

## MODELO 3D DE SUSCETIBILIDADE DE RISCO GEOTÉCNICO

André Leite de Oliveira <sup>1</sup>; Rodrigo Aquino Lopes<sup>2</sup>; Meyrielle Ribeiro<sup>3</sup>; Luiz Eduardo Souza<sup>4</sup>;  
Henrique Brandão Silva<sup>5</sup>

**Resumo** – A susceptibilidade geotécnica refere-se à tendência ou predisposição para a ocorrência de eventos geotécnicos, como rupturas e instabilidades, influenciada por fatores físicos, mecânicos e de projeto. A integração desses fatores é essencial para a compreensão da susceptibilidade e a definição de estratégias eficazes em empreendimentos minerais. Este trabalho apresenta uma metodologia experimental baseada em análise multivariada para a construção de um modelo 3D de susceptibilidade ao risco. O modelo considera cinco variáveis principais: litologia, geomecânica, cinemática, estabilidade e padrão construtivo. Para cada variável, foram desenvolvidos modelos tridimensionais categóricos, posteriormente integrados em um único modelo de blocos, permitindo quantificar a parcela de contribuição de cada variável para a susceptibilidade geotécnica do local. Esta metodologia foi aplicada e testada em um estudo de caso, envolvendo duas cavas de mineração a céu aberto, na região norte do estado de Minas Gerais.

**Abstract** – Geotechnical susceptibility refers to the tendency or predisposition for the occurrence of geotechnical events, such as failures and instabilities, influenced by physical, mechanical, and design factors. Integrating these factors is essential for understanding susceptibility and defining effective strategies in mining projects. This study presents an experimental methodology based on multivariate analysis for constructing a 3D risk susceptibility model. The model considers five main variables: lithology, geomechanics, kinematics, stability, and construction pattern. For each variable, categorical three-dimensional models were developed and later integrated into a single block model, allowing the quantification of each variable's contribution to the site's geotechnical susceptibility. This methodology was applied and tested in a case study involving two open-pit mines in the northern region of Minas Gerais state, Brazil.

**Palavras-Chave** – Risco geotécnico; modelagem 3D; susceptibilidade

---

<sup>1</sup> Geól., BVP Engenharia e Hidrotecnia, Belo Horizonte - MG, (21) 971001180, andre.leite@bvp.eng.br

<sup>2</sup> Msc. Geól. Sigma Lithium, Araçuaí – MG, (31) 99966-2109, rodrigo.lopes@sigmalithium.com.br

<sup>3</sup> Msc. Geól. Universidade Federal dos Vales Jequitinhonha e Mucuri, (38) 99112-6739, meyrielle.ribeiro@ufvjm.edu.br

<sup>4</sup> Geól. Sigma Lithium, Araçuaí – MG, (31) 99146-1541, luiz.souza@sigmalithium.com.br

<sup>5</sup> Eng. Sigma Lithium, Araçuaí – MG, (31) 98987-9304, henrique.silva@sigmalithium.com.br

# 1. INTRODUÇÃO

Na mineração, a perda pode estar associada à ruptura de um talude, tornando necessário considerar a adoção de uma inclinação mais suave, uma medida que, embora reduza o risco, acarreta custos adicionais de escavação. As análises de risco são essenciais para a comparação de diferentes alternativas, definição de prioridades e o suporte a decisões.

O risco geotécnico é definido como a relação entre a probabilidade de ocorrência de um evento geotécnico (susceptibilidade) e suas consequências (Fell et al., 2008). Na mineração, a compreensão dos fatores que influenciam a susceptibilidade às rupturas é fundamental para a segurança das operações (Ferreira Filho, 2022). Dessa forma, a implementação de modelos preditivos auxilia na prevenção de incidentes e na otimização da gestão de riscos.

# 2. OBJETIVO

Este trabalho propõe uma metodologia experimental baseada em análise multivariada para a elaboração de um modelo tridimensional de susceptibilidade ao risco geotécnico. O objetivo é identificar e mapear os pontos críticos que exigem maior atenção para o aprimorar o sequenciamento e operacionalidade da lavra. A metodologia foi aplicada em um estudo de caso real, abrangendo duas cavas de mineração a céu aberto (cavas A e B).

# 3. METODOLOGIA

Na metodologia aplicada considera-se cinco variáveis principais, sendo elas: geomecânica, litologia, geologia estrutural (cinemática), fator de segurança e padrão construtivo. Esta última está relacionada ao acabamento de taludes e à geometria das cavas. Cada variável tem um modelo atribuído, conforme demonstrado na Tabela **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento.1**.

Para cada agrupamento categórico de dados nos modelos 3D, foram atribuídos pesos associados à susceptibilidade geotécnica de cada categoria, seguindo uma abordagem semelhante à proposta por Sala et al. (2017), em ambiente 2D. Os pesos representam o grau de propensão à ruptura, sendo que valores mais altos indicam maior susceptibilidade do material à instabilidade.

Tabela **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento.1**: Variáveis e produtos utilizados na construção do modelo geotécnico.

| VARIÁVEL               | PRODUTO                            |
|------------------------|------------------------------------|
| Litologia              | Modelo litológico                  |
| Geomecânica            | Modelo geomecânico RMR             |
| Geologia estrutural    | Modelo cinemático                  |
| Fator de segurança     | Modelo de FS por equilíbrio limite |
| Condições operacionais | Modelo de padrão construtivo       |

Os modelos foram gerados com auxílio do software Leapfrog Geo v. 2024.1.1, e posteriormente integrados em um único modelo de blocos, no qual foi atribuída a parcela de contribuição de cada variável para a composição final do modelo de susceptibilidade ao risco geotécnico. Toda a formulação de cálculo foi efetuada com auxílio da ferramenta *calculation*, no mesmo software.

