

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

Elaboração de Modelo Geomecânico a partir da estimativa de multiparâmetros. Estudo de caso: Mina Pilar, Minas Gerais, Brasil.

Michele Márcia de Souza

Engenheira Geotécnica, Santa Bárbara, Brasil, michelesouzaeg@gmail.com

Hugo Leonardo de Avila Gomes

Geólogo Geoestatístico, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil, hugo.gomes@jaguarmining.com.br

Tiago Pedro de Souza

Especialista em Geologia, Jaguar Mining, Santa Bárbara, Brasil, tiago.pedro@jaguarmining.com.br

Sávio de Oliveira Viana Ribeiro

Engenheiro Geotécnico, Jaguar Mining, Santa Bárbara, Brasil, savio.ribeiro@jaguarmining.com.br

RESUMO: Problemas geotécnicos associados a incertezas e limitação de informações a respeito das características geomecânicas do maciço rochoso em profundidade, tem levado as empresas a investirem na aplicação de técnicas de modelagem geológica em modelos geomecânicos tridimensionais, afim de se obter informações diferenciadas sobre a qualidade dos maciços rochosos. Na mina subterrânea Pilar, de propriedade da empresa Jaguar Mining Inc, foi desenvolvido um modelo geomecânico tridimensional, com base no sistema de classificação geomecânica Q (Barton *et al* 1974). Os dados foram obtidos por meio de descrições geotécnicas dos furos de sondagem e mapeamentos em subsolo. Os parâmetros Jr, Ja, Jn, Jw, SRF e RQD foram estimados separadamente e os valores de Q calculados bloco a bloco para classificação do maciço.

PALAVRAS-CHAVE: Modelo Geomecânico 3D, Classificação Geomecânica, Mina Pilar, Jaguar Mining.

ABSTRACT: Geotechnical problems related to uncertainties and limited data regarding geomechanical characteristics of rock masses underground have led companies to invest in the application of geological modelling techniques in tridimensional geomechanical models, aiming to obtain varied information on rock mass quality. In Pilar underground mine, owned by Jaguar Mining Inc., a tridimensional geomechanical model was developed based upon Q system (Barton et al 1974). Data have been obtained from geotechnical core logging and underground mapping. The parameters Jr, Ja, Jn, Jw, SRF and RQD were estimated separately and Q values were calculated block by block for rock mass classification.

KEYWORDS: 3D Geomechanical models, rock mass classifications, Pilar Mine, Jaguar Mining, geostatistics.

1 Introdução

As obras subterrâneas assim como as obras geotécnicas de forma geral, encontram-se expostas a fatores que apresentam variabilidade intrínseca à sua natureza, assim como incertezas ao longo da elaboração do projeto e execução dos trabalhos. Como exemplo cita-se a geologia e as dificuldades de previsão da qualidade dos maciços rochosos, acarretando assim, em riscos e problemas geotécnicos identificados somente quando há exposição do minério, juntamente com suas rochas encaixantes.

Como forma de prever, reduzir e mitigar os problemas associados à qualidade geomecânica dos maciços rochosos, surge então a aplicação de técnicas de modelagem geológica em modelos geomecânicos tridimensionais, afim de se obter informações diferenciadas sobre a qualidade dos maciços rochosos.



O conhecimento das propriedades do maciço rochoso e suas descontinuidades é feito através do uso de sistemas de classificações geomecânicas, associados a ensaios laboratoriais. Embora tenham sido desenvolvidas a partir de estudos de casos da engenharia civil (Fabricio *et al* 2015), ao longo dos últimos anos, os métodos de classificação sofreram aprimorações, adequando-se a empreendimentos mineiros (Bieniawski, 1989).

O presente trabalho tem por objetivo geral a elaboração de um modelo geomecânico tridimensional para a mina Pilar, de propriedade da Jaguar Mining Inc., de forma que o mesmo consiga representar a qualidade geomecânica do maciço rochoso, nas áreas já escavadas, além de estimar essa mesma informação em profundidade, auxiliando no conhecimento da distribuição espacial das características geomecânicas do depósito, permitindo avaliar também, através da estimativa dos multiparâmetros do sistema de classificação Q (Barton *et al* 1974), qual o parâmetro responsável por impactar positiva ou negativamente na qualidade final do maciço rochoso da mina Pilar.

