

CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA PRÉVIA DO MACIÇO ROCHOSO DO ENTORNO DE ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS USANDO MODELOS DE BLOCOS ESTIMADOS POR KRIGAGEM DOS INDICADORES. ESTUDO DE CASO: MINERAÇÃO FAZENDA BRASILEIRO – BAHIA/BRASIL

I. B. M. AQUINO¹, R. M. ROLO², A. C. ZINGANO³, H. M. LIMA⁴

Universidade Federal de Campina Grande

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1400-3280>¹

iure.aquino@ufcg.edu.br¹

Submetido 24/05/2020 - Aceito 07/11/2020

DOI: 10.15628/holos.2021.10233

RESUMO

Um modelo tridimensional que represente a qualidade e características geomecânicas do maciço rochoso a ser escavado pode ser utilizado para classificação geomecânica prévia do maciço rochoso do entorno de escavações subterrâneas, contribuindo para o aumento da segurança nas atividades em subsolo, subsidiando nas tomadas de decisão dos projetos de lavra, dimensionamento das escavações, definição da malha dos sistemas de reforço e suporte e identificação antecipada de possíveis áreas ou regiões com risco geológico. Com o objetivo de melhorar a segurança nas atividades em subsolo, além de difundir e popularizar o uso de métodos de interpolação espacial para representação da continuidade espacial da qualidade do

maciço rochoso e de variáveis geomecânicas através de métodos geoestatísticos. Este artigo demonstra a metodologia para classificação geomecânica prévia, com base nas metodologias do RMR e Sistema Q, do maciço rochoso do entorno de futuras escavações subterrâneas usando modelos de blocos estimados por krigagem dos indicadores. Os dados utilizados são provenientes de descrição geotécnica de testemunhos de sondagem. O RMR e Sistema Q são parâmetros geomecânicos amplamente utilizados em projetos de engenharia para o dimensionamento de escavações e sistemas de reforço. Os modelos estimados foram validados através de inspeção visual e validação cruzada.

PALAVRAS-CHAVE: Modelo de Bloco Geomecânico, RMR, Krigagem por Indicadores, Dados de Furo de Sonda, Caracterização Geomecânica.

RMR BLOCK MODEL OF UNDERGROUND DRILL CORING SESSIONS

ABSTRACT

A three-dimensional model that represents the quality and geomechanical characteristics of the rock mass to be excavated can be used for previous geomechanical classification of the rock mass surrounding underground excavations, contributing to the increase of safety in underground activities, helping the project decision making mining, dimensioning of excavations, definition of the mesh of the reinforcement and support systems and early identification of possible areas or regions with geological risk. In order to improve safety in underground activities, in addition to disseminating and popularizing the use of spatial interpolation methods to represent the

spatial continuity of the quality of the rock mass and geomechanical variables through geostatistical methods. This article demonstrates the methodology for previous geomechanical classification, based on the RMR and Q System methodologies, of the rock mass surrounding future underground excavations using block models estimated by kriging the indicators. The data used comes from the geotechnical description of drill cores. RMR and Q System are geomechanical parameters widely used in engineering projects for the design of excavations and reinforcement systems. The estimated models were validated through visual inspection and cross-validation

KEYWORDS: Geomechanical Block Model, RMR, Indicator Kriging, Borehole Data, Geomechanical Characterization.



1 INTRODUÇÃO

Na rotina operacional de minas subterrâneas de metais básicos ou preciosos, a sondagem com recuperação de testemunhos é um procedimento importante e visa promover um melhor detalhamento das características do corpo mineralizado. A utilização mais usual dos testemunhos de sondagem é para a retirada de amostras para análises químicas laboratoriais de teores, mas estes por sua vez, também podem ser utilizados para classificação geomecânica tridimensional do maciço rochoso através de métodos geoestatísticos.

A caracterização e classificação geomecânica são etapas importantes em projetos de engenharia que envolvam escavações de rochas, tanto a céu aberto, quanto subterrânea, e visa principalmente garantir a segurança das atividades através da aplicação de metodologias para definição do grau de qualidade do maciço do rochoso, que por sua vez, dará subsídios para definição das metodologias de escavação, dimensões, estruturas de suporte e contenção (Brady & Brown, 2004; Hoek, 2006; Zingano, 2002)

A classificação geomecânica de um maciço rochoso é obtida a partir da caracterização geomecânica, que tem por objetivo avaliar e classificar maciços rochosos por meio de uma série de propriedades obtidas de ensaios realizados em laboratório com testemunhos de sondagem e observação direta de um conjunto de características presentes nos maciços rochosos - Mapeamento geomecânico de afloramentos rochosos, faces de taludes e paredes de galeias subterrâneas. Entre as várias metodologias de classificação geomecânica, destacam-se as desenvolvidas por Deere (1963) - RQD - Rock Quality Designation, Bieniawski (1973) - Sistema RMR - Rock Mass Rating e Barton et al., (1974) - Sistema Q.

A representação espacial tridimensional de variáveis geomecânicas e da qualidade do maciço rochoso em modelos de blocos é uma prática ainda pouco utilizada no setor mineral. Usualmente apenas os valores médios obtidos em um conjunto de furos são usados para determinar a qualidade do maciço rochoso na região pesquisada ou, conforme apontado por Cruz (2017), os dados obtidos nas descrições geomecânicas são simulados e inferidos através da interpretação de seções bidimensionais (2D), contando somente com a experiência do modelador, sem qualquer suporte de ferramentas computacionais para auxiliar nessa interpretação.

Mas essa realidade está mudando e atualmente encontra-se em fase de crescimento e difusão com estudos e pesquisas recentes. Das metodologias de estimativas geoestatísticas para a confecção de modelo de blocos disponíveis e referenciadas na literatura, a krigagem por indicadores é o método de estimativa mais indicado para variáveis geomecânicas, pois os parâmetros geomecânicos visuais ou descritos são variáveis qualitativas de forma categóricas, não contínuas e não aditivas e que pertencem a um intervalo de classificação, somente a variável resistência da rocha intacta é uma variável aditiva. A escolha do método de estimativa a ser usado para uma determinada variável deve ser feita baseada na natureza dos dados e nas características da unidade de observação (Cruz, 2017; Goovaerts, 1997; Jeon et al., 2008; Journel, 1982; Leite, 2008; Redondo, 2003; Vilca, 2019).

A classificação geomecânica do maciço rochoso do entorno de escavações subterrâneas na Mina Fazenda Brasileiro e em outras minas subterrâneas, usualmente, é realizada através de



mapeamento geomecânico nas paredes das galerias subterrâneas a cada ciclo de desenvolvimento das escavações. Sendo necessário primeiramente realizar a escavação para posteriormente proceder com o mapeamento e classificação geomecânica.

Com o objetivo de prever regiões com riscos geotécnicos e possíveis problemas de estabilidade, o enfoque deste artigo consiste em apresentar uma metodologia de utilização de modelos de blocos dos índices RMR e Sistema Q para classificação geomecânica prévia do maciço rochoso no entorno de escavações subterrâneas.

Os dados para a elaboração deste artigo são provenientes de descrição geotécnica de testemunho de sondagem de 40 furos de sonda com metragem total de 4015 metros, distribuídos ao longo de um trecho de 300 metros da rampa principal da Mina Fazenda Brasileiro, localizada no município de Teofilândia/BA, distante aproximadamente 200 km á noroeste de Salvador/BA.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: Primeiramente é apresentada uma revisão de alguns conceitos geoestatísticos e geomecânicos importantes para a modelagem tridimensional. Em seguida, a metodologia utilizada para confecção dos modelos de blocos e classificação prévia do entorno das escavações subterrâneas, bem como a justificativa da utilização do método de krigagem por indicadores nas estimativas. Por fim as discussões e conclusões do trabalho. Os modelos de blocos gerados foram validados através das técnicas de inspeção visual e validação cruzada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA

A classificação geomecânica é obtida através da caracterização geomecânica do maciço rochoso sendo uma etapa importante em projetos de engenharia que envolvam escavações de rochas e solos, tanto a céu aberto, quanto subterrânea e visa, principalmente, garantir a segurança das atividades pela aplicação de metodologias para definição do grau de qualidade do maciço do rochoso. Realizada através da coleta de informações em campo e de ensaios laboratoriais, onde são obtidas informações sobre as características das discontinuidades, resistência da rocha intacta, estado de tensões do maciço rochoso e presença de água (Bieniawski, 1989; Brady & Brown, 2004; Hoek & Brown, 1997; Zingano, 2002).

A classificação geomecânica é base de muitas formulações empíricas para o dimensionamento de escavações, principalmente no dimensionamento de túneis, galerias subterrâneas e seus respectivos sistemas de suporte e reforço. Consiste, basicamente, em definir uma nota ou qualidade ao maciço rochoso via cálculo de valores atribuídos aos parâmetros geológicos e geotécnicos. (Bieniawski, 1989; Brady & Brown, 2004; Hoek & Brown, 1997).

