

## SISTEMATIZAÇÃO DE TRATAMENTO DE TALUDES BASEADO EM CONDIÇÕES CINEMÁTICAS TÍPICAS EM ROCHAS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO – UM ESTUDO DE CASO

André Leite de Oliveira <sup>1</sup>; Luciene Almeida <sup>2</sup>; Paulo Cella<sup>3</sup> Felipe Neiva <sup>4</sup>; Yulder Cardenas<sup>5</sup>; Letícia Diniz<sup>6</sup>

**Resumo** – Na engenharia, a sistematização e padronização de processos desempenham um papel fundamental na tomada de decisões rápidas e assertivas. Este trabalho apresenta a sistematização dos tratamentos típicos aplicados em taludes de escavação de uma cava a céu aberto, considerando a resistência do maciço, as descontinuidades e os potenciais modos de ruptura. A classificação proposta foi testada em um estudo de caso em uma cava a céu aberto, por meio de análises cinemáticas e de estabilidade, cujos resultados confirmaram a eficácia da abordagem sistematizada.

**Abstract** – In engineering, the systematization and standardization of processes play a fundamental role in enabling quick and accurate decision-making step. This study presents the systematization of typical treatments applied to excavation slopes in the Quadrilátero Ferrífero, considering the rock mass competence, structural geology, and potential failure mechanisms. The proposed classification was tested in a case study of an open-pit mine through kinematic and stability analyses, whose results confirmed the effectiveness of the systematic approach.

**Palavras-Chave** – Tratamentos em taludes; ancoragem; sistematização.

---

<sup>1</sup> Geól., BVP Engenharia e Hidrotecnia: Belo Horizonte - MG, (21) 97100-1180, andre.leite@bvp.eng.br

<sup>2</sup> Geól., MSc, BVP Engenharia e Hidrotecnia: Belo Horizonte - MG, (31) 98822-7002, luciene.almeida@bvp.eng.br

<sup>3</sup> Geól., Diretor Técnico, BVP Engenharia e Hidrotecnia: Belo Horizonte - MG, (31) 3167-0857, paulo.cella@bvp.eng.br

<sup>4</sup> Eng., Dr, BVP Engenharia e Hidrotecnia: Belo Horizonte - MG, (31) 3167-0857, felipe.neiva@bvp.eng.br

<sup>5</sup> Eng., MSc, BVP Engenharia e Hidrotecnia: Belo Horizonte - MG, (31) 99948-8436, yulder.cardenas@bvp.eng.br

<sup>6</sup> Geól., BVP Engenharia e Hidrotecnia: Belo Horizonte - MG, (31) 3167-0857, leticia.diniz@bvp.eng.br

## 1. INTRODUÇÃO

A BVP Geotecnia e Hidrotecnia atua em diversos projetos geotécnicos de grandes mineradoras do Quadrilátero Ferrífero há mais de 30 anos, incluindo projetos de barragens, pilhas de rejeito e estéril, e também cavas a céu aberto e subterrâneas. Nesse contexto, desenvolve projetos de contenção de taludes utilizando empilhamento para berma de estabilização, concreto projetado com ancoragens, tirantes, drenagem superficial, entre outras soluções de engenharia.

Esta atuação, permitiu a parametrização e sistematização de uma série de tratamentos em taludes de escavação, definidos em função da resistência do maciço, da orientação espacial das descontinuidades e da cinemática atribuída aos taludes de escavação.

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo de caso em que a sistematização de tratamentos típicos, elaborados pela BVP e validada em obra, serviu como ponto de partida para o projeto de contenção da parte superior de um talude de cava, onde na porção inferior será implantado um aterro de estabilização. Além disso, todas as análises subsequentes, desenvolvidas para parametrização e dimensionamento das estruturas de contenção serão abordadas e comparadas à sistematização proposta para avaliar sua eficiência.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde a uma antiga cava de mineração com altura típica de 60 m, localizada na borda leste do Quadrilátero Ferrífero, porção central do estado de Minas Gerais, que foi paralisada no final da década de 80. Geologicamente, encontra-se inserida no flanco inverso do sinclinal Santa Rita, uma megaestrutura caracterizada como uma dobra de escala sub-regional de direção axial NW-SE, com raízes no embasamento adjacente do Complexo Santa Bárbara e seccionada pela falha de Água Quente. Na cava, predominam rochas das Formações Saramenha e Córrego do Germano, pertencentes ao Super Grupo Estrada Real (Endo et al., 2019).

Nos taludes da cava, afloram quartzitos, filitos e xistos da Formação Saramenha, intercalados com itabiritos da Formação Córrego do Germano. A Figura 1 exibe o mapa geológico da cava, os polígonos vermelhos destacam as áreas de interesse para implantação dos sistemas dos tratamentos aqui propostos para contenção de materiais que possam desprender do talude. Na área 1, predominam saprolito de filito, de resistência extremamente branda (A5, R0), cobertura laterítica na porção norte da poligonal, além de quartzito pouco a medianamente resistente (R2+ a R3) e itabirito medianamente resistente a resistente (R3 a R4), na porção sul da área 1. Já na área 2, predomina saprolito de sericita xisto, extremamente alterado, de resistência extremamente branda (A5, R0). A Figura 2 representa uma seção típica de um talude com afloramento de itabirito (R4). A classificação de resistência foi realizada a partir da proposta para *weak rocks* (BVP, 2012) e consolidada no livro *Open Pit Slope Design in Weak Rocks* (Franca, Costa e Stacey, 2018, p. 287), que considera a subdivisão das classes R1 e R2 (ISRM, 1981).

