

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



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

Metodologia para a Criação do Modelo 3D de Classificação do Maciço Rochoso

CARNEIRO, F.

Geólogo, Jacobina, Bahia, Brasil, fernandescarneiro@gmail.com

RESUMO: O presente trabalho busca desenvolver uma atualização de metodologia para a criação do modelo bidimensional e tridimensional de classificação do maciço rochoso usando o software Leapfrog como uma ferramenta de modelagem. O modelo é composto de dados de entrada confiáveis para análises empíricas e numéricas, porque são realizados através do mapeamento sistemático de galerias de minas. O modelo consiste na delimitação de domínios geomecânicos baseados no sistema *Rock Mass Rating* (RMR) e no sistema Q (Barton). A metodologia garante consistência com a criação de um modelo 3D de alta qualidade de classificação do maciço rochoso, fornece melhor precisão para o planejamento de mina de curto a longo prazo e fornece informações valiosas aos engenheiros de mecânica das rochas para validar ou reforçar os padrões de suporte de contenção, melhorando, portanto, a segurança das minas. Finalmente, um melhor entendimento do modelo do maciço rochoso contribui para o aumento da recuperação da mineração e oferece um melhor controle sobre a diluição da mina.

PALAVRAS-CHAVE: Modelos, Sólidos, Classes de maciço rochoso.

ABSTRACT: The present work seeks to develop a methodology update for the creation of a two-dimensional and three-dimensional rock mass classification model using Leapfrog software as a modeling tool. The model is composed of reliable input data for empirical and numerical analyzes because they are performed through systematic mapping of mine galleries. The model consists of the delimitation of geomechanical domains that is based on the Rock Mass Rating system (RMR) and the Q system (Barton). The methodology ensures consistency with the creation of a high quality rock mass classification 3D model, provides better accuracy for short and longer term mine planning and gives valuable information to the rock mechanic engineers to validate or reinforce ground support standards, which, in turn, improves mines safety. Finally, a better understanding of the rock mass model contributes to increasing mining recovery and offer a better control on mining dilution.

KEYWORDS: Model, Solids, Rock mass classes.

1 Introdução

As minas em atividades têm o seu maciço rochoso composto por várias direções principalmente de descontinuidades com presença de falhas. O trabalho consiste na criação de um modelo tridimensional de classificação de maciço rochoso formado por domínios que apresentam comportamento mecânico e geológico estrutural semelhantes. A metodologia utiliza cinco etapas: coleta de parâmetros de classificação dos sistemas RMR e Q-system por meio de mapeamentos sistemáticos de trechos de dez metros realizados nas galerias; arquivamento e cálculo de valores de RMR e Q em planilha Excel; projeção dos valores RMR, Q e suas respectivas classes nos mapas de níveis das galerias; delimitação dos domínios com mesma classificação; criação de sólido 3D utilizando software Leapfrog. O principal objetivo do mapeamento de campo é a identificação das famílias de descontinuidades e das estruturas geológicas de grande e pequena escala que possam afetar a estabilidade da escavação.

Os domínios geomecânicos são agrupados em cinco classes: (Class I - very good rock - blue color), (Class II - good rock - green color), (Class III - weak rock - yellow color), (Class IV - poor rock - orange color) and (Class V - very poor - red color) (Barton 1977, Barton 2002). Estes domínios derivam dos agrupamentos das classes definidas originalmente no sistema Q. Os padrões de suporte também foram derivados e ajustados para cada domínio (NGI 2015). Os sólidos criados no software Leapfrog são definidos por cores. Os modelos de classificação geomecânica e padrão de contenção são utilizados com a finalidade de estimar a quantidade e



tipos de suportes a serem usados no planejamento de desenvolvimento da mina. A metodologia utilizada é descrita no fluxograma da Figura 1.

