

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

SELTON DE OLIVEIRA LIMA

**MODELO GEOTÉCNICO COM SOFTWARE GEM4D DA MINA PILAR,
MINERAÇÃO CARAÍBA S/A**

RECIFE
2024

SELTON DE OLIVEIRA LIMA

**MODELO GEOTÉCNICO COM SOFTWARE GEM4D DA MINA PILAR,
MINERAÇÃO CARAÍBA S/A**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação
em Engenharia de Minas da
Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial
para a obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Robson Ribeiro Lima - UFPE

RECIFE

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Lima, Selton de Oliveira.

Modelo geotécnico com software GEM4D da Mina Pilar, Mineração Caraíba
S/A / Selton de Oliveira Lima. - Recife, 2024.

38 p. : il., tab.

Orientador(a): Robson Ribeiro Lima

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Minas -
Bacharelado, 2024.

Inclui referências.

1. Modelo geotécnico. 2. Basrock GEM4D. 3. Mina Pilar. 4. Mapeamento
geotécnico. 5. Descrição geotécnica de furos de sondagem. I. Lima, Robson
Ribeiro. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

SELTON DE OLIVEIRA LIMA

**MODELO GEOTÉCNICO COM SOFTWARE GEM4D DA MINA PILAR,
MINERAÇÃO CARAÍBA S/A**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação
em Engenharia de Minas da
Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial
para a obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia de Minas.

Aprovado em: 14 /06/ 2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. ROBSON RIBEIRO LIMA (Orientador)
(DEMINAS/ UFPE)

Prof. Me. CARLOS EDUARDO DA SILVA ARAÚJO (Examinador interno)
(DEMINAS/ UFPE)

Prof. Me. FILIPE BRITO MARINHO DE BARROS (Examinador interno)
(DEMINAS/ UFPE)

Prof. Dr. MARINÉSIO PINHEIRO DE LIMA (Examinador interno)
(DEMINAS/ UFPE)

Dedico este trabalho aos meus pais, aos quais tenho eterna gratidão pelo amor que transcende todas as adversidades, às minhas irmãs, por oferecerem um suporte valioso nos momentos de maior necessidade, às minhas queridas avós, cuja presença iluminou e inspirou cada passo da minha jornada nesta vida, e à minha namorada, por todo amor e por compreender as difíceis escolhas que fiz ao longo do meu trajeto.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Dr. Robson Ribeiro Lima, expresse minha profunda gratidão pela orientação acadêmica, amizade, valiosos conselhos, apoio incansável e pela confiança depositada em mim.

Agradeço aos professores e amigos do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Pernambuco, cuja contribuição foi fundamental para o meu desenvolvimento. A orientação dedicada, os conhecimentos valiosos e o apoio constante oferecido por essa comunidade acadêmica foram peças-chave.

Ao Engenheiro Lucas Renan Mendes Machado pela generosidade em compartilhar seus vastos conhecimentos, além do constante estímulo e orientação fornecidos ao longo de todo o processo.

Ao Engenheiro Me. Daniel Santos de Santana, coordenador da geotecnia, expresse minha profunda gratidão pelos conselhos, ensinamentos e oportunidades.

A equipe COGET, Eng. Jih Horng Liu, Eng. Carolina Imaculada, Eng. João Alberto, e tantos outros, agradeço pela paciência, pelos valiosos ensinamentos e pela dedicada contribuição de cada um de vocês em me proporcionar aprendizado.

RESUMO

Modelos geotécnicos são fundamentais para o entendimento e classificação da qualidade do maciço rochoso, garantindo a previsibilidade dos riscos associados à execução de escavações. Neste trabalho, o objetivo central foi a utilização do *software* Basrock GEM4D para criação de modelos de blocos geotécnicos. Isso foi feito a partir de bancos de dados advindos da classificação RMR e Sistema Q. A metodologia incluiu a análise desses bancos de dados de descrição geotécnica dos testemunhos de sondagem e de mapeamentos de campo. Esses dados foram avaliados e integrados para a construção de um modelo que representasse a qualidade do maciço rochoso. As atividades envolveram a confecção de modelos de blocos utilizando o *software* Basrock GEM4D. Os dados utilizados neste estudo foram coletados na Mina Pilar, localizada no município de Jaguarari, Bahia, Brasil. Com o modelo de blocos geotécnico construído foi possível afirmar que, embora haja possibilidade de refinamento dos dados, a elaboração de modelos geotécnicos utilizando o *software* da Basrock é extremamente útil na avaliação geotécnica de escavações em minas subterrâneas. Este estudo confirma a eficácia da ferramenta na análise da qualidade do maciço rochoso.

Palavras-chave: Modelo geotécnico; Basrock GEM4D; Mina Pilar; Mapeamento geotécnico; Descrição geotécnica de furos de sondagem.

ABSTRACT

Geotechnical models are essential for understanding and classifying the quality of the rock mass, ensuring the predictability of risks associated with excavation activities. In this work, the main objective was to use the Basrock GEM4D software to create geotechnical block models. This was done using data derived from RMR and Q System classifications. The methodology included the analysis of databases containing geotechnical descriptions of borehole cores and field mappings. These data were evaluated and integrated to construct a model that accurately represented the quality of the rock mass. The activities involved creating block models using the Basrock GEM4D software. The data used in this study were collected at the Pilar Mine, located in the municipality of Jaguarari, Bahia, Brazil. With the constructed geotechnical block model, it was possible to assert that, although there is potential for data refinement, the creation of geotechnical models using Basrock software is extremely useful in the geotechnical evaluation of underground mine excavations. This study confirms the tool's effectiveness in analyzing the quality of the rock mass.

Keywords: Geotechnical model; Basrock GEM4D; Pilar Mine; Geotechnical mapping; Geotechnical description of boreholes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes básicos de um sistema de classificação de maciço rochoso	13
Figura 2 - Procedimento para cálculo do RQD	15
Figura 3 - Ábaco de Barton	18
Figura 4 - Distância entre Mineração Caraíba e Salvador	22
Figura 5 - Mapa geológico simplificado do vale do Rio Curaçá, mostrando as áreas de ocorrência de corpos máfico-ultramáficos.	23
Figura 6 - Corpo de minério da mina	24
Figura 7 - Distribuição de mapeamentos e valores de RQD	26
Figura 8 - Distribuição espacial e valores de RQD dos furos	28
Figura 9 - Dados compositados e classificados em valores de Q'	29
Figura 10 - Parâmetros estatísticos apresentados no GEM4D	30
Figura 11 - Parâmetros da grade	32
Figura 12 - Diferentes vistas dos modelos geotécnicos com valores de Q' e RMR. A) Modelo 3D com valores de Q' . B) Seção 2D do modelo com valores de Q' . C) Modelo 3D com valores de RMR. D) Seção 2D do modelo com valores de RMR	34
Figura 13 - Região separada para criação do modelo de bloco	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DO MACIÇO ROCHOSO	13
2.1.1	Índice de qualidade de rochas (RQD).....	14
2.1.2	Classificação Geomecânica de Bieniawski (RMR).....	15
2.1.3	Sistema de Classificação Q de Barton.....	16
2.1.4	Índice Modificado Q`	19
2.2	MÉTODOS COMPUTACIONAIS COM BASROCK GEM4D	19
3	MINA PILAR – MINERAÇÃO CARAÍBA S/A	21
3.1	LOCALIZAÇÃO	21
3.2	CONTEXTO GEOLÓGICO	22
4	METODOLOGIA	25
4.1	MAPEAMENTO GEOTÉCNICO	25
4.2	DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA DE TESTEMUNHOS DE SONDAGEM.....	26
4.3	MODELAGEM NO SOFTWARE BASROCK GEM4D	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
6	CONCLUSÕES	36
	REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

A extração de minerais do subsolo é o principal componente da atividade de lavra, que pode ser realizada tanto em superfície, por meio da lavra a céu aberto, quanto em profundidade, por meio da lavra subterrânea. Para garantir a segurança e a eficiência dessas operações, são necessários modelos geotécnicos que definam espacialmente domínios ou unidades com comportamento geotécnico semelhante. O foco principal desses modelos é assegurar que os taludes em minas a céu aberto, assim como as galerias e realces em minas subterrâneas, sejam dimensionados corretamente. Quatro fatores diferentes devem ser incorporados para construir um modelo ideal, são eles: os litotipos, que são incluídos no modelo geológico, as discontinuidades principais, que são identificadas no modelo estrutural, o modelo hidrogeológico, que descreve as unidades hidrogeológicas e seus parâmetros, e o modelo geomecânico, que trata das classes geomecânicas e parâmetros geotécnicos pertinentes. Essa abordagem integrada é essencial para uma avaliação abrangente e precisa do ambiente geotécnico, pois fornece uma base sólida para o planejamento e execução das operações mineradoras. Para simplificar esta perspectiva, a utilização de classificações baseadas em parâmetros geotécnicos para criação dos modelos é uma alternativa utilizada para somar informações geotécnicas na análise de escavações, ainda que haja a necessidade de cautela quanto ao impeto de determinar características de uma área de interesse com dados geotécnicos dispersos, pelo risco resultante da falta de dados, que compromete a qualidade da estimativa, pois esse tipo de classificação é oriundo da sobreposição de parâmetros individuais atribuídos qualitativamente, sendo nem sempre úteis para a delimitação de um domínios (READ & STACEY, 2009; AQUINO, 2019; SALA, 2022).

A utilização de modelos de blocos para representar a variação espacial de variáveis de classificação geotécnica e qualidade do maciço rochoso no setor mineral é menos comum, para a maioria das vezes, a avaliação da qualidade do maciço rochoso encontrado na área de estudo é baseada em valores médios obtidos de um conjunto de furos. Geralmente, os dados descritos são extrapolados e inferidos por meio da interpretação de seções 2D, usando apenas a experiência do modelador e sem o uso de ferramentas computacionais para

auxiliar (AQUINO, 2019). Em contrapartida, a utilização do *software* GEM4D demonstrará como o auxílio de ferramentas computacionais, aliadas com métodos de técnicas de estimativas determinísticas intrínsecas ao próprio programa, Vizinho mais próximo e Inverso do quadrado da distância, podem auxiliar na criação rápida de modelos de blocos com características de parâmetros de classificações geotécnicas.