O arcabouço estrutural desta região resulta da superposição de pelo menos 3 (três) fases de deformação sobre o sistema de nappes Ouro Preto (Almeida, 2004). Esse sistema de dobras representa um segmento crustal alóctone sobre a Nappe Curral, vergente para SSW, no qual se articulam quatro nappes: Nappe Maquiné inferior, Nappe Santa Rita, Nappe Ouro Preto e Nappe Itabira-Rio Piracicaba superior. Nos taludes da cava, foi possível observar uma foliação dominante, com direção de strike NNE-SSW e mergulho médio de 40° para ESE. Além de pelo menos três famílias de fraturas, mais fraturas aleatórias. A Tabela 1 representa o quadro resumo das estruturas geológicas medidas em campo, com as direções e mergulhos médio em notação Dip/Dip Direction. Essas estruturas condicionam os modos de ruptura possíveis dos taludes e foram consideradas para realização de análises cinemáticas e de estabilidade.

Tabela 1: Quadro resumo do arcabouço estrutural da cava.

| Estrutura | Tipologia | Dip (°) | Dip Dir. (°) |
|-----------|-----------|---------|--------------|
| Sn        | Foliação  | 40      | 108          |
| FR1       | Fratura   | 63      | 256          |
| FR2       | Fratura   | 79      | 308          |
| FR3       | Fratura   | 75      | 18           |

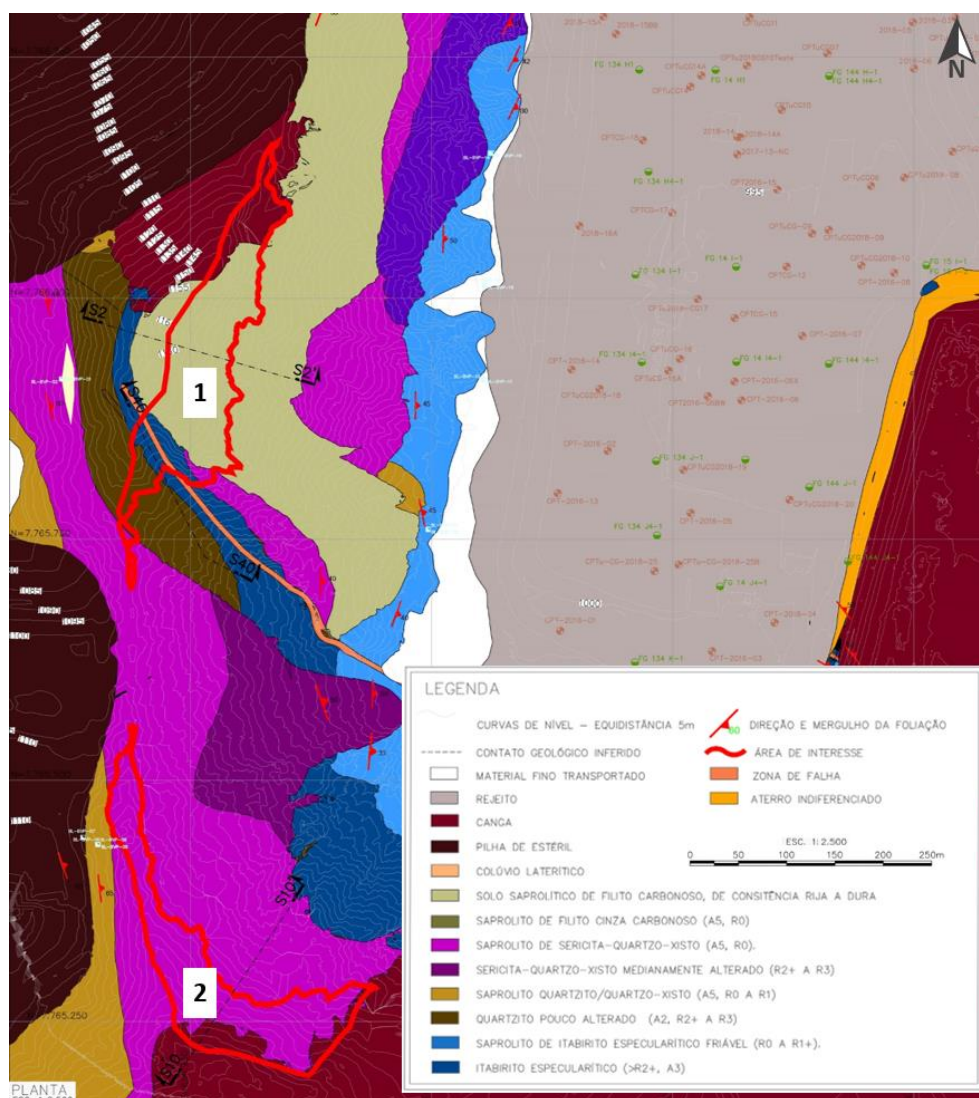


Figura 1: Mapa geológico da área de interesse. Os pontos localizados na bacia de rejeitos correspondem, majoritariamente, a investigações realizadas por meio de sonda cônica sísmica.