2 Conceitos Chaves

2.1 Classificações Geomecânicas

É corriqueiro a pouca ou até mesmo a falta de informação quando se está na fase de viabilização de um projeto, ou desenvolvimento de um novo subnível (no caso das minerações subterrâneas). Sendo assim, o uso dos sistemas de classificações geomecânicas podem se tornar uma boa ferramenta para estimar a qualidade do maciço rochoso e suas descontinuidades singulares, uma vez que se trata de uma forma simples de obtenção de dados.

Esses sistemas de classificação caracterizam o maciço através de observações de um conjunto de propriedades, tendo como objetivo final sintetizar um conjunto de fatores responsáveis por contribuir para mudanças no comportamento do maciço, em classes, podendo até mesmo associa-las a um padrão de comportamento pré-definido (Souza, 2019).

Essa forma de abordagem empírica existe a mais de 100 anos (Hoek *et al*, 1995) e vem sofrendo diversas alterações e melhorias ao longo dos anos, uma vez que estão sempre associadas a estudos de casos. Dentre as diversas classificações existentes, destacam-se a metodologia desenvolvida por Bieniawski (1989), que corresponde ao RMR (*Rock Mass Rating*), juntamente com o sistema Q (*Rock Tunnel Quality*) proposto por Barton *et al* (1974) e o GSI (*Geological Strength Index*) introduzido por Hoek (1994) e Hoek *et al* (1995). Para o modelo geomecânico da mina Pilar optou-se por utilizar o sistema de classificação Q, melhor descrito a seguir.

O sistema Q, também conhecido como *Rock Tunnel Quality*, corresponde a uma classificação desenvolvida por Barton e demais colaboradores em 1974. A mesma atribui peso a seis parâmetros do maciço, obtendo no final, um valor numérico que varia em escala logarítmica de 0.001 a 1.000, fazendo uso da seguinte equação (1):

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \cdot \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \cdot \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \quad (1)$$

Sendo RQD a designação da qualidade das rochas, J_n número de famílias de descontinuidades, J_r influência da rugosidade das paredes das descontinuidades, J_a influência da alteração das paredes das descontinuidades, J_w influência da água subterrânea e SRF índice de influência do estado de tensões no maciço.

Um ponto importante dessa classificação, é que a mesma não considera de forma direta a influência da orientação descontinuidades nem a resistência da rocha intacta, como a classificação RMR. Porém, segundo Hoek *et al*. (1995) os parâmetros J_n , J_r e J_a desempenham um papel mais importante do que a orientação, uma vez que os mesmos determinam o grau de liberdade para a movimentação dos blocos (Souza, 2019).



2.2 Geoestatística

Os investimentos e o planejamento econômico e operacional na mineração requerem o entendimento, quantificação e avaliação de riscos na determinação de teores e tonelagens de minério. A geoestatística proporciona as ferramentas necessárias para essa determinação através de estimativas que utilizam adaptações das técnicas clássicas de regressão. Porém, não apenas para definição de teores e tonelagens pode e deve ser usada a geoestatística. A geoestatística consiste num conjunto de técnicas estatísticas utilizadas para analisar e estimar valores de quaisquer variáveis fisicamente correlacionadas e que são distribuídas no espaço e no tempo, como acontece na maioria dos dados de geociências. Dessa forma, a mesma torna-se aplicável não somente a modelos geológicos, mais sim a outras diversas situações, como é o caso do modelo geomecânico desenvolvido no presente trabalho.

Os métodos de Krigagem e Vizinho Mais Próximo foram os utilizados no desenvolvimento do modelo geomecânico da mina Pilar, sendo os mesmos descritos de forma sucinta a seguir.

O algoritmo do vizinho mais próximo é um método não paramétrico usado para classificação ou regressão. O resultado encontrado depende de qual tipo de cálculo desejado.

No caso de classificação, o resultado será uma definição da classe a que pertence o ponto desconhecido. Essa classe pode ser a classe mais comum entre os vizinhos mais próximos ou simplesmente atribuído à classe do único vizinho mais próximo.

No caso de regressão, o resultado será um valor atribuído que corresponde à média dos valores dos vizinhos mais próximos.

