



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

*Northeast Geosciences Journal*

v. 12, nº 1 (2026)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2026v12n1ID38280>



## Modelagem implícita e geoestatística aplicadas à construção de um modelo geotécnico para uma mina a céu aberto no Brasil

### *Implicit modelling and geostatistics applied to construction of geotechnical model for a Brazilian open-pit mine*

Leonardo Alberto Sala<sup>1</sup>; José Matheus Vieira Matos<sup>2</sup>; Tatiana Barreto dos Santos<sup>3</sup>;  
Allan Erlichman Medeiros Santos<sup>4</sup>

- <sup>1</sup> Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia de Minas, Ouro Preto/MG, Brasil. Email: leonardo.sala@aluno.ufop.edu.br  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6052-8427>
- <sup>2</sup> Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia de Minas, Ouro Preto/MG, Brasil. Email: jose.matos@aluno.ufop.edu.br  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3700-166X>
- <sup>3</sup> Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia de Minas, Ouro Preto/MG, Brasil. Email: tatiana.santos@ufop.edu.br  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5484-6675>
- <sup>4</sup> Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia de Minas, Ouro Preto/MG, Brasil. Email: allan.santos@ufop.edu.br  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4302-3897>

**Resumo:** O conceito de modelo geotécnico em minas a céu aberto baseia-se em um produto definido por domínios ou unidades com comportamento geotécnico similar. O principal objetivo é apoiar os processos de design de taludes. A construção de um modelo geotécnico deve integrar quatro outros modelos: geológico, estrutural, geomecânico e hidrogeológico. Este artigo visa apresentar uma metodologia para a construção desses modelos utilizando geoestatística e modelagem implícita, e posteriormente, a integração desses modelos para criar um modelo de bloco geotécnico unificado. Este modelo contém informações sobre índice de resistência, grau de fraturamento, rugosidade, Índice de Resistência Geológica, anisotropia e condutividade hidráulica. A metodologia desenvolvida provou ser eficaz na integração dos modelos temáticos produzidos. A abordagem geoestatística reduziu a subjetividade na construção dos modelos, tornando este processo mais quantitativo. Este foi um dos principais diferenciais desta metodologia, pois permite a classificação da confiabilidade das informações geotécnicas atribuídas a cada bloco.

**Palavras-chave:** Geoestatística; Modelo Geotécnico; Mina a céu aberto.

**Abstract:** The concept of a geotechnical model in open-pit mines is based on a product defined by domains or units with similar geotechnical behavior. The main objective is to support slope design processes. The construction of a geotechnical model must integrate four other models: geological, structural, geomechanical, and hydrogeological. This article aims to present a methodology for constructing these models using geostatistics and implicit modeling, and subsequently, the integration of these models to create a unified geotechnical block model. This model contains information on strength index, degree of fracturing, roughness, Geological Strength Index, anisotropy, and hydraulic conductivity. The developed methodology has proven effective in integrating the thematic models produced. The geostatistical approach reduced subjectivity in model construction, making this process more quantitative. This was one of the main differentiators of this methodology, as it allows for the classification of the reliability of geotechnical information attributed to each block.

**Keywords:** Geostatistics; Geotechnical Model; Open-pit mine.

Recebido: 19/11/2024; Aceito: 24/02/2026; Publicado: 17/05/2026.

## 1. Introdução

O conceito de modelo geotécnico em minas a céu aberto envolve a criação de um produto que define espacialmente domínios ou unidades com comportamentos geotécnicos semelhantes. O principal objetivo é subsidiar os processos de projeto de taludes. A construção de um modelo geotécnico deve integrar outros quatro modelos (READ e STACEY, 2009): o modelo geológico, que contém os litotipos; o modelo estrutural, que define as principais discontinuidades e suas características; o modelo geomecânico, que define a qualidade do maciço rochoso (classes geomecânicas e parâmetros geotécnicos); e o modelo hidrogeológico, que define as unidades hidrogeológicas e seus respectivos parâmetros.

O desafio na construção do modelo geotécnico reside em combinar esses quatro modelos complexos em um único modelo tridimensional. De acordo com Read e Stacey (2009), a construção do modelo geotécnico por meio da sobreposição de mapas resulta em um mapa complexo e altamente segmentado de domínios geotécnicos (Figura 1). Além disso, os autores discutem o uso de modelos de blocos como alternativa, mas recomendam cautela na krigagem dos valores de RMR. O RMR (BIENIAWSKI, 1989) é o sistema de classificação geomecânica mais amplamente utilizado no mundo e consiste na sobreposição de avaliações qualitativas atribuídas a parâmetros individuais (resistência, fraturamento, rugosidade etc.). Esses parâmetros nem sempre são eficazes para a delimitação de um domínio geotécnico, e a escassez de dados pode comprometer a qualidade da estimativa.

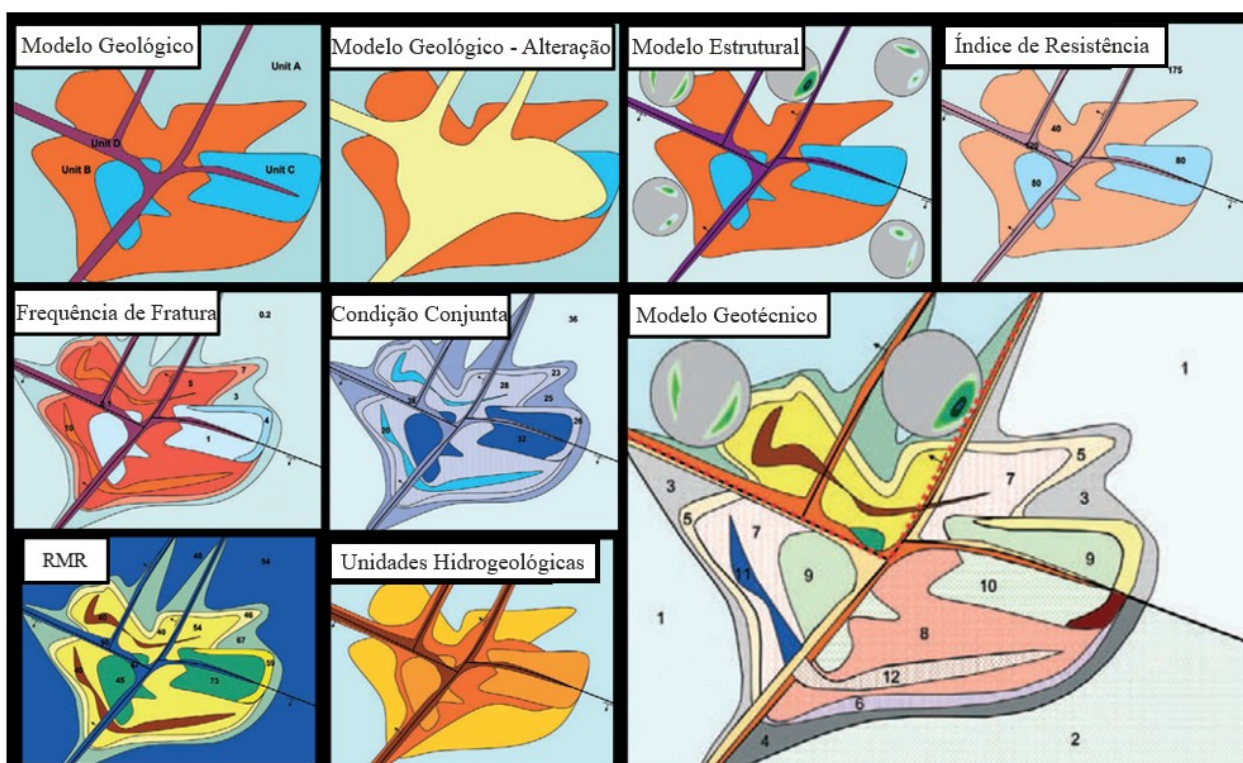


Figura 1 - Sobreposição de oito mapas temáticos para criar um modelo geotécnico bidimensional.

Fonte: modificado de Read e Stacey (2009).

Entre os modelos utilizados em estudos geotécnicos, o modelo geomecânico é o mais frequentemente empregado pelas equipes de mineração. Em minas a céu aberto, ele é tradicionalmente desenvolvido por meio da interpretação bidimensional de dados de sondagem e levantamentos de campo, projetados em seções verticais 2D e integrados em um modelo 3D explícito. O volume de informações geotécnicas em profundidade geralmente é menor que o volume de informações geológicas, especialmente em maciços de estéril. A escassez de dados torna o projeto das seções bidimensionais ainda mais interpretativo, dependendo essencialmente da experiência do modelador.

Seções geotécnicas bidimensionais têm sido, por muito tempo, a principal fonte para a construção de modelos geomecânicos tridimensionais, que servem como base para análises de estabilidade, seja por métodos de equilíbrio limite ou numéricos. Essa metodologia tradicional não utiliza ferramentas geoestatísticas que poderiam auxiliar a interpretação do modelador e reduzir a subjetividade associada. Consequentemente, não é possível avaliar quantitativamente a confiabilidade das informações fornecidas pelo modelo final.

Técnicas de controle de qualidade e geoestatística são amplamente usadas em modelos geológicos, nos quais a confiabilidade da informação está diretamente vinculada à valorização da empresa, devido à declaração de recursos e reservas minerais. Abordagens geoestatísticas para estimar volumes e teores de minério são obrigatórias para atender aos padrões internacionais de declaração de reservas, classificando as informações espacialmente distribuídas como medidas, indicadas ou inferidas.

O uso dessas ferramentas em geotecnia ainda não é comum na preparação de relatórios de declaração de reservas para bolsas internacionais; entretanto, consultores e auditores renomados incentivam estudos adicionais sobre quantificação e avaliação da incerteza dos dados (READ, 2013). Um grande desafio consiste em determinar quais métodos de estimativa são adequados para variáveis geotécnicas, que são predominantemente categóricas e podem apresentar pouca continuidade espacial. Apesar desses desafios, o uso de modelos de blocos tridimensionais com estimativas geoestatísticas tem sido amplamente discutido na literatura técnica (Vatcher, McKinnon, & Sjöberg, 2016; Cruz, 2017; Kring & Chatterjee, 2020; Liu et al., 2021). Esse conhecimento foi desenvolvido ao longo dos anos por pesquisadores e especialistas, principalmente na indústria de petróleo, mas ainda é limitado em sua aplicação a escavações de mineração.

A geoestatística tem sido aplicada em modelagem geotécnica. Kring e Chatterjee (2020) introduziram uma metodologia integrada para analisar a estabilidade de estruturas rochosas, considerando diversos fatores incertos que influenciam decisões de engenharia. Esses fatores, alguns distribuídos espacialmente na área geológica, são quantificados para aprimorar a análise de estabilidade. O estudo foca em dois fatores críticos: parâmetros estruturais categóricos e parâmetros geotécnicos contínuos. Para lidar com a incerteza espacial, dois métodos de simulação geoestatística — simulação sequencial de indicadores e simulação sequencial gaussiana — foram utilizados para gerar múltiplos mapas probabilísticos para zonas de falha e valores de RQD. Esses parâmetros espacialmente variáveis foram então integrados em uma análise de estabilidade de taludes.