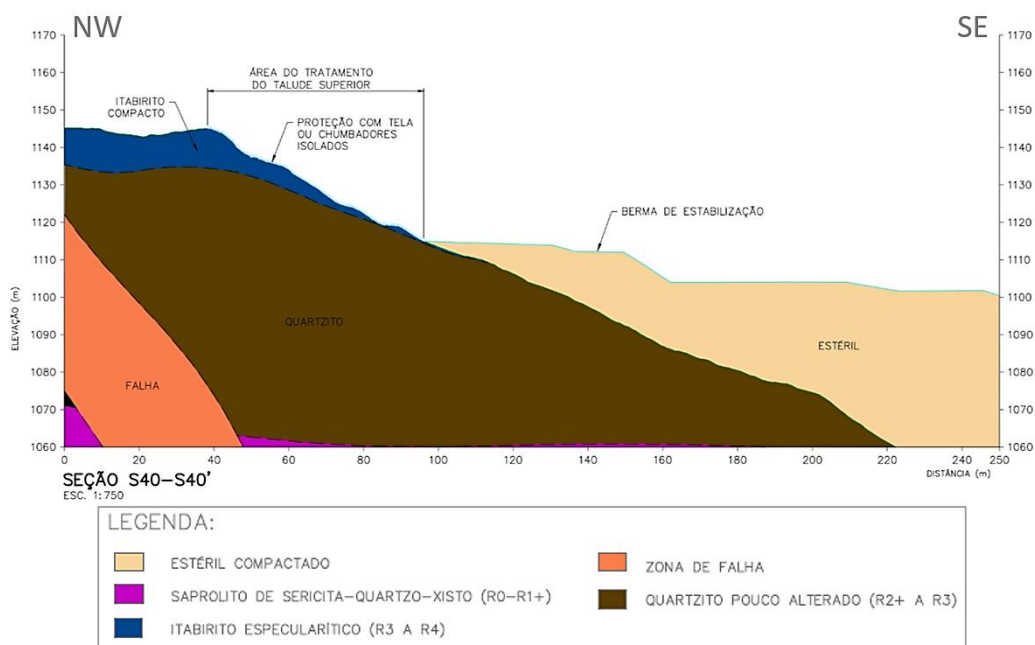


Figura 2: Seção típica de talude de itabirito compacto a ser tratado, com representação da berm de estabilização construída com estéril compactado.

## METODOLOGIA

O ponto de partida para determinação dos tratamentos estimados neste trabalho, foi a tabela de sistematização da BVP, consolidada após diversos projetos executados com análises específicas de cada caso (Tabela 2). Esta tabela foi parametrizada com base em quatro características principais do maciço, sendo: 1) classe de referência; 2) direção da foliação em relação ao talude; 3) mergulho da foliação em relação ao talude e 4) tipologia de comportamento potencial (modo de falha). A construção da tabela ocorreu durante a escavação de áreas correlatas do mesmo empreendimento, nas quais eram realizados mapeamentos por janelas de observação nas bancadas recém-escavadas. Com base nesses mapeamentos, eram identificadas as tipologias de comportamento potencial, considerando a classe do material e a cinemática estrutural.

Uma vez definidas essas tipologias, eram conduzidas análises de estabilidade específicas para cada janela, com o objetivo de determinar os tipos e parâmetros de tratamento mais adequados. Esse processo permitiu a consolidação da sistematização dos tratamentos, que passou a servir como instrução técnica para o acompanhamento da obra.

Tabela 2: Sistematização dos tratamentos típicos.<sup>1</sup>

| Tratamentos Típicos - Taludes de Escavação                                                                                    |                                                 |                                                            |                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Classe de referência                                                                                                          | Direção da foliação em relação a face do talude | Mergulho da foliação em relação à inclinação do talude     | Tipologia de comportamento potencial                                                                            | Tipo de Tratamento                                                                                                                                                              |
| Solo superficial, solo residual, solo saprolítico, saprolito;<br>Rocha extremamente branda a muito branda inferior (R0 a R1-) | -                                               | -                                                          | Queda de massa superficial ou Ruptura circular                                                                  | Regularização da face do corte, preservação da largura da berma e da drenagem superficial, aplicação de solo grampeado                                                          |
| Rocha foliada muito branda (R1- a R1+)                                                                                        | Desfavorável (<20 graus)                        | Mergulho da foliação subparalelo à face do talude escavado | Formação de lascas e deslocamentos superficiais                                                                 | Tela (Q138) grampeada associada a Concreto Projetado (e ~ 8cm) em aplicação local                                                                                               |
| Rocha foliada muito branda inferior a branda (R1+ a R2-)                                                                      | Desfavorável (<20 graus)                        | Mergulho da foliação entre 30 e 55 graus                   | Escorregamento planar<br><br>Escorregamento "em concha"<br>(no caso de presença de dobras métricas na foliação) | Tela (Q138) grampeada associada a Concreto Projetado (e ~ 8cm) (Ver Nota 3 e Nota 7); Profundidade e espaçamento / distribuição dos chumbadores em função de análise específica |
| Rocha foliada pouco resistente a resistente (R2+ a R4)                                                                        | Desfavorável (<20 graus)                        | Mergulho da foliação variando entre 30 e 55 graus          | Escorregamento planar;<br>Queda de blocos métricos a decimétricos                                               | Tela metálica alta resistência (TIPO STEELLGRID ou similar) com grampo ou chumbador, Profundidade dos grampos/chumbadores em função de análise específica                       |
|                                                                                                                               | Desfavorável (<10 - 20 graus)                   | Mergulho da foliação variando entre 60 e 90 graus          | Tombamento;<br>Queda de blocos métricos a decimétricos                                                          | Tela metálica alta resistência (TIPO STEELLGRID ou similar) com grampo ou chumbador, Profundidade dos grampos/chumbadores em função de análise específica                       |
|                                                                                                                               | Desfavorável (< 35 graus)                       | Mergulho da foliação para fora do talude                   | Queda de blocos métricos;<br>Rupturas em cunha de dimensões métricas (presença de fraturas laterais)            | Chumbadores localizados                                                                                                                                                         |