As técnicas de geoestatística procuram extrair, de uma aparente aleatoriedade dos dados coletados, as características estruturais probabilísticas do fenômeno regionalizado, ou seja, uma função de correlação entre os valores situados numa determinada vizinhança e direção no espaço amostrado. O método de estimativa básico utilizado é o da Krigagem (Fabricio et al., 2015).

Segundo Isaaks & Srivastava (1989), a estimativa por Krigagem está associada à abreviatura *BLUE* (*Best linear unbiased estimation*): *linear*, porque a estimativa é resultado de uma combinação linear dos pesos atribuídos às amostras vizinhas; *unbiased* (não enviesada), porque a média do erro da estimativa é zero, ou seja, é um estimador não tendencioso, e *Best* (melhor), porque minimiza a variância de estimativa dos erros, produzindo uma boa estimativa. A estimativa de Krigagem e a variância de estimativa são calculadas utilizando o modelo de covariância (ou variograma) obtidos no estudo da continuidade espacial (variografia).

A krigagem é um estimador linear a partir da informação disponível, onde temos $z(u)$ posições desconhecidas e dados nas posições $z(u_\alpha)$ como realizações da variável regionalizada em estudo (equação 2).

$$Z^*(u) - m(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_\alpha(u) [Z(u_\alpha) - m(u_\alpha)] \quad (2)$$

Sendo $Z^*(u)$ correspondente a um valor estimado; $m(u)$ se refere a média do atributo $z(u)$ e $\lambda_\alpha(u)$ igual aos pesos a serem estimados.

3 Estudo de Caso

3.1 Localização da área de estudo

O estudo de caso apresentado neste trabalho foi desenvolvido na mina Pilar, que faz parte do Complexo de Mineração Caeté (CCA), juntamente com a mina de Roça Grande. Ambas pertencem à Jaguar Mining Inc, e representam minerações subterrâneas que utilizam uma combinação de métodos de mineração tipo corte e preenchimento mecanizados e de realce em subníveis. A mina Pilar está localizada próximo da cidade de Santa e acerca de 70 quilômetros a leste da cidade de Belo Horizonte (Figura 1).

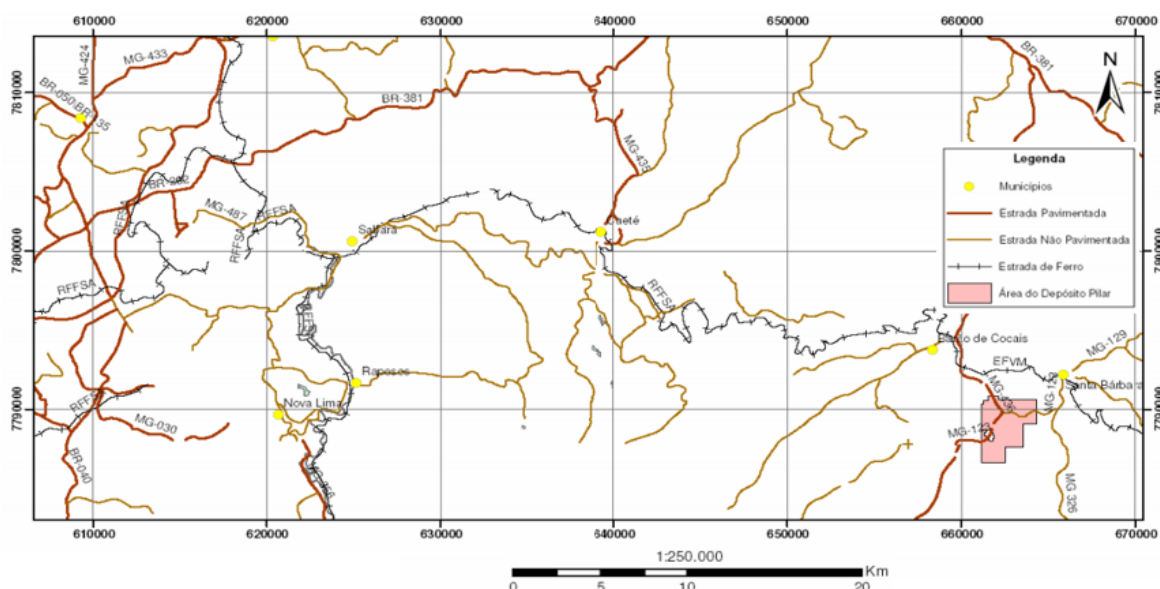


Figura 1. Mapa de localização da Mina Jaguar. Modificado de Silva (2007).