A metodologia foi validada com dados sintéticos, demonstrando alinhamento próximo aos valores de estabilidade calculados a partir dos dados simulados. Além disso, foi aplicada a um cenário real de projeto de mina a céu aberto com dados de exploração limitados. Mapas de RQD simulados geoestatisticamente para este estudo de caso foram analisados para determinar um ângulo seguro de talude de 44° para operações de mineração a céu aberto. De forma geral, essa abordagem pode ser adaptada para quantificar outros riscos geotécnicos e integrada a diferentes estruturas de análise de estabilidade.

Propondo uma melhor compreensão das variáveis geotécnicas e o uso de técnicas geoestatísticas na construção de modelos, este artigo apresenta uma metodologia que aplica ferramentas geoestatísticas para quantificar incertezas e construir um modelo geotécnico tridimensional de uma grande mina de ferro a céu aberto localizada na Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero, Brasil.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1 Dados

O primeiro passo no desenvolvimento do modelo foi o levantamento, a organização e a validação do conjunto de dados. Esta etapa é crucial no processo, pois a qualidade das informações afeta diretamente todos os produtos subsequentes. O conjunto de dados geotécnicos utilizado inclui 944 pontos de mapeamento de superfície e aproximadamente 67.000 metros de testemunhos de sondagem com descrições geotécnicas.

A definição do tamanho da amostra composta foi baseada nos comprimentos médios dos intervalos descritos nos testemunhos de sondagem. Ao todo, o conjunto de dados resultou em 21.975 pontos amostrais, que foram utilizados na construção dos modelos (Figura 2).

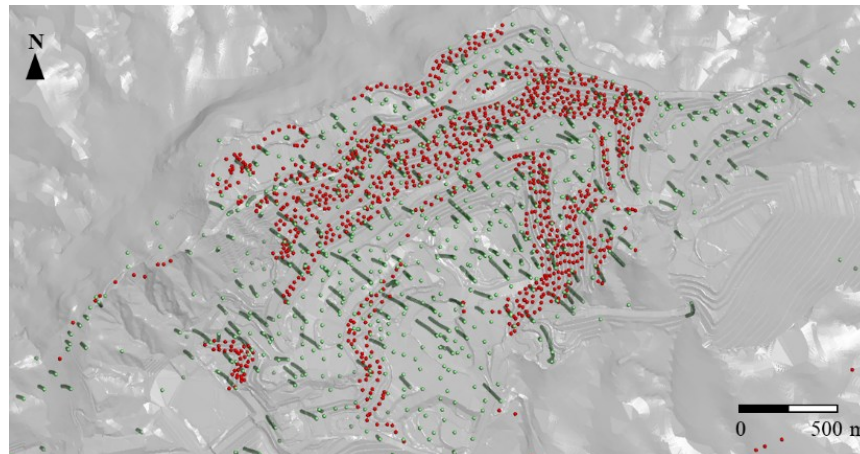


Figura 2 – Mapa de localização com a disposição do banco de dados. Vermelho: pontos de mapeamento. Verde: sondagens diamantadas.

Fonte: autores (2024)

Entre os parâmetros geotécnicos disponíveis no conjunto de dados, foram utilizados os seguintes: resistência da rocha intacta (R), Rock Quality Designation (RQD), grau de fraturamento (DF) e rugosidade das descontinuidades. Assim, foram empregadas três variáveis categóricas e uma variável numérica (RQD). Para as variáveis categóricas, foram necessárias transformações em indicadores (0 e 1) para a realização da krigagem por indicadores (IK).

## 2.2 Modelos

Para o desenvolvimento do modelo geotécnico, foram criados sete modelos temáticos: geológico, estrutural, resistência, grau de fraturamento, rugosidade das descontinuidades, geomecânico e hidrogeológico (Figura 3). A modelagem tridimensional dos dados geológicos, estruturais, geomecânicos e hidrogeológicos foi realizada utilizando o software Leapfrog Geo® (LEAPFROG GEO, 2024).

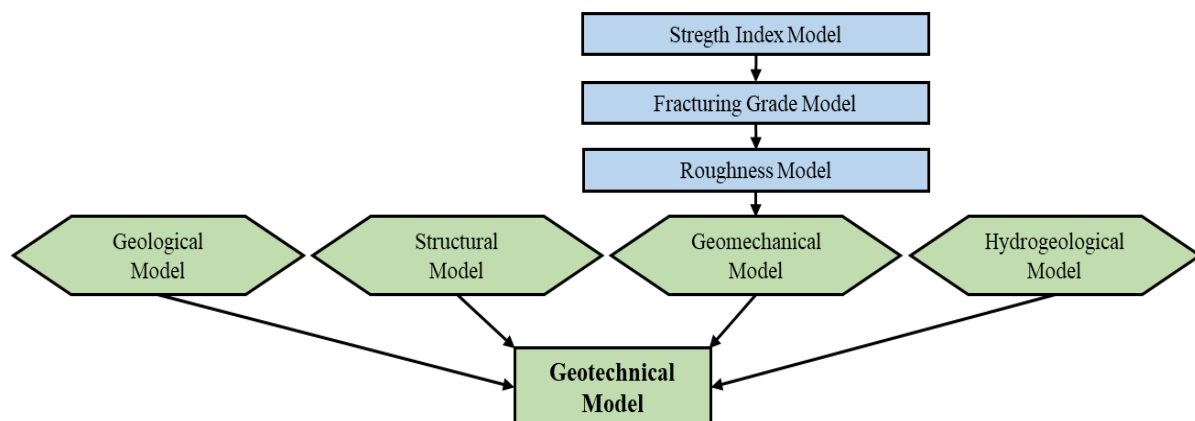


Figura 3 - Modelos temáticos elaborados para obtenção do modelo geotécnico.

Fonte: autores (2024).

O modelo geológico foi desenvolvido utilizando modelagem implícita, integrando testemunhos de sondagem, pontos de mapeamento e o mapa geológico de superfície. Ele delimita em três dimensões as principais unidades estratigráficas presentes na mina, compostas principalmente por quartzitos, folhelhos, formações ferríferas bandadas (BIF), rochas intrusivas e coberturas recentes.

O modelo estrutural baseou-se em medições obtidas em levantamentos de afloramentos (foliações e bandamentos composicionais) e em superfícies de contato geológico em profundidade derivadas dos dados de sondagem. Mapas estruturais regionais e locais apoiaram a identificação e interpretação das principais estruturas da mina. Posteriormente, foram geradas superfícies tridimensionais representando variações na atitude da foliação (superfícies anisotrópicas) e uma superfície de falha com possíveis rupturas planas (camada fraca).

O modelo geomecânico foi construído utilizando o índice de resistência (ISRM, 1981), grau de fraturamento (BIENIAWSKI, 1989), RQD (DEERE, 1968) e rugosidade (BIENIAWSKI, 1989). A partir desses dados, foram criados três modelos temáticos: o modelo do índice de resistência, o modelo do grau de fraturamento e o modelo de rugosidade. Os sólidos do modelo geológico foram definidos como domínios geoestatísticos, considerando que o comportamento reológico e o grau de intemperismo variam conforme o litotipo, influenciando as propriedades geotécnicas.

Para o modelo do índice de resistência, foram utilizadas variáveis categóricas representando sete classificações de resistência (R0 a R6), conforme ISRM (1981). Conforme proposto por Cruz (2017), estas foram agrupadas em duas categorias: fraca (R0, R1, R2) e compacta (R3, R4, R5, R6). Rochas fracas receberam valor 1 e rochas duras, valor 0 (Tabela 1). Essa transformação foi essencial para preparar o conjunto de dados para análise variográfica e estimativa por krigagem por indicadores.

A classificação final dos blocos foi determinada pela maior probabilidade de cada ponto estimado. O modelo variográfico, derivado da variografia experimental de rochas fracas (1) e duras (0), foi aplicado a krigagens por indicadores individuais para cada classificação de resistência. Para blocos não estimados, o índice de resistência foi atribuído com base em um modelo binário implícito. O modelo de blocos resultante contém informações tanto sobre a compacidade (fraca ou dura) quanto sobre o índice de resistência da rocha (R0 a R6).

Índice de Resistência	Descrição Qualitativa	UCS (MPa)	Indicador de Transformação
R6	Extremamente resistente	> 250	0: Dura
R5	Muito resistente	100 a 250	
R4	Resistente	50 a 100	
R3	Resistência média	25 a 50	
R2	Frágil	5 a 25	1: Frágil
R1	Muito frágil	1 a 5	
R0	Extremamente frágil	< 1	

*Tabela 1 - Descrição do índice de resistência e transformação em indicador.*

*Fonte: ISRM (1981) e Cruz (2017).*

O modelo do grau de fraturamento foi desenvolvido utilizando krigagem por indicadores, com base nos seis graus de fraturamento presentes no conjunto de dados (Tabela 2). A metodologia envolveu a construção de um modelo variográfico do RQD, uma variável numérica contínua (0–100%) que apresenta forte correlação com o grau de fraturamento na mina estudada ( $R^2 = 0,89$ ).

Essa abordagem permitiu que o modelo variográfico fosse construído a partir de um conjunto de dados maior, proporcionando uma compreensão mais precisa da distribuição espacial do fraturamento. Em outras palavras, assumiu-se que a continuidade espacial do RQD aproxima-se da do grau de fraturamento. Transformações em indicadores foram aplicadas ao conjunto de dados e, utilizando o variograma do RQD, a probabilidade máxima de cada bloco pertencer a um determinado grau de fraturamento foi estimada por meio da krigagem por indicadores.

Os valores do grau de fraturamento foram atribuídos apenas aos blocos classificados como duros no modelo do índice de resistência, uma vez que, em rochas fracas, o comportamento do maciço rochoso é predominantemente controlado pela resistência da matriz rochosa.

<b>Classificação do grau de fraturamento</b>	<b>Descrição</b>	<b>Fraturas / metro</b>
1	Maciça	< 1
2	Fraturada	1
3	Moderadamente raturada	2 a 5
4	Muito fraturada	6 a 10
5	Extremamente fraturada	11 a 20
6	Desintegrada / Laminada	> 20

*Tabela 2 – Grau de descrição de fraturamento.*

*Fonte: modificado de Bieniawski (1989).*

Os dados de rugosidade disponíveis no conjunto de dados (Tabela 3) são limitados e referem-se apenas a amostras de rocha dura (índice de resistência  $\geq R2$ ). Devido à ampla dispersão espacial desses dados, não foi possível desenvolver um modelo variográfico consistente. Portanto, o método do vizinho mais próximo foi aplicado para estimar a rugosidade, restringindo as atribuições a até 100 metros das amostras existentes. Para os blocos não estimados, foi atribuído o valor modal de rugosidade de cada domínio geológico (Quartzitos, Folhelhos, Formações Ferríferas Bandadas e Formações Intrusivas). O modelo de blocos resultante contém, assim, informações de rugosidade para rochas duras, com base tanto nos dados amostrados quanto nos valores modais de cada domínio geológico.