2.1.1 SISTEMA RMR – ROCK MASS RATING

A classificação RMR desenvolvida por (Bieniawski, 1989) consiste na análise de seis parâmetros relativos ao maciço rochoso e a escavação. Para cada parâmetro atribui-se um peso e o somatório dos pesos atribuídos a cada um destes parâmetros constitui-se num índice



correspondente ao resultado da classificação geomecânica, designado por RMR. O valor numérico do índice RMR é determinado pela Equação (01).

$$RMR = \sum_{i=1}^5 w_i + \text{ajuste} \quad (01)$$

Onde w_i representa a somatória dos 5 parâmetros relativos ao maciço rochoso, estes parâmetros são: Resistência à compressão uniaxial - qu; Grau de fraturamento do maciço – RQD; Espaçamento das descontinuidades; Padrão das descontinuidades; Percolação de água nas descontinuidades. O ajuste se dá segundo a orientação relativa das descontinuidades e a direção da escavação, segundo Bieniawski (1989). A Tabela 1 apresenta as classes de maciços de rochosos segundo os resultados do somatório dos cinco parâmetros do RMR.

Tabela 1 - Classe de maciço rochoso segundo a classificação RMR.

Classe de maciço rochoso determinada pela somatória dos pesos - RMR					
Somatória dos pesos	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	<20
Classe nº	I	II	III	IV	V
Descrição	Muito Bom	Bom	Regular	Pobre	Muito Pobre

Fonte: Adaptado de (BIENIAWSKI, 1989).

2.1.2 SISTEMA Q

O Sistema-Q de classificação de maciços rochosos foi desenvolvido por Barton, Lien e Lunde em 1974 no Instituto Geológico Norueguês - NGI e se fundamenta em um indicador de qualidade "Q", adquirido através de seis parâmetros que descrevem uma série de particularidades do maciço rochoso. O valor numérico do índice Q é determinado pela Equação (02).

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (02)$$

Os parâmetros analisados na metodologia de Barton et al., (1974) incluem o grau de fraturamento do maciço (RQD), o número de Famílias de Descontinuidades (J_n), o índice de Rugosidade das Descontinuidades (J_r), o índice de Alteração das Descontinuidades (J_a), o fator de Redução de Presença de Água (J_w) e o estado de tensão no maciço rochoso (SRF). Com a multiplicação dos três quocientes, obtém-se o valor do índice "Q".

Com a multiplicação dos três quocientes, obtém-se o valor do índice "Q". Barton et al. (1974) dividem os maciços rochosos em nove categorias de qualidade, variando de Excepcionalmente Bom até Excepcionalmente Fraco (Tabela 2).

Tabela 2 - Qualidade do Maciço Rochoso.

Qualidade do Maciço Rochoso	
Intervalo de "Q"	Qualidade
400 – 1000	Excepcionalmente Bom

100 - 400	Extremamente Bom
40 - 100	Muito Bom
10 - 40	Bom
4 - 10	Regular
1 - 4	Fraco
0,1 - 1	Muito Fraco
0,01 - 0,1	Extremamente Fraco
0,001 - 0,01	Excepcionalmente Fraco

Fonte: Adaptado de (BARTON ET AL., 1974).

2.2 INTERPOLAÇÃO ESPACIAL

Burrough (1986) define interpolação espacial como procedimento para se estimar valores de propriedades de locais não amostrados, baseando-se em valores de dados observados em locais conhecidos. Por sua vez Stark (1979) esclarece que interpolação é o processo matemático de se achar valores intermediários entre os valores discretos de uma função.

2.3 Tipos de Variáveis

Segundo Oliveira Filho (2015) a definição de variável pode ser dada como a característica de interesse que é medida em cada elemento da amostra ou população, e seus valores se alteram de elemento para elemento. As variáveis podem expressar valores numéricos ou não numéricos, sendo classificadas como quantitativas quando as características podem ser medidas em uma escala quantitativa, ou seja, apresentam valores numéricos que fazem sentido. Ou variáveis qualitativas (ou categóricas) quando as características não possuem valores quantitativos, mas valores categóricos, ou seja, representam uma classificação dos indivíduos.

Por sua vez as variáveis qualitativas ainda podem ser divididas em qualitativa nominal e qualitativa ordinal. Uma variável qualitativa nominal não possui nenhuma ordenação em seus resultados, por outro lado, uma variável qualitativa ordinal possui uma ordenação em seus resultados, por exemplo, grau de escolaridade, ensino fundamental, médio e superior, ou em roupas, pequeno, médio e grande. De modo análogo, as variáveis quantitativas também podem ser divididas em discretas e contínuas. Nas variáveis quantitativas discretas os possíveis resultados formam um conjunto finito ou enumerável de números inteiros, por exemplo, uma contagem sobre o número de filhos (0, 1, 2...). Já para as variáveis quantitativas contínuas os possíveis valores pertencem a um intervalo de números reais e que resultam de uma mensuração como, por exemplo, a estatura e massa corporal de uma pessoa (Bussab & Morettin, 2009).

E por último, as variáveis podem ser divididas em grandezas aditivas ou não aditivas. Segundo Camargo (1998), são denominadas grandezas aditivas aquelas que o valor médio é igual à média dos valores, ou seja, é possível calcular o valor médio dos dados para uma variável quantitativa. Por exemplo, o teor médio de Fe em um depósito, a idade média dos habitantes de uma cidade. E não aditivas quando não é possível calcular o valor médio dos valores.

Oliveira Filho, 2015 acrescenta que as distinções são menos rígidas do que a descrição acima insinua. Pois uma variável originalmente quantitativa pode ser coletada de forma qualitativa. Por exemplo, a variável idade, medida em anos completos, é quantitativa (contínua);



mas, se for informada apenas a faixa etária (0 a 5 anos, 6 a 10 anos, etc.), é qualitativa (ordinal). Outro exemplo é o peso dos lutadores de boxe, uma variável quantitativa (contínua) se trabalhamos com o valor obtido na balança, mas qualitativa (ordinal) se o classificarmos nas categorias do boxe (peso-pena, peso-leve, peso-pesado, etc.).

2.4 Breve histórico dos métodos Geoestatísticos aplicado a Geomecânica.

Os métodos geoestatísticos para estimativas de teores e delimitação de corpos minerais são técnicas com resultados positivos comprovados e amplamente utilizadas no setor mineral. Já a utilização da geoestatística associada à geomecânica é uma prática ainda pouco utilizada no setor mineral, mas que vem ganhando espaço e difusão com estudos e pesquisas recentes. Os trabalhos disponíveis na literatura são baseados principalmente na utilização das técnicas de krigagem ordinária, krigagem por indicadores e simulação geoestatística, por exemplo os estudos listados abaixo.

Van de Wall & Ajalu (1997) - Krigagem ordinária por blocos para estimativas da dureza da rocha em uma pedreira de quartzito (quarry mine) para otimizar os procedimentos de amostragem.

Castaing et al., (1997) – Uso da geoestatística para caracterizar o comportamento espacial das descontinuidades através do comportamento espacial das fraturas em diferentes escalas e assim identificar os grupos de fraturas alinhadas.

You & Barnes (1997) - Demonstração da viabilidade da utilização da krigagem por indicadores para classificação geomecânica de maciços rochosos e parâmetros geomecânicos em um projeto de escavação de túnel.

Redondo (2003)- Krigagem por indicadores para modelagem da distribuição do parâmetro RQD obtido em testemunhos de sondagem.

Leite (2008) - Krigagem por indicadores como método de estimativa das distribuições de probabilidade para as atitudes das descontinuidades.

Damasceno (2008) - Modelagem geológica e geomecânica em 3D através de krigagem ordinária.

Marchesi (2008) - Krigagem ordinária para modelagem em 3D do RMR e grau de faturamento ao longo do maciço rochoso.

Exadaktylos & Stavropoulou (2008) - Krigagem universal para analisar a variabilidade espacial do RMR na construção de túneis.

Jeon et al., (2008) -Krigagem por indicadores utilizada para estimar a distribuição tridimensional do RMR a partir dos dados de perfilagem de poço e dados geofísicos. O resultado foi comparado com os resultados usando krigagem ordinária e simulação sequencial dos indicadores. A simulação sequencial dos indicadores foi utilizada para quantificar a incerteza da estimativa.



Egaña & Ortiz em (2013) - Propuseram uma nova técnica de espacialização a partir da simulação geoestatística das variáveis utilizadas no cálculo do RMR isoladamente e comparam com os valores obtidos na estimativa direta do RMR. Os resultados desta comparação revelaram uma melhoria significativa da qualidade da estimativa do RMR local. Além de revisarem a natureza e consequências no processo de modelagem de para os cinco parâmetros geomecânicos utilizados no RMR.

Cruz (2017) – Krigagem por indicadores para espacialização do parâmetro da rocha intacta em modelos de blocos.

Vatanable (2018) – Krigagem por indicadores para estimar o Rock Mass Rating (RMR) em modelos de blocos tridimensionais.

Sewnun (2019) - Krigagem ordinária para confecção de modelo de blocos geotécnico do Sistema Q para um projeto de mineração subterrânea

Vilca (2019) - Comparação das estimativas via Krigagem por Indicadores, Krigagem Ordinária e Simulação Geoestatística pelo Indicador para o RMR.

Kring & Chatterjee (2020) - Propõem uma metodologia integrada para análise de estabilidade da estrutura da rocha através das zonas de falha e do RQD utilizando simulação sequencial de indicadores e simulação gaussiana sequencial para quantificar a incerteza espacial.

A utilização da geoestatística aplicada à geomecânica para criação de modelos de blocos com informações geomecânicas é recente e com poucos trabalhos publicados.

