

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Construção de Modelo Geotécnico por meio de Estatística e Geoestatística

Leonardo Alberto Sala
Geólogo, Vale, Nova Lima-MG, Brasil, leonardo.sala@vale.com

Tatiana Barreto dos Santos
Professora efetiva, Departamento de Engenharia de Minas - UFOP, Ouro Preto-MG, Brasil,
tatiana.santos@ufop.edu.br

Cissa Lopes Lanna
Engenheira de Minas, Progen, Nova Lima-MG, Brasil, c0615473@vale.com

Alexandre Martins Ferreira
Engenheiro Civil, Vale, Nova Lima-MG, Brasil, alexandre.martins.ferreira@vale.com

Henrique Guimarães Pedrosa
Geólogo, Vale, Nova Lima-MG, Brasil, henrique.guimaraes.pedrosa@vale.com

RESUMO: O objetivo deste artigo é apresentar uma metodologia de construção de modelos temáticos por geoestatística e modelagem implícita, e posterior integração destes modelos para elaboração de um modelo geotécnico de blocos unificado, com informações de índice de resistência, grau de fraturamento, rugosidade, GSI (Hoek, 2001), anisotropia e condutividade hidráulica. Esta abordagem permitiu a classificação de confiabilidade da informação geotécnica atribuída aos blocos.

PALAVRAS-CHAVE: Geoestatística, Modelo Geotécnico, Estabilidade de Taludes, Geotecnia.

ABSTRACT: This paper aims to present a methodology to construct thematic models by geostatistics and implicit model, and later integration of these models to develop a unified geotechnical block model with information on strength index, fracture degree, roughness, GSI (Hoek, 2001), anisotropy and hydraulic conductivity. This approach allowed the reliability classification of the geotechnical information attributed to the blocks.

KEYWORDS: Geostatistics, Geotechnical Model, Slope Stability, Geotechnics.

1 Introdução

O conceito de modelo geotécnico em mineração a céu aberto consiste na elaboração de um produto que defina espacialmente domínios ou unidades de mesmo comportamento geotécnico, com a finalidade principal de subsidiar o dimensionamento dos taludes (*design sectors*).

Read & Stacey (2009) mostra que a construção de um modelo geotécnico deve ser feita a partir da união de outros quatro modelos. O modelo geológico deve conter os litotipos, o estrutural define as principais descontinuidades, o geomecânico contempla as classes geomecânicas e parâmetros geotécnicos, e o hidrogeológico define as unidades hidrogeológicas e seus respectivos parâmetros.

O grande desafio para construção do modelo geotécnico é unir em um produto único e tridimensional, quatro modelos complexos. Segundo Read & Stacey (2009), a construção do modelo geotécnico através da sobreposição de mapas, resulta em um mapa de domínios geotécnicos complexo e muito segmentado (Figura 1). Além disso, os autores também discorrem sobre a utilização de modelos de blocos como alternativa para simplificação do processo, mas sugerem cautela quanto à krigagem de notas providas da classificação geomecânica RMR (Bieniawski, 1989). As ressalvas se devem ao fato de o RMR ser composto por uma sobreposição de notas atribuídas qualitativamente à parâmetros individuais (resistência, fraturamento,

rugosidade) que nem sempre são efetivos para a delimitação de um domínio geotécnico, e pelo risco gerado pela escassez de dados, comprometendo a qualidade da estimativa.

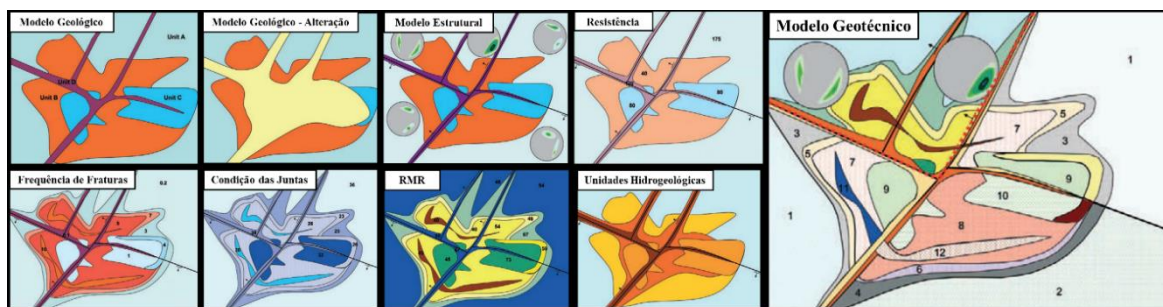


Figura 1. Sobreposição de oito mapas temáticos para elaboração de um modelo geotécnico bidimensional, modificado de Read & Stacey (2009).