3.2 Contexto Geológico e Estrutural

A Mina Pilar está inserida dentro do contexto geotectônico do Cráton São Francisco, mais precisamente na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero (QF). A jazida se hospeda nas rochas do Supergrupo Rio das Velhas de idade Arqueana definido por Schorcher (1979) como uma sequência *greenstone belt*.

Neste cenário, o depósito se situa numa sequência metavulcano sedimentar intensamente hidrotermalizada e deformada em fácies xisto verde, composta principalmente de xistos de natureza máfica a intermediária, formações ferríferas (BIFs) do tipo Algoma e xistos carbonosos, atribuída ao Grupo Nova Lima.

O contato entre as BIFs e os xistos carbonosos é bem evidenciado em campo, sendo possível identificar a presença do xisto carbonoso por meio de lentes dentro da formação ferrífera. Entretanto, sua maior ocorrência está a *hangingwall* das dobras, impactando diretamente na estabilidade dos *stopes* de lavra (Figura 2).

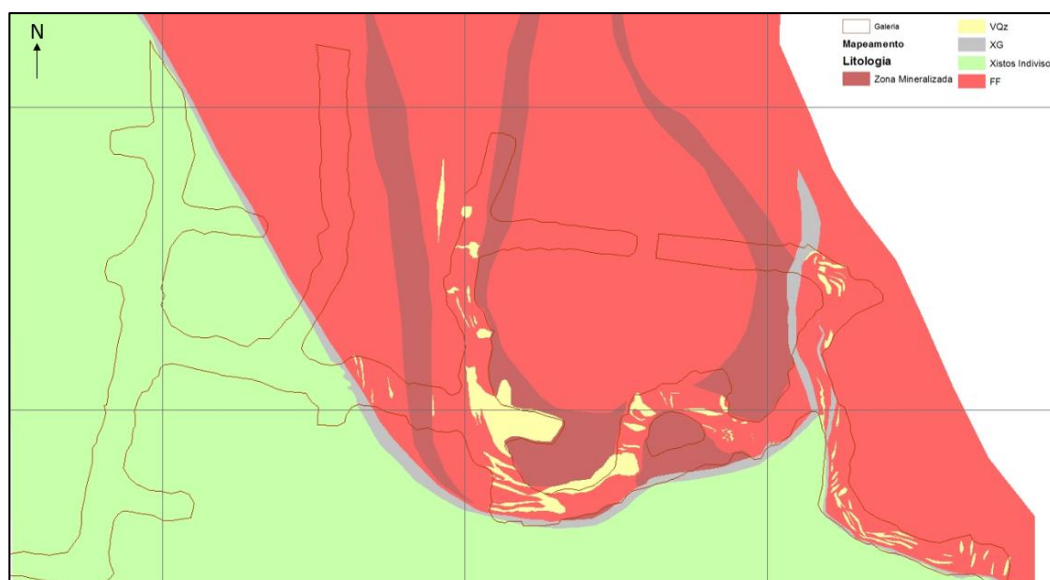


Figura 2. Mapa Geológico do nível doze. Destaca-se em vermelho a ocorrência da BIF e em cinza a presença dos xistos carbonosos.



Já em termos estruturais, o arcabouço estrutural regional indica que as rochas se dispõem em sequência estratigráfica invertida e que são afetadas por vários eventos deformacionais que compreendem dobramentos e falhamentos diversos. A leste e oeste da mina são observados dois dos principais sistemas de falhamentos do QF, o sistema de falhas da Água Quente e o sistema de falhas Fundão-Cambotas, respectivamente.

As deformações finitas indicam que o maciço foi afetado por, no mínimo, três eventos de dobramentos, apresentando eixos mergulhando para SE, discerníveis em escala local. O último evento considerado, e que define a geometria final do depósito, foi responsável por uma zona de cisalhamento reversa que afeta as rochas em direção NS, provocou as rotações dos eixos de dobras, gerou clivagem plano axial Sn+1 e gerou todo encurtamento superficial. Acreditasse que este evento foi deflagrado sobre condições transpressivas em regime dúctil-rúptil.