2.5 Métodos Estocásticos - Krigagem

A Krigagem é um método geoestatístico de inferência (estimativa) espacial de uma grandeza em um determinado suporte (ponto, área, volume) não amostrado, distribuídos no espaço e/ou tempo, que apresenta estimativas não tendenciosas e a mínima variância associada ao valor estimado (Yamamoto & Landim, 2015).

2.5.1 Krigagem por indicadores - (KI)

Journel (1982) propõem que cada um dos parâmetros seja codificado em somente dois valores, por exemplo, entre 0 e 1. Onde 1 representa a probabilidade de pertencer a uma dada classe e 0 a probabilidade não pertencer. O resultado deste processo é que ao final da krigagem cada bloco terá a probabilidade distribuída entre 0 e 1, que será equivalente a distribuição de 0 a 100% de chances de pertencer a qualquer um dos intervalos de classe.

A classificação final do bloco dependerá do tipo de parâmetro utilizado, que pode ser baseado no agrupamento inicial da base de dados ou na maior probabilidade do ponto estimado.

O padrão de continuidade de uma categoria s_k pode ser caracterizada pelo variograma definido pelos indicadores que codificam a presença ou ausência dessa categoria.

O variograma dos indicadores para uma categoria s_k é computado como na Equação (03):

$$\gamma_I(h; s_k) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [i(u_{\alpha}; s_k) - i(u_{\alpha} + h; s_k)]^2 \quad (03)$$

O variograma dos indicadores mede com qual frequência dois lugares separados de um vetor h pertencem a categorias diferentes, quanto menor o valor de $\gamma_I(h; s_k)$, maior a conectividade espacial da categoria s_k (GOOVAERTS, 1997).

3 METODOLOGIA

3.1 Definição do método de estimativa

A escolha do método de estimativa utilizado para prever valores ou categorias em locais não amostrados e deve ser feita com base na natureza dos dados a serem estimados. Estes por sua vez, devem necessariamente possuir correlação física e/ou espacial entre si, para o uso de métodos Geostatísticos (Matheron, 1965).

Os índices do RMR e do Sistema Q são os resultados dos cálculos não lineares dos pesos dos parâmetros geomecânicos e, portanto, não devem ser estimados diretamente usando ferramentas geostatísticas lineares, como é o caso da krigagem ordinária. Desta forma é necessário utilizar um método de estimativa não linear, como por exemplo a krigagem por indicadores (Egaña & Ortiz, 2013; Goovaerts, 1997; Journel, 1982; You & Barnes, 1997).

Sendo assim, a maneira correta de estimar estes índices é estimar cada um dos seus parâmetros separadamente através de krigagem por indicadores, onde cada parâmetro será subdividido em classes e atribuído um valor a estas classes. A classificação final dos índices do RMR e Sistema Q será proveniente do cálculo destes parâmetros conforme a Equação (01) para o RMR e Equação (02) para o Sistema Q (Cruz, 2017; Egaña & Ortiz, 2013; Vatanable, 2018; You & Barnes, 1997).

3.2 Descrição geotécnica dos testemunhos de sondagem

As atividades de sondagem são realizadas com objetivo de amostrar partes profundas ou não acessíveis dos depósitos minerais, após a retirada dos testemunhos de sondagem são realizadas a descrição litológica e geomecânica. Para a descrição geomecânica de testemunhos de sondagem utilizou-se um formulário de descrição onde foram registradas as informações necessárias para classificação segundo a metodologia do RMR e Sistema Q. Os parâmetros necessários para a classificação foram obtidos utilizando as técnicas descritas abaixo.

Descrição geotécnica de testemunhos de sondagem – RMR e Sistema - Q

- A resistência da Rocha Intacta – Obtida utilizando o teste de impacto com martelo de geólogo segundo tabela de correlação da ISRM (1981).
- Espaçamento das Descontinuidades e J_n – O espaçamento e número de famílias de descontinuidades foram obtidos da média entre número de descontinuidades presentes em uma manobra e comprimento da manobra.



- RQD – Obtido utilizando a técnica original desenvolvida por Deere (1963).
- Condição das Descontinuidades, Ja e Jr – As condições das descontinuidades foram obtidas através da observação direta nos testemunhos de sondagem e englobam características referentes a persistência, abertura, rugosidade/ J_r , preenchimento e grau de alteração/ J_a . Na descrição geomecânica para o RMR utilizando testemunhos de sondagem não é possível definir a persistência e a abertura das descontinuidades. Uma proposta apresentada por Bieniawski (1989) é utilizar as características generalizadas das descontinuidades, desta maneira não ocorre uma penalização de 12 pontos por falta destas informações. Na descrição realizada neste estudo de caso foi adotado penalizar a descrição em 12 pontos em prol da segurança.
- Condição de Água Subterrânea, J_w – Para este parâmetro foi adotada uma condição de percolação de água conservadora, ou seja, maciço rochoso quase seco ou com gotejamento pouco intenso.
- Fator de Redução Tensão, SRF – Valor adotado conforme as condições de tensões presentes no local, o qual foi adotado um valor fixo de 2,5. Baixa tensão, perto da superfície, juntas abertas

Neste estudo de caso foram utilizados 40 furos de sonda com metragem total de 4015 metros, distribuídos ao longo de 300 metros da rampa de acesso principal da Mina Fazenda Brasileiro. A recuperação dos testemunhos varia entre 0,5 a 3,0 m de comprimento. Nas Figura 1 e 2 são ilustrados a distribuição espacial dos furos de sonda, os valores de RMR e Sistema Q ao longo dos furos de sonda e o projeto das futuras escavações da mina. A classificação geomecânica prévia do maciço rochoso do entorno da escavação será realizada para estas escavações com base nos valores dos parâmetros geomecânicos descritos ao longo dos furos de sonda.

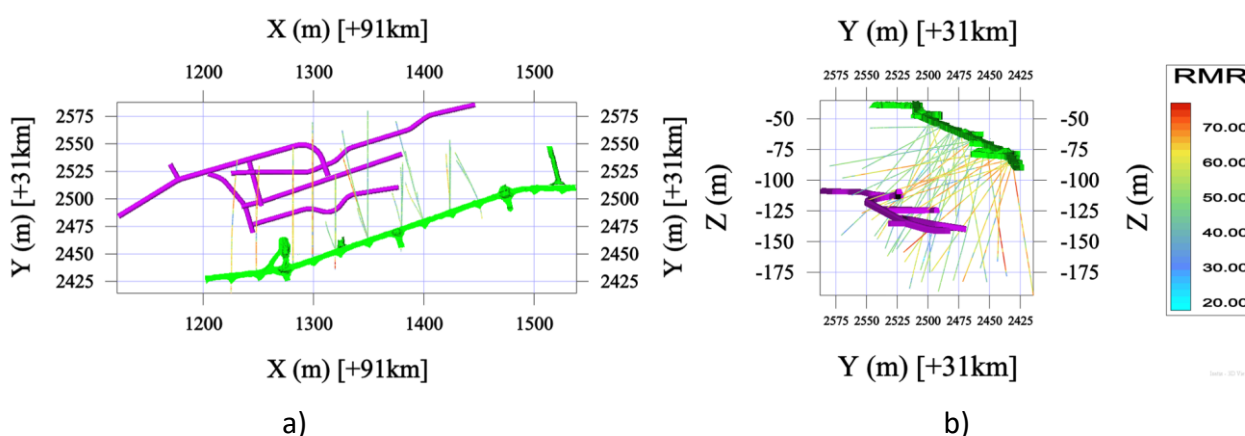


Figura 1 – Descrição geomecânica do RMR ao longo dos furos de sonda. a) vista em planta; b) vista para leste.
Fonte: (AUTOR 2020).

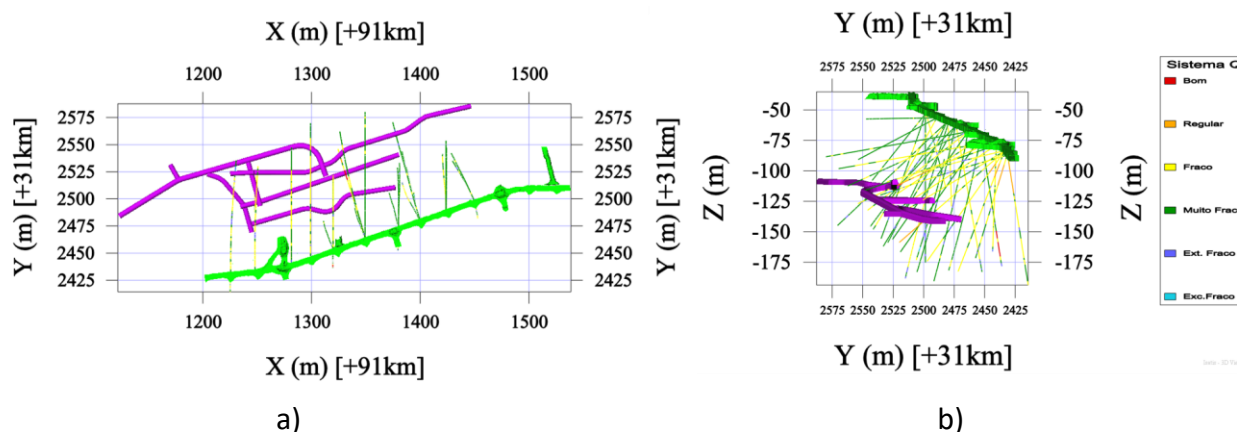


Figura 2 – Descrição geomecânica do Sistema Q ao longo dos furos de sonda. a) vista em planta; b) vista para leste. Fonte: (AUTOR, 2020).