<b>Classificação de Rugosidade</b>	<b>Descrição</b>
1	Extremamente rocosa
2	Rugosa
3	Ligeiramente rocosa
4	Lisa
5	Superfície polida

*Tabela 3 – Descrição da rugosidade.*

*Fonte: modificado de Bieniawski (1989).*

O modelo geomecânico foi construído integrando os modelos temáticos de índice de resistência, grau de fraturamento e rugosidade. Essa integração foi realizada por meio de uma adaptação da classificação Geological Strength Index (GSI), conforme proposta por Hoek (2001). A classificação GSI envolve a avaliação das condições geológicas do maciço rochoso (estrutura e condições das descontinuidades) e a seleção do valor que melhor representa as condições observadas, comparando-as com casos de referência fornecidos em uma tabela. O sistema GSI foi escolhido por fornecer diretamente os parâmetros necessários para a aplicação do critério de falha Generalized Hoek-Brown para maciços rochosos (HOEK et al., 2002).

Neste estudo, o GSI foi adaptado utilizando o grau de fraturamento para caracterizar a estrutura do maciço rochoso e a rugosidade para definir as condições das descontinuidades. Como o GSI é um método visual e empírico, detalhar o modelo geomecânico com inúmeros materiais possuindo diferentes valores de GSI não seria prático. Portanto, apenas três valores de GSI (75, 45 e 15) foram utilizados para simplificar a faixa de parâmetros geotécnicos no modelo final e, conseqüentemente, na análise de estabilidade (Figura 4).

GSI Adaptation		Roughness					
		Extremely Rough	Rough	Slightly Rough	Smooth	Slickensided	
		1	2	3	4	5	
Fracturing degree	Massive	1	85	75	65	NA	NA
	Blocky	2	75	65	55	45	35
	Moderately Blocky	3	65	55	45	35	25
	Very Blocky	4	55	45	35	25	15
	Extremely Blocky	5	45	35	25	15	10
	Desintegrated / Laminated	6	NA	NA	15	10	5

Figura 4 - Proposta de adaptação do GSI para a construção do modelo geomecânico da metodologia proposta.  
Fonte: autores (2024).

O modelo hidrogeológico foi desenvolvido atribuindo valores equivalentes de condutividade hidráulica (K) com base em litotipo, compacidade e GSI. Embora outros fatores, como a composição química, possam influenciar os parâmetros hidrogeológicos, este estudo focou na classificação dos materiais de acordo com características físicas que afetam o comportamento geotécnico do maciço rochoso; portanto, parâmetros químicos não foram considerados.

Além disso, ao definir intervalos de eficiência da krigagem para os blocos estimados, foi possível avaliar a confiabilidade das informações geotécnicas. Três classes foram estabelecidas, seguindo a nomenclatura tradicional utilizada na classificação de recursos minerais: medida, indicada e inferida. Essa classificação auxilia na identificação de áreas com lacunas de dados, orienta planos de investigação futuros e é essencial para otimizar a malha de sondagens geotécnicas.

### 2.3 Estudo de Caso

O local selecionado para a aplicação da metodologia é uma grande mina de ferro a céu aberto situada em São Gonçalo do Rio Abaixo, Brasil. O talude principal mede aproximadamente 3,2 km de comprimento, 1,5 km de largura e possui uma altura máxima de 280 m. A mina planejada deve alcançar, ao final, uma geometria de 4,4 km de comprimento, 1,7 km de largura e altura máxima do talude de 480 m. Esse potencial significativo de expansão da cava ressalta a importância do modelo geotécnico para garantir a estabilidade do talude e apoiar análises de viabilidade técnica.

### 3. Resultados e Discussão

Para cada modelo temático, foi selecionada a metodologia de modelagem e estimativa mais adequada, considerando a natureza das variáveis e o suporte amostral. Nos blocos onde não havia amostras disponíveis, os valores foram atribuídos por meio de modelagem implícita, com lentes orientadas de acordo com os elipsoides de busca de cada fenômeno modelado. O método de modelagem aplicado a cada modelo temático individual está resumido na Tabela 4. Além disso, os modelos temáticos resultantes são apresentados juntamente com um exemplo do modelo geotécnico aplicado à análise de estabilidade de uma geometria de cava a céu aberto (Figura 5).

Modelo	Variografia	Domínio	Metodologia Atribuída
--------	-------------	---------	-----------------------

Geológico	Não aplicado	Todos	Modelo implícito
Índice de Resistência	Transformação do indicador (Duro: 0, Frágil: 1). Mesmo modelo variográfico para estimar os 7 índices de resistência	Cobertura Intrusivo BIF Xisto Quartzito Subsolo	Vizinho mais próximo Vizinho mais próximo + Modelo implícito Krigagem do indicador + Modelo implícito Krigagem do indicador + Modelo implícito Modelo implícito Modelo implícito
Grau de Fraturamento	Dados originais RQD (0 a 100). Meso modelo variográfico usado nos 6 graus de fraturamento. Aplicável somente a blocos classificados como duros.	Cobertura Intrusivo BIF Xisto Quartzito Subsolo	Não aplicado Valor modal Krigagem indicadora + Modelo implícito Krigagem indicadora + Modelo implícito Valor modal Valor modal
Rugosidade	Dados insuficientes para variografia	Todos, exceto cobertura.	Vizinho mais próximo (limitado à distância média de 100 m) + Valor modal por litotipo
Geomecânico	Não aplicado	Todos	Integração e atribuição do modelo de acordo com o GSI adaptado
Estrutural	Não aplicado	Todos, exceto cobertura	Superfícies anisotrópicas por modelagem implícita, respeitando os contatos entre os domínios geológicos. Atitude atribuída aos blocos pelo vizinho mais próximo, respeitando as triangulações da superfície.
Hidrogeológico	Não aplicado	Todos	Condutividade hidráulica média (k) por litotipo.

Tabela 4 – Método de modelagem aplicado para cada modelo temático.

Fonte: os autores (2024).

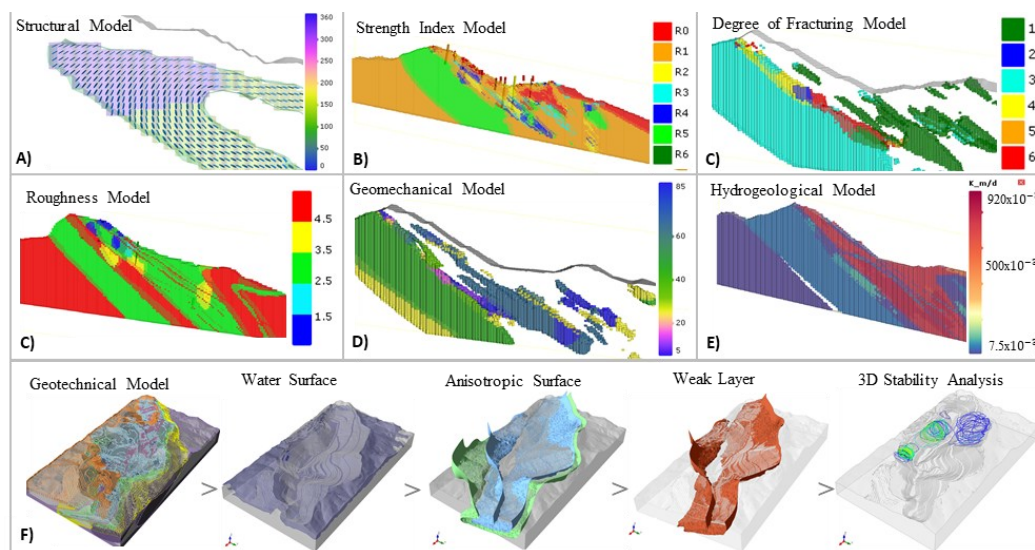


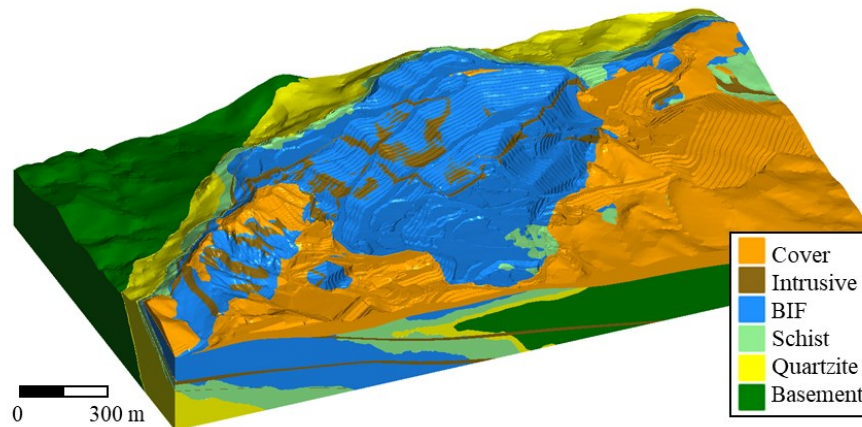
Figura 5 - (A a E) Seções do modelo de bloco dos modelos temáticos, (F) fluxo para importar os produtos para uma análise de estabilidade 3D utilizando modelo de bloco e superfícies.

Fonte: os autores (2024).

### 3.1 Modelo geológico

Os litotipos predominantes nas unidades estratigráficas da mina incluem embasamento (xistos e granitos não divididos), quartzito, xisto, formação ferrífera bandada (BIF), intrusivos (diabásios e gabros) e cobertura (bacias quaternárias e solo

laterítico) (Figura 6). A composição mineralógica de cada rocha influencia diretamente a sensibilidade do material à intemperização e, conseqüentemente, o índice de resistência. Além disso, as rochas apresentam comportamentos distintos em resposta às deformações tectônicas (reologia), o que pode resultar em diferentes padrões estruturais em cada material. Por essa razão, as unidades estratigráficas condicionam as variáveis geotécnicas e foram utilizadas como domínios geoestatísticos.



*Figura 6 – Modelo geológico.  
Fonte: os autores (2024).*

### 3.2 Modelo estrutural

As principais estruturas identificadas no levantamento de campo foram fraturas, bandamento composicional, foliação, eixos de dobras e lineações minerais por alongamento (Figura 7). No entanto, o bandamento e a foliação acompanharam os processos tectônicos da região e, por essa razão, essas estruturas também estão em concordância com os principais contatos geológicos: BIF/xisto, xisto/quartzito e quartzito/embasamento. As medições estruturais e as superfícies modeladas estão apresentadas na Figura 8.