1.1 OBJETIVOS

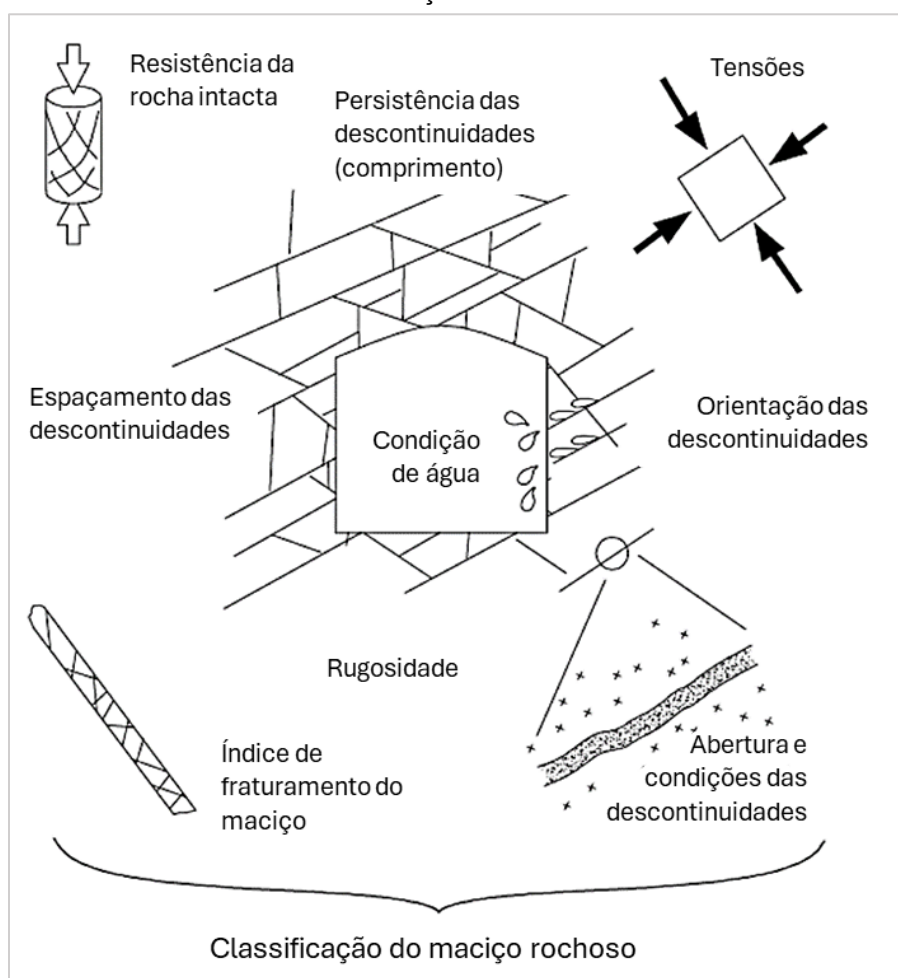
O presente trabalho tem como objetivo principal de caracterizar as limitações e utilidades do *software* Basrock GEM4D na criação de um modelo de blocos geotécnico da Mina Subterrânea de Pilar, através da integração de dados provenientes de mapeamentos de campo e descrições geotécnicas obtidas de testemunhos de sondagem. O emprego do *software* da Basrock, visa demonstrar sua eficácia na simplificação da elaboração deste tipo de modelo. Assim, conferindo sua eficácia em proporcionar uma compreensão generalista do comportamento do maciço rochoso em cada área de interesse da mina, contribuindo para o aprimoramento das estratégias de exploração e segurança.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DO MACIÇO ROCHOSO

Para projetos de engenharia civil e na mineração subterrânea, a classificação geotécnica é essencial porque fornece informações importantes sobre propriedades dos maciços rochosos, a partir da observação de componentes básicos presentes (FREITAS, 2016). Os componentes básicos de um sistema de classificação de maciço rochoso são mostrados na Figura 1.

Figura 1 - Componentes básicos de um sistema de classificação de maciço rochoso



Fonte: Modificado de Hutchinson & Diederichs (1996).

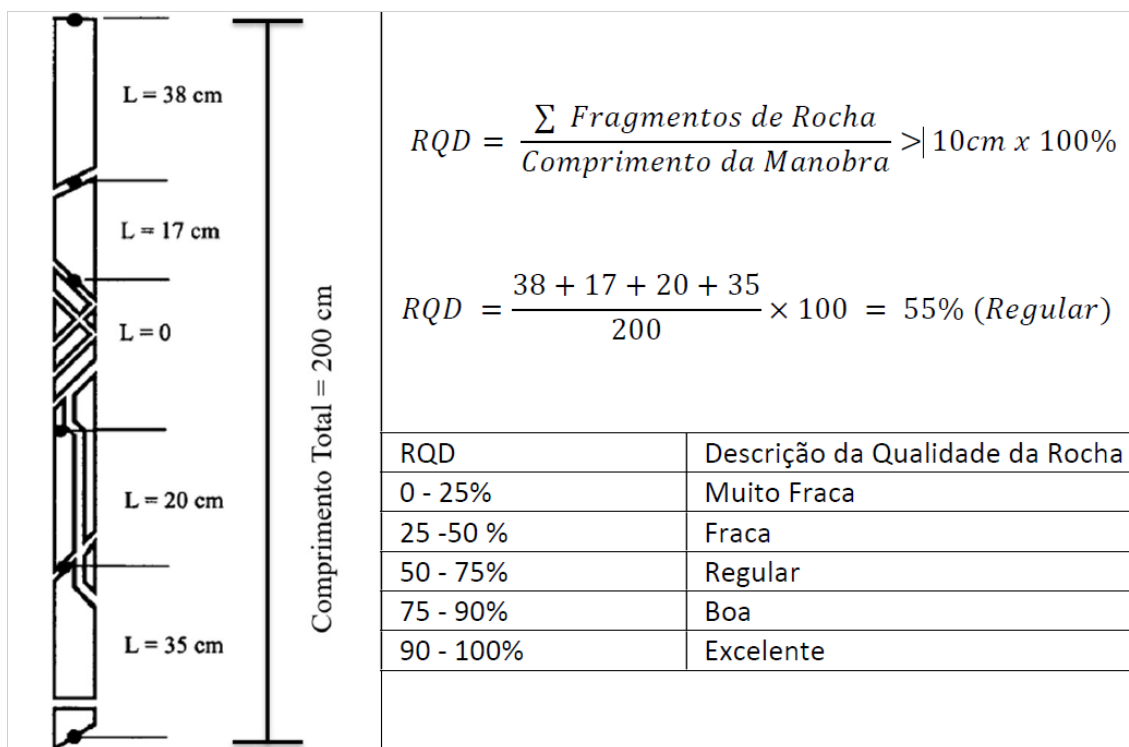
Existem várias abordagens para esse gênero de classificação, que evoluíram com o objetivo de avaliar o comportamento das rochas em diferentes contextos de escavação. Uma das abordagens mais difundidas é o *Rock Quality*

Designation (RQD) de Deere (1963), que faz parte de diversas outras classificações. Além dele, o Sistema GSI (*Geological Strength Index*), criado por Hoek *et al.* (1995), o Índice Q (*Tunneling Quality Index*), proposto por Barton *et al.* (1974), e o RMR (*Rock Mass Rating*), proposto por Bienawski (1989), são amplamente utilizados em projetos de engenharia, alguns deles incorporando o próprio RQD em suas formulações, para determinar os índices de qualidade do maciço. Esses sistemas de classificação são essenciais para garantir a segurança e eficiência das operações subterrâneas, bem como para o sucesso de projetos de engenharia que envolvem escavações em rocha (AQUINO, 2019; FREITAS, 2016).

2.1.1 Índice de qualidade de rochas (RQD)

O índice RQD, criado por Deere (1963), visa determinar a qualidade do maciço rochoso calculando o grau de fraturamento. Nas obras de engenharia, este índice é frequentemente usado como um guia básico. Mas não leva em consideração os parâmetros qualitativos das descontinuidades, como alteração, preenchimento e rugosidade das estruturas, e apenas faz uma análise quantitativa. O índice é calculado como a proporção entre o total de fragmentos de amostra com comprimento superior a 10 cm e o comprimento total do testemunho de sondagem recuperado durante cada manobra, este procedimento descrito para cálculo do índice pode ser visto na Figura 2. Os métodos para calcular o RQD foram inicialmente projetados para usar-se em testemunhos de sondagem com diâmetro mínimo de 54,7 mm (DEERE, 1963 *apud* AQUINO, 2019). Ainda assim, no caso de mapeamentos de campo, o valor de RQD pode ser estimado com base no número de descontinuidades por unidade de volume, ou seja, será calculado a partir do J_v , que é o contador volumétrico de juntas, com base no espaçamento médio de cada família de descontinuidade. Este segundo método é RQD Volumétrico e foi validado por Palmstrom em 2005.

Figura 2 - Procedimento para cálculo do RQD



Fonte: Aquino (2019), modificado de Deere & Deere (1989).

2.1.2 Classificação Geomecânica de Bieniawski (RMR)

Bieniawski (1973) apresentou o sistema de classificação de maciços rochosos conhecido como RMR (Rock Mass Rating), utilizando dados de escavações de obras civis e rochas sedimentares na África do Sul. A versão inicial foi alterada em relação aos parâmetros avaliados e às pontuações atribuídas. Apenas em 1989, Bieniawski (1989) apresentou a versão conhecida como RMR₈₉ (CHARBEL, 2015; FREITAS, 2016). Para realizar essa classificação, cinco parâmetros são usados:

- 1) Resistência uniaxial da rocha intacta (UCS);
- 2) Índice de qualidade da rocha (RQD);
- 3) Espaçamento das descontinuidades;
- 4) Condições das descontinuidades, como abertura, persistência, rugosidade, preenchimento e condição da parede das descontinuidades;
- 5) Presença de água;

Cada parâmetro está listado com sua representatividade e valor atribuído na Tabela 1. O valor total do RMR é a soma dos valores encontrados para cada

parâmetro estudado. Após atingir esse valor, é possível ajustar a orientação da escavação em relação a orientação das descontinuidades. Os valores obtidos do resultado do RMR determinam a qualidade do maciço rochoso e variam de 0 (valor mínimo de um maciço muito pobre) a 100 (valor máximo para um maciço muito bom). Isso permite que os valores de RMR do maciço sejam utilizados para correlacionar e estimar os parâmetros do tempo de autossustentação do vão, da coesão e do ângulo de atrito (FREITAS, 2016).