<sup>1</sup> No estudo de caso, as classes detectadas na porção acima da berma de estabilização são: saprolito R0 e rocha foliada R2+ a R4.

Vale ressaltar, no entanto, que esta tabela foi elaborada para um contexto geológico e geotécnico específico do referido talude e não deve ser utilizada indiscriminadamente, sem o auxílio de outras análises específicas.

Para o presente trabalho, análises cinemáticas foram realizadas com o software Dips v. 8.026, para subsidiar os critérios de entrada na tabela de tratamentos típicos e as análises de estabilidade subsequentes.

Para as litologias de resistência R0 a R1-, foram realizadas análises de estabilidade pelo método de equilíbrio limite, considerando rupturas circulares. Como os fatores de segurança foram considerados como aceitáveis sem o incremento de tratamentos, segundo a Norma ABNT NBR 11682 (2009), a solução de solo grampeado foi sugerida com objetivo principal de estabelecer o controle erosivo do local e evitar pequenas rupturas de face.

Já para as litologias de resistência R2+ ou superior, análises de estabilidade foram conduzidas com auxílio do software RocSlope 2D v. 1.001, segundo critério de Barton-Bandis (Barton & Bandis, 1978). Segundo este critério, a resistência ao cisalhamento ( $\tau$ ) de juntas e fraturas é dado pela equação 1:

$$\tau = \sigma_n \tan (\phi_b + JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right)) \quad (1)$$

Em que:

$\tau$  → Resistência ao cisalhamento (MPa);

$\sigma_n$  → Tensão normal (MPa);

$\phi_b$  → Ângulo de atrito básico (°);

JRC → Coeficiente de Rugosidade da descontinuidade (adimensional); e

JCS → Resistência à compressão da descontinuidade (MPa).

Barton & Choubey (1977) propõem métodos empíricos e correlações para obtenção dos parâmetros de entrada ( $\phi_b$ , JRC e JCS). O JCS, por exemplo, pode ser estimado aplicando-se um fator de redução ( $\alpha$ ) à resistência da rocha intacta. Para juntas ligeiramente alteradas, como as observadas em campo, os autores sugerem fator de redução igual a 0,75. Na região do empreendimento estudado, ocorrem itabiritos classe III (RMR - Bieniawski, 1989) com resistência a compressão uniaxial (UCS) variando entre 70 e 110 MPa, obtida através de ensaios uniaxiais e triaxiais. Portanto, considerando o menor valor de UCS e aplicando o fator de redução (0,75), JCS é aproximadamente igual a 50 MPa.

O ângulo de atrito básico ( $\phi_b$ ) das descontinuidades foi determinado com base em ensaios de cisalhamento direto em itabiritos na área do empreendimento, resultando em um valor de 30°.

Já o coeficiente de rugosidade foi estimado com base na correlação da classificação visual das descontinuidades, realizada no mapeamento geomecânico de campo, com o perfil de comparação proposto por Barton & Choubey (1977), obtendo-se o valor JRC igual a 8.

Os dados estruturais utilizados nestas análises foram os mesmos utilizados nas análises cinemáticas.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. ANÁLISES CINEMÁTICAS

Os estudos de análises cinemáticas foram realizados com o objetivo de identificar a potencialidade das estruturas planares, presentes nos litotipos rochosos, promoverem rupturas nas faces dos taludes estudados. Para isso foram consideradas 91 medidas de estruturais entre planos

de foliação (Sn) e fraturas (FR), adquiridas durante o mapeamento geomecânico local. A Tabela 3 apresenta o resumo dos resultados obtidos para os taludes rochosos de itabirito e quartzito.

Tabela 3: Quadro resumo dos resultados da análise cinemática

| Plano do Talude |     |          | Litotipo             | $\Phi$  | Limite lateral | Descontinuidade | Cinemática |                 |            |       |
|-----------------|-----|----------|----------------------|---------|----------------|-----------------|------------|-----------------|------------|-------|
| Nom e           | Dip | Dip Dir. |                      | (graus) |                |                 | Planar     | Descontinuidade | Tombamento | Cunha |
| T4              | 50  | 180      | Itabirito compacto   | 30      | 30             | Sn              | 13.85%     | Sn/FR           | 6.59%      | 9.12% |
| T5              | 34  | 98       | Quartzito/ita birito |         |                |                 | 7.69%      |                 | 1.10%      | 3.37% |

Os resultados indicaram maior propensão à ocorrência de rupturas planares condicionadas pela foliação, tendo em vista que aproximadamente 14% das descontinuidades medidas são indicativas deste tipo de ruptura, enquanto 9% indicam ruptura em cunha e aproximadamente 7%, ruptura por tombamento flexural. A Figura 3 representa o estereograma típico das análises cinemáticas realizadas para ruptura planar.