# 4. RESULTADOS

## 4.1. MODELO LITOLÓGICO

O modelo litológico foi construído a partir da descrição de 174 furos de sondagem rotativa, que totalizam 21.655 m de sondagem, além de 305 pontos de mapeamento. Os litotipos da área de estudo podem ser divididos em sete grupos principais: solo residual (SOL), saprólito (SAP), cordieirita biotita xisto (SCHCR), rochas calcissilicáticas (SCHCS) e duas intrusões ígneas tabulares (IG1 e IG2). O saprólito foi definido conforme Norma ABGE 109/2024: material derivado da alteração in situ da rocha matriz, preservando aspectos texturais e estruturais.

As atribuições de pesos para cada litotipo foram ponderadas considerando características mecânicas das rochas, como por exemplo a resistência a compressão uniaxial (UCS) de pico (Tabela 2). A Figura 1 representa o resultado final do modelo litológico para uma das cavas.

Tabela 2: Relação de pesos atribuídos às litologias e a resistência a compressão uniaxial (UCS).

| Litologia |       | Peso | UCS (Mpa) |
|-----------|-------|------|-----------|
|           | SOL   | 4    | -         |
|           | SAP   |      | -         |
|           | SCHCR | 3    | 60        |
|           | SCHMI | 2    | 120       |
|           | SCHCS | 1    | 160       |
|           | IG1   |      | > 160     |
|           | IG2   |      | > 160     |

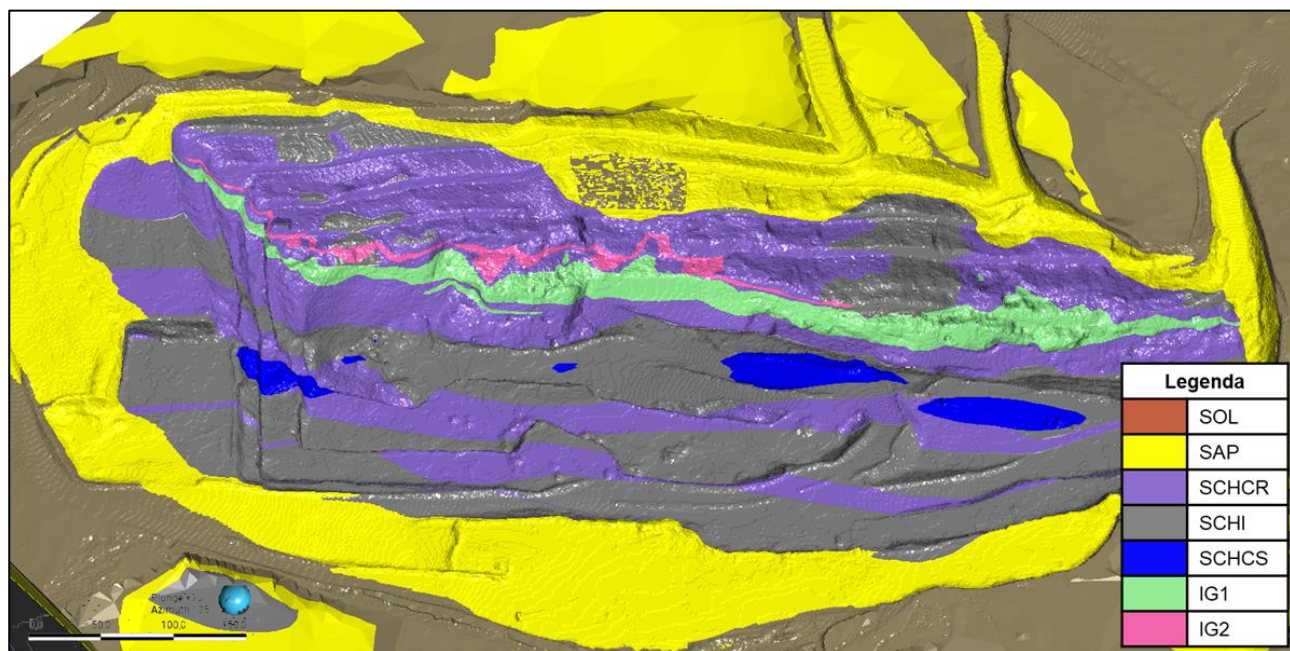


Figura 1: Modelo litológico 3D da cava A.

## 4.2. MODELO GEOMECÂNICO

O modelo geomecânico foi construído a partir de cinco classes qualitativas do maciço rochoso definida por Bieniawski (1989), aplicada em todas as litologias mapeadas, com exceção do solo residual, em que não se aplica tal classificação de rocha. A base de dados do modelo foi composta por 100 furos, totalizando 15.848 m de sondagem, e 305 pontos de mapeamento. Nota de 1 a 5 foram atribuídas para cada classe, conforme demonstrado na Tabela 3. A Figura 2 representa o resultado do modelo geomecânico da cava A.