Tabela 1 - Intervalo de classes e peso dos parâmetros do sistema de classificação RMR

A. Parâmetros de classificação e seus índices									
Parâmetros			Valores						
1	Resistência da rocha	Índice de carga pontual (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	Valores baixos recomendados		
		Compressão uniaxial (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Índice		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Índice		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento médio (m)		>2	0.6-2	0.2-0.6	0.06-0.2	<0.06		
	Índice		20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades		Superfície muito rugosa, não contínua, sem separação e sem intemperismo.	Superfície levemente rugosa, separação <1 mm, levemente intemperizada	Superfície levemente rugosa, separação <1 mm, forte intemperismo	Superfícies planas ou preenchimento <5 mm ou abertura entre 1-5 mm contínua	Preenchimento >5 mm ou abertura >5 mm contínua		
	Índice		30	25	20	10	0		
5	Presença de água	Fluxo de água por 10 m de galeria (l/min)	Sem ocorrência de água	<10	10-25	25-125	>125		
		Razão pressão da água na junta pela tensão principal	0	<0.1	<0.1	0.1-0.2	>0.5		
		Condições gerais	Seco	Pingos	Molhado	Gotejamento	Fluxo contínuo		
	Índice		15	10	7	4	0		
B. Ajustes para orientação das descontinuidades em relação a escavação									
Direção e mergulho das descontinuidades			Muito favorável	Favorável	Fraco	Desfavorável	Muito desfavorável		
Índices	Galeria		0	-2	-5	-10	-12		
	Fundações		0	-2	-7	-15	-25		
	Taludes		0	-5	-25	-50	-60		
C. Classificação geomecânica									
Escore			100-80	80-61	60-41	40-21	<20		
Classe			I	II	III	IV	V		
Descrição do maciço			Muito bom	Bom	Fraco	Pobre	Muito pobre		
D. Significado da Classificação geomecânica									
Classificação			I	II	III	IV	V		
Tempo de auto sustentação/ vão (m)			20 anos p/ 15 m	1 ano p/ 10 m	1 semana p/ 5 m	10 horas p/ 2,5 m	30 min p/ 1 m		
Coesão (kPa)			>400	300-400	200-300	100-200	<100		
Ângulo de atrito (°)			>45	35-45	25-35	15-25	<15		

Fonte: Freitas (2016), modificado de Bieniawski (1989).

2.1.3 Sistema de Classificação Q de Barton

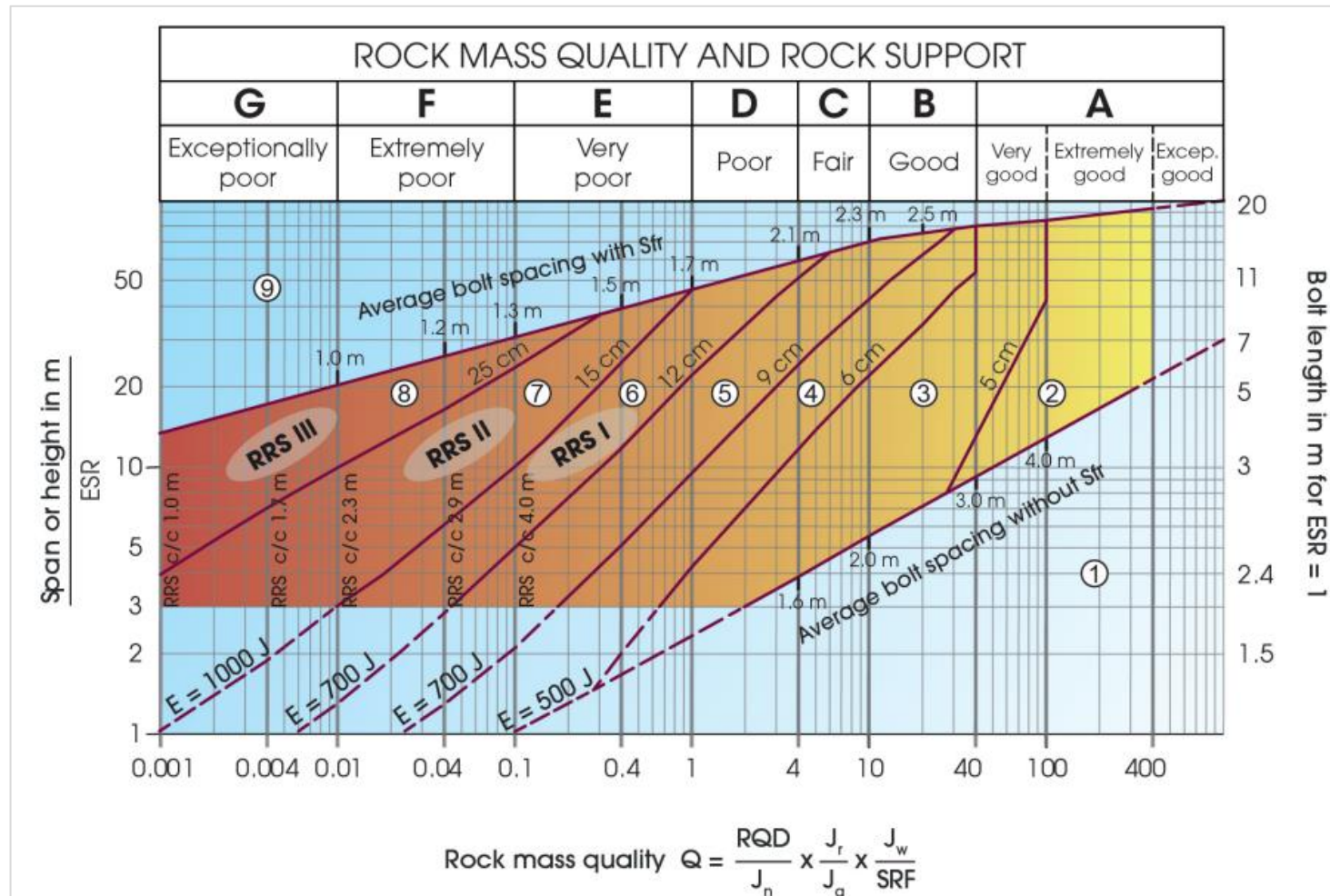
Em 1974, Barton, Lien e Lunde trabalharam juntos no *Norwegian Geological Institute* (NGI) para criar o Sistema Q, uma ferramenta para classificar

maciços rochosos. Seu desenvolvimento foi baseado em uma análise abrangente de dados de 212 túneis construídos na Escandinávia. O Sistema Q não é apenas uma abordagem quantitativa; também se estabeleceu como um sistema de engenharia importante, ajudando a simplificar o dimensionamento de escavações subterrâneas e suportes para túneis. Desde então, contribuiu significativamente para o desenvolvimento no campo da classificação de maciços rochosos. O índice de qualidade do maciço rochoso (Q) é baseado em seis parâmetros que descrevem uma variedade de particularidades do maciço rochoso. Esses parâmetros são usados pela classificação para calcular os requisitos de suporte em rocha dura (BARTON *et al.*, 1974; BRADY & BROWN, 2004; VILLAESCUSA, 2014). O valor numérico do índice Q é obtido a partir da Equação 1.

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

Cada variável da equação é um parâmetro. O RQD, que foi discutido anteriormente, fornece uma medida da qualidade global da rocha em uma determinada área. Ajuda a prevê como o maciço rochoso se comporta durante a escavação de túneis ou outras obras subterrâneas. Além do RQD, outros índices como J_n , J_r , J_a e J_w são essenciais para descrever as descontinuidades do maciço rochoso. O número de famílias de descontinuidades na rocha é mostrado pelo J_n , enquanto o J_r mostra a rugosidade dessas descontinuidades. O J_a representa o grau de alteração das descontinuidades, enquanto o J_w representa o impacto da água subterrânea nessas estruturas. Por último, o Fator de Redução de Tensão, ou SRF, é um índice importante que mostra o estado de tensão no maciço rochoso. Valores mais altos podem indicar pressões elevadas e deformações constantes na rocha, enquanto valores mais baixos podem indicar túneis com alta tensão, mas com condições de rocha favoráveis (BARTON *et al.*, 1974). O ábaco de Barton, separando os intervalos de classes utilizado para o dimensionamento de suportes e reforços de escavações, pode ser visualizado na Figura 3.

Figura 3 - Ábaco de Barton



Fonte: Barton (2015).

2.1.4 Índice Modificado Q'

Ao longo dos anos, o Sistema Q tem recebido várias atualizações. No entanto, quando se trata de classificar o maciço rochoso, existem dúvidas sobre os parâmetros do fator de tensão SRF e da pressão da água J_w . Essas questões surgem da ideia de que esses índices são fora do contexto da rocha e, frequentemente, podem ser derivados por meio de *softwares*. Desta forma, o índice modificado Q' foi criado para responder a essa questão. Ao não levar em consideração o tamanho e o formato da escavação, que são considerados separadamente em outros tipos de análises, o Índice Q' poderá identificar melhor a característica real do maciço rochoso. O módulo e a resistência do maciço rochoso devem ser calculados com o Q'. Por outro lado, o Q original é usado para estimar e dimensionar os suportes e a estabilidade (FREITAS, 2016; HOEK *et al.*, 1995; BARTON *et al.*, 1974). Na Equação 2 pode ser vista a forma de obter o Índice Modificado Q'.

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \quad (2)$$

2.2 MÉTODOS COMPUTACIONAIS COM BASROCK GEM4D

A modelagem computacional é o processo de criar modelos que representam uma realidade específica. Na mecânica das rochas, são utilizadas as características geológicas, geográficas e geométricas conhecidas, esses modelos ajudam a prever o comportamento dos maciços rochosos ao redor de aberturas subterrâneas (FREITAS, 2016).