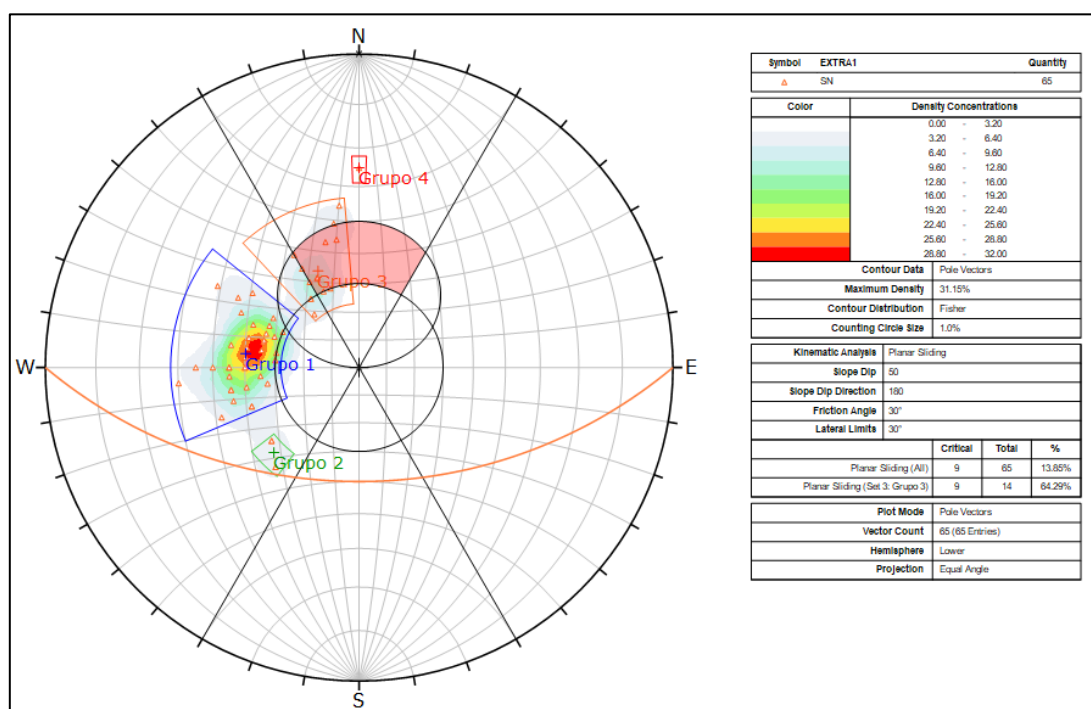


Figura 3: Estereograma típico das análises cinemáticas realizadas para ruptura planar.

### 3.2. ANÁLISE DE ESTABILIDADE

Após a determinação dos modos de ruptura dos estudos cinemáticos, foram conduzidas análises de estabilidade para avaliar os fatores de segurança das possíveis rupturas condicionadas por descontinuidades em rochas compactas, e para o dimensionamento e determinação dos parâmetros dos elementos de ancoragem, quando necessários.

Na Figura 4 abaixo, observa-se o resultado gerado com auxílio do software RocSlope 2D para ruptura planar, em que se obteve um Fator de Segurança (FS) igual a 1.979. Este foi o menor fator de segurança natural, obtido com os parâmetros de campo, conforme discutido anteriormente.

Então, foram realizadas simulações hipotéticas para cenários críticos que porventura possam ocorrer após a remoção do material superficial para tratamento dos taludes da cava. Estas

simulações têm como objetivo, determinar os parâmetros mais adequados de elementos de ancoragem referentes ao tratamento proposto. Para essas análises, os parâmetros de entrada das descontinuidades ( $\phi_b$ , JRC e JCS) foram reduzidos para se chegar ao fator de segurança crítico (FS = 0.945), para um bloco de aproximadamente 3 m de espessura, conforme ilustrado na Figura 5. Este bloco foi considerado como um bloco típico, devido ao espaçamento e persistência das descontinuidades observadas em campo.