Dentre os modelos necessários para construção do modelo geotécnico, o modelo geomecânico é o mais presente na rotina das equipes de geotecnia de mina. A construção de modelos geomecânicos nas minas à céu aberto é tradicionalmente feita através da interpretação bidimensional de dados de sondagem e mapeamento, projetados em uma seção vertical 2D. O volume de informações geotécnicas disponíveis em profundidade é geralmente menor que o volume de informações geológicas, principalmente em maciços rochosos de estéril. O grande distanciamento das informações faz com que o desenho das seções bidimensionais seja ainda mais interpretativo, contando essencialmente com a experiência do modelador.

Tais seções tem sido a principal fonte para a construção do modelo geomecânico tridimensional, que é a principal base para análises de estabilidade em softwares geotécnicos específicos, sejam baseadas no equilíbrio limite ou análises numéricas.

Essa metodologia tradicional não utiliza ferramentas estatísticas que possam auxiliar o modelador em sua interpretação e reduzir a subjetividade associada, de forma que não é possível medir o nível de confiabilidade das informações fornecidas pelo modelo final.

Técnicas geoestatísticas e de controle de qualidade são largamente utilizadas na construção de modelos geológicos, onde a confiabilidade da informação está diretamente ligada à valoração das empresas devido às declarações de recursos e reservas.

A metodologia de estimativa de massas e teores de minério com ferramentas geoestatísticas é obrigatória para cumprimento de normas internacionais de declaração de reservas, classificando as informações distribuídas no espaço como medido, indicado ou inferido.

O uso de tais ferramentas em geotecnia ainda não é usual para elaboração de relatórios de declaração de reservas em bolsas de valores internacionais, porém renomados consultores e auditores encorajam o aprofundamento em estudos sobre a quantificação e impactos da incerteza de dados (Read, 2013).

O grande desafio é determinar quais métodos de estimativa são aplicáveis às variáveis geotécnicas, que em sua maioria são categóricas e podem não apresentar grandes continuidades espaciais. Apesar das dificuldades associadas, a utilização de modelos de blocos tridimensionais (3D) com estimativas geoestatísticas vem sendo largamente discutida no meio técnico, como nos trabalhos de Hammah & Curran (2006), Vatcher et al. (2016), Kring & Chatterjee (2020) e Liu et al. (2021). Trata-se de um conhecimento que vem sendo construído há anos por pesquisadores e profissionais, principalmente na indústria do petróleo, porém ainda são escassos os trabalhos aplicados às escavações de mineração.

Os dados de maciços rochosos espacializados de forma tridimensional são utilizados para aprimorar o projeto de geometrias de cavas finais, tornando-as mais adequadas, com maior segurança operacional e maior aproveitamento dos recursos minerais.

Propondo o melhor entendimento das variáveis geotécnicas e a aplicação de técnicas geoestatísticas para a construção do modelo geotécnico, este artigo apresenta ferramentas estatísticas e geoestatísticas utilizadas na quantificação das incertezas e construção de um modelo geotécnico de uma mina de minério de ferro de grande porte, situada no Quadrilátero Ferrífero – MG.

2 Metodologia



A primeira etapa utilizada para elaboração do modelo foi de definição e validação do banco de dados utilizado. Trata-se de uma importante etapa do processo pois todos os produtos seguintes dependem da qualidade destas informações. Os dados utilizados podem ser provindos de descrições geológicas e geotécnicas de testemunhos de sondagem, como também de descrições de afloramentos nos trabalhos de mapeamento.

Uma vez definida a base de dados, é feita a análise exploratória destes dados com a finalidade de conhecer as distribuições estatísticas de cada variável, e verificar as possíveis correlações existentes entre as mesmas. As informações obtidas nesta etapa serão fundamentais para definição da estratégia de modelagem.