O *software* Basrock GEM4D foi criado por Frans Basson em outubro de 2012, na cidade de Perth, na Austrália Ocidental. Esse pacote computacional é apresentado pelo criador como um gestor geotécnico em quatro dimensões, referindo-se a estas dimensões como o espaço tridimensional em conjunto com uma informação visual contida. Esta ferramenta encontra-se gratuita e de livre acesso, e apresenta-se como uma alternativa simples para a execução de diversas atividades e tarefas no ramo da mineração e da geotecnia (BASSON, 2019). Na utilização do *software* da Basrock, são compreendidos apenas

métodos determinísticos, sendo eles interpoladores que não usam da probabilidade, apenas a geometria da distribuição espacial dos dados amostrados para produzir uma combinação linear dos valores amostrados para calcular a medida de uma grandeza no espaço. O primeiro deles, um método simples de interpolação multivariada, a interpolação pelo vizinho mais próximo, funciona para uma ou mais dimensões. Este algoritmo cria um interpolante constante por partes escolhendo o valor mais próximo sem levar em consideração os valores dos pontos próximos. Em outras palavras, dentro do raio de busca especificado, o valor estimado sempre é igual ao valor da amostra mais próxima. É frequentemente usado para interpolações rápidas em áreas de estudo bem amostradas devido à sua simplicidade. Outro método é a interpolação pelo inverso do quadrado da distância, ela encontra o valor em cada ponto alvo calculando uma média ponderada onde os pesos são determinados pelo inverso do quadrado da distância entre os pontos de dados e os pontos alvo. A normalização dos pesos é tal que todos os pesos somam um. Isto significa que se um ponto de dados estiver mais próximo do ponto alvo, terá mais influência no resultado nesse ponto alvo; portanto, a estimativa é uma combinação linear de informações de pontos vizinhos. Esta abordagem é, portanto, baseada apenas em métodos locais: nenhuma informação global ou aproximação a ela. Sendo assim, neste método nenhum cálculo ocorre se um ponto de dados estiver mais próximo do ponto de destino definido como Distância Mínima, nessas situações, o valor do ponto de dados é considerado igual ao valor do resultado. Se cada vizinho estiver a menos que esta distância mínima do alvo, então a média desses pontos de dados chega ao ponto alvo (AQUINO, 2019).

3 MINA PILAR – MINERAÇÃO CARAÍBA S/A

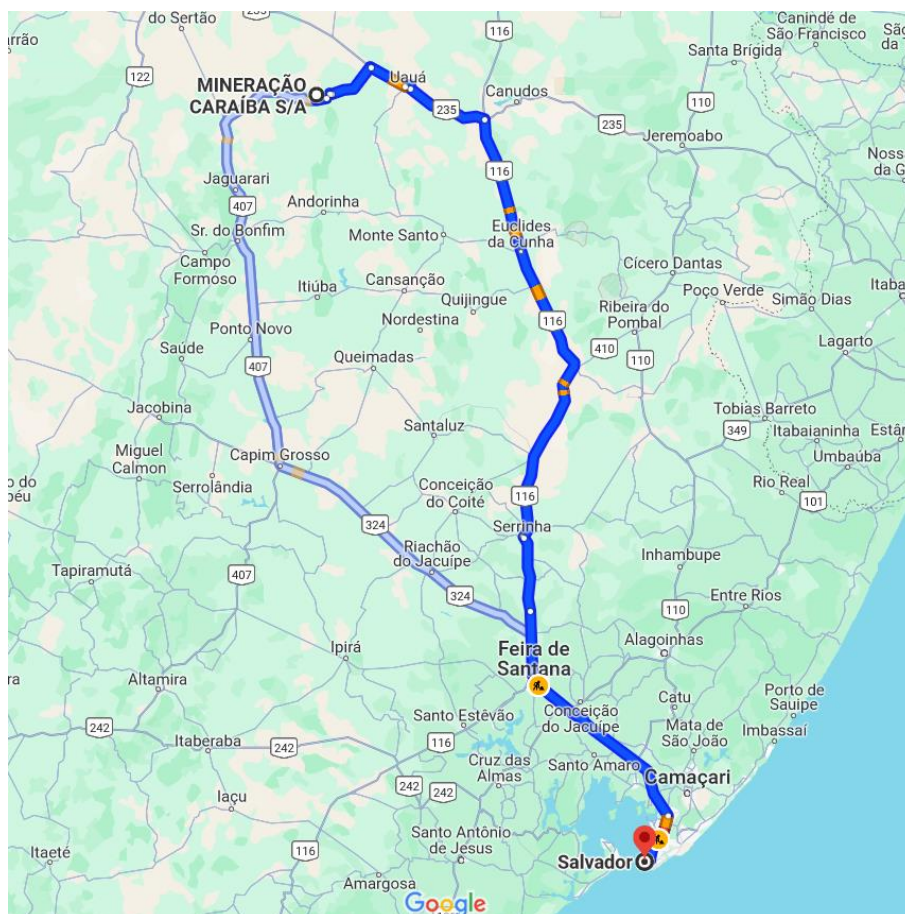
A Mineração Caraíba S/A é uma empresa especializada na extração de cobre. Descoberto em 1874 no sertão baiano, o depósito de minério de cobre foi identificado. Mas somente em 1944 que o Departamento Nacional de Produção Mineral (antigo DNPM, atual ANM) identificou seu potencial produtivo. Francisco Baby Pignatari, em 1969, iniciou os estudos de viabilidade, e em 1974, o empreendimento passou ao controle do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). Em 29 de outubro de 1979, sob o nome de Caraíba Metais S/A, iniciaram-se as operações da mina a céu aberto. Posteriormente, em 1986, teve início a exploração da mina subterrânea (MSB), mantida até os dias atuais. A privatização da empresa teve início em 1988, culminando em sua inclusão no Programa de Privatização Nacional em 1994, momento em que passou a ser denominada Mineração Caraíba S/A, nome que perdura até os dias atuais.

Em 2016, a MCSA foi adquirida pela empresa canadense Ero Copper Corporation, detentora de 99,6% de participação na Mineração Caraíba S/A. Atualmente, a empresa opera duas minas subterrâneas: a Mina de Vermelhos, situada em Curaçá, e a Mina Pilar, que se faz referente no presente trabalho.

3.1 LOCALIZAÇÃO

A Mina Subterrânea de Pilar está localizada no Vale do Curaçá, ao norte-nordeste do estado da Bahia, no distrito de Pilar, que faz parte do município de Jaguarari. Está situada a cerca de 480 quilômetros de Salvador, na Bahia. O acesso à mina é feito pela BA-314. A Figura 4 mostra a localização da mina no mapa, destacando sua distância da capital baiana.

Figura 4 - Distância entre Mineração Caraíba e Salvador

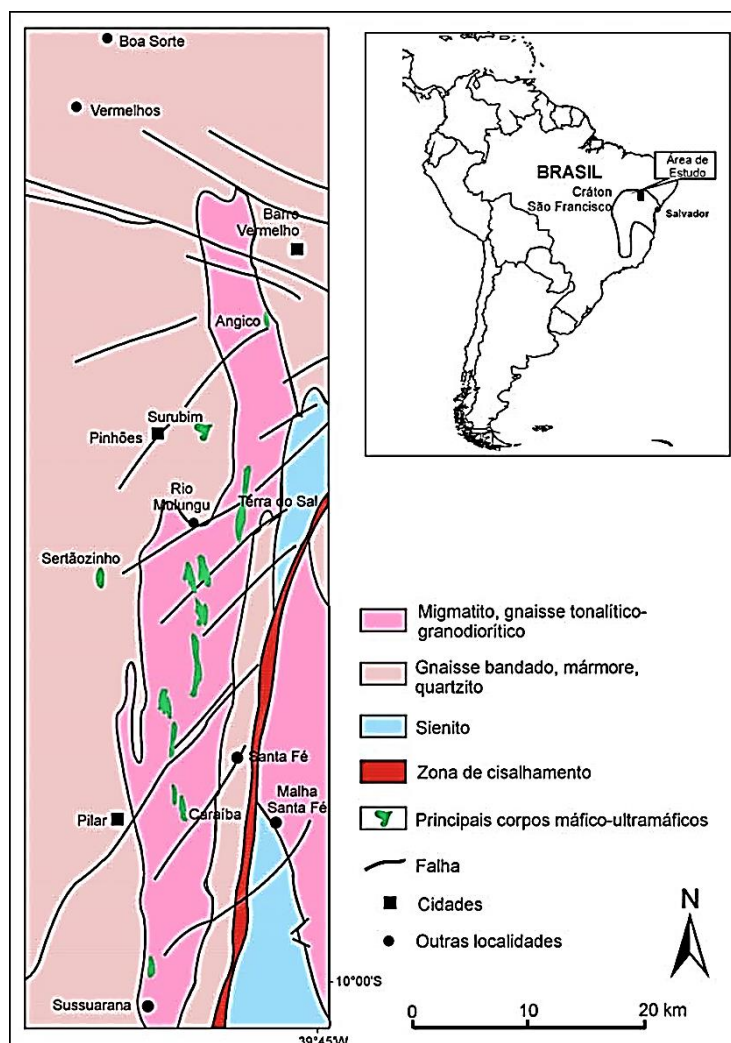


Fonte: O autor

3.2 CONTEXTO GEOLÓGICO

Uma sequência de rochas máficas e ultramáficas, como noritos, gabro-noritos e piroxenitos, que são encontradas principalmente em granitos e gnaisses, compõem a área da mina. Esta é uma localização pré-cambriana no Vale do Rio Curaçá, ao nordeste do Cráton do São Francisco. Devido ao alto grau metamórfico e polideformação, uma faixa do Vale do Curaçá se estende norte-sul (MAIA, 2019; TEIXEIRA *et al.*, 2010). A Figura 5 apresenta o mapa geológico do vale do Rio Curaçá de forma simplificada, indicando as áreas de ocorrências dos corpos citados.

Figura 5 - Mapa geológico simplificado do vale do Rio Curaçá, mostrando as áreas de ocorrência de corpos máfico-ultramáficos.