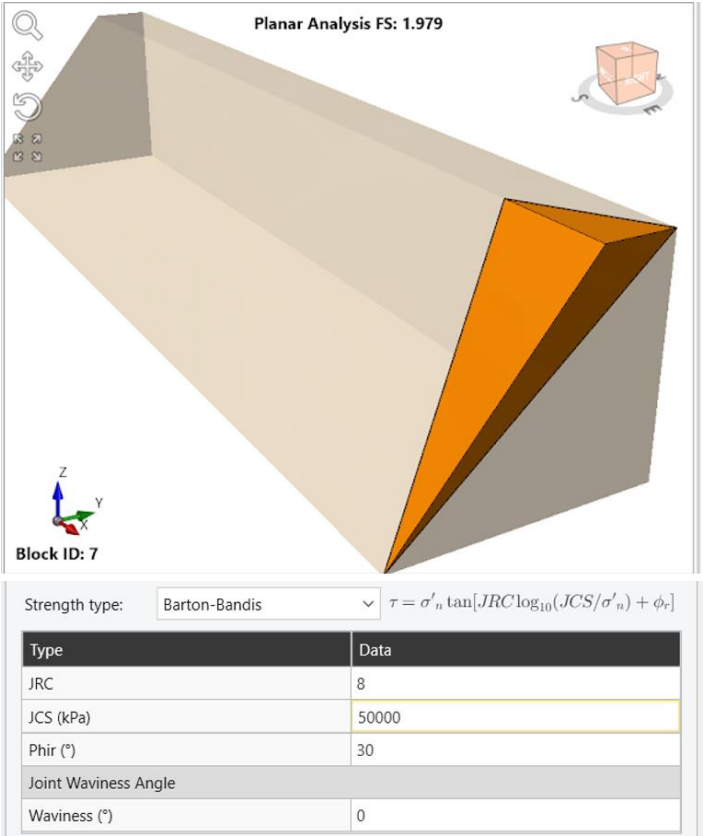


Figura 4: Resultado das análises no RocSlope 2D: menor fator de segurança obtido com os parâmetros de campo

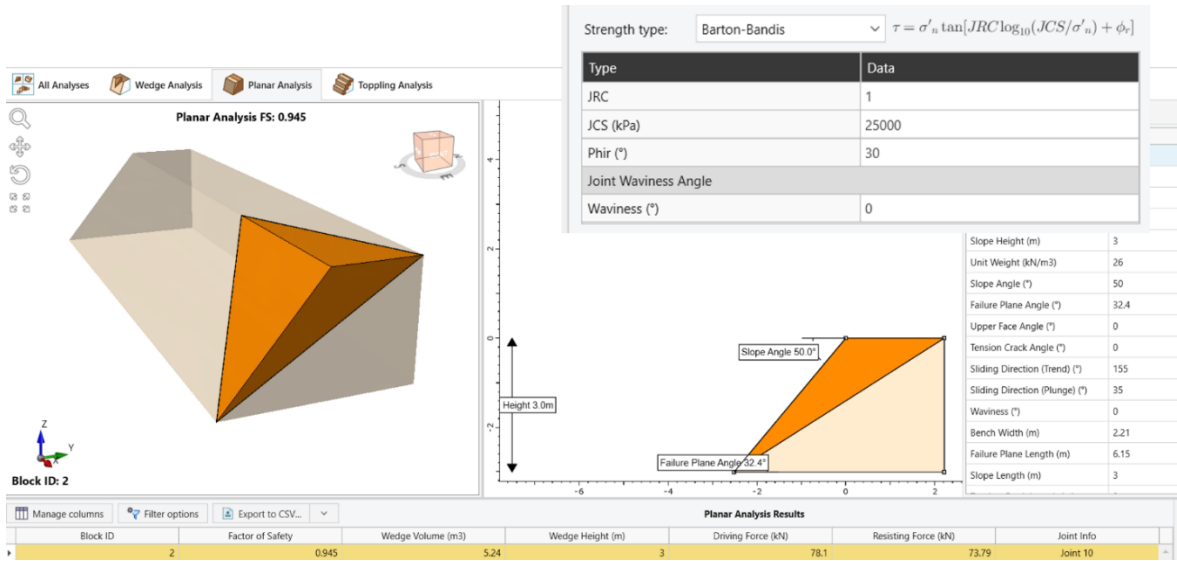


Figura 5: Resultado da análise hipotética: FS crítico.

Finalmente, foi inserido um único elemento de ancoragem passivo com 2,5 m de comprimento e capacidade de carga igual a 50 kN (aproximadamente 5 toneladas), obtendo-se então um fator de segurança igual a 1.417, conforme ilustrado na Figura 6.

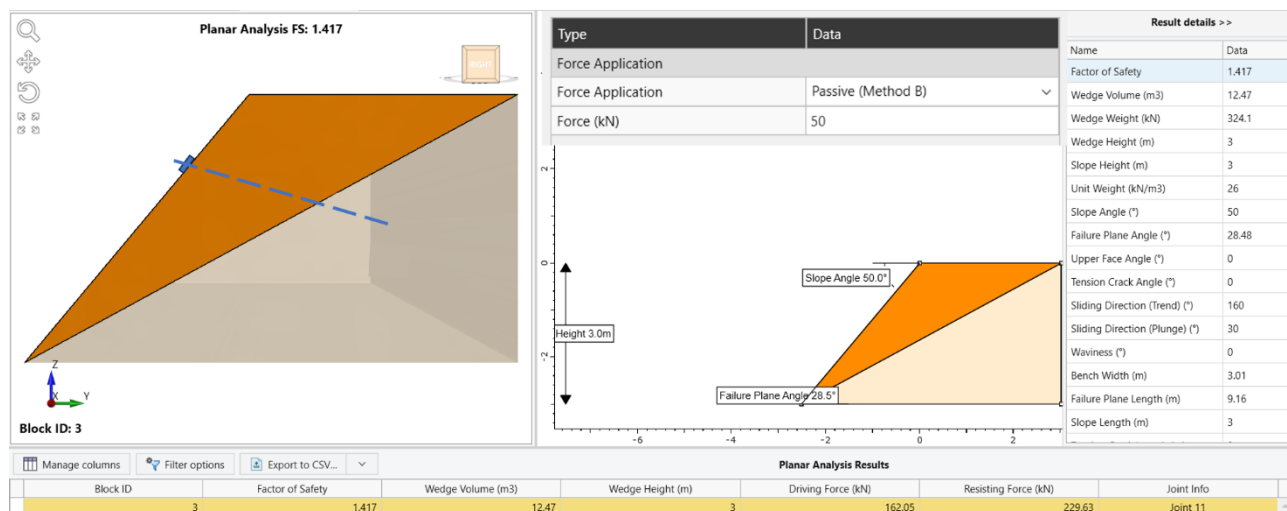


Figura 6: Fator de segurança obtido com a adição de um chumbador isolado.