Tabela 3: Tabela de pesos atribuídos às classes geomecânicas.

| Classe RMR | Peso |
|------------|------|
| V          | 5    |
| IV         | 4    |
| III        | 3    |
| II         | 2    |
| I          | 1    |

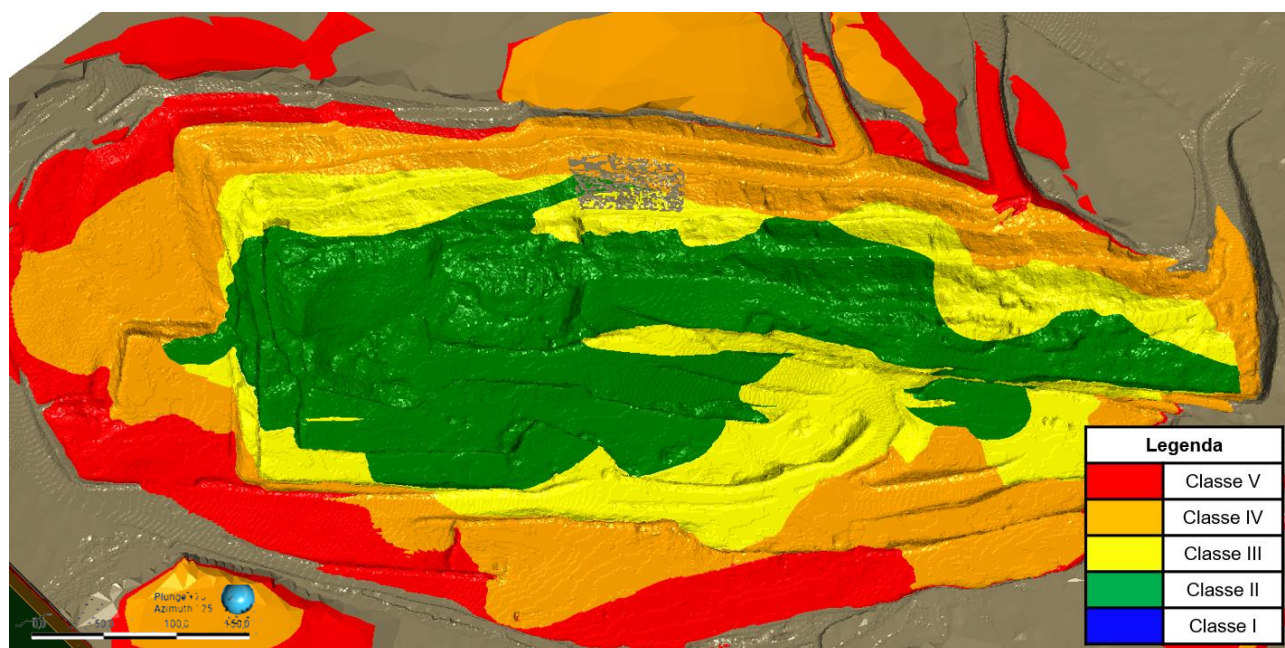


Figura 2: Modelo geomecânico 3D da cava A.

### 4.3. MODELO CINEMÁTICO

O modelo cinemático consiste em um modelo de setorização da cava. As análises foram realizadas com auxílio do software Dips v. 6.017, a partir de 1055 medidas estruturais obtidas em mapeamento geomecânico das duas cavas. As análises consideraram um ângulo de atrito interno médio de 50°, com base em ensaios laboratoriais.

A pontuação de entrada no modelo, foi baseada em percentis obtidos e no modo de ruptura dominante no setor (Tabela 4). O modo de ruptura circular/círculo-planar foi considerado para os litotipos friáveis (solo e saprólito), que possuem comportamento geomecânico comandado pelas parcelas de coesão e ângulo de atrito interno, com nenhuma ou pouca influência das discontinuidades. Este modo de ruptura foi considerado como a menor pontuação no modelo, devido a pequena espessura dos litotipos friáveis, que representam apenas rupturas de face ou de no máximo duas bancadas. A Figura 3 representa o modelo cinemático 3D da cava A.

Tabela 4: Tabela de pesos atribuídos aos setores cinemáticos das cavas.

| Cinemática |                         | Peso |
|------------|-------------------------|------|
|            | Planar 20-30%           | 4    |
|            | Tombamento 10-20%       | 3    |
|            | Cunha 10-20%            |      |
|            | Cunha 0-10%             | 2    |
|            | Circular/Plano circular | 1    |