3.3 Caracterização Geomecânica do Maciço Rochoso

A caracterização geomecânica do maciço rochoso da mina Pilar foi obtida a partir de mapeamentos geológico-geomecânicos realizados ao longo dos acessos da mina (desenvolvimentos produtivos, improdutos e rampa principal), que inclui a caracterização das litologias existentes (com enfoque para os contatos entre a formação ferrífera e o xisto carbonoso), levantamento das feições estruturais e obtenção dos parâmetros necessários para classificar o maciço conforme as classificações propostas por Bieniawski (1989) e Barton *et al* (1974), ou seja, sistemas RMR e Q, respectivamente.

A dinâmica do trabalho de mapeamento é feita através da definição dos intervalos/trechos a serem mapeados, sendo os mesmos realizados por meio de “janelas” amostrais, com dimensões de aproximadamente cinco metros de comprimento. A mudança no contexto geológico e/ou geomecânico é o responsável pelo posicionamento das janelas amostrais. Não tendo variações, as mesmas são espaçadas a cada vinte metros, aproximadamente.

Regiões próximas ao contato entre formação ferrífera e xisto carbonoso são melhor detalhadas, uma vez que as características geomecânicas entre essas duas litologias são bem distintas. Nestes trechos são feitos pontos/janelas amostrais tanto no *footwall* quanto no *hangingwall* dos desenvolvimentos.

Juntamente dos mapeamentos faz-se também as descrições geotécnicas dos furos de sondagem, tendo como objetivo a previsibilidade da qualidade geomecânica do maciço em regiões ainda não desenvolvidas (Figura 3).

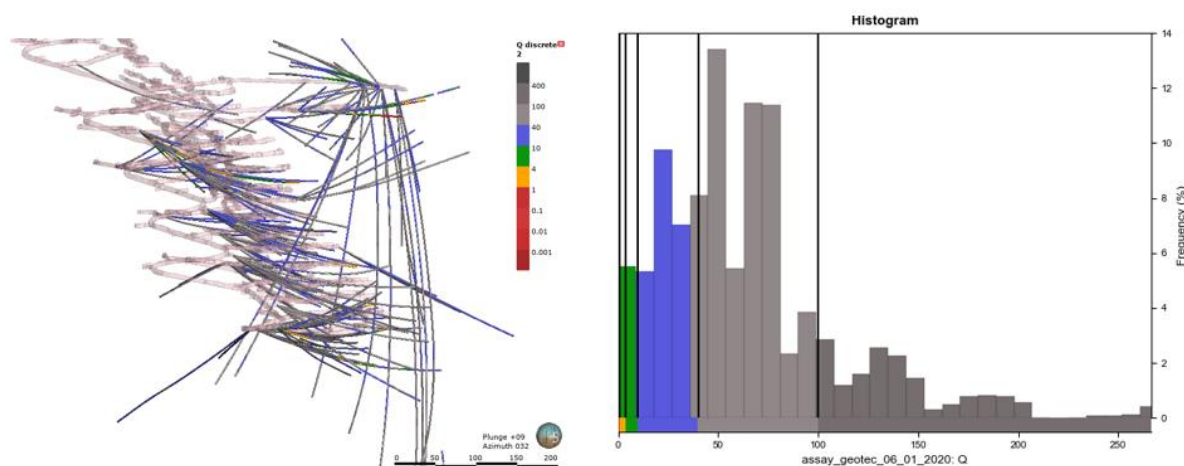


Figura 3. Sondagens e histograma indicando a maior ocorrência de maciço de boa qualidade geomecânica.

3.4 Elaboração do Modelo de Blocos Geomecânico

De acordo com as características da mina Pilar, o modelo foi dividido em 3 subdomínios definidos por grupos litológicos de características geomecânicas bem distintas e características.

O primeiro domínio, e o principal deles, é das formações ferríferas que hospedam a mineralização. Este domínio possui, na maioria das vezes, melhor comportamento geomecânico, porém pode apresentar estruturas e passagens de xistos que pode comprometer sua qualidade.



O segundo domínio é composto pelos xistos indivisos, que possuem menor resistência, se comparados a BIF e ocorrem em contato com as mesmas, o que pode acarretar problemas de estabilidade no momento das escavações.