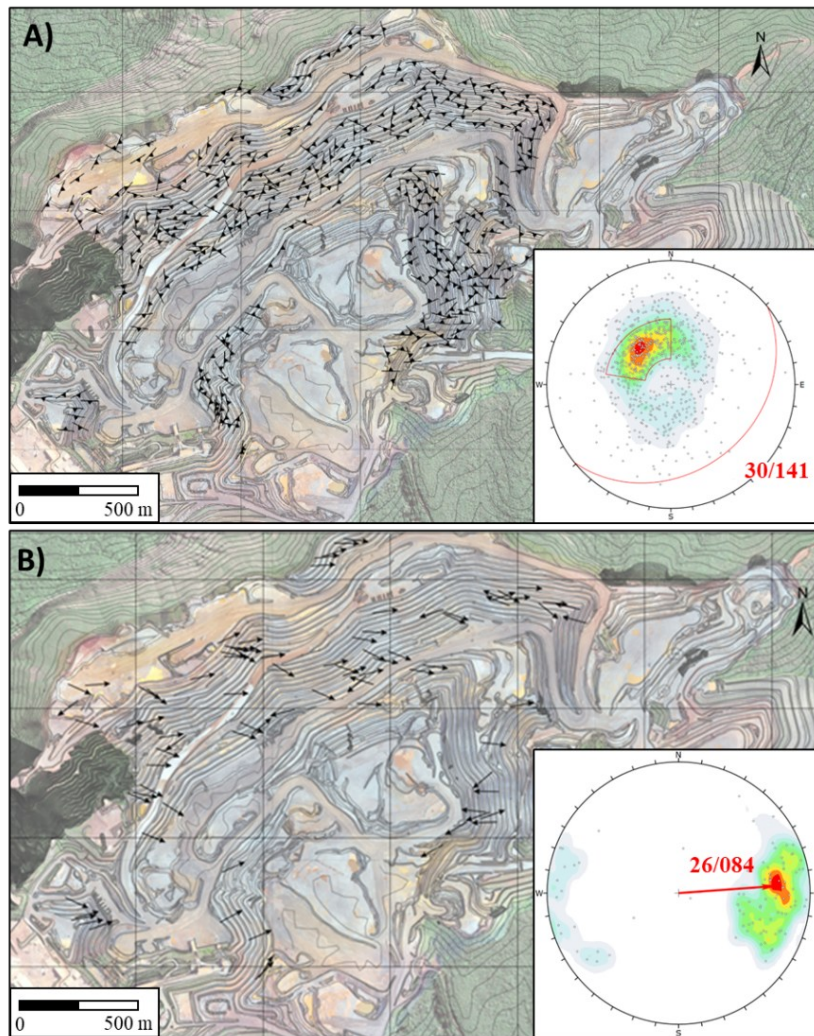


Figura 7 - A) Bandamento composicional e foliação, orientação média do plano 30/141.  
B) Eixos de dobras e lineação mineral por alongamento, orientação média da linha 26/084.  
Fonte: os autores (2024).

Estruturas em menor escala são extremamente relevantes para análises de estabilidade de bancadas, mas o foco do modelo é apoiar análises de estabilidade em escala inter-rampa e global. Por essa razão, as fraturas não foram consideradas no modelo. As superfícies anisotrópicas dos contatos geológicos foram elaboradas por triangulação, em que cada triângulo da malha possui uma atitude (inclinação / direção de mergulho). Esses valores foram distribuídos espacialmente como dados estruturais, que assumiram a função de pontos amostrais e foram interpolados pelo método do vizinho mais próximo, atribuindo inclinação / direção de mergulho aos blocos.

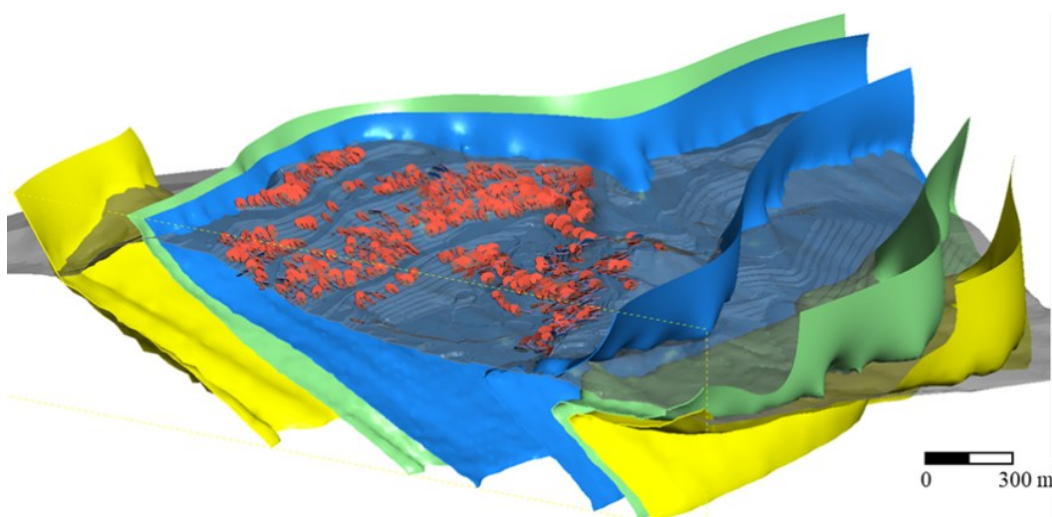


Figura 8 - Superfícies de contatos geológicos e discos de medições estruturais utilizados como referência para a elaboração do modelo estrutural.

Fonte: os autores (2024).

### 3.3 Modelo de Índice de Resistência

O índice de resistência é categorizado em sete classes (R0 a R6). Como se trata de uma variável categórica, o método de estimação mais adequado é o krigagem por indicadores. Nesse processo, é realizada uma transformação indicadora, na qual a categoria a ser modelada recebe o valor 1, e as demais recebem o valor 0. Esses dados binários são então utilizados para o estudo variográfico e para definir a continuidade espacial do fenômeno.

Inicialmente, foram realizados sete estudos variográficos e sete estimativas utilizando essa metodologia, mas os resultados não foram satisfatórios. Observou-se que as orientações da continuidade espacial variavam significativamente entre os estudos, o que era geologicamente inconsistente, uma vez que as estruturas foram formadas pelos mesmos processos de intemperismo e tectônicos. Como alternativa, empregou-se a transformação indicadora proposta por Cruz (2017). Apesar de ser uma abordagem simplificada, esse método forneceu resultados mais consistentes com a geologia, pois o elipsoide de busca obtido alinhou-se bem com a orientação geral das estruturas planares da mina (bandamento composicional e foliação).

As estruturas planares são significativas para a percolação de água e intemperismo devido à anisotropia da condutividade hidráulica gerada pelas diferenças mineralógicas no bandamento composicional. Portanto, além de fornecer suporte geoestatístico, os resultados do estudo variográfico apresentaram coerência física com a geologia e a estrutura da mina.

O modelo variográfico proposto tem como objetivo calcular a probabilidade de os blocos serem classificados como rocha fraca ou não. Se o valor estimado pelo krigagem por indicadores estiver mais próximo de 1, o bloco é classificado como 'fraco'. Se o valor estimado estiver mais próximo de 0, o bloco é classificado como 'duro'. Esse processo foi replicado duas vezes: uma vez no domínio do BIF (Figuras 9 a 11) e uma vez no domínio do xisto, pois esses são os domínios com o maior número de pontos amostrais. Informações sobre os elipsoides utilizados e os parâmetros de busca são detalhadas na Tabela 5. A curva variográfica ajustou-se bem aos dados, resultando em modelos variográficos consistentes que confirmam a continuidade espacial dos fenômenos modelados (Tabela 6). Os modelos variográficos de compatibilidade obtidos foram então utilizados para estimar as categorias individuais (R0 a R6) e construir o modelo do índice de resistência.

Estimativas	Elipsoide de busca			Parâmetros de busca			
	Eixos	Inclinação/Mergulho	Alcance (m)	Distância de atraso	Nº de atrasos	Tolerância angular	Largura da banda (m)
Compacidade em BIF	Maior	05/216	740	50	30	45°	200
	Semi-maior	29/123	340	50	30	45°	200
	Menor	60/315	85	10	30	22.5°	-
Compacidade em Xisto	Maior	05/054	680	100	20	45°	200
	Semi-maior	29/147	200	50	20	45°	200
	Menor	60/315	80	10	50	22.5°	-
RQD	Maior	12/067	450	50	20	45°	200
	Semi-maior	27/163	320	50	20	45°	200
	Menor	60/315	150	10	50	22.5°	-

Tabela 5 - Elipsóides de busca e parâmetros dos estudos variográficos.  
Fonte: os autores (2024).

Direção		
Inclinação 30°	Azimute de inclinação 135°	Rumo 170°
Modelo de variograma		
Pepita 0.2269	Estrutura 1 (Esférica) 0.2631	Estrutura 2 (Esférica) 0.5100
Maior	145.70	740.00
Semi-maior	102.40	340.00
Menor	44.05	85.00

Tabela 6 – Modelo de variograma.  
Fonte: os autores (2024).

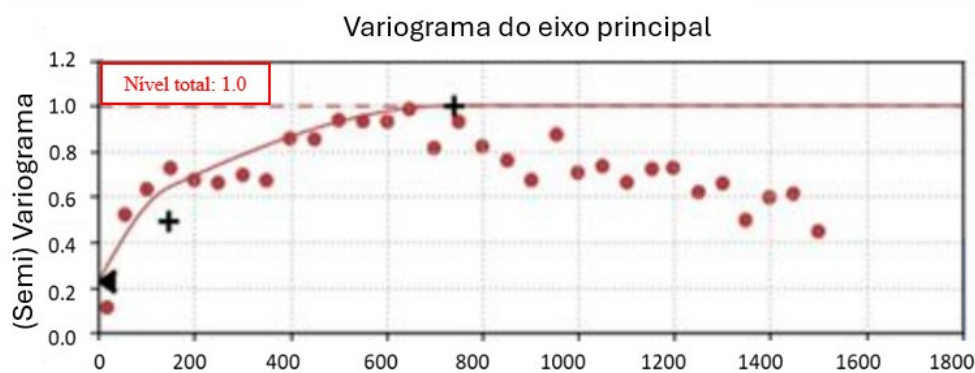


Figura 9 – Variograma do eixo principal BIF 05/216.  
Fonte: os autores (2024).

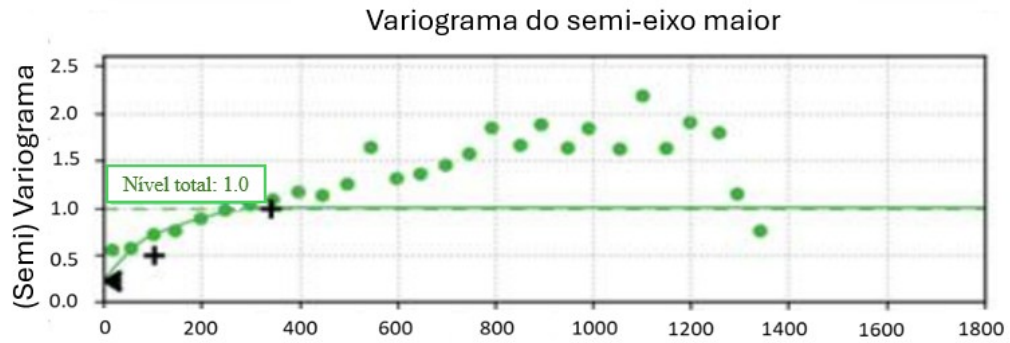


Figura 10 – Variograma do semi-eixo maior BIF 29/123.  
Fonte: os autores (2024).