Os furos foram realizados em uma sequência metassedimentar, denominada Sequência Canto, com direção Leste - Oeste, mergulho de 40° a 50° para sul e caimento de 10° para Leste. Pode-se considerar um comportamento geomecânico similar em toda a área sondada, representando assim, um único domínio geomecânico.

3.3 Confeção dos modelos de blocos

O software Isatis® foi utilizado para a confecção dos modelos geomecânicos tridimensionais. Antes de iniciar os procedimentos de estimativa, os dados de descrição geomecânicas foram regularizados em intervalos de comprimento iguais, através do método de média ponderada denominado de compositagem. O intervalo de compositagem definido foi de 0.5 m, referente ao menor comprimento de recuperação dos testemunhos de sondagem. A Figura 3 ilustra o resultado deste processo regularização.

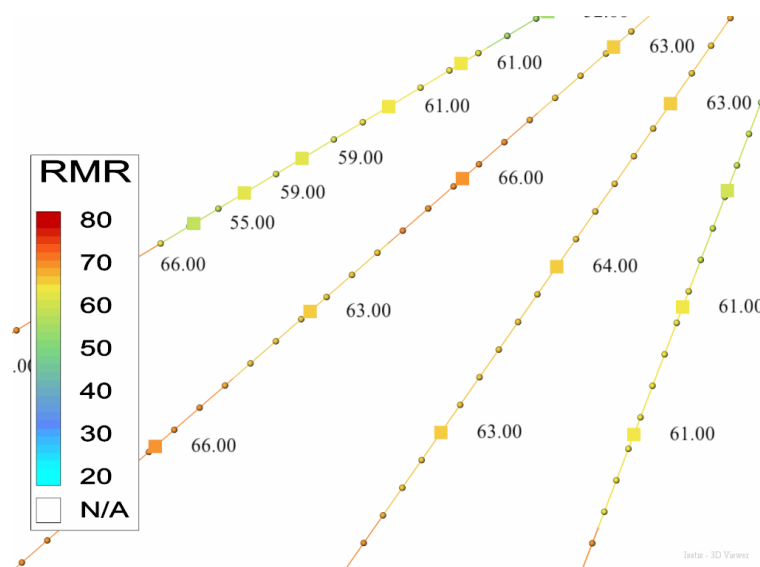


Figura 3 – Representação gráfica do procedimento da compositagem das amostras para uma região específica da área de estudo.

Fonte: (AUTOR, 2020).

As dimensões dos blocos utilizados nas estimativas usualmente são definidas em razão do espaçamento da malha de amostragem, variando de 1/4 à 1/2. Toda via, a resolução do modelo (tamanho dos blocos) depende do tipo de estudo, do nível de detalhe necessário, da fase do projeto entre outros fatores. Para o presente estudo buscou-se um nível alto de detalhe com boa diferenciação e representatividade dos intervalos dos índices do RMR e Sistema Q, desta forma foi adotado uma resolução do modelo de 2 x 2 x 2 m.

A Figura 4 apresenta os histogramas de distribuição dos resultados dos sistemas de classificação da qualidade do maciço rochoso ao longo dos furos de sonda após o processo de regularização de espaçamento entre as amostras.

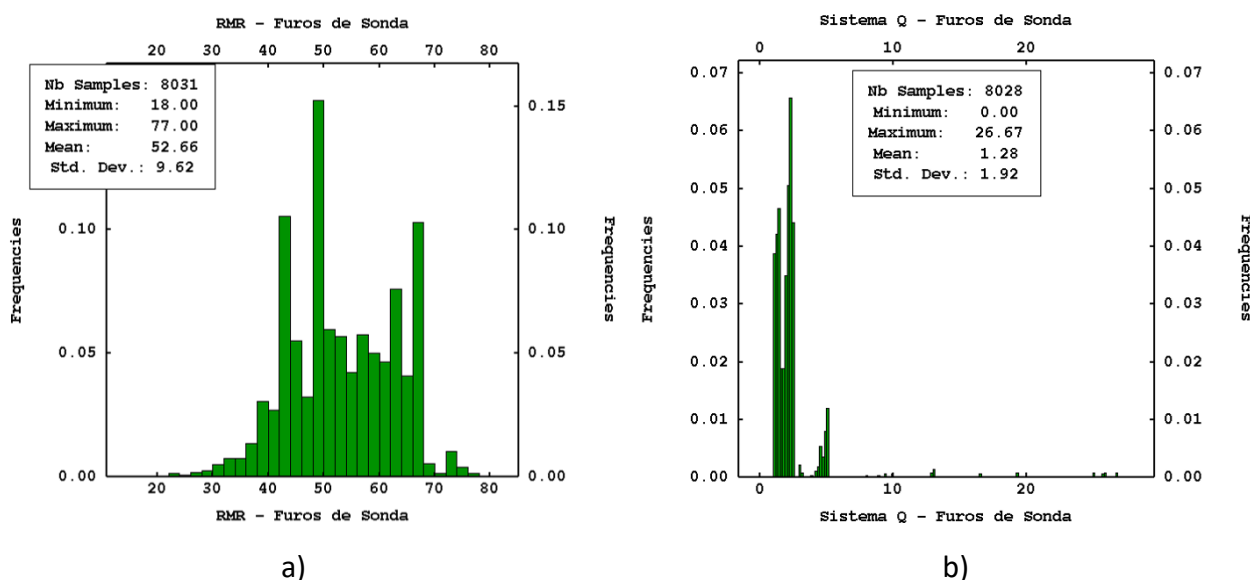


Figura 4 – Histograma de distribuição dos valores dos índices dos sistema de classificação nos furos de sonda. a) RMR; b) Sistema Q.

Fonte: (AUTOR, 2020).

3.3.1 Definição dos intervalos de classes

A Krigagem por indicadores é utilizada para estimativas de funções de distribuições de probabilidades e estimativas de variáveis categóricas, desta forma para estimativa dos índices do Sistema RMR e Sistema Q é necessário definir as classes ou categorias de cada parâmetro utilizado no cálculo, ou seja, configurar os parâmetros geomecânicos em dados categóricos através de indicadores. A Tabela 01 exemplifica este procedimento apresentado os intervalos de classes, os valores dos indicadores e os pesos de cada parâmetro no cálculo do RMR, o mesmo procedimento foi também utilizado para os parâmetros do Sistema Q demonstrado na Tabela 02.

Tabela 3 - Intervalo de classes e peso dos parâmetros do sistema de classificação RMR.

Intervalo de Classe e Peso Parâmetros RMR			
Classe RQD	Intervalo RQD	Valor do Indicador	Peso RMR
RQD 1	100 - 90	1	20

RQD 2	90- 75	2	17
RQD 3	75 -50	3	13
RQD 4	50 - 25	4	8
RQD 5	25 - 0	5	3
Classe ALT	Alteração	Valor do Indicador	Peso RMR
ALT 1	Não alteradas	1	6
ALT 2	Ligeiramente alteradas	2	5
ALT 3	Moderadamente alteradas	3	3
ALT 4	Muito alteradas	4	1
ALT 5	Em decomposição	5	0
Classe ESP	Espaçamento	Valor do Indicador	Peso RMR
ESP 1	> 200 cm	1	20
ESP 2	60 - 200 cm	2	15
ESP 3	20 -60cm	3	10
ESP 4	6 - 20	4	8
ESP 5	< 6 cm	5	5
Classe UCS	Resistência (MPa)	Valor do Indicador	Peso RMR
RCU 1	> 250	1	15
RCU 2	100 - 250	2	12
RCU 3	50 - 100	3	7
RCU 4	25 - 50	4	4
RCU 5	5 - 25	5	2
RCU 6	1 - 5	6	1
RCU 7	<1	7	0
Classe RUG	Rugosidade	Valor do Indicador	Peso RMR
RUG 1	Muito rugoso	1	6
RUG 2	Rugoso	2	5
RUG 3	Ligeiramente rugoso	3	3
RUG 4	Quase liso	4	1
RUG 5	Liso	5	0
Classe PRE	Preenchimento	Valor do Indicador	Peso RMR
PRE 1	Nenhum	1	6
PRE 2	Duro com espessura < 5 mm	2	4
PRE 3	Duro com espessura > 5 mm ou Mole com espessura < 5 mm	3	2
PRE 4	Mole com espessura > 5 mm	4	0

Fonte: Adaptado de (BIENIAWSKI, 1989).

Tabela 4 - Intervalo de classes e peso dos parâmetros do sistema de classificação Sistema Q.