O terceiro, e não menos importante domínio, é o do talco xisto. Possuem pouca ou nenhuma estabilidade a depender das escavações e precisam ser o quanto antes previstos para se programar diferentes contenções ou até mesmo, planejar mudanças no projeto.

A construção do modelo foi baseada nos dados de furos de sondagem e mapeamentos. Estes dados foram importados para o *software MineSight*. Para efeito de regularização do suporte amostral, foram criadas compostas com 0,50 metros de comprimento nos furos e as amostras pontuais de mapeamento foram consideradas como compostas também de 0,50 metros. Esse comprimento foi definido por ser a moda da população que compõe o banco de dados.

Depois de regularizadas as amostras elas foram codificadas dentro dos domínios a que pertencem, definidos pelos sólidos do modelo litológico da mina Pilar (Figura 4a). Dessa forma, amostras localizadas em um domínio não participam da estimativa de outro domínio, evitando aumento ou diminuição relativa da competência do maciço rochoso.

Foi construído o modelo de blocos 3D com dimensões 2x2x4, considerando as dimensões da galeria e avanços na mina que são 4x4,5m e 3m, respectivamente. O modelo de blocos também foi codificado com os sólidos do modelo litológico para separar os domínios de estimativa.

Para estimativa dos parâmetros, optou-se por utilizar o Método do Vizinho Mais Próximo para se estimar as variáveis discretas (Jn, Jr, Ja, Jw, SRF) e Krigagem Ordinária para o RQD, que possui característica de variável contínua. As variáveis Jn, Jr, Ja, Jw e SRF, apesar de poderem ser de diversas classes, ainda sim podem ser tratadas como variáveis discretas.

Para estimativa do RQD, fez-se a análise variográfica para se definir o alcance do variograma e, dessa forma, os raios do elipsoide de busca de amostras. A Figura 4b mostra um exemplo de variograma direcional para a variável RQD da BIF. Similarmente, também foram construídos os variogramas para os domínios de talco xistos e xistos indivisos. A análise variográfica da BIF mostrou como 3 direções de continuidade espacial 100/0, 10/0 e 0/-90. Os alcances encontrados foram 130, 80 e 40, respectivamente.

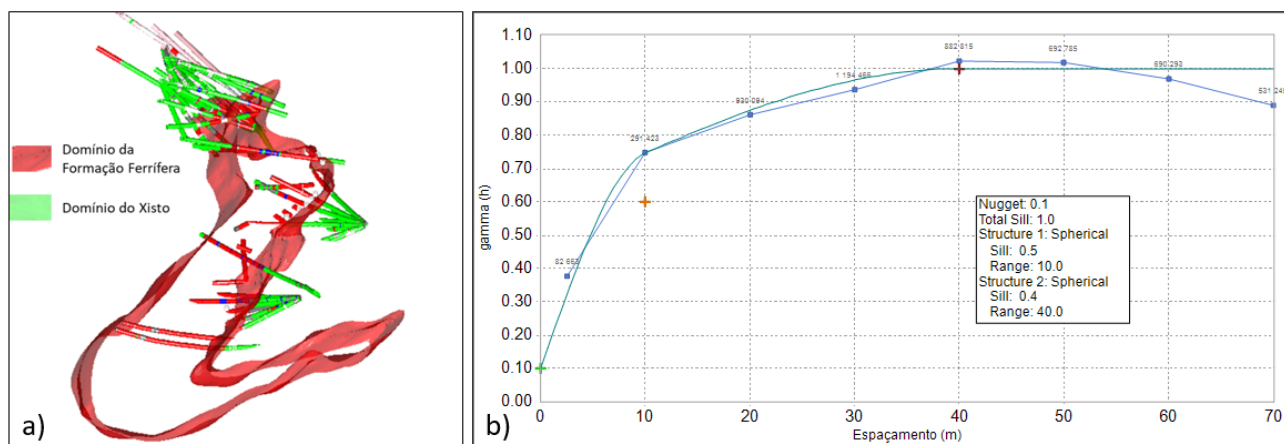


Figura 4. A) Domínio da BIF e xistos com amostras codificadas dentro de cada domínio. B) Variograma na direção 0/-90 para domínio da formação ferrífera.