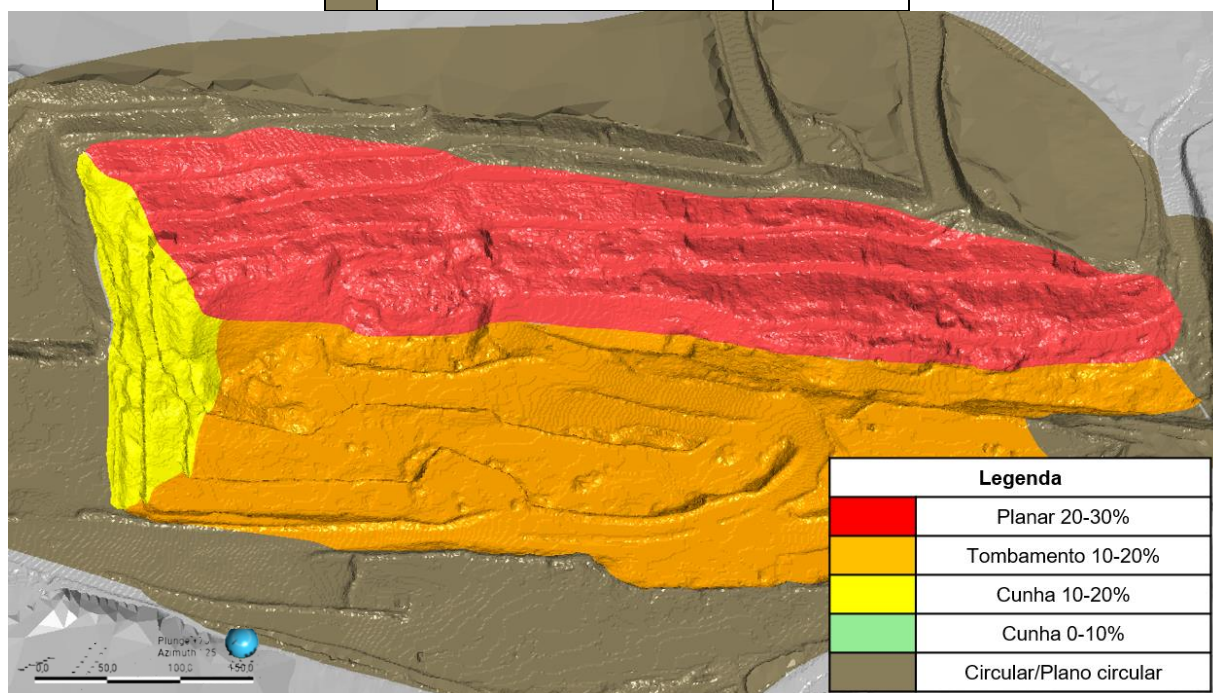


Figura 3: Modelo cinemático 3D da cava A

#### 4.4. MODELO DE FATOR DE SEGURANÇA

Para construção do modelo de Fator de Segurança (FS) e do modelo construtivo, 26 seções de referência (nomeadas de A a M) foram consideradas para as análises de estabilidade e para as inspeções de campo (Figura 4-A). As análises foram realizadas pelo método de equilíbrio limite com auxílio do software Slide 2 v. 9.031. Os critérios adotados neste trabalho foram baseados nos termos de resistência da rocha, sendo esse um modelo empírico de resistência ao cisalhamento de Hoek-Brown, e o modelo de Morh-Coloumb para solo e saprolito.

A Figura 4-B representa o exemplo de análise realizada para a Seção X. Os pesos para cálculo do modelo de susceptibilidade foram atribuídos a intervalos pré-definidos de Fator de Segurança. Quanto menor o FS, maior o peso (Tabela 5). Finalmente, faz-se a interpolação dos pontos analisados conforme ilustrado na Figura 5, que representa o resultado do modelo de FS da cava A.

Tabela 5: Tabela de pesos atribuídos ao Fator de Segurança (FS)

| FS |           | Peso |
|----|-----------|------|
|    | < 1.1     | 4    |
|    | 1.1 – 1.3 | 3    |
|    | 1.3 – 1.5 | 2    |
|    | > 1.5     | 1    |

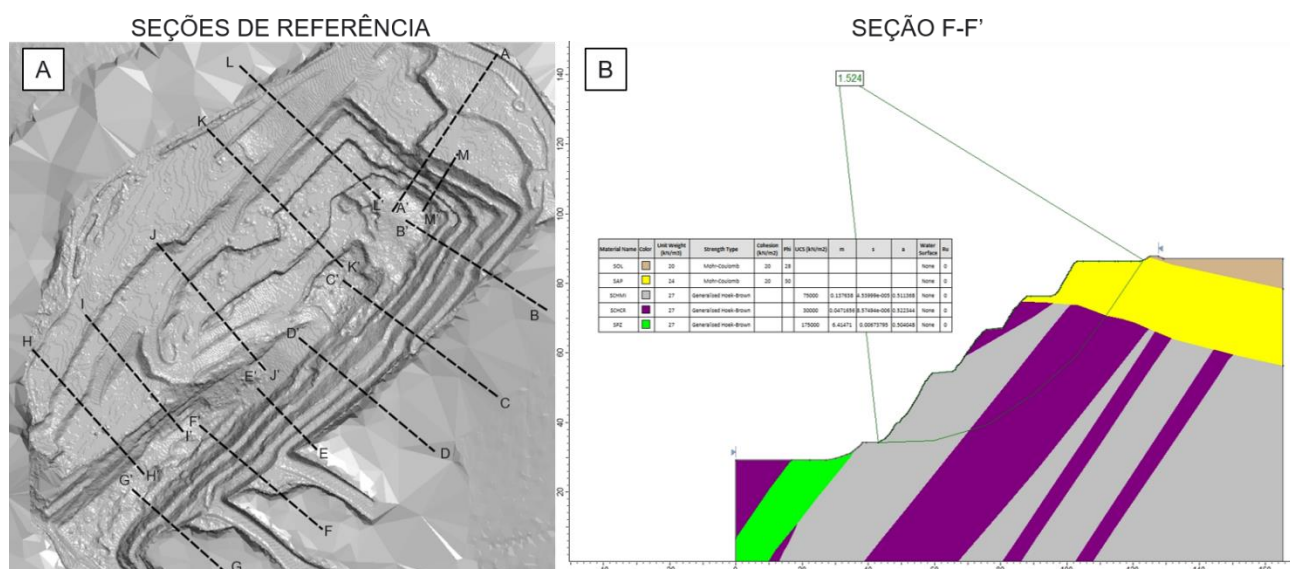


Figura 4: A - Seções de referência; B - Exemplo de análise de estabilidade realizadas para a seção F-F'.