Para que sejam dispostas amostras uniformemente ao longo dos furos com descrição geotécnica, foi necessária a regularização (composite) dos intervalos. A seleção do espaçamento de regularização foi realizada com base na moda de tamanhos de intervalos descritos.

O modelo geológico foi elaborado através da técnica de modelagem implícita, seguindo os furos, pontos de mapeamento e mapa geológico de superfície. Esse modelo delimita tridimensionalmente as principais unidades estratigráficas presentes na mina, compostas majoritariamente por Quartzitos, Xistos, Formações Feríferas, rochas intrusivas e coberturas recentes.

O modelo estrutural foi elaborado a partir das medidas obtidas em superfície nos mapeamentos (foliações e bandamento composicional) e superfícies de contatos geológicos modelados em profundidade com a utilização das informações de sondagem. Também foram utilizados mapas estruturais regionais para auxiliar a identificação e interpretação das principais estruturas da mina. Desse produto foram obtidas as superfícies tridimensionais que definem as variações de atitude das foliações (superfícies anisotrópicas), e uma superfície de falha com potencial de condicionar rupturas planares (*weak layer*).

Dentre as informações geotécnicas disponíveis, foram utilizados para a elaboração do modelo geomecânico os dados de índice de resistência (ISRM, 1981), grau de fraturamento (Bieniawski, 1989), RQD (Deere, 1968) e rugosidade (Bieniawski, 1989). A partir dessas informações foram elaborados três modelos temáticos: modelo de resistências, modelo de grau de fraturamento e modelo de rugosidade.

Os sólidos do modelo geológico foram definidos como domínios geoestatísticos, uma vez que o comportamento reológico e intempérico varia de acordo com o litotipo e condicionam majoritariamente o comportamento das variáveis geotécnicas.

Para a construção do modelo de resistências foram utilizadas variáveis categóricas representando 7 faixas de resistências (R0 a R6), definidas a partir de descrições tátil-visuais como resistência ao risco e golpes de martelo (Tabela 1). Conforme sugerido por Cruz (2017), estes dados foram agrupados em dois subgrupos: friáveis (R0, R1 e R2) e compactos (R3, R4, R5 e R6). Os friáveis receberam o valor 1 e os compactos receberam o valor 0. Esta etapa foi necessária para elaborar o estudo variográfico e consequente estimativa por krigagem indicadora. Segundo Sinclair & Blackwell (2006) a krigagem dos indicadores é um procedimento de estimativa aplicado a variáveis binárias, codificadas em zeros e uns. A partir da transformação das amostras para um banco de dados categórico binário, é realizada a análise de continuidade espacial e consequentemente a estimativa por krigagem dos indicadores.

A classificação final do bloco foi definida como a maior probabilidade do ponto estimado. O modelo variográfico obtido a partir da variografia experimental de Friável (1) e Compacto (0) é apresentado na Figura 2 e foi aplicado às krigagens indicadoras individuais de cada um dos 7 índices de resistência. Os blocos não estimados receberam a atribuição do índice de resistência a partir de um modelo implícito binário, onde se compacto R5, se friável R1. O produto final obtido consiste em um modelo de blocos com informação sobre a compacidade (Friável ou Compacto), e sobre o índice de resistência do material (R0 a R6).

Tabela 1. Descrição do índice de resistência, ISRM (1981).

Índice de Resistência	Descrição	UCS (Mpa)	Transformação Binária
R6	Extremamente resistente	>250	0: Compacto
R5	Muito resistente	100 a 250	
R4	Resistente	50 a 100	
R3	Medianamente resistente	25 a 50	
R2	Pouco resistente	5 a 25	1: Friável
R1	Muito branda	1 a 5	