De posse das amostras regularizadas e codificadas por domínio, modelo de blocos também devidamente codificado, e estudo variográfico, procedeu-se com a estimativa do RQD e demais parâmetros. A estimativa do RQD, por Krigagem Ordinária, foi feita em dois passos para poder separar, por grau de confiabilidade dos resultados, as áreas com maior densidade de informação e mais próximas dessas, das áreas com menor densidade ou nenhuma informação disponível. O primeiro passo considera uma vez o alcance variográfico e o segundo passo é uma extrapolação do elipsoide de busca para garantir a estimativa de todo o modelo. Para cada passo da estimativa foram utilizados diferentes critérios, separados por domínios.

Os parâmetros Jn, Jr, Ja, Jw e SRF foram estimados por vizinho mais próximo onde não há aplicação de restrições com relação aos dados utilizados, pois foi considerada o resultado de classificação apenas pelo



vizinho mais próximo e não por médias dos mais próximos dentro de um limite de raio e número de dados (regressão). Após a estimativa, os valores de Q foram calculados para cada bloco através da equação apresentada no item 2.1.

4. Resultados

O modelo Geomecânico da mina Pilar indica que há predominância de maciço com característica regular a boa nos níveis superiores (nível 1 ao 7), ao passo que entre os níveis 7 ao 13 o maciço mostrou-se com características boa a muito boa, como mostra a Figura 5a. Acredita-se que além dos fatores inerentes à qualidade do maciço, pontuados pela classificação geomecânica Q , o fato de se ter um maior volume de informações de mapeamento nestes níveis, se comparado com grande volume de informações obtidas por meio de descrições de sondagens nos níveis inferiores, também podem estar impactando no resultado observado. O efeito do desmonte no maciço, somado com a relaxação do mesmo, são fatores contribuintes para a penalização de alguns parâmetros, fato este não observado quando são realizadas as descrições de sondagens. Somado a isto, tem-se também o efeito escala, ou seja, as janelas amostrais dos mapeamentos são mais representativas se comparadas com os testemunhos de sondagens descritos.

De forma a verificar se o modelo geomecânico representa de fato o banco de dados, foi realizada uma validação visual dos resultados gerados (Figura 5b e c), sendo estes resultados coerentes tanto para as informações de sondagem quanto para os dados de mapeamentos.

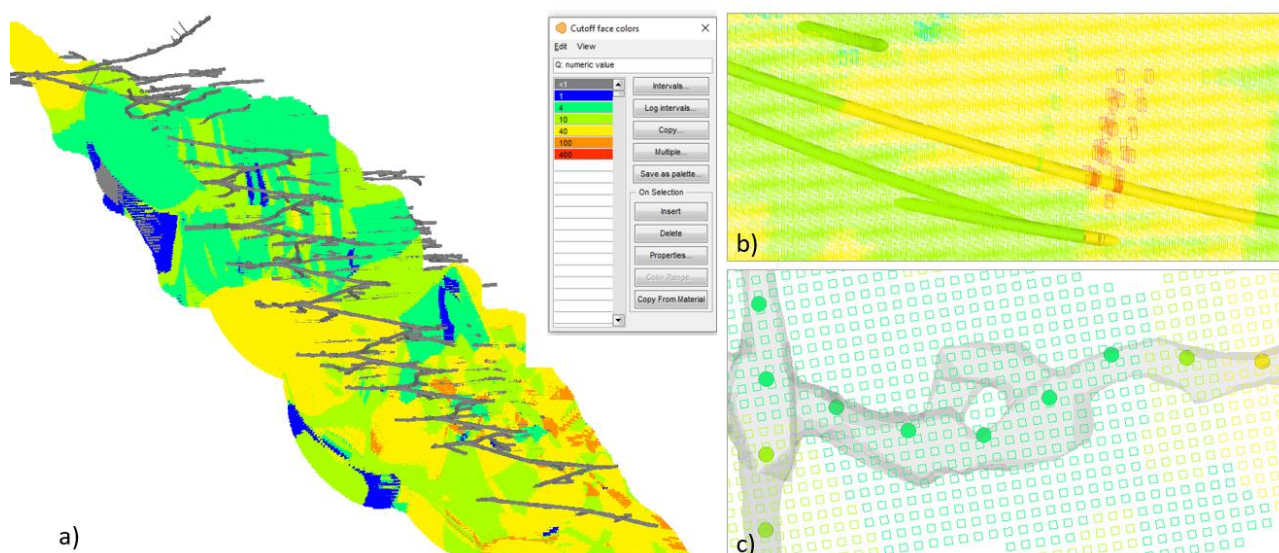


Figura 5. Modelo de blocos geomecânico da mina Pilar. Na figura (a) tem-se a vista geral do modelo 3D, (b) validação dos dados de sondagem e (c) a validação dos dados de mapeamento.