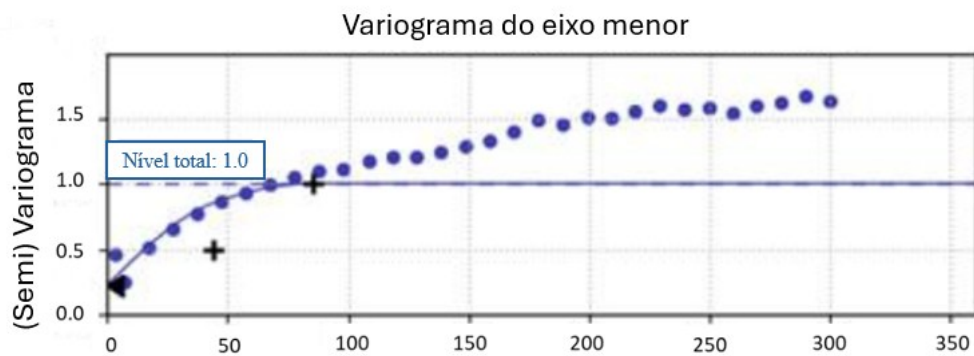


Figura 11 – Variograma do eixo menor BIF 60/315  
Fonte: os autores (2024).

Para atribuir valores do índice de resistência aos blocos não estimados, foi elaborado um modelo implícito por interpolação de indicadores, replicando a continuidade espacial identificada nos estudos variográficos para os parâmetros de modelagem dos sólidos (Figura 12). Os blocos não estimados foram atribuídos de acordo com o valor modal de cada litotipo, respeitando a classificação de compacidade.

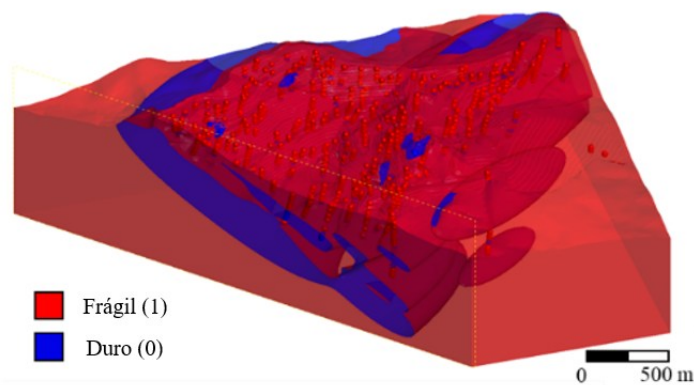


Figura 12 - Modelo implícito de compacidade. Frágil (R0 a R2) e Duro (R3 a R6).  
Fonte: os autores (2024).

As atribuições do índice de resistência para os domínios Cobertura e Intrusivos foram realizadas utilizando a técnica do vizinho mais próximo, com uma distância máxima de 300 metros, a fim de evitar extrapolações excessivas. Para os blocos não estimados, o atributo de resistência foi atribuído com base no valor modal do litotipo. Nos domínios Quartzito e Embasamento, onde não havia amostras suficientes para qualquer tipo de estimação, a atribuição foi feita utilizando o modelo implícito de compacidade: R5 para materiais duros e R1 para materiais fracos.

A validação das estimativas foi conduzida utilizando quatro técnicas: inspeção visual, soma das probabilidades obtidas para cada bloco (totalizando 100%), correlação com o conjunto de dados da geologia estrutural e análise de swath plot. Além disso, blocos com eficiência de krigagem negativa foram desconsiderados, e a atribuição de resistência foi realizada com base no modelo implícito de compacidade e no valor modal.

A validação visual mostrou boa correspondência entre os pontos amostrais e os valores estimados nos blocos. Os contatos geológicos e a orientação das lentes estão consistentes com a geologia estrutural da área, como demonstrado nas seções AB e CD (Figura 13).

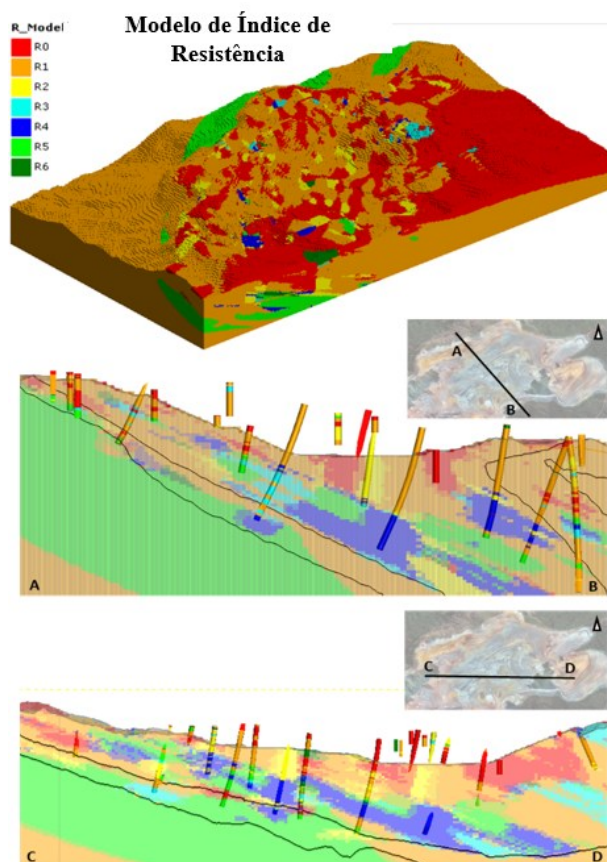


Figura 13 – Validação visual do Modelo de Índice de Resistência.  
Fonte: os autores (2024).

A soma das probabilidades das estimativas de compacidade e das categorias de resistência resultou em 100%, como esperado. Os resultados da variografia foram consistentes com a geologia estrutural da área, uma vez que a direção de maior continuidade da compacidade alinha-se com a orientação das estruturas planares (bandamento e foliação). Portanto, a distribuição espacial da resistência é controlada pelo bandamento composicional e pela foliação principal da mina.

A análise dos swath plots ao longo dos eixos XYZ revelou um leve viés de subestimação. Na transformação indicadora, o valor 0 representa rochas compactas e 1 representa rochas friáveis. A subestimação indica que o volume de rochas compactas é maior do que o sugerido pelas amostras. No entanto, o comportamento das curvas médias dos blocos estimados e a média das amostras mostra que o estimador foi eficaz e refletiu de maneira precisa o comportamento da compacidade.

---

O volume de cada swath é mostrado pelo histograma abaixo das curvas e indica uma quantidade menor de blocos de xisto em comparação com a formação ferrífera. Além disso, há menos amostras de xisto do que de formação ferrífera, o que leva a um melhor ajuste das curvas para a formação ferrífera, onde o estimador apresentou um viés negativo menor em comparação com o estimador para xisto. Os primeiros e últimos swaths representam as bordas da caixa do modelo, regiões onde o volume de pontos amostrais é significativamente menor do que na região central, o que causa maior desvio das curvas médias tanto para o xisto quanto para a formação ferrífera. Esse fenômeno é conhecido em geoestatística como efeito de borda.

Os swath plots para a estimativa de compacidade nos eixos XYZ foram realizados (Figura 14).

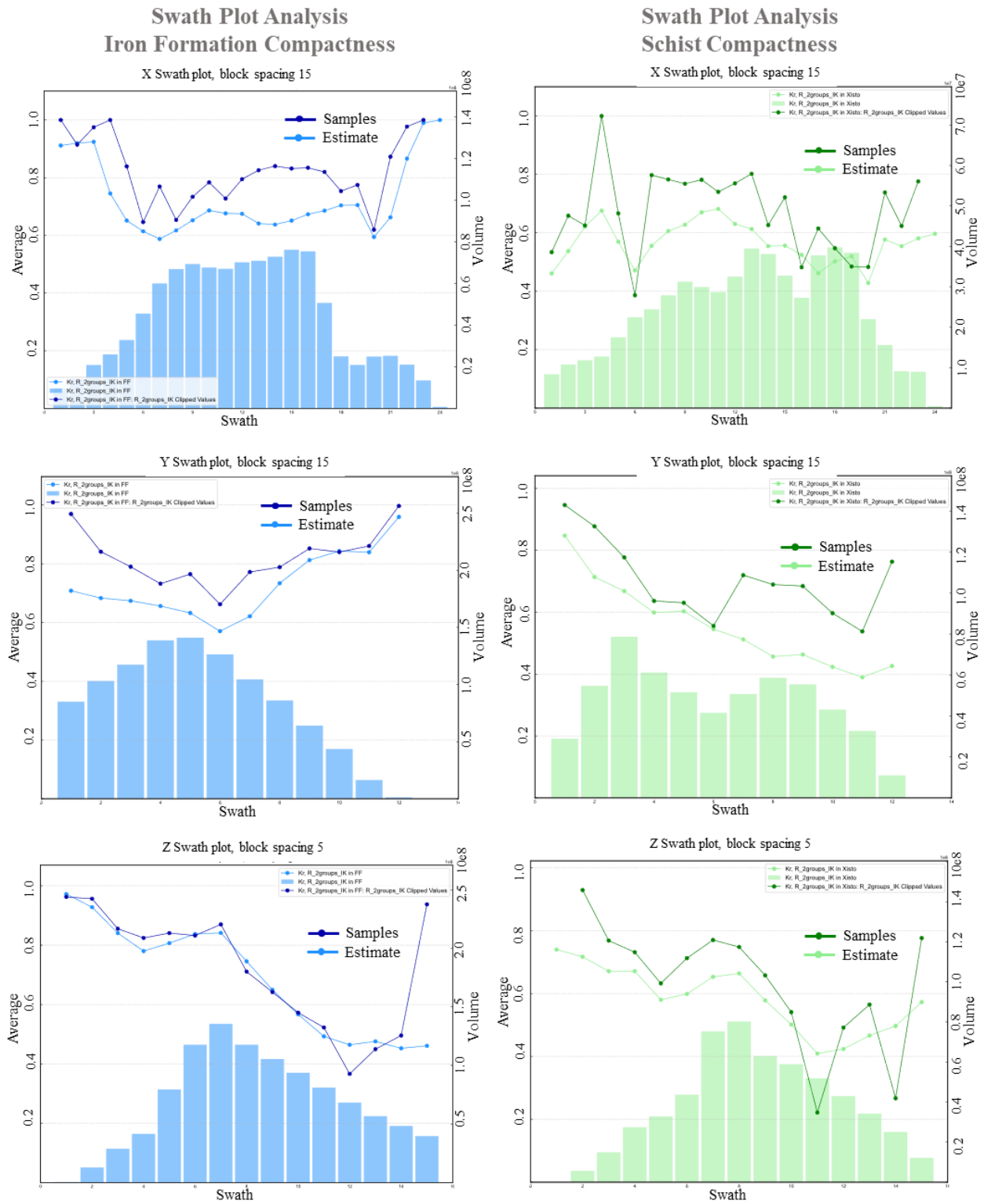


Figura 14 - Análise dos swath plots de compactidade nos domínios de xisto e formação ferrífera.  
 Fonte: os autores (2024).

### 3.4 Modelo de Grau de Fraturamento

O grau de fraturamento é uma variável categórica, dividida em seis categorias distintas. Para a estimação por krigagem por indicadores, foi necessário adotar uma metodologia semelhante à utilizada na modelagem do índice de resistência, agrupando variáveis para simplificar a transformação indicadora. No entanto, o grau de fraturamento na mina estudada apresenta forte correlação com o RQD ( $R^2 = 0,89$ ), uma variável numérica e contínua (variando de 0 a 100%), o que permite a aplicação da estimação por krigagem ordinária.