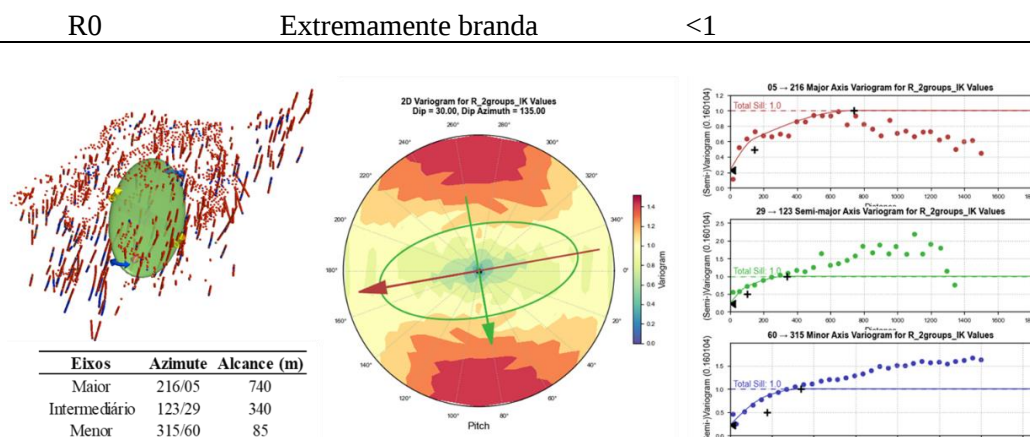


Figura 2. Variografia experimental dos dados binários de compactidade (0: Compacto, 1: Friável).

O modelo de grau de fraturamento também foi elaborado através de estimativa por krigagem indicadora, utilizado os 6 graus de fraturamento presentes no banco de dados (Tabela 2). A metodologia adotada consistiu em elaborar o modelo variográfico dos dados de RQD, visto que esta é uma variável contínua (0 a 100%) e na mina estudada apresenta forte correlação com o grau de fraturamento ($R^2=0.89$). Desta forma, o modelo variográfico pôde ser feito com uma maior quantidade de dados, gerando uma melhor compreensão da distribuição espacial do fenômeno. Portanto, foi assumido que a continuidade espacial do RQD é similar à continuidade espacial das categorias de grau de fraturamento. O banco de dados foi assinalado com as transformações binárias e, utilizando o modelo variográfico de RQD, estimou-se por krigagem indicadora a probabilidade máxima de cada bloco pertencer à um dos graus de fraturamento. Só foram estimados valores de grau de fraturamento para blocos classificados como compactos no modelo de resistência, visto que em rochas friáveis o comportamento do maciço está ligado principalmente à resistência da matriz.

Tabela 2. Descrição do grau de fraturamento, Bieniawski (1989).

Grau de Fraturamento	Descrição	Fraturas / Metro
1	Maciço	<1
2	Pouco fraturado	1
3	Moderadamente fraturado	2 a 5
4	Muito fraturado	6 a 10
5	Intensamente fraturado	11 a 20
6	Fragmentado	>20

Os dados de rugosidade (Tabela 3) presentes na base de dados são escassos e estão restritos às amostras compactas (índice de resistência $\geq R_2$). Devido à grande dispersão espacial das informações, não foi possível criar um modelo variográfico consistente, e por isso optou-se por fazer a estimativa das rugosidades por vizinho mais próximo, limitando as atribuições à 100m das amostras existentes. Os blocos não estimados foram carimbados com a moda de rugosidade de cada domínio geológico (Quartzitos, Xistos, Formações Feríferas e Intrusivas). O produto obtido foi um modelo de blocos com informações de rugosidade atribuídas às rochas compactas, respeitando os pontos amostrais disponíveis e a moda descrita em cada domínio geológico.

Tabela 3. Descrição da rugosidade das discontinuidades, Bieniawski (1989).

Rugosidade	Descrição
1	Extremamente rugosa
2	Rugosa
3	Levemente rugosa
4	Lisa
5	Estriada



Com o objetivo de se obter o modelo geomecânico, foi elaborada a união dos modelos temáticos (grau de fraturamento e rugosidade) através de uma adaptação da classificação geotécnica GSI – *Geological Strength Index* (Hoek, 2001). A classificação consiste na observação das condições geológicas do maciço (estrutura e condição das superfícies das descontinuidades), e por comparação com as situações ilustradas na tabela, seleciona-se o valor que melhor representa as condições observadas. Trata-se de um sistema empírico, rápido e confiável, baseado em simples inspeções visuais das condições geológicas. Para a elaboração de um modelo que possa ser utilizado em análises de estabilidade, optou-se pelo sistema GSI por ser o único sistema de classificação de maciço rochoso que visa fornecer diretamente os parâmetros de resistência, como os de Mohr-Coulomb ou de Hoek-Brown, ou módulos do maciço rochoso (Ferreira, 2008).