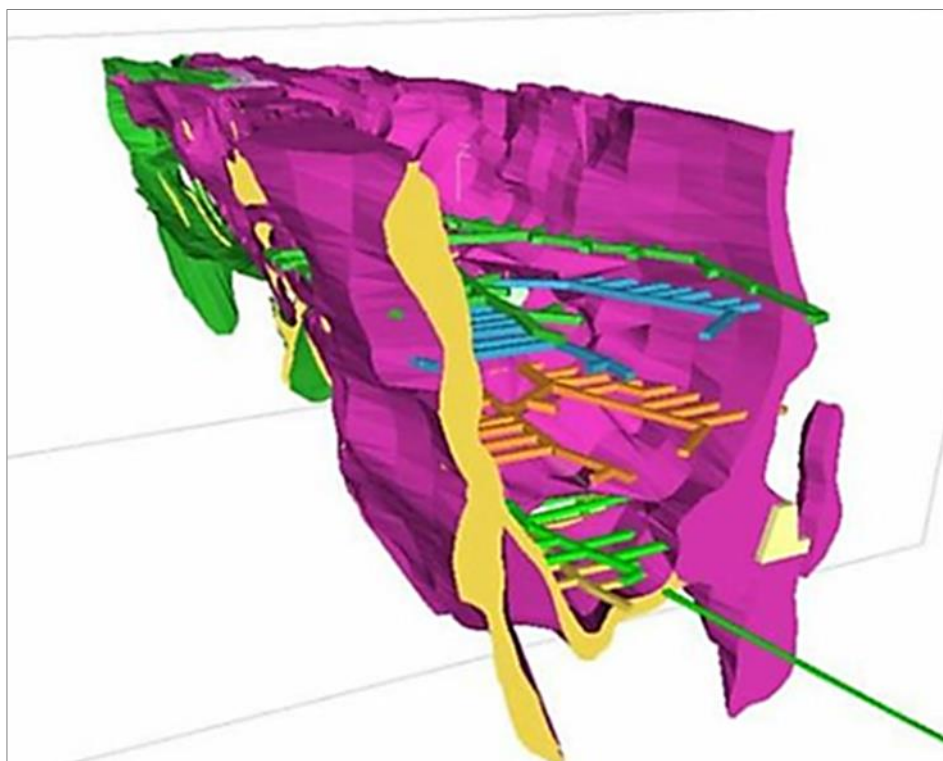


Fonte: Teixeira *et al.* (2010), modificado de Delgado & Souza (1981).

A estrutura geológica é ilustrada por um sinforme com um eixo inclinado de 10 a 30 graus para o norte-noroeste. A segmentação primária do terreno é afetada por áreas de cisalhamento, dobras e falhas. Com mergulhos de médio a alto, as principais falhas são longitudinais. Seguem falhas conjuntas de várias orientações e falhas menores. Além dessas características, famílias adicionais de juntas e falhas menores sustentam a segmentação secundária do maciço. Os contatos geológicos também podem indicar áreas instáveis, especialmente aquelas associadas a falhas. O minério é principalmente composto de sulfetos de cobre, como a calcopirita e a bornita, que são principalmente encontrados em piroxenitos, em formas maciças, remobilizadas, disseminadas e

secundariamente em fraturas. O minério é extremamente heterogêneo em todo o espaço, não havendo nenhuma continuidade longitudinal, lateral ou vertical em todos os níveis. De acordo com os mapas de isoteores, as concentrações de sulfetos de cobre são encontradas nas charneiras das dobras da segunda fase. Por outro lado, durante a terceira fase, as áreas ricas, compostas por corpos cilíndricos horizontais, foram verticalizadas. Além da estrutura geológica, o minério é submetido a um controle litológico claro, com os sulfetos de cobre principalmente presentes nos piroxenitos e melanoritos (MAIA, 2019; TEIXEIRA *et al.*, 2010). O corpo de minério da mina pilar pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 - Corpo de minério da mina



Fonte: Maia (2019), *apud* Mineração Caraíba S/A (2013).

4 METODOLOGIA

O método empregado para a realização do trabalho de criação do modelo de blocos utilizou-se da adoção de dois extensos bancos de dados desenvolvidos pela equipe de Geotecnia da mina Pilar. Estes são o banco de dados de Mapeamento geotécnico em campo e o banco de dados da Descrição geotécnica dos testemunhos de sondagem. Com base nesses dados, foi possível elaborar o modelo de blocos utilizando o *software* GEM4D.

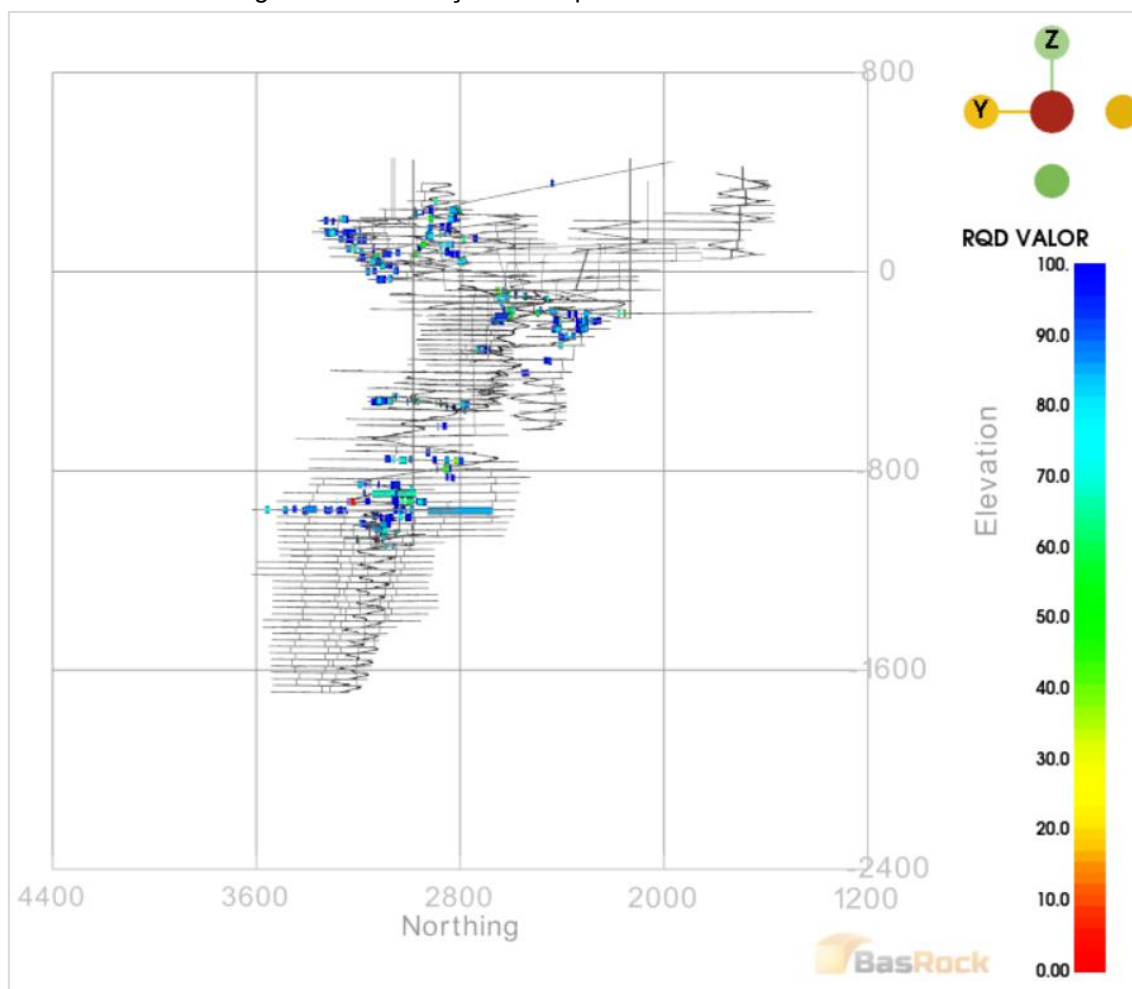
4.1 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO

Para o trabalho foram utilizadas informações de cerca de 530 mapeamentos geotécnicos de campo, realizados de setembro de 2021 a março de 2024, por geotécnicos e técnicos de mineração em diversas localidades e em diferentes etapas da mina.

O mapeamento geológico-geotécnico foi realizado para produzir uma representação detalhada dos elementos do ambiente geológico da mina, em uma escala mapeada. Este mapeamento foi essencial para realizar avaliações qualitativas preliminares sobre possíveis problemas geotécnicos no local. Para executar o trabalho, duas condições principais foram atendidas: a representação e descrição dos componentes litoestruturais, incluindo a descrição quantitativa das principais famílias de descontinuidades e do RQD, e a determinação de parâmetros do maciço, como rugosidade e alteração. Estas características foram medidas e registradas para auxiliar na classificação geotécnica, permitindo a elaboração de um modelo geotécnico preciso, essencial para o planejamento e execução segura das atividades de escavação na mina.

Na Figura 7 pode-se observar a localização e distribuição destes mapeamentos nas galerias da mina Pilar, indicados por seus valores de RQD (o mapa da mina mostrado na Figuras 6, e posteriormente na Figura 7, contém os escaneamentos de galerias realizadas e as *wireframes* de projetos de galerias que serão realizadas futuramente).

Figura 7 - Distribuição de mapeamentos e valores de RQD



Fonte: O autor.

4.2 DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA DE TESTEMUNHOS DE SONDAGEM

Nesse trabalho, utilizamos dados de diversas campanhas de sondagem realizadas pela empresa, totalizando cerca de 600 testemunhos de furos descritos geotecnicamente. Esses furos, geralmente com um diâmetro de 36,5 mm e uma média de 10 metros por manobra de sondagem, resultaram em aproximadamente 70 mil metros de testemunhos descritos. As sondagens foram realizadas em diversas regiões e em diferentes fases da mina, integrando-se ao banco de dados.