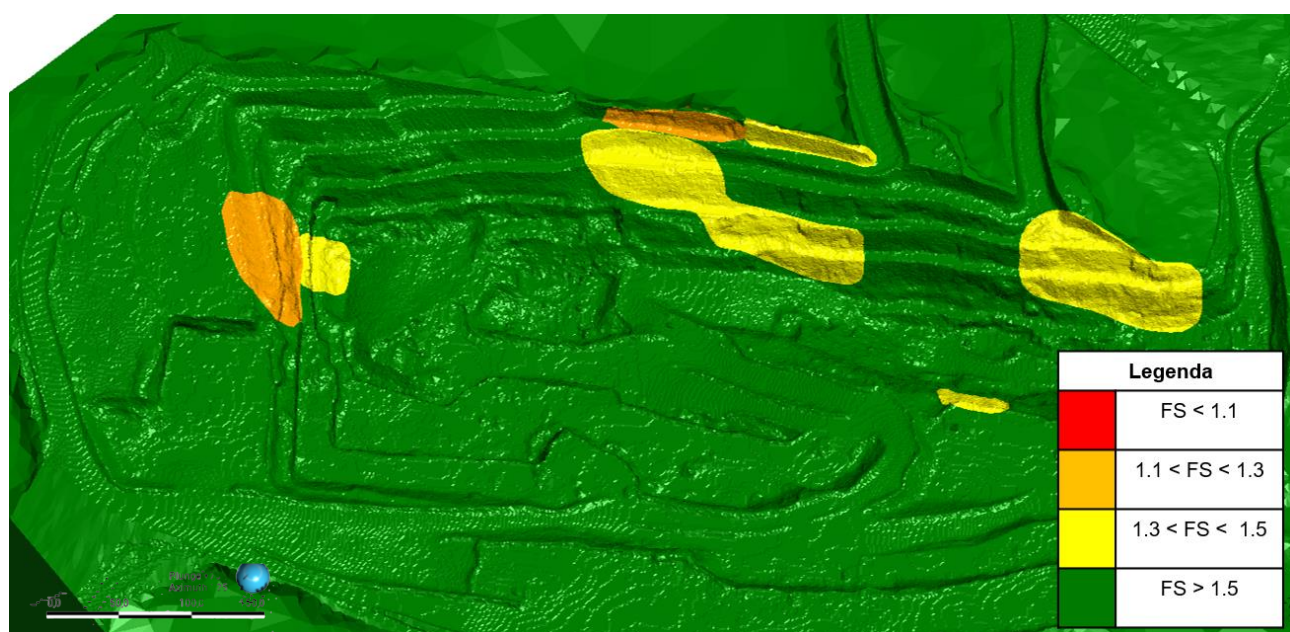


Figura 5: Modelo 3D de Fator de Segurança (FS).

#### 4.5. MODELO DE PADRÃO CONSTRUTIVO

O modelo de padrão construtivo foi elaborado através de mapeamento e inspeções geotécnicas de campo regulares, através de critérios geométricos, hidrogeológicos e estruturais de ambas as cavas (Tabela 6), o qual se distribui da seguinte maneira: A – Geometria do talude em relação ao projeto; B – Acabamento de face do talude; C – Condições de água (subterrânea e superficial); D – Presença de trincas, rupturas e/ou escombros. As inspeções foram realizadas por bancada, considerando as mesmas 26 seções de referência das análises de estabilidade.

As pontuações da ficha de inspeção foram agrupadas em cinco classes conforme demonstrado na Tabela 7, para atribuição de pesos no modelo de suscetibilidade. A Figura 6 representa o resultado do modelo de padrão construtivo elaborado, após a interpolação dos pontos analisados.

Tabela 6: Ficha de inspeção geotécnica utilizada no modelo de padrão construtivo.