Além das análises determinísticas previamente descritas, foram conduzidas análises de sensibilidade univariadas, nas quais apenas um parâmetro foi variado por vez, dentro do intervalo de valores considerados nas análises anteriores — tanto na análise base (Figura 4) quanto na análise hipotética (Figura 5).

Por exemplo, na análise de sensibilidade do JRC, os parâmetros JCS e  $\phi_\beta$  foram mantidos constantes em 25 MPa e 30°, respectivamente, enquanto o JRC variou de 1 a 8. Para as análises dos demais parâmetros, o JRC foi fixado em 1, e variaram-se individualmente o JCS entre 25 MPa e 50 MPa, e o ângulo de atrito básico ( $\phi_\beta$ ), entre 27° e 33°. Com isso, constatou-se que o JRC é o parâmetro mais sensível para as análises, em que se obteve fatores de segurança variando de 0.945 a 1.995.

A partir desse ponto, foram realizadas análises de probabilidade de ruptura utilizando o método de amostragem Latin Hypercube, com 10.000 iterações, no software RocSlope 2D. Nessas simulações, apenas o JRC foi considerado como variável, com valores variando entre 1 e 8, enquanto os demais parâmetros foram mantidos constantes nos respectivos valores médios, conforme ilustrado na Figura 7.

Como resultado, obteve-se uma Probabilidade de Falha (PoF) de aproximadamente 10% para casos com fator de segurança inferior a 1.0. De acordo com Wesseloo e Read (2009), esse valor representa o limite inferior recomendado para taludes temporários, nos quais os impactos associados a uma possível ruptura são considerados de baixa consequência.

Quando um chumbador isolado foi introduzido no modelo, conforme descrito anteriormente, as análises probabilísticas indicaram uma redução da PoF para próximo de 0%, resultado compatível com as boas práticas internacionais aplicadas a taludes permanentes (Figura 8).

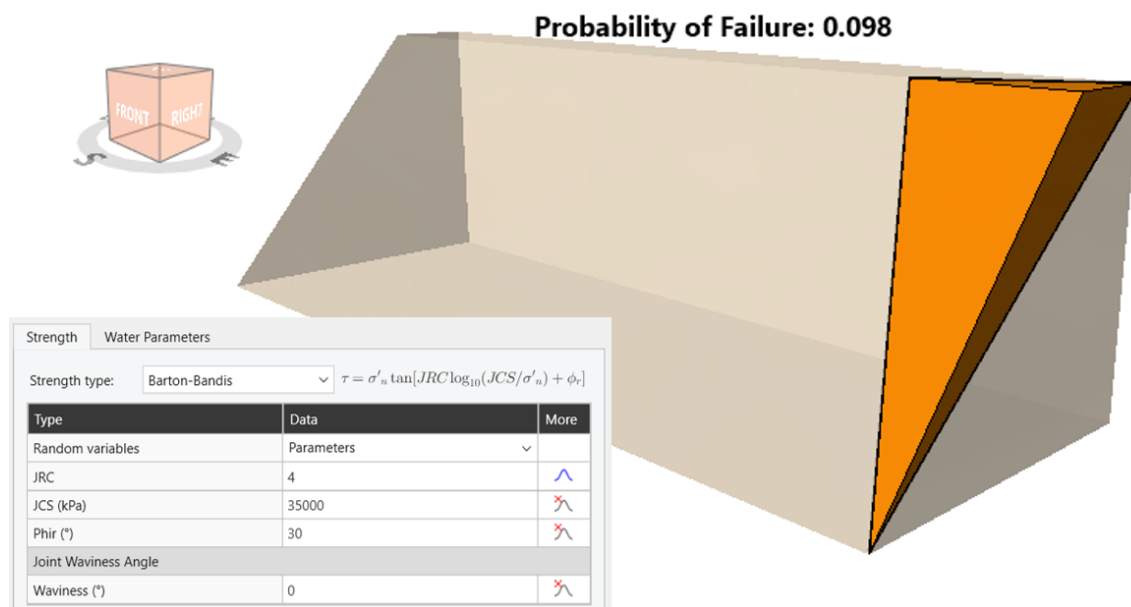


Figura 7: Resultado da análise de probabilidade de falha.