Intervalo de Classe e Peso Parâmetros Sistema Q			
Classe Jn	Número de Famílias de Descontinuidades - Jn	Valor do Indicador	Peso Sistema Q
JN 1	Nenhuma	1	1
JN 2	1 família	2	3



JN 3	2 famílias	3	6
JN 4	3 famílias	4	12
JN 5	4 famílias	5	15
JN 6	Rocha desintegrada/solo	6	20
Classe Jr	Rugosidade das Descontinuidades – Jr	Valor do Indicador	Peso Sistema Q
JR 1	Polidas, lisas e planas	1	0,5
JR 2	Polidas e onduladas	2	1
JR 3	Suaves e onduladas	3	2
JR 4	Rugosas, irregulares, onduladas	4	3
JR 5	Juntas descontínuas	5	4
Classe Ja	Alteração das Descontinuidades – Ja	Valor do Indicador	Peso Sistema Q
JA 1	Sem alteração	1	1
JA 2	Levemente alteradas	2	2
JA 3	Preenchimento de partículas siltosas ou argilosas	3	3
JA 4	Preenchimento com partículas de materiais moles (caulinita, mica, gesso, talco, clorita, grafite, etc)	4	4
JA 5	Paredes ligeiramente alteradas, preenchimento com material abrasivo	5	4
JA 6	Descontinuidades com preenchimento argiloso consolidado (contínuo, mas com espessura < 5 mm)	6	6
JA 7	Alteradas ou descontinuidades com preenchimento argiloso subconsolidado (contínuo, mas com espessura < 5 mm)	7	8
JA 8	Muito alteradas ou descontinuidades com preenchimento argiloso expansivo (contínuo, mas com espessura < 5 mm)	8	12

Fonte: Adaptado de (BARTON ET AL., 1974).

3.3.2 Análise da continuidade espacial

Os métodos de Krigagem utilizam o conceito de semi-variograma no cálculo da estimativa. O semi-variograma é utilizado para definir a continuidade espacial e para a representação da variabilidade do fenômeno em questão, obtendo assim o modelo variográfico final. Para cada um dos parâmetros dos sistemas de RMR e Q foram elaborados modelos variográfico específicos utilizando 3 variogramas experimentais ortogonais entre si da classe com maior distribuição de frequência.

Na Figura 5 para efeito demonstrativo é apresentado o histograma de distribuição das classes do RQD nos furos. A Classe RQD 3 possui a maior distribuição de frequência para este conjunto de dados da variável RQD. O modelo do variograma obtido a partir do ajuste de 3 variogramas ortogonais entre si foi utilizado para a estimativas de todas as classes do RQD. O

modelo do variograma representado pela Figura 4b apresenta uma estrutura esférica e é apresentado na Tabela 3.

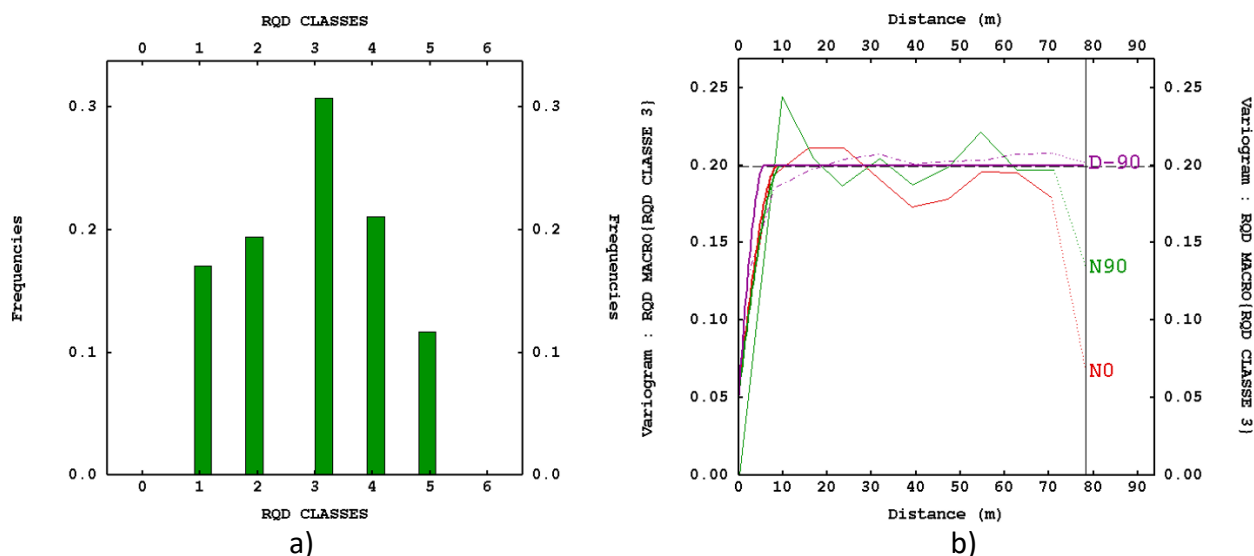


Figura 5 – (a) Histograma de distribuição das classes do RQD nos furos. (b) Semi variograma da continuidade espacial da Classe 3 do RQD.

Fonte: (AUTOR, 2020).

Tabela 5 – Modelo do semi variograma.

Efeito Pepita	Patamar	Alcance Primeira Estrutura		
		X	Y	Z
0,05	0,14	9	10	6

Fonte: (AUTOR, 2020).

O mesmo procedimento realizado para o parâmetro RQD foi realizado para os demais parâmetros.

4 RESULTADOS

4.1 Krigagem por indicadores

Na krigagem por indicadores ao invés de estimar diretamente os valores dos índices RMR ou Sistema Q no bloco, é estimado a probabilidade do bloco pertencer a cada uma das classes dos parâmetros do RMR e Sistema Q. Ou seja, são confeccionados “n” modelos de blocos para cada parâmetro, onde “n” é o número de classes em cada parâmetro. Desta forma, o valor do RMR e do Sistema Q é obtido do cálculo dos pesos de cada parâmetro das classes com maior probabilidade em cada bloco dos modelos confeccionados. Para cada classe dos parâmetros são gerados modelos de blocos codificados entre 0 e 1, onde 1 representa a probabilidade de 100% do bloco pertencer aquela classe, e 0 de não pertencer

Definidos os modelos variográficos que representam a continuidade espacial e variabilidade das classes dos parâmetros geomecânicos, se faz necessário determinar a vizinhança de busca, que compreende o raio de busca e número de amostras mínimas e máximas para o cálculo da estimativa.

Utilizando os resultados da variografia, as características estruturais do depósito mineral e as características da disposição espacial na área amostrada, e após várias tentativas de combinações, foi adotado uma vizinhança de busca com raio anisotrópico rotacionado para o azimute 90°, mergulho de 45°, alcance de 30 m no eixo X, 50 m no eixo Y e 4 m no eixo Z, com no mínimo duas e no máximo quatro amostras. A Figura 6 ilustra os resultados das estimativas para cada classe de RQD e o seu respectivo resultado final.

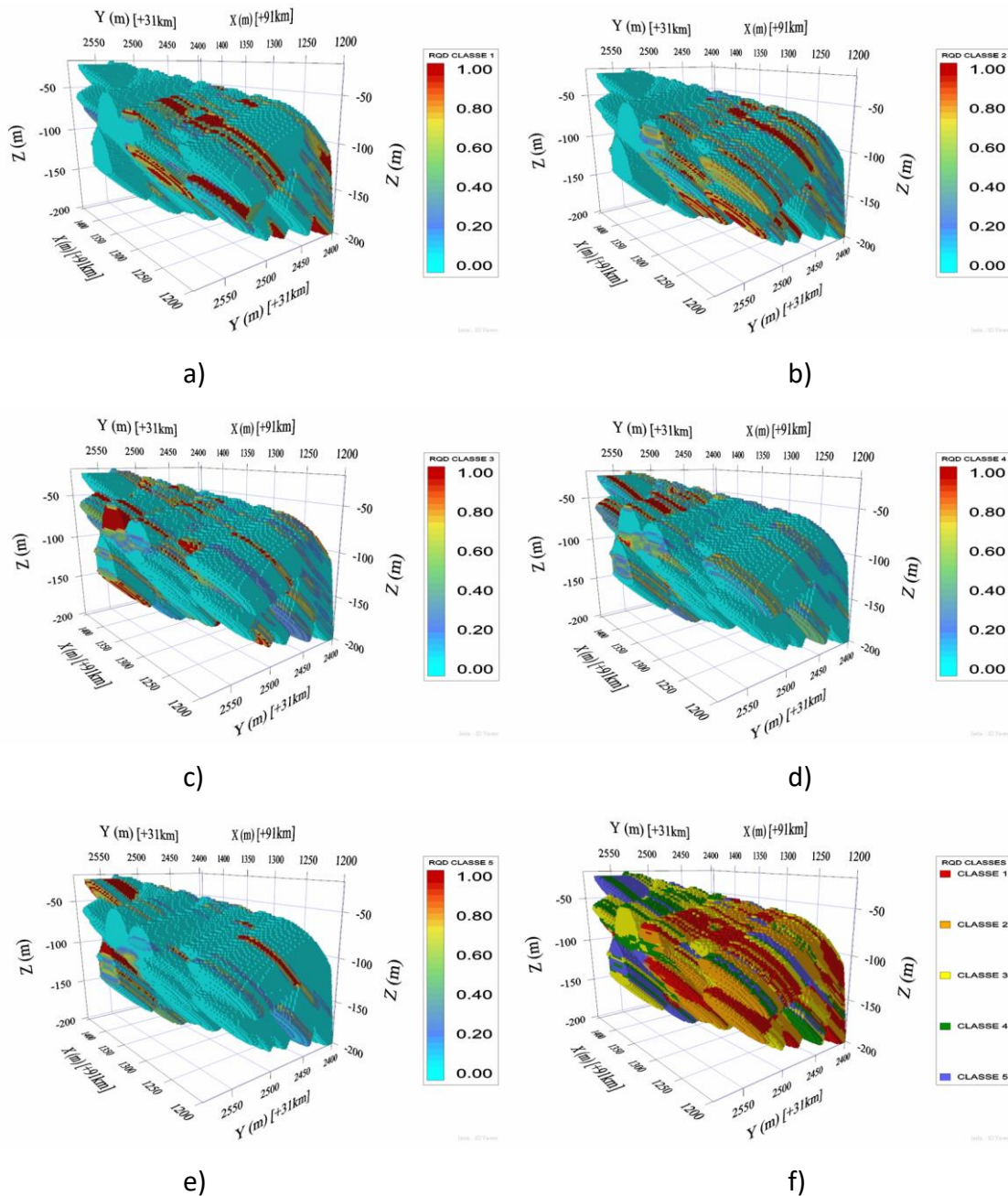


Figura 6 – Resultados das estimativas de probabilidades do bloco pertencer a uma determinada classe de RQD e resultado final de RDQ por classes. a) estimativa Classe 1 RQD; b) estimativa Classe 2 RQD; c) estimativa Classe 3 RQD; d) estimativa Classe 4 RQD; e) estimativa Classe 5 RQD; f) resultado final estimativa RQD.