A adaptação do GSI proposta neste trabalho consiste em utilizar o grau de fraturamento para caracterizar a estrutura do maciço e a rugosidade para definir a condição da superfície das descontinuidades (Figura 3). Como o GSI é um método visual e empírico, não seria razoável detalhar o modelo a ponto de gerar diversos materiais com notas GSI diferentes. Por este motivo, propõe-se utilizar apenas 3 valores de GSI (75, 45 e 15) de modo a reduzir a multiplicidade de parâmetros geotécnicos a serem aplicados no modelo final.

GSI Adaptado		Rugosidade				
		Extremamente Rugosa	Rugosa	Levemente Rugosa	Lisa	Estriada
		1	2	3	4	5
Maciço	1	85	75	65	NA	NA
Pouco Fraturado	2	75	65	55	45	35
Moderadamente Fraturado	3	65	55	45	35	25
Muito Fraturado	4	55	45	35	25	15
Intensamente Fraturado	5	45	35	25	15	10
Fragmentado / Laminado	6	NA	NA	15	10	5

CONDIÇÃO DE SUPERFÍCIE

MUITO BOA
Superfície rugosa com interrupção

BOA
rugosa, ligeiramente alterada, altura de 1-2mm, pouco alinhamento duro

RAZO/AVEL
Levemente rugosa, moderadamente alterada, altura de 1-5mm, alinhamento médio

RUIM
Dura, lisa, pouco rugosa, altura de 5-10mm, pouco alinhamento

MUITO RUIM
Superfície extremamente lisa

DECRESCIMO DA QUALIDADE DA SUPERFÍCIE

ESTRUTURA DO MACIÇO

INTACTA OU COMPACTA – Ausência completa de foliação e poucas descontinuidades largamente espaçadas

ESPAÇADAMENTE FOLIADA – Parcialmente fraturada, predominância de intervalos maciços sobre intervalos foliados

MODERADAMENTE FOLIADA – Maciço rochoso formado por intervalos compactos e foliados em proporções similares

FOLIADA – Maciço rochoso dobrado e/ou fraturado, com intervalos maciços ocasional

MUITO FOLIADA – Maciço rochoso dobrado e/ou altamente fraturado, formado por somente por rochas foliadas

FRATURADO/CISALHADO – Muito dobrado e muito fraturado, maciço rochoso tectonicamente perturbado

DECRESCIMO INTERFATAMENTO DOS BLOCOS DE ROCHA

Hock (2001)

Figura 3. Esquerda: classificação GSI para rochas metamórficas (Hoek, 2001). Direita: proposta de adaptação do GSI para aplicação no modelo geomecânico deste trabalho.

Por fim, através da definição de intervalos de valores de eficiência de krigagem (Krig, 1996) atribuídos aos blocos estimados foi possível classificar a confiabilidade das informações geotécnicas. Foram criadas três classes, seguindo o padrão de nomenclatura tradicionalmente utilizado na classificação de recursos minerais: medido, indicado e inferido. Esta classificação evidencia as regiões com carência de dados, auxilia na programação de novas investigações, e é fundamental para a definição da malha de sondagem ótima para geotecnia.

3 Estudo de Caso

A mina selecionada para aplicação da metodologia proposta está situada na porção noroeste do Quadrilátero Ferrífero. Trata-se de uma mina de minério de ferro a céu aberto. Os litotipos dominantes nas unidades estratigráficas da mina são: embasamento (xistos e granitos indivisos), quartzito, xisto, formação ferrífera bandada (BIF), intrusivas (diabásios e gabros) e cobertura (bacias quaternárias e cangas). Estas unidades são condicionantes das variáveis geotécnicas, e por este motivo foram utilizadas como domínios geoestatísticos.

A base de dados utilizada contou com 944 pontos de mapeamento de superfície e 67 mil metros de sondagem com descrição geotécnica dos testemunhos. Os intervalos de sondagem foram regularizados em intervalos de 5m (moda dos comprimentos de intervalos descritos), resultando em cerca de 20 mil pontos amostrais. Ao todo, foram utilizados 21975 pontos amostrais na construção dos modelos.