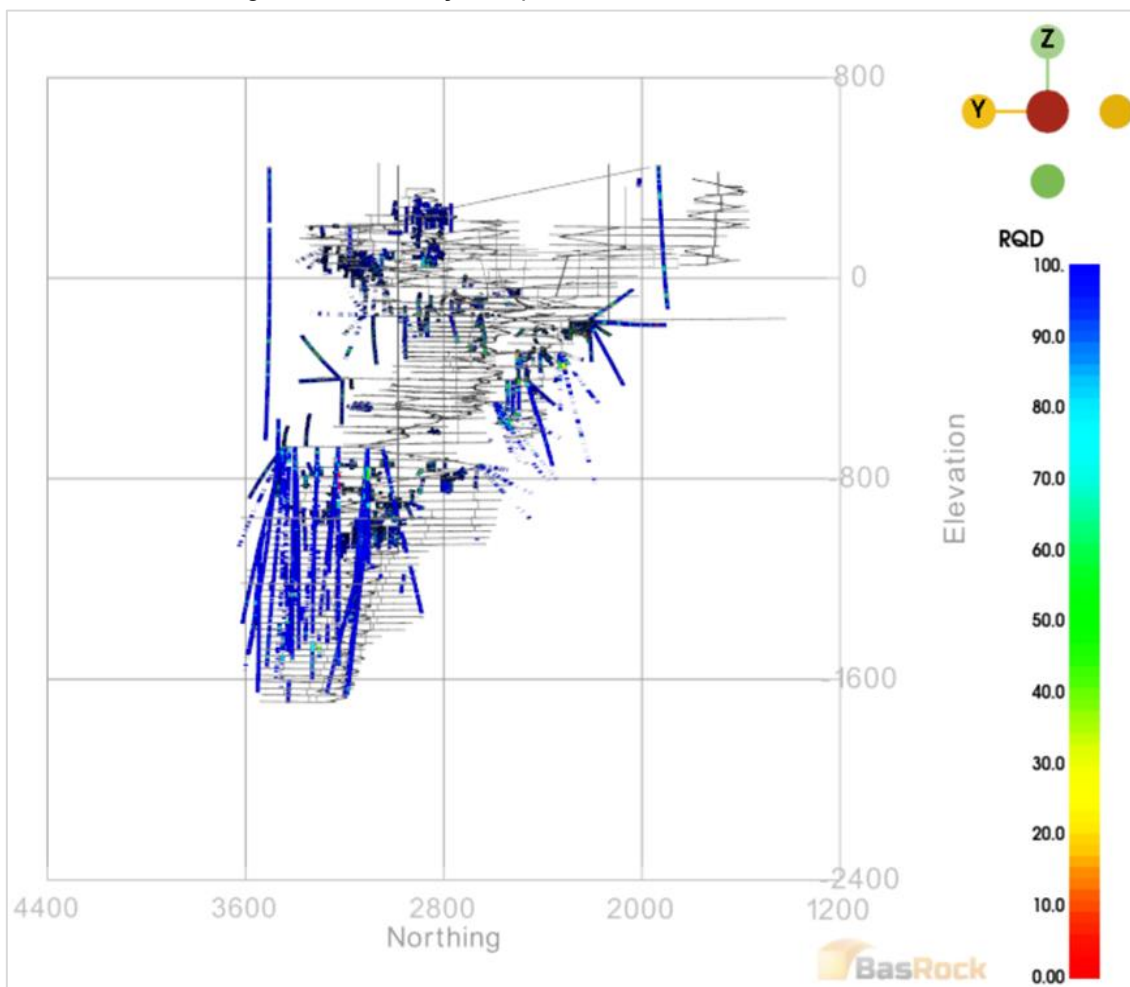
Para obter amostras representativas de depósitos minerais, especialmente aqueles em profundidades significativas ou de difícil acesso, realizamos atividades de sondagem. Após a coleta das amostras, conduzimos análises geomecânicas. A análise geomecânica, essencial para compreender as

propriedades e o comportamento dos materiais geológicos, foi realizada por meio de um procedimento organizado e estruturado. Este procedimento incluiu a preparação e descrição das amostras, seguido de testes específicos para determinar suas características geomecânicas e estruturais. O procedimento contém informações relacionadas à classificação geomecânica dos testemunhos de sondagem são normalmente registradas em um formulário padronizado. Esta é a metodologia desenvolvida pelo RMR e Sistema Q. Os parâmetros para realizar a classificação por tais metodologias são os seguintes:

- A. RQD: Neste item são seguidos os métodos descritos no trabalho de Deere (1963);
- B. Número de descontinuidades: Devem ser contadas todas as descontinuidades naturais presentes no intervalo determinado;
- C. Alteração: Trata-se do grau de alteração (estágios de descoloração do mineral) da matriz rochosa e das imediações das descontinuidades causadas pelo intemperismo. Em geral, os estágios iniciais do intemperismo reduzem a resistência da rocha;
- D. Resistência da rocha intacta: Este parâmetro é relacionado à resistência da rocha intacta à compressão uniaxial, que pode ser calculada usando vários instrumentos, incluindo canivete, unha e martelo de geólogo;
- E. Número de famílias (J_n): Uma família de descontinuidades é identificada quando as quebras naturais seguem uma frequência constante de ângulo de quebra. O número de famílias de descontinuidades e o espaçamento foram calculados pela média entre o número de descontinuidades presentes em uma manobra e o comprimento da manobra;
- F. Rugosidade (J_r): Esse parâmetro está relacionado as características das superfícies das paredes das descontinuidades. Se estas são planas lisas, planas irregulares, rugosas, entre outras;
- G. Alteração das descontinuidades (J_a): As condições de alteração das paredes de descontinuidades, como descoloração, mudanças na mineralização e a presença de material diferente da rocha, estão incluídas neste item;
- H. Preenchimento: Esse item se refere a espessura e as características do tipo de material que preenchem as fraturas.

Na Figura 8 pode-se observar a distribuição espacial dos furos de sondagem e os valores de RQD ao longo deles.

Figura 8 - Distribuição espacial e valores de RQD dos furos



Fonte: O autor.

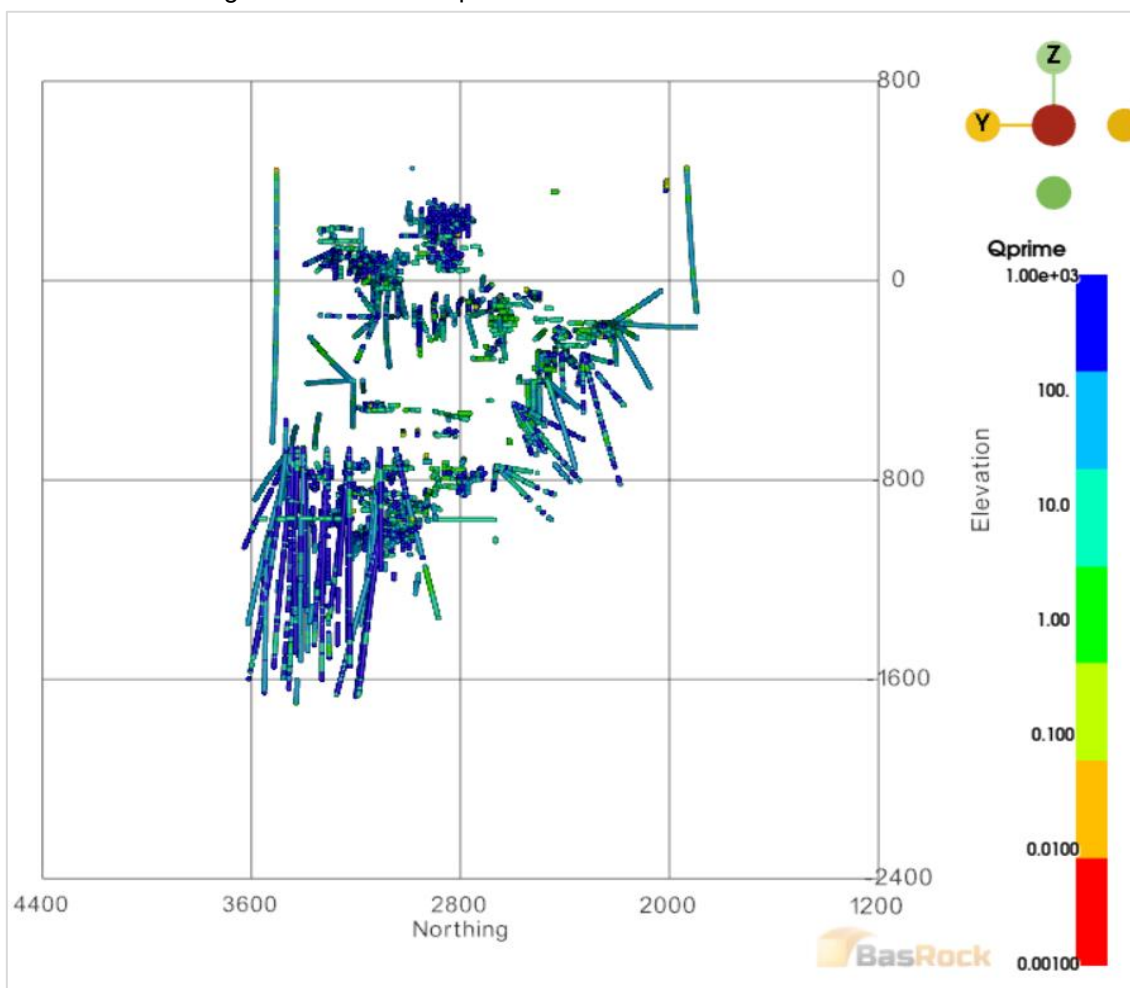
4.3 MODELAGEM NO SOFTWARE BASROCK GEM4D

De forma simplificada, um modelo de blocos é uma grade regular de coordenadas com valores associados a cada ponto. Cada ponto na grade representa os valores típicos no centro de um volume retangular ao redor do ponto. Na geotecnia, esses valores típicos podem ser obtidos por interpolação de pontos de dados próximos ou adicionados manualmente com base nas propriedades do maciço rochoso. A criação de modelos de blocos utilizando o programa segue dois passos principais, a criação de uma grade regular de pontos de coordenadas ao redor do volume de interesse e a atribuição de valores

a cada um destes pontos, representando valores para um pequeno volume retangular circundante ao ponto de coordenada. A criação dos modelos geotécnicos utilizando são simplificações que podem ser utilizadas na maioria dos casos.