Fonte: (AUTOR, 2020).

Ao analisar os modelos gerados nota-se que as classes de RQD se distribuem em camadas seguindo a orientação do corpo geológico, que, nesta região, é formado por uma sequência estratigráfica metassedimentar, denominada Sequência Canto. Para os demais parâmetros é utilizado o mesmo procedimento adotado para a construção do modelo de blocos do RQD.

Por fim, os modelos geomecânicos tridimensionais do RMR e Sistema Q foram gerados após a confecção dos modelos de blocos para cada parâmetro, seguido do cálculo dos pesos de cada bloco. Para o parâmetro condição de água é utilizado um valor padrão constante de peso 10 no caso do RMR e 1 para o Sistema Q, adicionado diretamente nos procedimentos de cálculo, sem a necessidade de confecção de um modelo de blocos específico, dado as dificuldades ou mesmo da impossibilidade de verificar as condições de água do maciço rochoso nos testemunhos de sondagem. Para o SRF é adotado o mesmo princípio da condição de água sendo definido o valor de 2,5. Relativo a uma condição de baixa tensão *in situ*, perto da superfície ou juntas abertas.

Vale ressaltar que para o cálculo do índice do Sistema Q o parâmetro RQD, diferentemente do cálculo do RMR, é utilizado o valor numérico deste parâmetro. Desta forma, o modelo de blocos do RQD deve ser elaborado por métodos de estimativas lineares, como por exemplo, a krigagem ordinária, ou seja, a não aditividade desta variável deve ser desconsiderada para a estimativa. Transformar esta variável em uma variável categórica de 100 classes não é viável do ponto de vista prático, além de acarretar uma correlação espacial baixa ou nula, inviabilizando uso de métodos geoestatísticos. A Figura 7 apresenta os modelos de blocos finais das estimativas dos índices do RMR e Sistema Q.

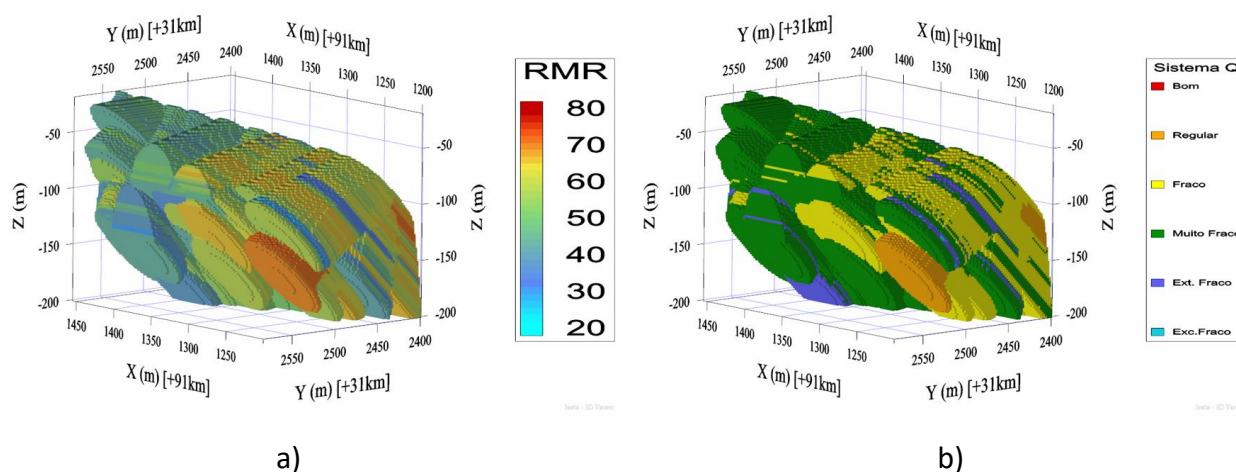


Figura 7 – Modelo de blocos final dos valores de RMR para estimativa por krigagem por indicadores. a) RMR; b) Sistema Q.

Fonte: (AUTOR, 2020).

4.2 Validação do Modelo

Logo após os modelos serem estimados é necessário realizar a sua validação, o objetivo da validação é verificar se o modelo é satisfatório. Para realizar essa validação existem algumas

técnicas. As técnicas que serão utilizadas para realizar a validação desta estimativa serão a Inspeção Visual e Validação Cruzada.

A inspeção visual é uma ferramenta simples para comparar os valores amostrados com os valores estimados, esta técnica é uma boa ferramenta para avaliar se método de estimativa é adequado.

Observando a Figura 8 é possível perceber que tanto os valores das amostras quanto os valores estimados dos blocos possuem uma boa correlação de valores e seguem um mesmo padrão espacial estratificado. Essa distribuição estratificada é condizente com as características geológicas da área de estudo, a qual é formada por uma sequência metassedimentar.

Além disso, observa-se também uma possível região de falha com valores de RMR baixos e bem representada no modelo de blocos, reproduzindo com fidelidades os valores descritos nos furos de sonda. Vale ressaltar que cada bloco do modelo possui dimensões de 2 x 2 x 2 m, dimensões adequadas para este estudo de caso devido ao melhor detalhamento e preservação da heterogeneidade dos valores dos índices do RMR e Sistema Q descritos ao longo dos furos de sonda.

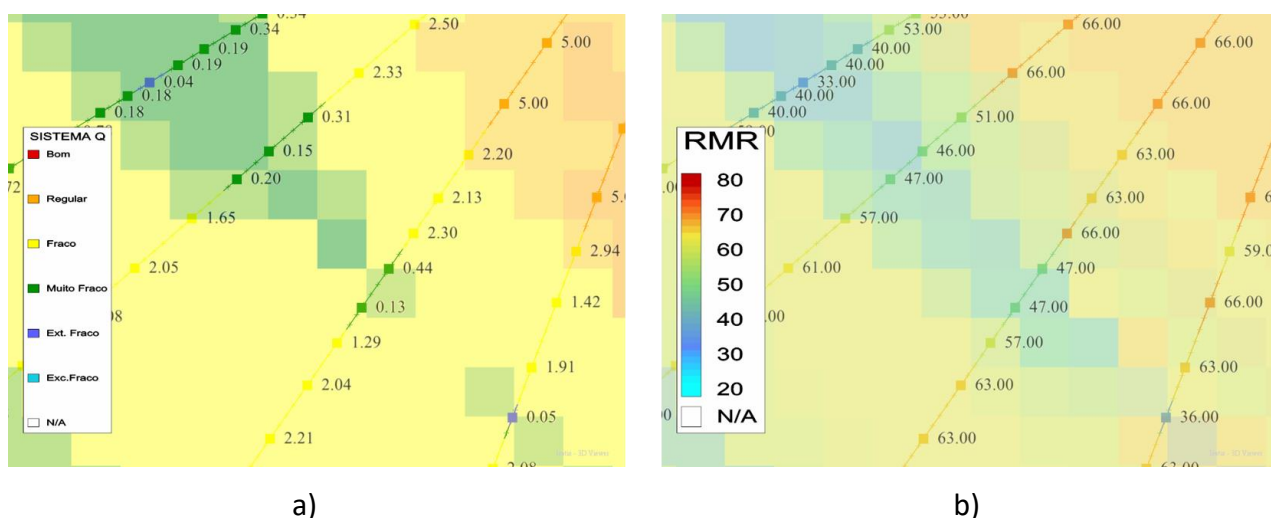


Figura 8 – Sessões de sondagem da área de estudo e modelo de blocos estimados. a) Sistema Q; b) RMR.
Fonte: (AUTOR, 2020).

A validação cruzada consiste na técnica onde cada ponto é removido e seu valor será estimado com os dados da estimativa, ou seja, os valores da variável em estudo nos pontos amostrados agora serão estimados e comparados com os valores originais da amostra. Com o *scatterplot* os valores estimados pela krigagem são confrontados com os valores verdadeiros sobre uma reta de regressão, quanto maior for a correlação entre os dados, melhor o nível da estimativa.