| FICHA DE INSPEÇÃO |                     |                                                                                             |                                                                                                         |                                                                                                                             |                                                                                                                 |                                                                                        |
|-------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| A                 | Geometria do talude | Altura do banco                                                                             | Conforme ou menor que projeto                                                                           | Até 10% maior que projeto                                                                                                   | Entre 10 e 20% maior que o projeto                                                                              | Mais que 20% maior que projeto                                                         |
|                   |                     |                                                                                             | 10                                                                                                      | 5                                                                                                                           | 4                                                                                                               | 0                                                                                      |
|                   |                     | Berma                                                                                       | Conforme ou maior que projeto (6 m)                                                                     | Até 10% menor que projeto (>5.40 m)                                                                                         | Entre 10 e 20% menor que o projeto                                                                              | Mais que 20% menor que projeto                                                         |
|                   |                     |                                                                                             | 10                                                                                                      | 5                                                                                                                           | 4                                                                                                               | 0                                                                                      |
|                   |                     | Ângulo de face                                                                              | Conforme ou menor que projeto                                                                           | Até 10% maior que projeto                                                                                                   | Entre 10 e 20% maior que o projeto                                                                              | Mais que 20% maior que projeto                                                         |
|                   |                     |                                                                                             | 10                                                                                                      | 5                                                                                                                           | 4                                                                                                               | 0                                                                                      |
|                   |                     | Ângulo geral                                                                                | Conforme ou menor que projeto                                                                           | Até 10% maior que projeto                                                                                                   | Entre 10 e 20% maior que o projeto                                                                              | Mais que 20% maior que projeto                                                         |
|                   |                     |                                                                                             | 10                                                                                                      | 5                                                                                                                           | 3                                                                                                               | 0                                                                                      |
| B                 | Acabamento de face  | Blocos instáveis e mobilizáveis (>0.5m)                                                     | Nenhum bloco solto na face ou crista do talude                                                          | Poucos blocos soltos (1-3)                                                                                                  | Alguns blocos soltos (4-7)                                                                                      | Muitos blocos instáveis e mobilizáveis (> 7)                                           |
|                   |                     |                                                                                             | 13                                                                                                      | 8                                                                                                                           | 3                                                                                                               | 0                                                                                      |
|                   |                     | Irregularidades na face                                                                     | Superfície regular do talude                                                                            | Pequenas irregularidades e/ou erosões na face (até 1 m)                                                                     | Irregularidades e/ou erosões na face entre 1 e 4 m, sem pontos negativos ou repés                               | Irregularidades e/ou erosões maiores que 4 m, podendo ocorrer pontos negativos e repés |
|                   |                     |                                                                                             | 13                                                                                                      | 8                                                                                                                           | 3                                                                                                               | 0                                                                                      |
| C                 | Água                | Sem água subterrânea. Talude seco.                                                          | Baixo a moderado NA (tendência de cair o nível d'água, baixa recarga), pouca presença de surgência      | Elevado Nível d'água (condicionado por chuvas). NA com tendência de subir (recarga). Grande presença de umidade e surgência | Talude saturado (surgência) com pico em função de chuva. Fluxo de água perceptível                              |                                                                                        |
|                   |                     |                                                                                             | 8                                                                                                       | 4                                                                                                                           | 3                                                                                                               | 0                                                                                      |
|                   |                     | Greides longitudinal e transversal em perfeito estado de conservação, de acordo com projeto | Greide transversal irregular. Apresenta pontos de transbordo na crista. Necessita de pequenas correções | Greide longitudinal irregular. Apresenta regiões de acúmulo de água, podendo haver transbordo na crista                     | Sem greide transversal e longitudinal. Apresenta pontos de transbordo na crista e regiões de acúmulo de água    |                                                                                        |
|                   |                     |                                                                                             | 7                                                                                                       | 5                                                                                                                           | 3                                                                                                               | 0                                                                                      |
| D                 | Trincas e rupturas  | Talude íntegro, sem indícios de ruptura. Não apresenta trincas na face ou berma             | Pequenas trincas na face e/ou berma. Possível estufamento no pé nas regiões de material friável         | Trincas conectadas com abertura milimétrica. Talude danificado                                                              | Trincas abertas podendo haver deslocamento relativo e escombros de material rompido. Talude bastante danificado |                                                                                        |
|                   |                     |                                                                                             | 19                                                                                                      | 10                                                                                                                          | 4                                                                                                               | 0                                                                                      |

Tabela 7: Pesos atribuídos aos resultados da avaliação de padrão construtivo.

| Pontuação do padrão construtivo |         | Peso |
|---------------------------------|---------|------|
|                                 | 0 - 30  | 5    |
|                                 | 31 - 50 | 4    |
|                                 | 51- 70  | 3    |
|                                 | 71- 90  | 2    |
|                                 | 91-100  | 1    |

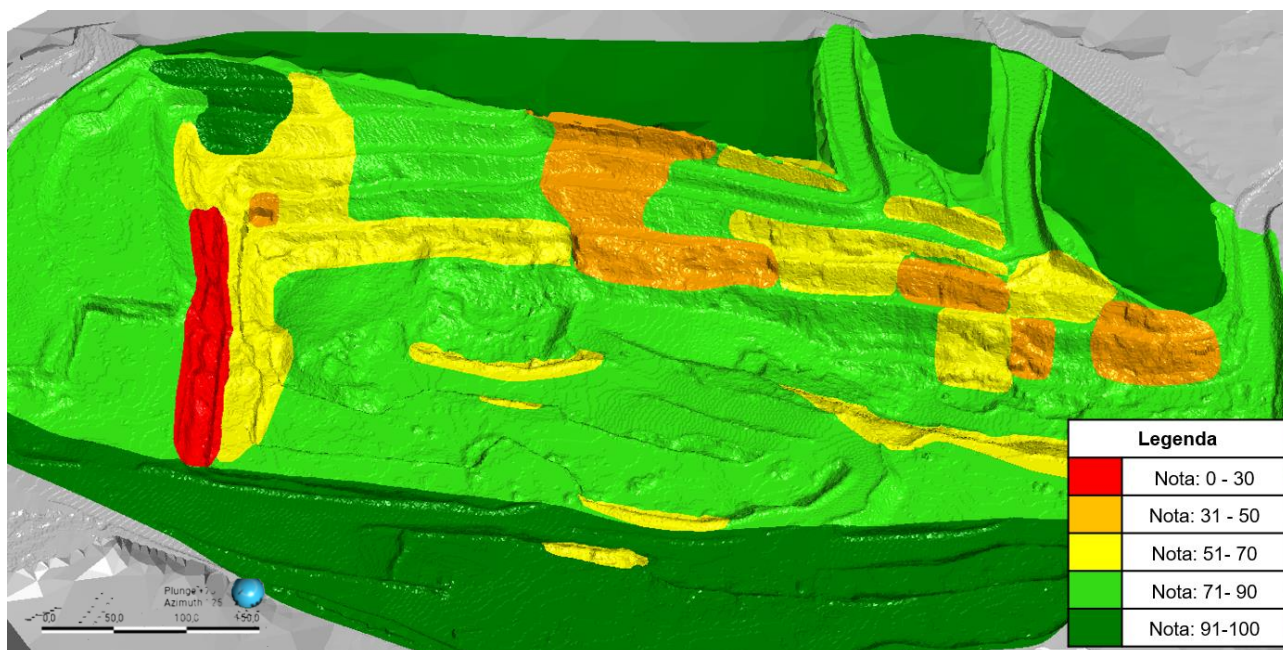


Figura 6: Modelo 3D de padrão construtivo.