Essa correlação significativa é observada em amostras classificadas como duras (R3 a R6), nas quais, ao contrário das rochas mais fracas, o grau de fraturamento desempenha papel crucial na determinação da qualidade da rocha. Dessa forma, foi realizado um estudo variográfico do RQD, cujos resultados são apresentados na Figura 15.

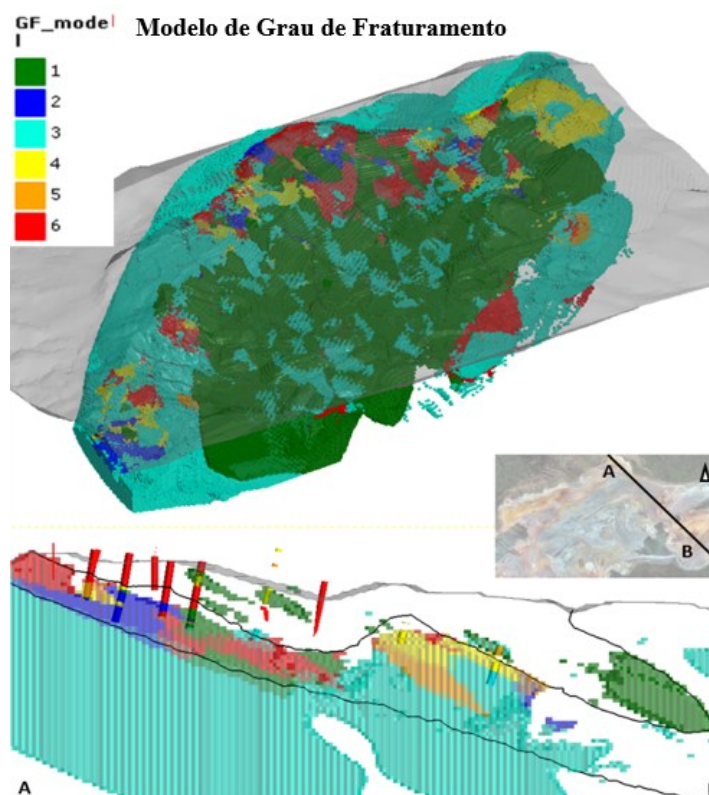


Figura 15 - Validação visual do modelo de grau de fraturamento, com atribuição dos valores de GF apenas nos blocos compactos (R3 a R6).

Fonte: os autores (2024).

O modelo variográfico obtido foi replicado para a estimação por krigagem por indicadores de cada um dos seis graus de fraturamento, aplicável exclusivamente às rochas duras. Essa abordagem é considerada viável porque os fenômenos geológicos e estruturais que influenciam ambas as variáveis são os mesmos, resultando em distribuição e continuidade espacial semelhantes.

De modo geral, o fraturamento das rochas é estruturalmente controlado por zonas de cisalhamento e/ou dobras regionais. O elipsoide de busca definido após o estudo variográfico revelou uma direção semelhante para as feições planares (como bandamento composicional e foliação) e está alinhado com estruturas lineares (como lineações minerais e eixos de dobras). Assim, a distribuição espacial do fraturamento é controlada pelo alongamento mineral da mina.

Os blocos não estimados receberam valores com base no modelo implícito de compacidade e no valor modal do grau de fraturamento para cada litotipo. A validação da estimação foi realizada utilizando as mesmas quatro técnicas aplicadas

---

ao modelo do índice de resistência: inspeção visual, soma das probabilidades em cada bloco (totalizando 100%), correlação com o conjunto de dados da geologia estrutural e análise de swath plot. Todas as técnicas empregadas mostraram boa aderência ao conjunto de dados disponível. Portanto, pode-se afirmar que a estimativa representa de forma precisa o comportamento do RQD na massa rochosa.

Os swath plots da estimativa XYZ do RQD são apresentados na Figura 16.

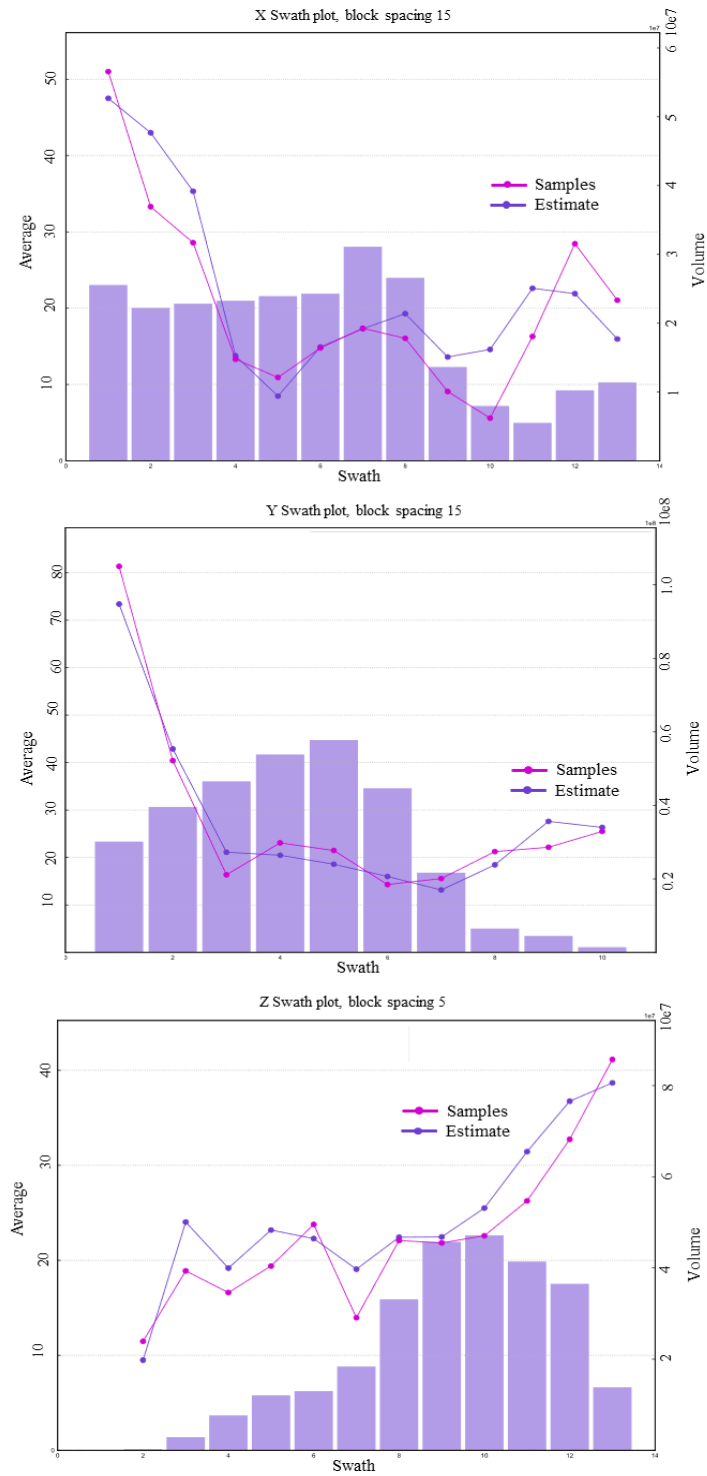


Figura 16 – Análise dos swath plots do RQD.  
 Fonte: os autores (2024).

### 3.5 Modelo de rugosidade

Os dados de rugosidade foram restritos a rochas duras, mas a mina estudada é predominantemente composta por rochas fracas. Como resultado, o volume de amostras disponíveis foi insuficiente para conduzir um estudo variográfico consistente. Portanto, o modelo de rugosidade foi desenvolvido utilizando o método do vizinho mais próximo, com uma distância máxima de 100 m, a fim de evitar extrapolações excessivas. Os blocos não estimados receberam valores com base no valor modal de cada domínio geológico (Quartzitos, Xistos, Formações Ferríferas e Formações Intrusivas).

O modelo final gerado é um modelo de blocos com informações de rugosidade, respeitando os pontos amostrais disponíveis e os valores modais definidos para cada domínio geológico (Figura 17).

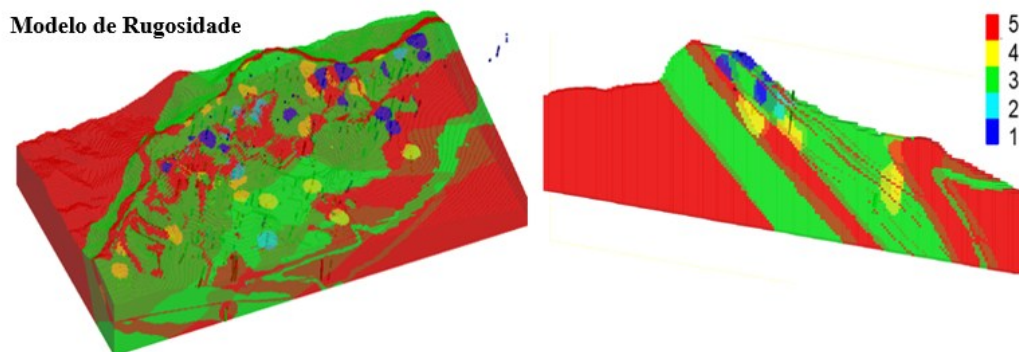


Figura 17 – Modelo de rugosidade.  
Fonte: os autores (2024).

### 3.6 Modelo geomecânico

O modelo geomecânico integrou os seguintes modelos das etapas anteriores: índice de resistência, grau de fraturamento e rugosidade. A metodologia GSI é aplicável principalmente a massas rochosas e, portanto, não foi utilizada para blocos de rocha fraca com comportamento semelhante ao do solo. A atribuição de valores de GSI aos blocos de rocha dura foi realizada por meio de lógica computacional, seguindo a adaptação proposta da tabela GSI. Por exemplo, um bloco com grau de fraturamento 3 e rugosidade 2 recebeu um valor de GSI igual a 55 (Figura 18).

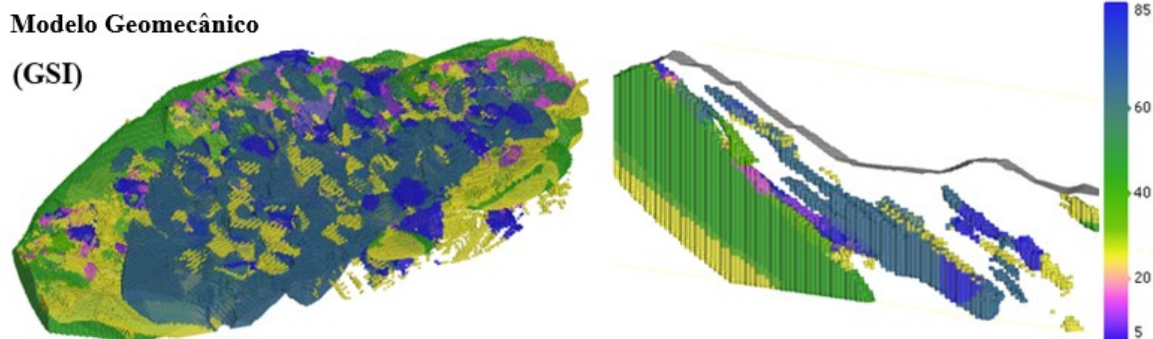


Figure 18 – Modelo geomecânico.  
Fonte: os autores (2024).