A validação cruzada não prova que o modelo de variograma escolhido esteja correto, mas prova que ele não está grosseiramente incorreto. Busca-se por uma distribuição gaussiana com média próxima de zero, ou seja, baixo viés, e baixa variância. Os resultados da validação cruzada para as estimativas do RMR e Sistema Q são apresentados na Figura 9.

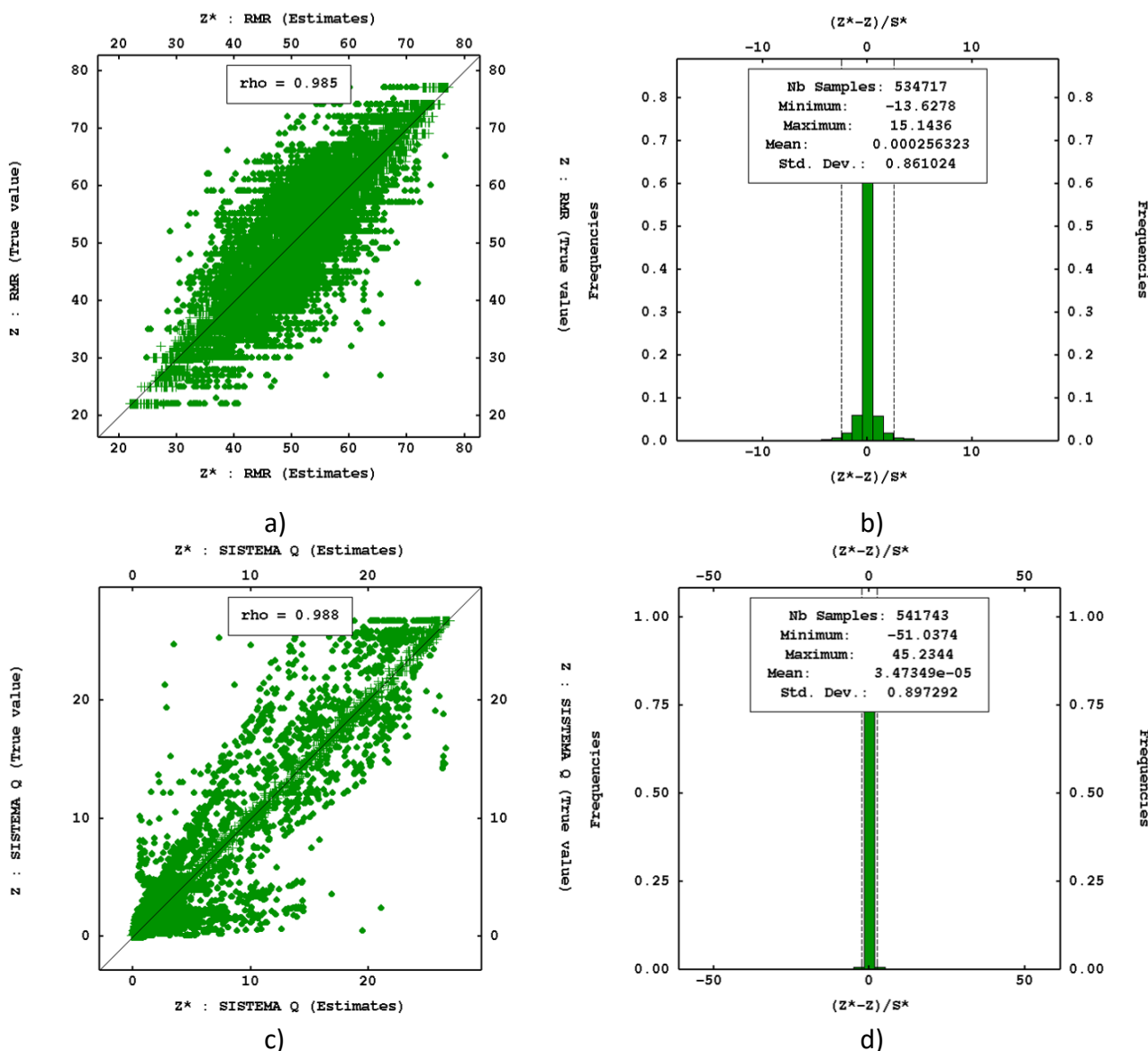


Figura 9 – Resultados da validação cruzada. a) Scatterplot dos valores estimados x reais - RMR; b) histograma do erro da validação cruzada - RMR; c) Scatterplot dos valores estimados x reais – Sistema Q; d) histograma do erro da validação cruzada – Sistema Q.

Fonte: (AUTOR, 2020).

Analisando os resultados acima o coeficiente de correlação para esta estimativa do RMR foi de 98,7% e para o Sistema Q de 98,8% com a média do erro bastante baixas para ambas as estimativas. Os métodos de validação utilizados nesse trabalho, mostraram que as estimativas foram boas e os modelos de blocos são satisfatórios.

4.3 Classificação geomecânica prévia do maciço rochoso do entorno de escavações subterrâneas.

Os modelos de blocos geomecânicos do RMR e do Sistema Q confeccionados anteriormente foram utilizados para uma definição preliminar da qualidade do maciço rochoso do entorno das futuras escavações. Para isso, foi utilizado uma ferramenta de corte (split) presente em programas



de planejamento de lavra para recortar os modelos de blocos somente na região compreendida pelos limites do projeto de escavação.

A Figura 10 ilustra os resultados dos recortes dos modelos de blocos das classes do RMR e Sistema Q com os projetos das futuras galerias, representando o zoneamento da qualidade do maciço rochoso do entorno das galerias. Através desta classificação prévia é possível identificar regiões com possíveis riscos geotécnicos e assim adotar medidas adequadas no desenvolvimento e reforço das galerias.

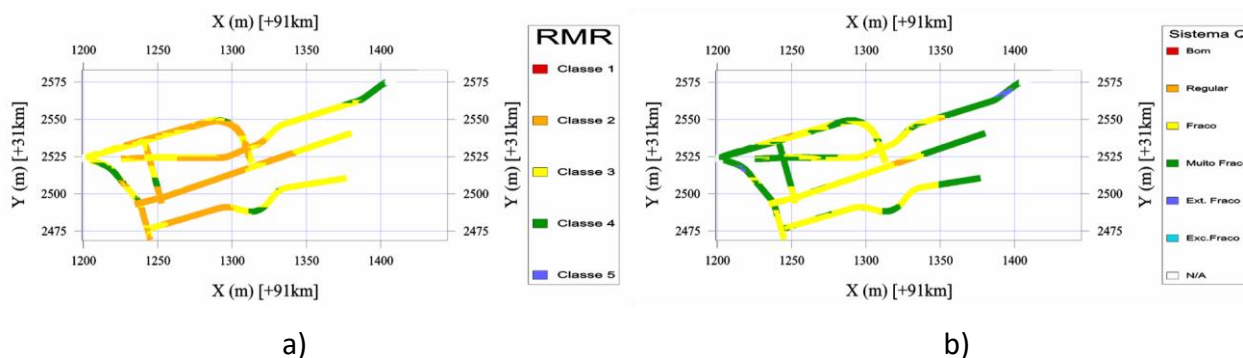


Figura 10 - Zoneamento da qualidade do maciço rochoso ao longo das galerias. a) RMR; b) Sistema Q
Fonte: (AUTOR, 2020).

Sendo assim, o procedimento para classificação geomecânica prévia do maciço rochoso do entorno de escavações subterrâneas através de modelos de blocos está concluído. Graças à combinação do conhecimento de caracterização geomecânica e geoestatística aplicada à geomecânica

5 DISCUSÃO DOS RESULTADOS

O banco de dados utilizado é caracterizado por variáveis não aditivas e possui um número reduzido de amostras, distribuídas em uma malha irregular em forma de leque com grande variação das distâncias entre as amostras, o que acarreta um adensamento das amostras nas proximidades da galeria e um grande distanciamento nas extremidades dos leques de sondagem. Ademais, possui falta de uniformidade no espaçamento, número de furos, distâncias e inclinação entre furos, baixa continuidade espacial e grande variação dos valores do RMR ao longo dos furos.

Em razão de tais características para obter um melhor resultado das estimativas foi utilizado uma vizinhança de busca com um grande alcance para englobar todos os blocos entre os furos de sonda. Juntamente com uma quantidade restritiva de amostras, máximo de 4 e mínimo de 2 amostras. Isso se fez necessário para reduzir a superestimativa dos resultados decorrente do cálculo da média ponderada dos pesos de cada amostra no bloco estimado nas regiões com baixa qualidade geomecânica e/ou pouco número de amostras, e assim, reproduzir da melhor forma os dados iniciais.

Embora a configuração do banco de dados não fosse a ideal, em uma malha regular bem distribuída, o método de estimativa por krigagem por indicadores adotado neste estudo

apresentou bons resultados e atendeu aos objetivos propostos para classificação geomecânica prévia do maciço rochoso do entorno de escavações subterrâneas usando modelos de blocos.

Os projetos das futuras galerias tiveram o seu entorno previamente classificado com base nos índices dos valores do RMR e Sistema, promovendo assim, a maximização do aproveitamento das informações contidas nos testemunhos de sondagem no setor mineral.

