (1983). *“Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos.”* (Tradução 12: ISRM – “Suggested methods for the quantitative description of rock masses”, 1978). São Paulo.

BARTON, N., BANDIS, S.C. (1990). *“Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. International Symposium on Rock Joints”*. Loen 1990. Proceedings, pp. 603-610, 1990.

BARTON, N., LIEN, R., LUNDE, J. (1974). *“Engineering Classification of Rock Masses for Design of Tunnel Support”*. Rock Mechanics, 6: 189-236.

ENDO, I., MACHADO, R., GALBIATTI, H.F., ROSSI, D.Q., ZAPPAROLI, A.D., DELGADO, C.E. R., CASTRO, P.T.A. (2020). *“Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero”*. In: CASTRO, P.T.A., ENDO, I., GANDINI A.L. (Orgs.). Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos. Belo Horizonte: 3i Editora, p.72-113.

HOEK, E., CARRANZA-TORRES, C. & CORKUM, B. (2002). *“Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition”*. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and the 17th Tunnelling Association of Canada Conference: NARMS-TAC 2002, R. Hammah, W. Bawden, J. Curran and M. Telesnicki (eds.), University of Toronto Press, Toronto, Ontario, Canada: 267–273.

HOEK, E., BROWN, E.T. (2019). *“The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition”*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Volume 11, Issue 3, June 2019, pp. 445-463.

HOEK, E., MARINOS, P.G. (2000). *“Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses”*. Tunnels and Tunnelling International;132(11):45e51.

SILVA, M.A.; PINTO, C.P.; PINHEIRO, M.A.P.; MARINHO, M.S.; LOMBELLO, J.C.; PINHO, J.M.M.P.; GOULART, L.E.A.; MAGALHÃES, J.R. (2020). *“Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais”*. Projeto Geologia do Estado de Minas Gerais. Escala 1:1.000.000. Belo Horizonte.