### 3.7 Modelo hidrogeológico

O modelo hidrogeológico foi elaborado por meio da atribuição de valores equivalentes de condutividade hidráulica (K), com base no litotipo, na resistência da rocha e nos valores de GSI. Os valores atribuídos a cada material (Tabela 7) e o modelo final (Figura 19) são apresentados.

Litotipo	Resistência	GSI	Unidades geotécnicas	Condutividade hidráulica K (m/d)
Cobertura	Duro	-	COV_COMPAC	0.530
	Frágil	-	COV_FRAGIL	0.530
Intrusiva	Duro	15	IN_GSI_15	0.049
	Frágil	-	IN_FRAGIL	0.0075
Formação de ferro bandado (BIF)	Duro	75	BIF_GSI_75	0.660
	Duro	45	BIF_GSI_45	0.800
	Duro	15	BIF_GSI_15	0.920
	Frágil	-	BIF_FRAGIL	0.740
Xisto	Duro	75	SC_GSI_75	0.049
	Duro	45	SC_GSI_45	0.073
	Duro	15	SC_GSI_15	0.089
	Frágil	-	SC_FRAGIL	0.0075
Quartzito	Duro	45	QT_GSI_45	0.041
	Frágil	-	QT_FRAGIL	0.046
Subsolo	Duro	15	BAS_GSI_15	0.089
	Frágil	-	BAS_FRAGIL	0.0075

Tabela 7 - Condutividade hidráulica (K) atribuída aos materiais.

Fonte: os autores (2024).

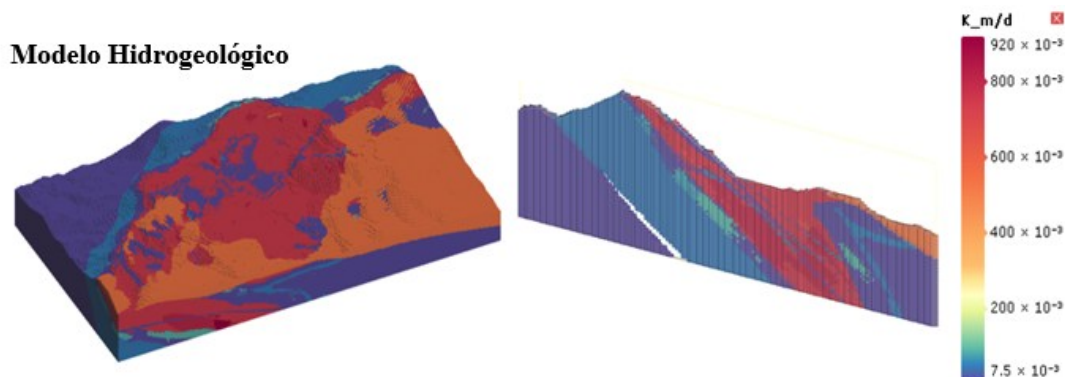


Figura 19 – Modelo hidrogeológico.

Fonte: os autores (2024).

### 3.8 Modelo Geotécnico

O modelo geotécnico foi desenvolvido por meio da integração de todos os modelos temáticos em um único ponto no espaço, representado pelo centróide do bloco. Para facilitar a aplicação do modelo em análises de estabilidade e considerando a utilidade computacional, foi aplicada uma simplificação ao modelo geomecânico a fim de reduzir o número de materiais. Antes dessa simplificação, o mesmo litotipo poderia apresentar até dez valores diferentes de GSI, resultando em dez materiais com parâmetros geotécnicos distintos. Após a simplificação, os valores de GSI foram reduzidos a três opções (75, 45 ou 15).

Um fluxograma ilustra a lógica computacional utilizada na integração do modelo (Figura 20), consolidando todas as informações necessárias em um único produto, o modelo de blocos (Figura 21). O modelo final resultou em dezesseis materiais, cada um com parâmetros geotécnicos distintos a serem utilizados nas análises de estabilidade (Figura 5F).

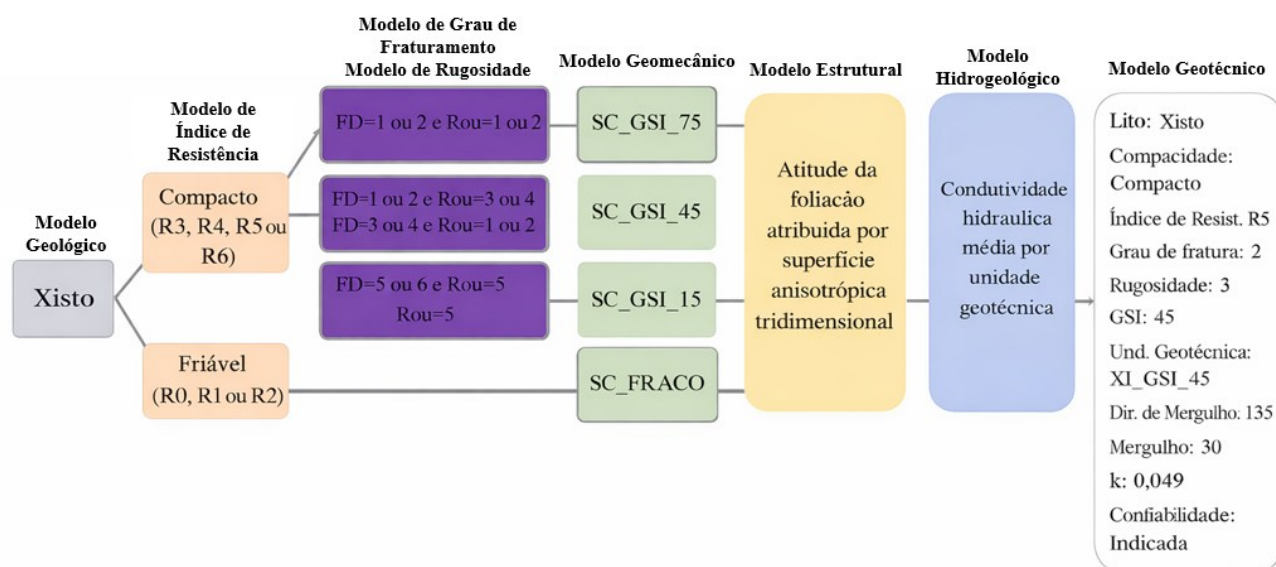


Figura 20 - Fluxograma exemplificando a lógica computacional utilizada para a integração dos modelos.  
Fonte: o autores (2024).

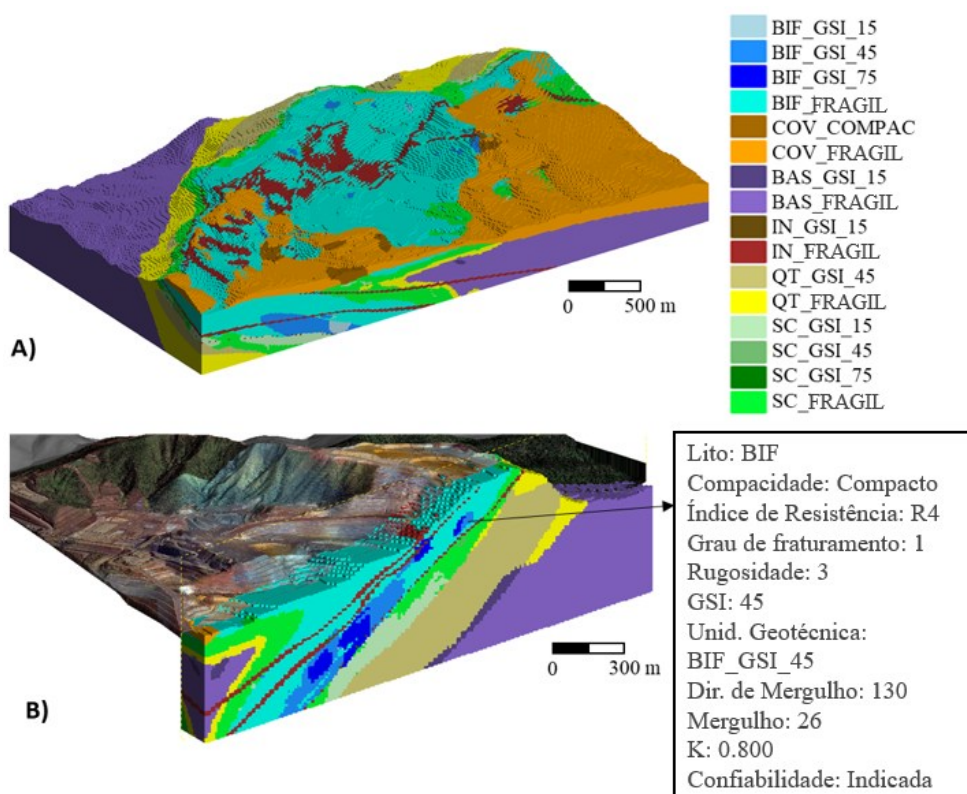


Figura 21 – A) Modelo geotécnico com todas as unidades geotécnicas.  
B) Seção do modelo e informações contidas em cada bloco.  
Fonte: autor (2024).

### 3.9 Confiabilidade das Informações Geotécnicas

A abordagem geoestatística permitiu a mensuração do erro de estimação e, conseqüentemente, a avaliação da confiabilidade atribuída aos blocos. Esse método é amplamente utilizado na classificação de recursos e reservas minerais, havendo diversos métodos disponíveis para definir critérios de classificação (ROSSI e DEUTSCH, 2013). A classificação da confiabilidade das informações geotécnicas estimadas para cada bloco em um modelo geotécnico representa uma inovação com grande potencial para otimizar investigações geotécnicas, pois permite identificar áreas com informações insuficientes e orientar planos de sondagem e levantamentos de campo.

Os critérios de classificação adotados foram a eficiência de krigagem (KE) (KRIGE, 1966) para blocos estimados por krigagem e a distância média (AvgD) para blocos interpolados pelo método do vizinho mais próximo. Com base nesse conceito, foi desenvolvida uma classificação de confiabilidade para o índice de resistência atribuído aos blocos. O índice de resistência foi selecionado por ser a variável mais relevante para a estabilidade dos taludes da mina, que são predominantemente escavados em rochas fracas. Os critérios de classificação adotados (Tabela 8) e os resultados obtidos (Figura 22) são apresentados.

Domínio	Critério	Classificação de Confiabilidade
Cobertura e Intrusão	$AvdD \leq 50m$	Medido
	$AvdD \leq 100m$	Indicado
	$AvdD > 100m$	Inferido
BIF e Xisto	$0.6 < KE \leq 1$	Medido
	$0.2 < KE \leq 0.6$	Indicado
	$KE \leq 0.2$	Inferido
Quartzito e subsolo	Escassez de amostras	Inferido

Table 8 – Critérios de classificação de confiabilidade.

Fonte: os autores (2024).