Em regiões do modelo onde não haviam amostras disponíveis a atribuição dos valores se deu por meio de modelagem implícita, com lentes orientadas conforme os elipsóides de busca de cada fenômeno modelado. A Tabela 4 resume a estratégia de modelagem utilizada em cada um dos modelos individuais produzidos. A Figura 4 exemplifica a sequência utilizada para integração dos modelos e classificação de cada um dos blocos do modelo geotécnico final.

Tabela 4. Método de modelagem aplicado a cada um dos modelos individuais.

Modelo	Variografia	Domínio	Método de atribuição
Geológico	Não aplicada	Todos	Modelo Implícito
Resistências	Dados binários (Compacto:0, Friável:1). Mesmo modelo variográfico para estimativa dos 7 índices de resistência.	Cobertura	Vizinho mais próximo
		Intrusiva	Vizinho mais próximo + Modelo implícito
		Formação Ferrífera	Krigagem Indicadora + Modelo implícito
		Xisto	Krigagem Indicadora + Modelo implícito
		Quartzito	Modelo Implícito
Grau de Fraturamento	Dados ordinais de RQD (0 a 100). Mesmo modelo variográfico utilizado nos 6 graus de fraturamento. Aplicável apenas a blocos classificados como compactos.	Embasamento	Modelo Implícito
		Cobertura	Não aplicável
		Intrusiva	Valor modal
		Formação Ferrífera	Krigagem Indicadora + Modelo implícito
		Xisto	Krigagem Indicadora + Modelo implícito
Rugosidade	Dados insuficientes para variografia.	Quartzito	Valor modal
		Embasamento	Valor modal
Geomecânico	Não aplicada	Todos, exceto cobertura	Vizinho mais próximo (limitado a distância média de 100m) + Valor Modal por litotipo
Estrutural	Não aplicada	Todos	Sobreposição dos modelos e atribuição segundo GSI adaptado
		Todos, exceto cobertura	Superfícies anisotrópicas por modelagem implícita, respeitando os contatos entre os domínios geológicos. Atitude carimbada nos blocos por vizinho mais próximo, respeitando a triangulação das superfícies.
Hidrogeológico	Não aplicada	Todos	Condutividade hidráulica média de cada litotipo

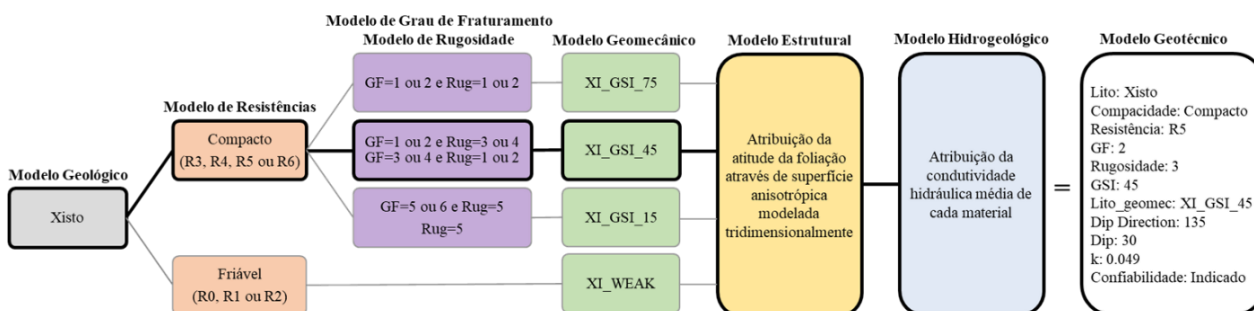


Figura 4. Exemplo de classificação de um bloco utilizando todos os modelos produzidos.