O processo inicial na elaboração do modelo envolveu a compilação dos resultados, a integração e regularização, utilizando o *software*, das sondagens e mapeamentos em intervalos regulares de comprimentos iguais de 0,5m, resultando em aproximadamente 170 mil pontos de dados. A seleção deste conjunto de dados considerou coordenadas espaciais e os valores associados relevantes para este estudo, incluindo informações de localização (Leste, Norte e Elevação), classificação RMR e o índice modificado Q' . Esses dados constituem a base primordial para a construção do modelo de blocos geotécnicos e podem ser vistos na Figura 9.

Figura 9 - Dados compostados e classificado em valores de Q'

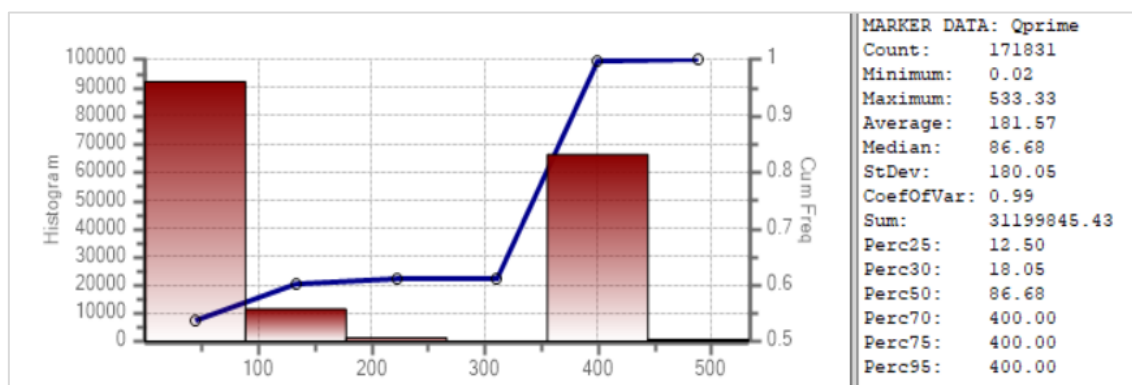


Fonte: O autor.

O segundo passo, proposto pela rotina do *software*, consiste em analisar a distribuição espacial, estatística e aplicar os filtros desejados aos dados, filtros esses que podem ser a exclusão de um determinado tipo de dado ou até uma faixa de valores. Entretanto, como essa proposta de modelo foi realizada buscando maximizar a quantidade de dados presentes, filtros não foram aplicados. A distribuição espacial dos dados foi verificada, mas não houveram modificações e nem ajustes manuais.

O *software* calcula automaticamente a distribuição de valores e os parâmetros estatísticos dos dados e os apresenta numa interface. Com os pontos de dados do Q' de mapeamentos e descrições de furos inseridos, apresenta-se um histograma de dois picos, ou bimodal, mostrando duas áreas distintas de alta frequência, picos. Nos detalhes da distribuição estatística dos dados inseridos, têm-se que: valor mínimo de Q' é 0,02 e o valor máximo 533,33, a média de valores dos dados é 181,57 e a mediana é 86,6, desvio padrão é 180,05, já o coeficiente de variação é de 0,99. Os parâmetros estatísticos apresentados podem ser vistos na Figura 10.

Figura 10 - Parâmetros estatísticos apresentados no GEM4D



Fonte: O autor.

Com os pontos de dados carregados e analisados, para criação da grade regular de pontos é preciso ajustar os parâmetros de regulação de grade dentro do *software*, estimando e verificando a precisão dos dados de acordo com a densidade e espaçamento deles. É possível alterar os limites do modelo, o raio de busca dos dados a serem interpolados, a resolução da grade e algumas opções de criação de isosuperfícies. Os métodos de interpolação dentro do

GEM4D são limitados, como comentado anteriormente, existem apenas dois métodos, sendo ambos determinísticos. Neste trabalho foi utilizada a opção de interpolação pelo inverso do quadrado da distância, pois este método de interpolação é conhecido por gerar uma superfície mais suave e contínua, resultando em transições graduais e maior precisão, especialmente em áreas com variações graduais dos dados e, em termos gerais, oferece uma representação mais realista e compatível com análises subsequentes.

A cada ajuste, uma grade regular é gerada automaticamente, permitindo ao usuário visualizar os parâmetros propostos. Quando o modelador estiver satisfeito, a partir de seus conhecimentos da área e continuidade conhecida em campo e seu grau de satisfação com o refinamento dos resultados, ele poderá visualizar grade criada e a utilizar para o modelo de blocos geotécnico. Os ajustes configurados para a grade de criação do modelo de blocos geotécnico do presente trabalho tiveram os limites nas coordenadas leste, norte e elevação as seguintes: limite mínimo 719,6, 1893,3, -1697,2 e limite máximo 1539,0, 3629,1, 455,0. O raio de distância máxima para busca de dados para interpolação foi de 29 metros. A resolução foi definida por blocos do modelo de dimensões de 18,0m a leste, 40,0m a norte e 50,0m na elevação, sem ajuste de inclinação. A janela de ajuste dos parâmetros pode ser vista na Figura 11.

Figura 11 - Parâmetros da grade

GEM4D Shephard parameters

Interpolation method

☒ Inverse distance ☐ Nearest neighbour

☐ Use the data 'as-is' without interpolation

"Nearest neighbour" is used by 'Colour meshes' and ignored by 'Iso-surface'

Model bounds

EastingMin: 719.6 EastingMax: 1539.0

NorthingMin: 1893.3 NorthingMax: 3629.1

ElevationMin: -1697.2 ElevationMax: 455.0

Extend the data boundary by a fixed distance: 0.0

Search radius

Search radius: 29 Search radius ratio: 0.010

Estimate an appropriate search radius from the data

Resolution

Easting: 18 Northing: 40 Elevation: 50

Reset to ensure square blocks with max resolution: 50

Iso-surface options

Number surfaces: 1 Increment value: 0.000

NOTE: This is a floating form that can stay on top of the main GEM4D program, move it out of the way and press 'Update iso-surface/colours' on the main form to update the scene with the new values.

'Update iso-surface/colour' is directly adjacent to the button that opens this floating form

Close the floating form

Fonte: O autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

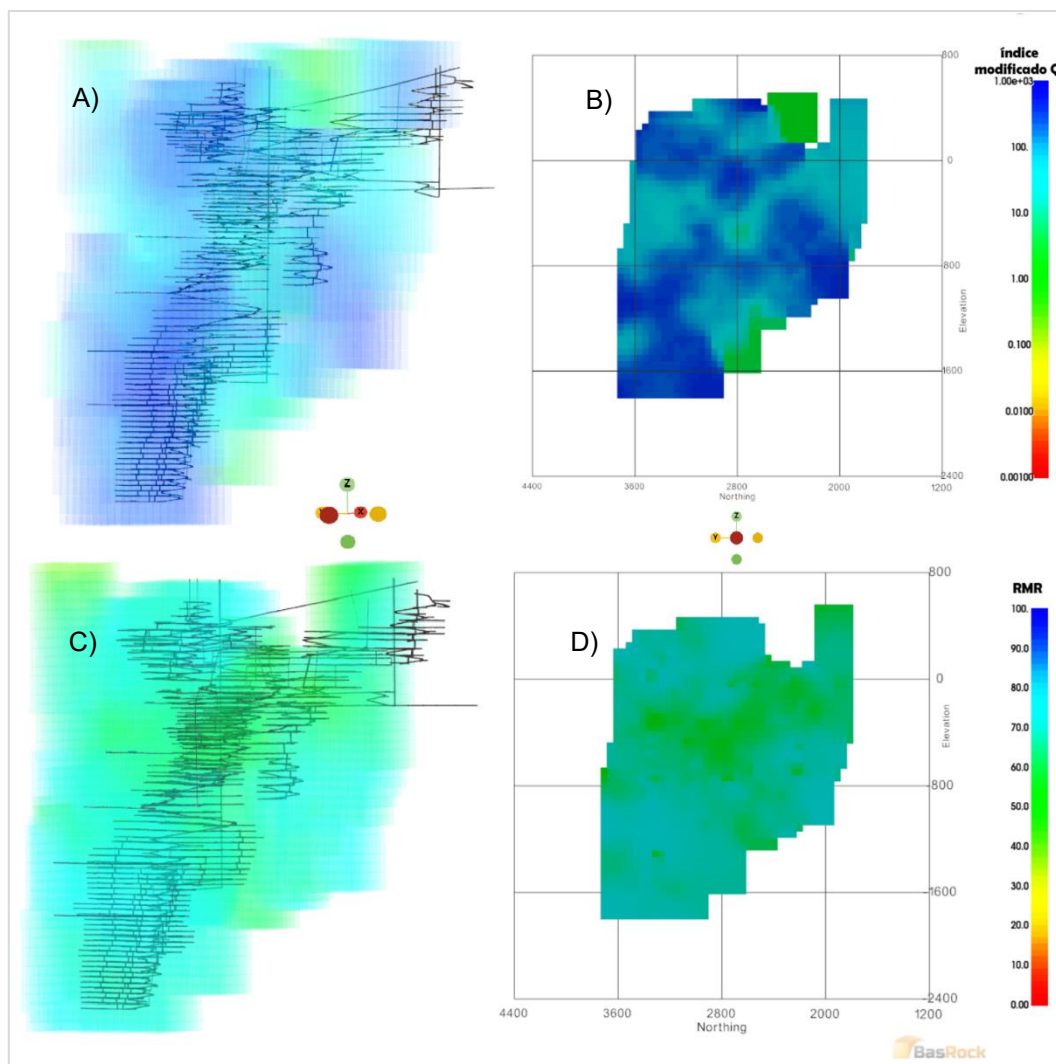
Neste capítulo são apresentados os resultados e ilustrações dos modelos de blocos confeccionados com o GEM4D para a qualidade do maciço rochoso, sistema RMR e índice modificado Q' .

A visualização dos resultados será utilizada para realizar as comparações entre os parâmetros das grades regulares e a possibilidade de distinguir em diferentes modelos por densidade e espaçamentos dos dados.