5. Considerações Finais

Os resultados da estimativa foram coerentes com os dados existentes e representam, de modo geral, as características do maciço nas áreas já escavadas e mapeadas. Nas regiões mais profundas, onde se tem apenas informações de furos de sondagem, o modelo também se mostra expressivo, porém é necessário fazer sua validação através dos dados de mapeamento, à medida que houver exposição do maciço. Ressalta-se que os dados de furos de sondagem causam um viés positivo na qualidade do maciço em relação aos dados de mapeamento, sendo necessário trabalhar em um fator para compensação dessas informações no modelo em profundidade.



AGRADECIMENTOS

Agradecemos a toda equipe da Geologia pelos excelentes trabalhos e interpretações acerca da geologia da mina Pilar. Em conjunto agradecemos também a Jaguar Mining Inc. por incentivar e apoiar nossos projetos de melhoria.

BIBLIOGRAFIA

- Barbetta, P. A., Reis, M. M., Bornia, A. C. (2010). Estatística para cursos de engenharia e informática. 3 edição, Editora Atlas, São Paulo, 416p.
- Barton, N., Lien, R. & Lunde, J. (1974). Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, 6: 189–236.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classification*. New York. John Wiley & Sons, 251 p.
- Fabrizio, J. F., Abichequer, L. A., Souza, L. E., Neto, R. O., Gonçalves, Í. G. (2015). Análise e Interpretação de Parâmetros de Qualidade de Maciço para Proposição de Modelo Geomecânico. *Revista Monografias Ambientais (Edição Especial Unipampa)*, Santa Maria, v. 14, p. 62-79. ISSN: 22361308
- Goovaerts, P. (1997) *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Applied Geostatistics Series. 483 pp. New York, Oxford: Oxford University Press. ISBN 0 19 511538 4.
- Hoek, E. (1994). Strength of rock and rock masses, *ISRM News Journal*, 2(2), 4016.
- Isaaks, E.H., Srivastava, R.M. (1989) *Applied Geostatistics*. New York: Oxford University Press. 558p.
- Matheron, G. (1962) *Traité de Géostatistique Appliquée*, Tome I: Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières: Editions Technip, vol. 14. 333 p.
- Matheron, G. (1963) Principles of Geostatistics. *Economic Geology*, v. 58, p. 1246-1266.
- Matheron, G. (1971). Teoria das Variáveis Regionalizadas e Suas Aplicações. Paris, École Nationale Supérieure des Mines de Paris. 211p.
- Santos, D. (2018). Uma introdução ao semivariograma: sua importância dentro da geoestatística. In: I Simpósio Nacional de Geografia e Gestão Territorial e XXXIV Semana de Geografia da Universidade Estadual de Londrina, Anais... v. 1, P.539-549
- Schorcher, H.D. (1978). Komatiitos na estrutura Greenstone Belt, Série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. In: CONGR. BRAS. GEOL., 30. Recife, 1978. Boletim de Resumos. Recife, SBG. p. 292-293
- Silva, L.C.F. (2007). Depósito Pilar: Contexto Geológico, alteração hidrotermal e mineralização aurífera. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais/ UFMG, 112 p.
- Soares, A. (2006) *Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente*, 2. Ed. Lisboa: IST Press. 232p.
- Souza, M.M (2019). *Estudos geotécnicos para determinação e viabilização de cavas operacionais e finais. Estudo de caso: cava Três Buracos, Goiás*. Dissertação de Mestrado, Publicação 321/2019, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 83 p.
- Yamamoto, J.K. (1991) Comparação de métodos computacionais para avaliação de reservas: um estudo de caso na jazida de cobre de Chapada, GO. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 175 p.