## 5. DISCUSSÕES

Após a conclusão dos cinco modelos discutidos anteriormente, todas as variáveis foram consolidadas em um modelo de blocos com dimensões de 2,5 m x 2 m x 2 m, visando sintetizar os dados e gerar um modelo integrado. Para isso, além da atribuição de pesos aos agrupamentos categóricos de cada modelo, foi necessário determinar a contribuição desses modelos na avaliação da susceptibilidade à ruptura dos taludes da cava.

Analisou-se, então, o histórico de pequenas rupturas de face ocorridas, que apresentaram forte correlação com a litologia cordierita xisto (SCHCR), comumente condicionadas pela cinemática planar associada à foliação da rocha. Com base nessa análise, definiu-se a seguinte distribuição de pesos para a composição da nota final do modelo de susceptibilidade: 25% para o modelo litológico, 25% para o modelo cinemático, 20% para o Fator de Segurança, 15% para o modelo de padrão construtivo e 15% para o modelo geomecânico.

Com auxílio da ferramenta calculation do software Lepfrog Geo, foi realizado o cálculo para transformação dos modelos categóricos em variáveis numéricas, e a formulação da variável “nota final”, em blocos lógicos (“if”), conforme demonstrado na Figura 7. O resultado deste processo é a atribuição de um valor numérico de susceptibilidade geotécnica para cada bloco do modelo. Para esta distribuição de pesos proposta, o valor final variou de 1 a 4, onde 4 é o valor de maior susceptibilidade de risco, e 1 o menor. Então, realizou-se a clusterização dos dados, através do método de k-means, distinguindo-se cinco agrupamentos categorizados como regiões de risco baixo a muito alto, conforme demonstrado na Figura 8.

Metodologia semelhante foi testada em ambiente 2D com auxílio do software QGIS v. 3.28.3, utilizando mapas de superfície extraídos dos cinco modelos tridimensionais, e utilizando a mesma base de cálculo. O mapa final de suscetibilidade ao risco (Figura 9), gerado no QGIS, apresentou alta semelhança com o modelo tridimensional final, evidenciando a confiabilidade e reprodutibilidade da metodologia aplicada em ambiente 3D.

1 (x) litológico = if

- [Litho-refine] = 'SAP' or [Litho-refine] = 'SOL' → 4
- [Litho-refine] = 'SCHCR' → 3
- [Litho-refine] = 'SCHMI' → 2
- otherwise → 1

2 (x) geomecanico = if

- [RMR refine] = 'V' → 5
- [RMR refine] = 'IV' → 4
- [RMR refine] = 'III' → 3
- [RMR refine] = 'II' → 2
- otherwise → 1

3 (x) cinematico 2 = if

- [Cinematico] = 'planar 20-30% + qb' → 4
- [Cinematico] = 'cunha 10-20% + qb' or [Cinematico] = 'tombamento 10-20% + qb' → 3
- [Cinematico] = 'cunha 0-10% + qb' → 2
- otherwise → 1

4 (x) FS = if

- [Modelo FS] = 'FS < 1.1' → 4
- [Modelo FS] = 'FS 1.1 - 1.29' → 3
- [Modelo FS] = 'FS 1.3 - 1.5' → 2
- otherwise → 1

5 (x) construtivo BM = if

- [Construtivo] = 'Muito Ruim' → 5
- [Construtivo] = 'Ruim' → 4
- [Construtivo] = 'Moderado' → 3
- [Construtivo] = 'Bom' → 2
- otherwise → 1

(x) nota final = [Litologico]\*0.25+ [geomecanico]\*0.15+ [cinematico 2]\*0.25+ [FS]\*0.2+ [construtivo BM]\*0.15

Figura 7: Formulação do cálculo de susceptibilidade de risco através da ferramenta *calculation*.