O modelo executado caracterizou a mina em regiões distribuídas com diferentes classes de maciço rochoso, com boa parte das áreas estando num intervalo de Q' classificado como Classe A (valores de 533 a 40) e RMR classificado como Classe II (valores de 80 a 61), outras áreas em um intervalo caracterizado por Q' classificado como Classe B (valores de 40 a 10) e RMR classificado como Classe III (valores de 60 a 41), e áreas minoritárias da mina classificadas com Q' de Classe C, D e E (valores de 10 a 0,1) e RMR classificado também como Classe III.

A Figura 12 ilustra os resultados das estimativas, apresentando o modelo geotécnico dos dados, com os valores de Q' e de RMR, em seções 2D e os modelos 3D.

Figura 12 - Diferentes vistas dos modelos geotécnicos com valores de Q' e RMR.
 A) Modelo 3D com valores de Q' . B) Seção 2D do modelo com valores de Q' . C) Modelo 3D com valores de RMR. D) Seção 2D do modelo com valores de RMR.



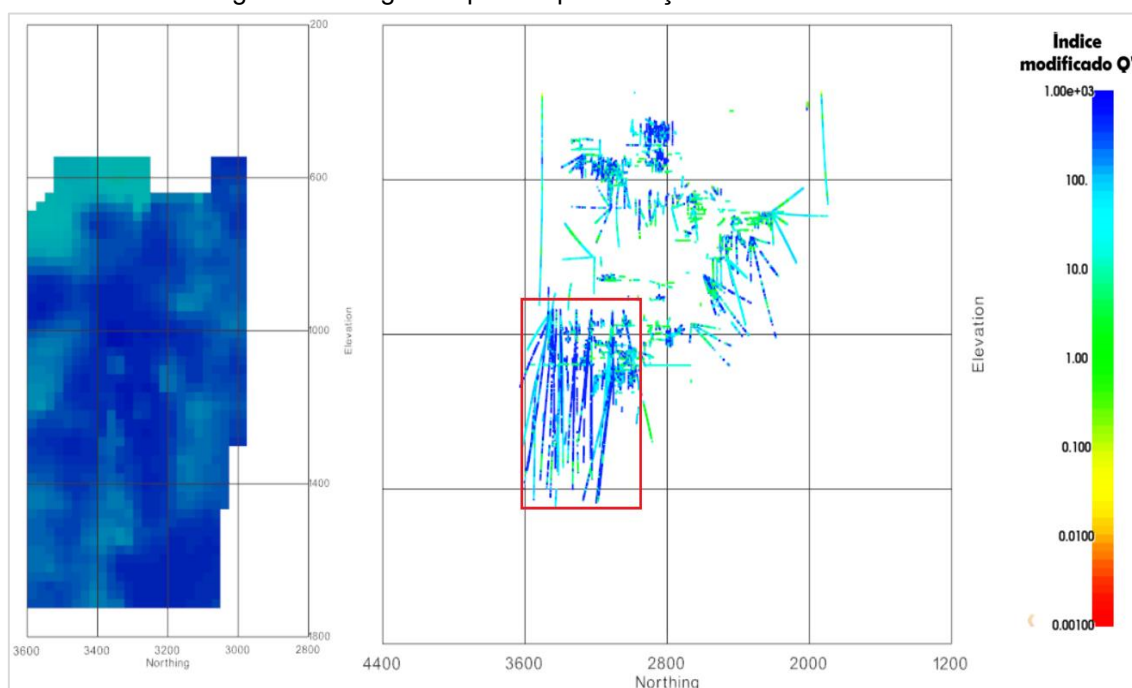
Fonte: O autor.

Se analisado cuidadosamente na Figura 12 acima e comparada com a Figura 9, anteriormente apresentada, em razão das limitações do programa, pode-se observar a generalização de boa parte dos dados e dos resultados do modelo em alguns locais que antes haviam dados com classes de valores dispares, fazendo assim com que o modelo de blocos se torne pouco representativo em algumas regiões do mapa.

Uma das proposições para a criação de modelos representativos utilizando a rotina do trabalho foi a de separar os dados por regiões que apresentem configurações próximas para o espaçamento e densidade dos dados, fazendo com que assim fossem executados vários pequenos modelos de

blocos em regiões que possuísssem características e parâmetros comuns entre si. Na Figura 13 pode-se observar um exemplo, uma das regiões com dados mais adensados e com menores espaçamentos foi isolada e feito o modelo de bloco de forma separada, pela diferença de distribuição das cores e, conseqüentemente, dos valores de Q' de ambos modelos percebe-se um melhor refino e representatividade do modelo aos dados disponíveis da área em questão.

Figura 13 - Região separada para criação do modelo de bloco



Fonte: O autor.

6 CONCLUSÕES

Com base nos modelos geotécnicos obtidos, observa-se que o *software* Basrock GEM4D se apresenta como uma ferramenta viável para a criação de modelos geotécnicos rápidos e simplificados. Contudo, o uso da ferramenta deve ser cuidadosamente analisado pelo usuário, pois a superestimação do RMR ou do Índice Q' pode alterar a classificação do maciço rochoso e introduzir riscos às operações subterrâneas. A finalidade da representação espacial da qualidade do maciço rochoso é criar um modelo tridimensional que permita identificar as diversas características e qualidades ao longo do maciço. Para assegurar a preservação e representatividade dos dados, é necessária a adoção de estratégias específicas para a busca e definição dos parâmetros de estimativa, o que não foi abordado neste trabalho.

O banco de dados utilizado é caracterizado por variáveis não aditivas e possui um número reduzido de amostras, distribuídas em malhas irregulares de furos de sondagem e mapeamentos geotécnicos, com grandes variações nas distâncias. Isso resulta em um adensamento das amostras nas proximidades da galeria, especialmente nos mapeamentos de campo, e um grande afastamento nas extremidades dos furos de sondagem. Além disso, o banco de dados apresenta falta de uniformidade no espaçamento, no número de dados e nas distâncias, baixa continuidade espacial e grande variação dos valores do RMR e do Índice Q' ao longo dos furos. Como mencionado por Read & Stacey (2009), esse tipo de classificação nem sempre é útil para a delimitação de domínios, devido à sobreposição de parâmetros individuais qualitativos que variam conforme a coleta e o responsável por ela.

Portanto, o programa terá maior conformidade e representatividade com a criação e inserção de bancos de dados com espaçamentos regulares e uniformes. Assim, com as experiências presentes neste trabalho recomenda-se a utilização *software* Basrock GEM4D em casos de estimativas de menor escala, como a criação de um modelo de blocos geotécnicos para estimar a qualidade do maciço rochoso em torno de uma escavação planejada.

REFERÊNCIAS

AQUINO, Iure Borges de Moura. **Modelo de blocos para dimensionamento prévio de reforço e suporte para escavações subterrâneas**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

BARTON, N. "Using the Q-system Rock Mass Classification and Support Design", **NGI, Oslo**, 2015.

BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. Engineering classification of Rock Masses for the design of tunnel support. **Rock Mechanics Felsmechanik Mécanique des Roches**, v. 6, n. 4, p. 189–236, 1974.

BASSON, Frans. **GEM4D Geotech block models process description**. Perth, AUS. Basrock. 19 abr. 2019. PDF. 5 slides. color. Disponível em: <https://basrock.co/pdf/GEM4D%20Geotech%20block%20models%20process%20description.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2024.

BIENIAWSKI, Z. T. Engineering classification of jointed rock masses. **Civil Engineer in South Africa**, África do Sul, v. 15, n. 12, p. 335 – 344, 1973.

BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering rock mass classifications**: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. New York: Wiley, 1989.

BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. **Rock Mechanics for underground mining** Dordrecht: Springer Science, 2004.

CHARBEL, P. A. **Gerenciamento de risco aplicado à diluição de minério**. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

DEERE, D. U.; DEERE, D. W. **The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1988. p. 91-91–11. DOI: 10.1520/STP48465S. Disponível em: <http://astm.org/doiLink.cgi?STP48465S>.

DEERE, D. U., Technical description of rock cores for engineering purpose, **Journal of the International Society of Rock Mechanics**, Urbana-Champaign, v. 1, n. 1, p. 16–22, 1963.

ERO COPPER. **2024 ANUAL REPORT**. 2024. Disponível em <<https://erocopper.com/investors/annual-reports/>>. Acesso em: 30 de jan. 2024.

ERO COPPER. **COMPANY OVERVIEW**. 2024. Disponível em <<https://erocopper.com/about/company-overview/>>. Acesso em: 30 de jan. 2024

FREITAS, J. P. S. **Elaboração do modelo geomecânico tridimensional para a reavaliação e setorização geotécnica dos realces da Mineração Caraíba**. Dissertação. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2016.

HOEK, E.; KAISER, P.K.; BAWDEN, W.F. **Support of Underground Excavations in Hard Rock**. Rotterdam: Balkema Publishers, 1995.
MAIA, Leandro de Lima. **Estudo de melhoria da resistência à compressão uniaxial de enchimento de mina tipo Paste Fill da Mineração Caraíba S/A**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

MINERAÇÃO CARAÍBA. **Geologia de longo prazo da Mineração Caraíba: Relatório Técnico**. Projeto Mina Subterrânea. (Relatório Interno) Jaguarari, 2013. 85p.

PALMSTROM, Arild. Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 20, n. 4, p. 362–377, 2005.

READ, J.; STACEY, P. **Guidelines for Open Pit Slope Design**. 1. ed. Collingwood: CSIRO PUBLISHING, 2009.

SALA, Leonardo Alberto. **Metodologia de construção de modelo geotécnica com uso de geoestatística**. 2022. 87 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

TEIXEIRA, J. B. G. et al. Capítulo IV - DEPÓSITOS DE COBRE DO VALE DO RIO CURAÇÁ, BAHIA. In: BRITO, Reinaldo Santana Correia de; SILVA, Maria da Glória da; KUYUMJIAN, Raul Minas (Ed.). **Modelos de depósitos de cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo**. Brasília: CPRM, 2010. 213 p., il. (Série Metalogenia). Programa Geologia do Brasil. p. 71-95.

VILLAESCUSA, E. **Geotechnical design for sublevel open stoping**. Nova York: CRC Press, 2014.