Uma das principais funções do modelo geotécnico é integrar as informações necessárias para o dimensionamento das escavações da mina e análise de estabilidade das geometrias de lavra. Esta integração de modelos complexos só foi possível devido à versatilidade do modelo de blocos, que permite a atribuição de diversas variáveis para um único ponto no espaço, representado pelo centróide do bloco. Recentemente, alguns softwares comerciais desenvolveram ferramentas que permitem a importação de modelos de blocos para desenvolvimento de análises de estabilidade tridimensionais. Também é possível importar superfícies



tridimensionais para orientar a anisotropia de resistência dos materiais (superfícies anisotrópicas), superfícies de planos de falha com potencial de condicionar instabilidades (weak layer), além da superfície de nível de água. Os critérios de ruptura e parâmetros geotécnicos podem ser atribuídos manualmente no software de análise, de acordo com as informações disponibilizadas no modelo geotécnico de blocos. A Figura 5 ilustra os modelos individuais produzidos e a integração destes para a elaboração da análise de estabilidade de estabilidade tridimensional, apresentada em detalhes em Lanna et al. (em publicação).

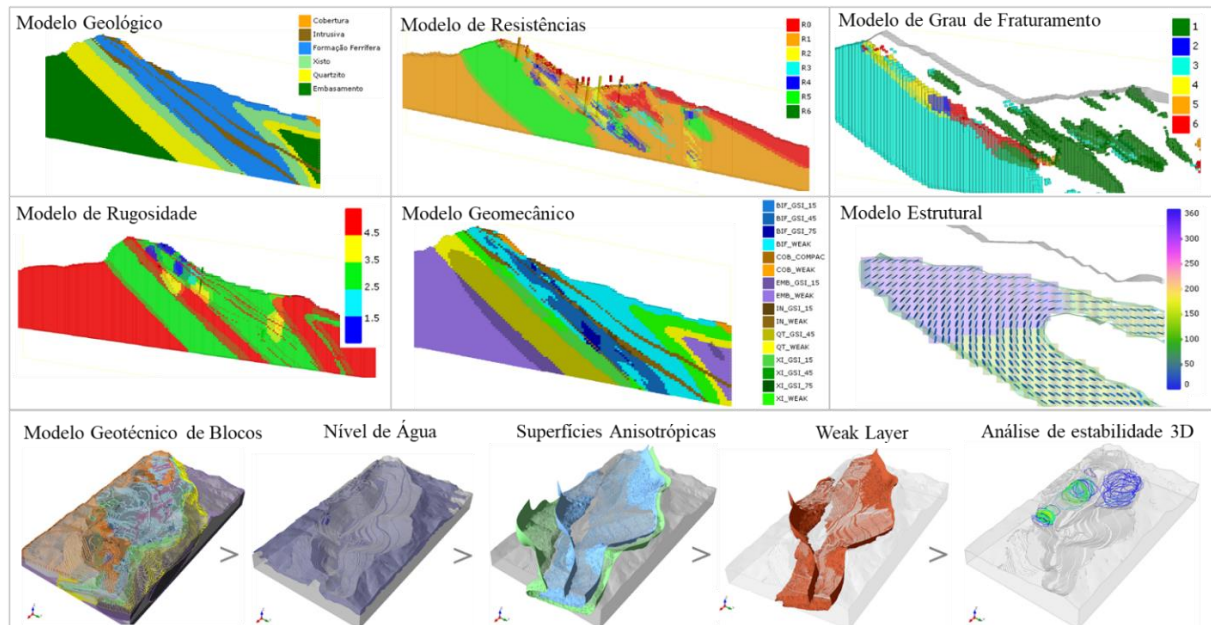


Figura 5. Seções dos modelos de blocos produzidos e fluxo de importação dos produtos para elaboração de análise de estabilidade 3D utilizando modelo de blocos e superfícies.

Com os modelos elaborados, foi possível medir o erro da estimativa e consequentemente, a confiabilidade da informação atribuída ao bloco. Esta abordagem é amplamente utilizada em classificação de recursos e reservas minerais, e existem diversos métodos para definição dos critérios de classificação (Yamamoto, 2001). Seguindo este conceito, elaborou-se a classificação da confiabilidade das informações de resistência atribuídas aos blocos. A opção pela resistência se deve ao fato de ser a informação mais relevante para a estabilidade dos taludes da mina, por serem majoritariamente escavados em rochas friáveis. O resultado e os critérios adotados para a classificação é apresentado na Figura 6.