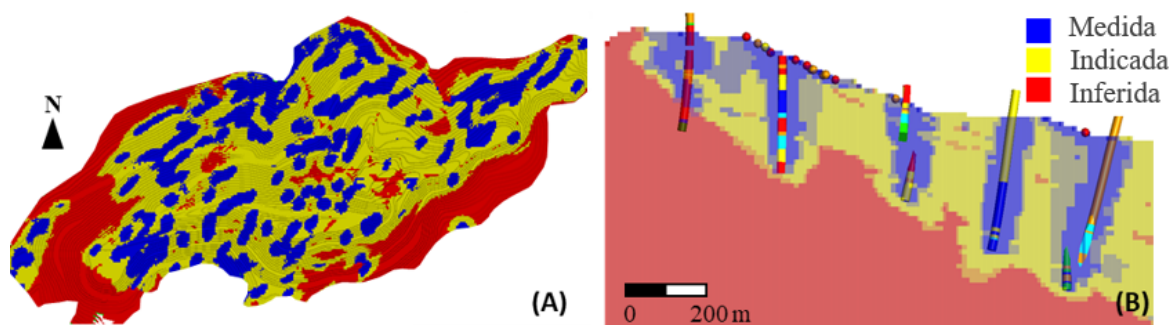


Figura 22 - A) Projeto de geometria da cava com previsão da confiabilidade dos dados geotécnicos. B) Seção do modelo de blocos com confiabilidade dos dados geotécnicos, pontos de mapeamento e furos de sondagem. Fonte: os autores (2024).

A metodologia proposta possibilita a integração de múltiplos modelos em um único produto. A integração de modelos tão complexos em uma estrutura sólida tridimensional seria praticamente inviável devido à criação de um número imenso de pequenos volumes e às exigências de armazenamento de formatos baseados em superfícies (resultando em arquivos muito grandes). Portanto, optou-se pela abordagem de modelo de blocos, pois ela permite atribuir múltiplas variáveis ao mesmo ponto, armazenando as informações em formatos de arquivo leves (csv, xls, dat, txt).

O modelo geotécnico desenvolvido é multidisciplinar e fornece informações valiosas para diversas equipes, incluindo engenheiros geotécnicos, geólogos, hidrogeólogos, planejadores de mina e equipes de perfuração. Em um projeto de lavra mineral, a maturidade do ativo evolui pelas seguintes fases: conceitual, pré-viabilidade, viabilidade, operação e

fechamento. Cada fase requer diferentes níveis de maturidade das informações para apoiar adequadamente a tomada de decisões.

A classificação de confiabilidade proposta para os blocos apresenta grande potencial, fornecendo um meio de quantificar a incerteza dos dados dentro dos projetos. Esses valores podem ser utilizados para avaliar a maturidade do projeto. Por exemplo, projetos conceituais e de longo prazo são mais flexíveis e podem tolerar uma porcentagem maior de blocos inferidos, enquanto projetos operacionais exigem maior precisão e confiabilidade dos dados. Assim, com base nos resultados obtidos e discutidos, a classificação de confiabilidade dentro da zona de influência do projeto é apresentada na Figura 23.

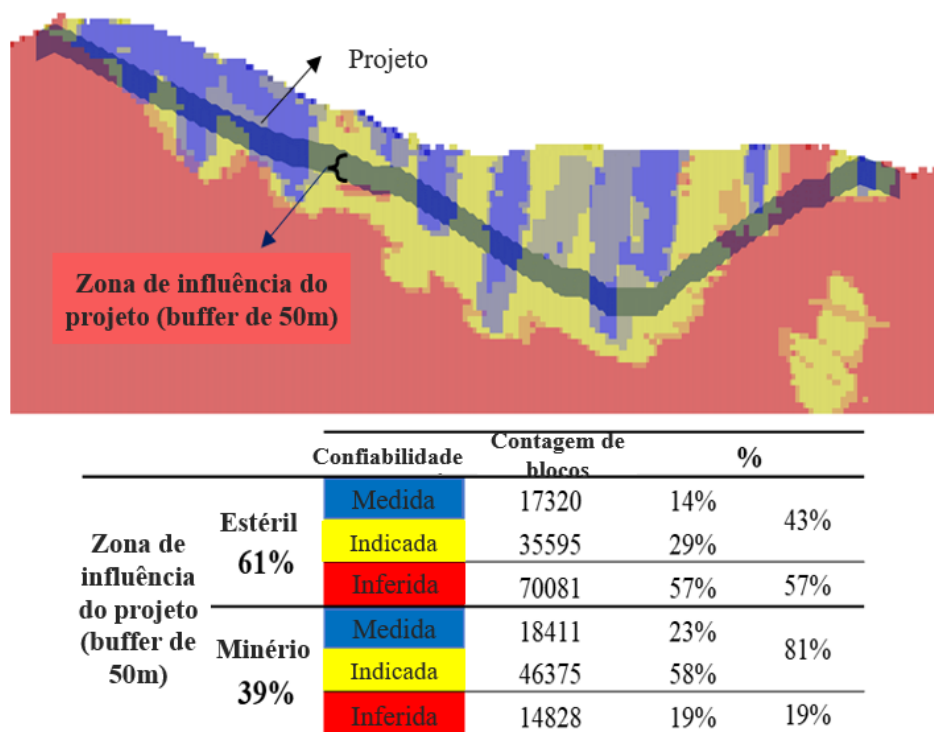


Figura 23 - Classificação de confiabilidade na zona de influência do projeto.  
Fonte: os autores (2024).

#### 4. Conclusões

Neste estudo, foi apresentada e validada uma metodologia integrada para a construção de um modelo geotécnico tridimensional aplicado à mineração a céu aberto, combinando técnicas de modelagem implícita com estimativas geoestatísticas em um framework de modelo de blocos. A abordagem proposta mostrou-se eficaz na integração dos modelos temáticos geológico, estrutural, geomecânico e hidrogeológico em um único produto coerente, adequado para análises de estabilidade de taludes e aplicações em planejamento de minas.

O uso sistemático de ferramentas geoestatísticas para modelar variáveis geotécnicas predominantemente categóricas, como índice de resistência e grau de fraturamento, constituiu uma contribuição central deste trabalho. Por meio da aplicação da krigagem por indicadores, apoiada por modelos variográficos consistentes com a geologia estrutural da mina, a subjetividade tradicionalmente associada à construção de modelos geotécnicos foi significativamente reduzida. As distribuições espaciais resultantes apresentaram forte coerência geológica, com direções de continuidade alinhadas às principais feições estruturais planas e lineares do depósito.

Além disso, foi incorporada uma classificação de confiabilidade das informações geotécnicas em escala de bloco, baseada na eficiência da krigagem e na distância de interpolação. Essa abordagem, amplamente utilizada na avaliação de recursos minerais, mas ainda incomum em modelagem geotécnica, permitiu a quantificação da incerteza dos dados. A

classificação de confiabilidade demonstrou ser uma ferramenta prática para identificar áreas com informações insuficientes, orientar futuras campanhas de sondagem e apoiar a tomada de decisão nas diferentes etapas de maturidade do projeto.

A aplicação da metodologia a uma grande mina de ferro a céu aberto demonstrou que, dentro da principal zona de influência para estabilidade de taludes (aproximadamente os primeiros 50 m da superfície do projeto), os maciços de estéril representavam a maior parte do material escavado. Entretanto, apenas 43% dos blocos de estéril foram classificados como medidos ou indicados, em comparação com 81% dos blocos de minério. Esse desequilíbrio indicou um desafio relevante em projetos geotécnicos de minas a céu aberto, já que a estabilidade dos taludes era predominantemente controlada pelo comportamento das rochas estéreis, que apresentavam menor densidade de dados e maior incerteza.

O modelo final de blocos geotécnicos, simplificado para um número gerenciável de unidades geotécnicas e classes de GSI, mostrou-se adequado para integração direta em análises tridimensionais de estabilidade. Além de apoiar o projeto geotécnico, o modelo forneceu informações relevantes para equipes multidisciplinares, incluindo planejamento de mina, hidrogeologia e sondagem, reforçando sua aplicabilidade ao longo de todo o ciclo de vida do projeto de mineração, desde estudos conceituais até decisões operacionais.

De forma geral, a metodologia proposta representou um avanço na caracterização quantitativa das condições geotécnicas em minas a céu aberto. Ao abordar explicitamente a incerteza e a confiabilidade das informações, contribuiu para o desenvolvimento de modelos geotécnicos mais transparentes, auditáveis e orientados ao risco. Como perspectivas futuras, indica-se que técnicas de simulação geoestatística possam ser incorporadas para permitir uma avaliação mais abrangente da incerteza, assim como a metodologia pode ser estendida para incluir feições estruturais adicionais e efeitos hidrogeológicos dependentes do tempo.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral (PPGEM) pelo apoio institucional ao desenvolvimento desta pesquisa. Agradecem também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro concedido.

## Referências

- Bieniawski, Z. T. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons; 1989.
- CRUZ, F. A. R. *Spatialization of intact rock parameter in block models using indicator kriging*. Master's Thesis, Federal University of Rio Grande do Sul. School of Engineering. Graduate Program in Mining, Metallurgical, and Materials Engineering, 2017.
- Deere, D. U. Geological considerations. *Rock Mechanics in Engineering Practice*, Stagg and Zienkiewicz, 1968.
- Hoek, E.; Brown, E. T. et al. *Hoek-Brown failure criterion*. 2002 edition. Proceedings of NARMS-Tac. 1(1):267-273, 2002.
- Hoek, E. Rock mass properties for underground mines. *Underground mining methods: engineering fundamentals and international case studies*. 2001;21.
- ISRM Commission on Testing Methods. *Suggested methods: rock characterization, testing and monitoring*. ISRM Commission on Testing Methods. Pergamon; 1981.
- KRIGE, D. G. A practical analysis of the effects of spatial structure and of data available and accessed, on conditional biases in ordinary kriging. In: Geostatistics Wollongong '96. Proceedings of the 5th International Geostatistical Congress, Wollongong, NSW, Australia. 1966:799-810.

- 
- KRING, K.; CHATTERJEE, S. Uncertainty quantification of structural and geotechnical parameter by geostatistical simulations applied to a stability analysis case study with limited exploration data. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 125:104157, 2020.
- LEAPFROG GEO. Version 2024.1. Wellington, New Zealand: Seequent (The Bentley Subsurface Company), 2024. Disponível em: <https://www.seequent.com/products-solutions/leapfrog-geo/>.
- Liu, F. et al. Geostatistics-block-based characterization of heterogeneous rock mass and its application on ultimate pit limit optimization: a case study. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 80(2):1683-1700, 2021.
- READ, J. R. L. Data gathering, interpretation, reliability and geotechnical models. In: *Slope Stability 2013: Proceedings of the 2013 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*. Australian Centre for Geomechanics. 2013:81-89.
- READ, J.; STACEY, P. *Guidelines for Open Pit Slope Design*. Clayton: CSIRO Publishing; 2009. p. 496. <https://doi.org/10.1071/9780643101104>.
- Rossi, M. E.; Deutsch, C. V. Mineral resource estimation. *Springer Science & Business Media*, 2013.
- Vatcher, J.; McKinnon, S. D.; Sjöberg, J. Developing 3-D mine-scale geomechanical models in complex geological environments, as applied to the Kiirunavaara Mine. *Engineering geology*. 203:140-150, 2016.