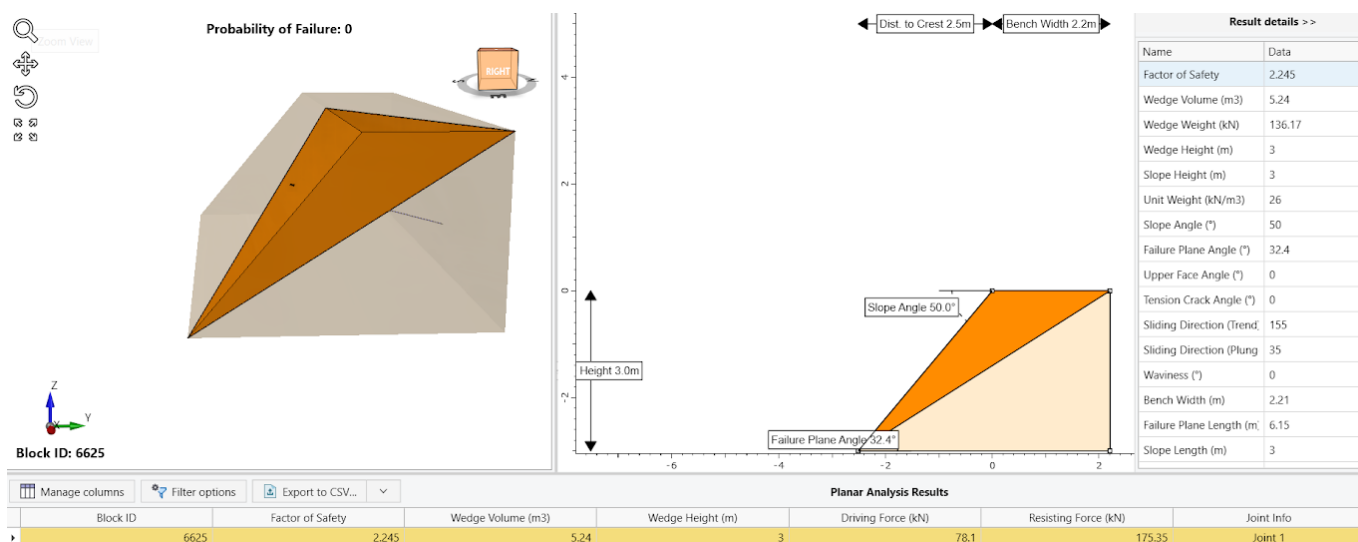


Figura 7: Probabilidade de falha com um chumbador isolado.

## DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido revela a importância da sistematização de tratamentos para auxílio de tomadas de decisão rápidas e assertivas em campo, em projetos de mineração e grandes obras.

As análises de estabilidade para maciços rochosos também se revelaram muito eficazes para determinação de intervenções de engenharia e definição dos elementos de ancoragem. As simulações hipotéticas apontam que, caso ocorra uma região com rochas ou descontinuidades um pouco mais alteradas, de resistência R3 (UCS = 25 MPa) e descontinuidades lisas (JRC = 1), em situação favorável a ruptura planar ou cunha, haverá instabilidade do material.

Além disso, as análises revelaram, que, com a adição de um elemento de ancoragem passivo isolado, de 2,5 m de comprimento e capacidade de carga igual a 50 kN, o bloco pode ser estabilizado, chegando a um FS de 1.4 e probabilidade de falha menor que 1%. Estes resultados corroboram com a sistematização de tratamentos típicos da região, desenvolvida pela BVP que indicam o tratamento com chumbadores localizados para maciços de resistência R2+ a R4, com tipologia de comportamento potencial de queda de blocos, e rupturas em cunha de dimensões métricas (presença de fraturas laterais condicionando a formação de blocos rochosos).

Vale ressaltar, no entanto, que este tipo de sistematização deve ser considerado como um arquivo vivo, constantemente atualizado com o surgimento de novas evidências de campo e análises específicas em função das condições geológicas e geotécnicas de cada projeto. Além disso, deve ser sempre apoiado por levantamentos de campo rigorosos e estudos detalhados específicos para cada objetivo e situação.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. G.; Estratigrafia e geologia estrutural da porção central do sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais. Dissertação de mestrado, Ouro Preto, Departamento de Geologia, Escola de Minas – UFOP, 109 p., 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682: estabilidade de encostas. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

BARTON, N.; BANDIS, S. Effects of block size on the shear behavior of jointed rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, v. 15, n. 4, p. 105-109, 1978.

BARTON, N.; CHOUBEY, V. The shear strength of rockfill. *Géotechnique*, v. 27, n. 4, p. 343-363, 1977.

BIENIAWSKI, Z. T. *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. New York: Wiley, 1989.

BVP. Modelo Geomecânico da Porção Oeste da Cava Norte da Mina de Fábrica Nova – Complexo Mariana, Mariana-MG. VL119.15-10-E-CA-RT-07-003, setembro, Vale. 2012.

ENDO, I.; et al. Estratigrafia e Arcabouço Estrutural do Quadrilátero Ferrífero: Nota Explicativa do Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000. Ouro Preto, Departamento de Geologia, Escola de Minas – UFOP, 2019.

FRANCA, P.; COSTA, T.; STACEY, P. Soft iron ores and other leached rocks. In: MARTIN, D.; STACEY, P. (Ed.). *Guidelines for open pit slope design in weak rocks*. CSIRO Publishing, 2018. Cap. 10, p. 269–308.

ISRM. Rock Characterization, Testing and Monitoring – ISRM suggested methods. Oxford: Pergamon. Brown E. T. (ed.). 1981.

WESSELOO, J.; READ, J. Acceptance Criteria. In: READ, J.; STACEY, P. (ed.). *Guidelines for open pit slope design*. Perth: CSIRO Publishing, 2009. Cap. 9, p. 221–236.