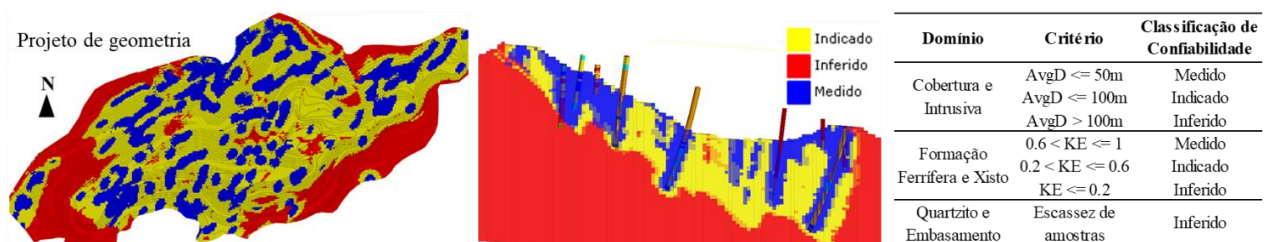


Figura 6. Classificação de confiabilidade da informação geotécnica atribuída ao bloco. AvgD: Distância média das amostras; KE: Eficiência de krigagem (Krige, 1996).

3 Conclusão

A metodologia proposta se mostrou eficaz para aplicação a um estudo de caso real. Os modelos individuais produzidos e a integração destes é condizente às recomendações de Read & Stacey (2009), e apresentaram bons resultados ao serem utilizados na elaboração de uma análise de estabilidade 3D de uma geometria de cava de reserva, apresentada em Lanna et al. (em publicação). Além disso, a classificação de confiabilidade das informações representa um grande potencial para trabalhos futuros, visto que indica as



regiões da geometria que necessitam de mais sondagens e/ou mapeamento. Esta abordagem permite inclusive a definição de uma malha ótima de sondagem para investigações geotécnicas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao colegas da Gerência de Geomecânica e Hidrogeologia da Vale e ao constante apoio e incentivo dos familiares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.
- Cruz, F. (2017). *Espacialização de parâmetro de rocha intacta em modelos de blocos utilizando krigagem da indicatriz*. 2017 (Doctoral dissertation, Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul).
- Deere, D. U. (1968). Geological considerations. *Rock Mechanics in Engineering Practice*, Stagg and Zienkiewicz. London, 20p.
- Ferreira, A. M. (2008). *Modelagem computacional dos realces de lavra da mina Cuiabá, com vista ao dimensionamento da malha de cabos de contenção*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 213 p.
- Hammah, R. E., & Curran, J. H. (2006). Geostatistics in geotechnical engineering: Fad or empowering?. In *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*, 5p.
- Hoek, E. (2001). Rock mass properties for underground mines. *Underground mining methods: engineering fundamentals and international case studies*, 21p.
- ISRM, R. C. (1981). *Testing and Monitoring, ISRM Suggested Methods*, Ed. ET Brown Pergamon Press.
- Krige, D. G. (1996). 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 (pp. 799-810).
- Kring, K., & Chatterjee, S. (2020). 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.
- Lanna, C. L, Sala, L. A., Ferreira, A. M., Pedrosa, H. G. (em publicação). *Análise de Estabilidade Tridimensional em Cavas de Mineração de Ferrosos a partir de Modelo de Blocos Geotécnico*. Submetido para publicação.
- Liu, F., Yang, T., Deng, W., Zhou, J., & Li, J. (2021). 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.
- Read, J., & Stacey, P. (2009). *Guidelines for open pit slope design*.
- Read, J. R. L. (2013). Data gathering, interpretation, reliability and geotechnical models. In *Proceedings of the 2013 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering* (pp. 81-89). Australian Centre for Geomechanics.
- Sinclair, A. J., & Blackwell, G. H. (2006). *Applied mineral inventory estimation*. Cambridge University Press.
- Vatcher, J., McKinnon, S. D., & Sjöberg, J. (2016). Developing 3-D mine-scale geomechanical models in complex geological environments, as applied to the Kiirunavaara Mine. *Engineering geology*, 203, 140-150.
- Yamamoto, J. K. (2001). *Avaliação e classificação de reservas minerais* (Vol. 38). Edusp.