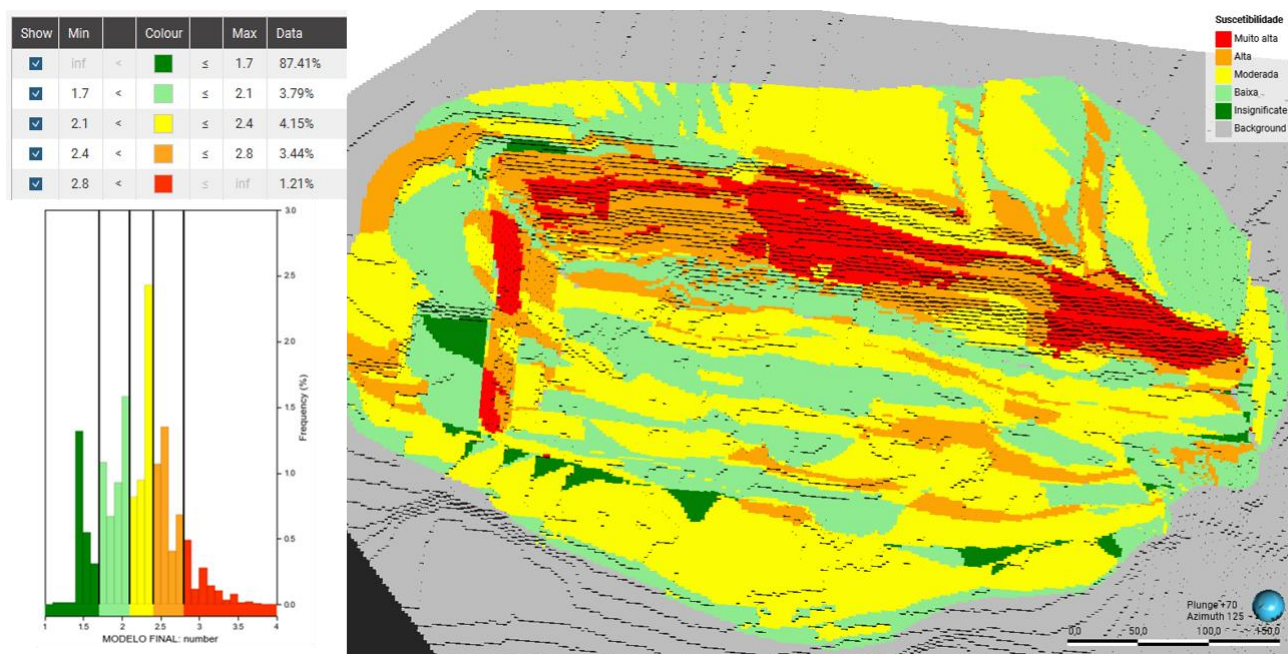


Figura 8: Modelo de blocos final de susceptibilidade ao risco geotécnico.

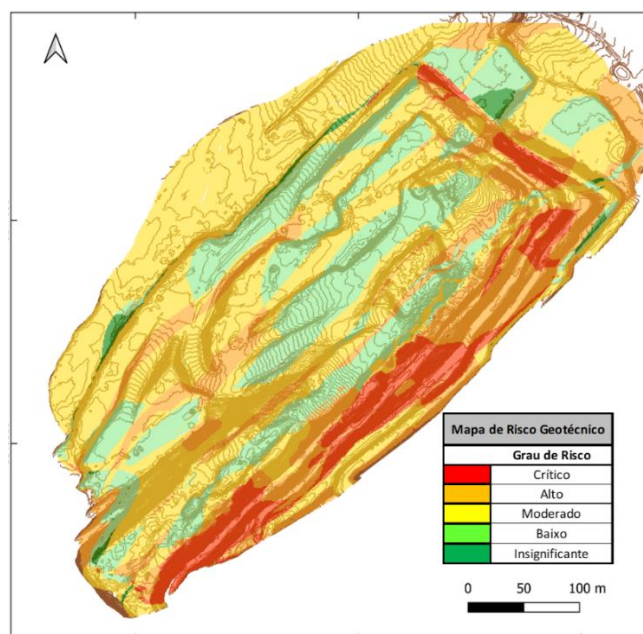


Figura 9: Mapa de susceptibilidade de risco elaborado no QGIS.

## 6. CONCLUSÕES

Este trabalho auxilia na gestão de riscos da indústria mineira, que ao longo dos anos tem-se preocupado cada vez mais com os danos correlacionados a infraestrutura de mina, bem como prejuízos e perdas de vidas decorrentes de deslizamentos, queda de blocos, explosões de rochas dentre outros fatores operacionais que possam contribuir direta e indiretamente com a segurança das operações. A metodologia aqui proposta, se mostrou interessante como ferramenta a integração de dados e variáveis geotécnicas úteis para auxílio a tomadas de decisão no dia a dia operacional das cavas estudadas.

O estabelecimento de um procedimento geotécnico através da integração de dados multivariados estabelece, ao longo da vida de uma mina, vantagens com abordagens determinísticas e nos fornece probabilidades e consequências quanto aos riscos de rupturas em várias escalas, proporcionando assim uma melhor gestão das atividades e autonomia/responsabilidade para definir níveis aceitáveis de segurança de risco econômico por etapas, além da possibilidade de reavaliar configurações pré-existentes no desenvolvimento de planos geotécnicos. Além disso, a modelagem tridimensional pode se tornar uma alternativa prática para mapeamentos de risco, normalmente trabalhados em ambiente 2D com softwares GIS. Modelos 3D podem auxiliar estratégias, aumentando a previsibilidade dos dados em profundidade.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL (ABGE). Norma ABGE 109/2024 – Descrição e classificação de sondagens. São Paulo: ABGE, 2024.
- BIENIAWSKI, Z. T. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons, 1989.
- FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; CASCINI, L.; LEROI, E.; SAVAGE, W.Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. Engineering Geology, n. 102, v. 3-4, 2008.
- FERREIRA FILHO, F. A. Nova metodologia para análise de suscetibilidade a ruptura de taludes rochosos de mineração. Teses UFOP, 2022.
- SALA, L. A.; MELO, M. P.; SIMÕES, L. P.; DAMAN, D.; ARAÚJO, W.; MEIRELES, H. Metodologia para elaboração de mapa de risco geotécnico da mina Casa de Pedra. Geomin, 2017.