6 CONCLUSÃO

O bom aproveitamento das reservas minerais, associada a uma boa gestão de capital e pessoal devem ser as premissas daqueles que ocupam cargos de decisão no setor mineral. A sondagem com recuperação de testemunho é uma atividade que demanda bastante tempo e recursos financeiros. Utilizar testemunhos de sondagem somente para análises químicas é um total desperdício, várias e preciosas informações podem ser obtidas antes do envio para o laboratório, como por exemplo, características geomecânicas do depósito mineral.

A confecção e utilização de modelos de blocos geomecânicos da qualidade do maciço rochoso e demais parâmetros geomecânicos deve ser uma prática mais presente no setor mineral. As vantagens de sua utilização no planejamento das escavações e no aumento da segurança nas operações são inegáveis, pois fornece uma previsão da qualidade do maciço rochoso antes de ocorrer a escavação.

A utilização de modelos de blocos para classificação geomecânica prévia de escavações é uma aplicação direta dos modelos de blocos geomecânicos e se mostrou uma técnica eficaz. As duas metodologias de classificação utilizadas como exemplos neste artigo apresentaram bons resultados e com similaridades quanto as classes de qualidade do maciço rochoso.

O bom resultado desta classificação depende de uma adequada coleta de dados com descrições precisas e confiáveis dos testemunhos de sondagem, de uma confecção de modelos blocos das características geomecânicas com maior representatividade e proximidade possível com a realidade. Além de promover a maximização do aproveitamento das informações contidas nos testemunhos de sondagem.

Em suma, recomenda-se que o método de estimativa a ser utilizado deve ser sempre aquele com melhor reprodução das características originais do banco de dados. Para as estimativas dos índices de qualidade do maciço rochoso segundo as metodologias do RMR e Sistema Q a krigagem por indicadores é a técnica mais adequada, pois reduz a superestimativa de pequenos valores e subestimativa de grandes valores, reduzindo o viés seletivo de perda da distribuição dos valores dos dados originais e proporcionando uma estimativa mais precisa das características geomecânicas da área amostrada.

7 REFERÊNCIAS

- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6(4), 189–236.
- Bieniawski, Z. T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *Civil Engineer in South Africa*, 15(12).



- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*.
- Brady, B. H. G., & Brown, E. T. (2004). *Rock Mechanics for underground mining* Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- Brown, E. T. (1981). *ISRM suggested methods. Rock characterization testing and monitoring*. London: Royal School of Mines.
- Burrough, P. A. (1986). *Principles of Geographical. Information Systems for Land Resource Assessment*. Clarendon Press, Oxford.
- Bussab, W. de O., & Morettin, P. A. (2009). *Estatística básica*.
- Camargo, E. C. G. (1998). *Geoestatística: fundamentos e aplicações. Geoprocessamento Para Projetos Ambientais*. São José Dos Campos: INPE.
- Castaing, C., Genter, A., Chilès, J. P., Bourguine, B., & Ouillon, G. (1997). Scale effects in natural fracture networks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3–4), 45.e1-45.e18. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)00117-2](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)00117-2)
- Cruz, F. A. R. da. (2017). *Espacialização de parâmetro de rocha intacta em modelos de blocos utilizando krigagem da indicatriz*. [Master thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul]. <http://hdl.handle.net/10183/164588>
- de Oliveira Filho, P. F. (2015). *Epidemiologia e Bioestatística–Fundamentos para a Leitura Crítica*. Editora Rubio.
- Deere, D. U. (1963). Technical description of rock cores for engineering purpose. *Rock Mechanics and Engineer-Ring Geology*, 1(1), 16–22.
- Egaña, M., & Ortiz, J. M. (2013). Assessment of RMR and its uncertainty by using geostatistical simulation in a mining project. *Journal of GeoEngineering*, 8(3), 83–90.
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press on Demand.
- Hoek, E. (2006). *Practical Rock Engineering*. Evert Hoek Consulting Engineer Inc. North Vancouver. British Columbia, Canadá.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165–1186.
- Jeon, S., Hong, C., & You, K. (2008). Design of tunnel supporting system using geostatistical methods. In *Geotechnical aspects of underground construction in soft ground* (pp. 797–800). CRC Press.
- Journel, A. G. (1982). The indicator approach to estimation of spatial distributions. *Proceedings of the 17th APCOM International Symposium, New York*, 793–806.
- 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104157>
- Leite, L. de F. (2008). *Aplicação de métodos estatísticos e geoestatísticos no estudo de famílias de descontinuidades*. [Master thesis, Universidade Federal de Ouro Preto]. <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3304>
- Matheron, G. (1965). *Les variables régionalisées et leur estimation: une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature*. Masson et CIE.
- Redondo, F. (2003). *Classificação probabilística do padrão geomecânico de um maciço rochoso mineralizado com base no índice RQD*. [Master thesis, Universidade Estadual Paulista]. <http://hdl.handle.net/11449/92778%3E>



- Stark, P. (1979). Introdução aos métodos numéricos; tradução de João Bosco Pitombeira de Carvalho. *Interciência, Rio de Janeiro*, 426p., 53–64.
- Van de Wall, A. R. G., & Ajalu, J. S. (1997). Characterization of the geotechnical properties of rock material for construction purposes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3–4), 319.e1-319.e12. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)00208-6](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)00208-6)
- Vatanable, H. Y. (2018). *A geoestatística como ferramenta para estimar o Rock Mass Rating em modelos tridimensionais* [Master thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul]. <http://hdl.handle.net/10183/184887>
- Vilca, Y. C. (2019). *Modelagem geoestatística de variáveis geomecânicas estudo de caso: Mina Córrego do Sítio, Santa Bárbara/MG*. [Master thesis, Universidade Federal de Ouro Preto]. <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/11998>
- Yamamoto, J. K., & Landim, P. M. B. (2015). *Geoestatística: conceitos e aplicações*. Oficina de textos.
- You, K., & Barnes, R. J. (1997). Infill sampling design for tunnel rock classification. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(2), 207–215. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(96\)00054-X](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(96)00054-X)
- Zingano, A. C. (2002). *Modelamento geomecânico para o dimensionamento de pilares de carvão*. Phd thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

COMO CITAR ESTE ARTIGO:

Aquino, I. B. M., Rolo, R. M., Zingano, A. C., Lima, H. M. (2021). Classificação geomecânica prévia do maciço rochoso do entorno de escavações subterrâneas usando modelos de blocos estimados por krigagem dos indicadores. Estudo de caso: mineração fazenda brasileiro – Bahia/Brasil. *Holos*. 37(4), 1-23.

SOBRE OS AUTORES

I. B. M. AQUINO

Possui graduação em Engenharia de Minas pela Universidade Federal de Ouro Preto (2011) e mestrado em Engenharia Mineral pela Universidade Federal de Ouro Preto (2014). Atualmente é professor da Universidade Federal de Campina Grande. Tem experiência na área de Geomecânica, Geoprocessamento e elaboração de estudos ambientais diversos, com ênfase em Espeleologia. E-mail: iure.aquino@ufcg.edu.br
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0929-1014>

R. M. ROLO

Engenheiro de Minas, Mestre em geoestatística, doutorando em geoestatística. Tem domínio dos principais softwares de mineração utilizados pela indústria, domina programação em python aplicada às geociências e algoritmos de machine learning. Tem experiência em modelagem geológica implícita, fluxos de trabalho de estimativa e simulação de teores. E-mail: robertorolo@gmail.com
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9742-9692>

A. C. ZINGANO

Formado em Engenharia de Minas (1990) pela Universidade Federal do Rio grande do Sul, Doutor em Engenharia em 2002. Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1996) na área de geoestatística e doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2002) na área de mecânica de rochas, com doutorado sandwish na Universidade de West Virginia sob orientação do prof. Syd Peng. Estágio pós-doutoral na Universidade de West Virginia com atividades em projetos ligados à área de



geomecânica ligada a lavra de carvão. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia de Minas da UFRGS, dando aulas para as disciplinas de Geologia de Engenharia e Mecânica de Rochas para os cursos de Engenharia de Minas e Engenharia Civil. Atua na pós-graduação como orientador de mestrado para dissertações em controle de maciço e lavra subterrânea. Participa de projetos em geomecânica para a indústria de mineração em projetos de estabilidade de escavações subterrâneas e céu aberto, estabilidade de barragens e bacias de contenção, pilhas de minério e estéril. Responsável pelo laboratório de Mecânica de Rochas do LPM. Membro da ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, CBMR - Comissão Brasileira de Mecânica de Rochas, Comitê Internacional de Rochas Brandas da ISRM - International Society of Rock Mechanics, SME - Society of Mining, Metallurgy and Exploration. E-mail: andrezin@ufrgs.br
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3740-9104>

H. M. LIMA

Possui graduação em Engenharia de Minas pela Universidade Federal de Ouro Preto (1987), mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas (CPGEM) pela Universidade Federal de Minas Gerais (1993) e doutorado em Gerenciamento Ambiental - University of Wales, Aberystwyth, País de Gales (2001). É professor da Universidade Federal de Ouro Preto. Desenvolve estudos na área de Engenharia de Minas, com ênfase em desenvolvimento de mina, fechamento de mina e gerenciamento ambiental na mineração. E-mail: hernani.lima@ufop.br
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5595-4149>

Editor(a) Responsável: Francinaide de Lima Silva Nascimento

Pareceristas Ad Hoc: Vandervilson Carneiro e Milene Sabino Lana