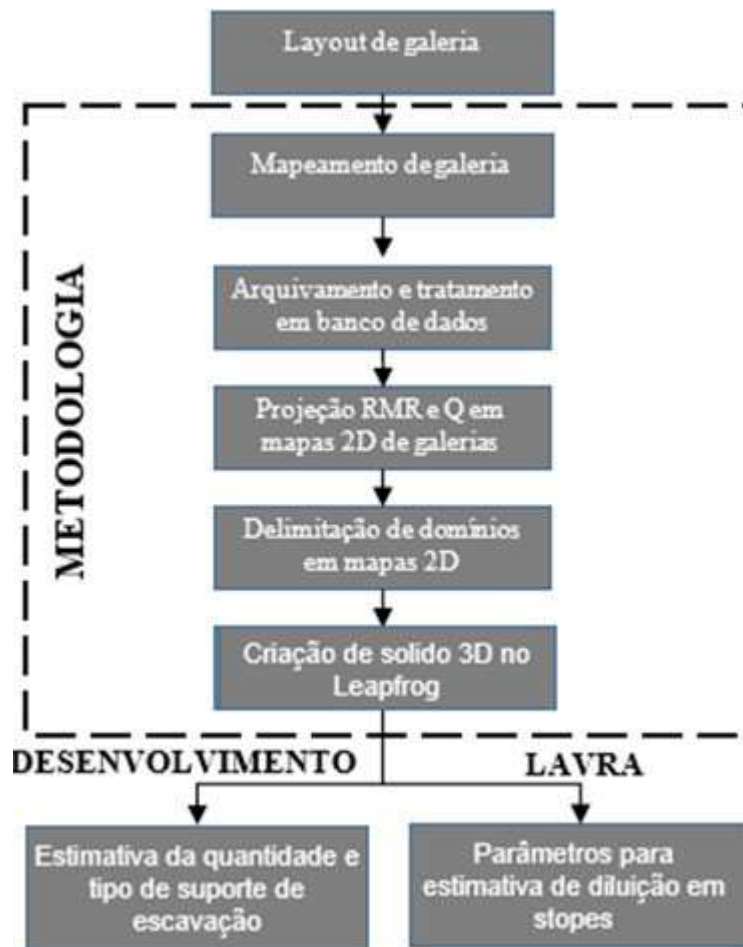


Figura 1. Fluxograma da metodologia.

2 Metodologia

2.1 Coleta dos dados de campo do mapeamento geotécnico

Todas as entradas de dados têm como objetivo a construção das classes dos domínios geológicos-geomecânicos 2D e 3D. O processo tem início pelo mapeamento geotécnico em diferentes níveis das galerias subterrâneas. Para que as informações estejam atualizadas precisa-se ter uma rotina constante de mapeamentos geotécnicos, sendo eles todos os dias.

O mapeamento geotécnico consiste em obter informações dos parâmetros de classificação da RMR introduzidos por Bieniawski (Bieniawski 1989) e Q-system (NGI 2015). As áreas a serem mapeadas devem ser identificadas nos mapas estruturais em formato 2D através da distância no ponto topográfico mais próximo, como mostrado na Figura 2. A distância do mapeamento é medida a partir do ponto inicial até o ponto final (por exemplo, do ponto F2 a G2 da Figura 2) ou em recuo (por exemplo, do ponto G2 para o ponto F2), com intervalos de 10 metros. Nas galerias ou regiões onde a formação geológica estrutural afeta o maciço rochoso e oferece maiores riscos operacionais, esses trechos são detalhados em intervalos de 5 metros.

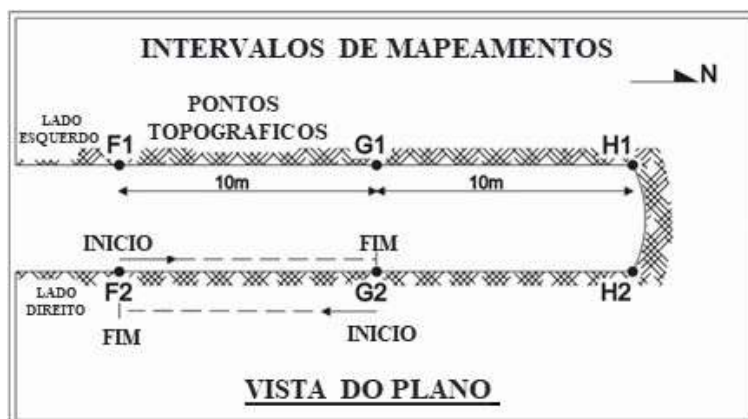


Figura 2. Mapa da localização dos intervalos de mapeamento com os pontos topográficos.

As principais discontinuidades no trecho mapeado são identificadas e as quebras naturais são diferenciadas das quebras causadas pela explosão de rochas. As discontinuidades existentes nas minas são agrupadas em famílias (Set), A, B, C, esse tipo de nomenclatura adotada se dá para uma boa metodologia de separações das discontinuidades e se faz com alta complexidade dos planos existentes nas galerias passam a ser de fácil compreensão. Adotamos assim as seguintes sequências. A família A tem atitudes variando entre $70^\circ/280^\circ$ a $70^\circ/345^\circ$, B tem atitudes de $40^\circ/090^\circ$ a $40^\circ/135^\circ$ e C tem as atitudes variando entre de $70^\circ/220^\circ$ a $70^\circ/270^\circ$ (Palmstrom 2005). As aleatórias aparecem com várias direções de mergulho. O método de distinguir os conjuntos de orientações mais representativos é anotando suas atitudes no formato mergulho/direção de mergulho, conforme indicado no exemplo: Mergulho 70° , Direção de mergulho 345° , Atitude ($70^\circ/345^\circ$). É utilizado tinta spray de cor branca, para diferenciar as juntas das falhas e das zonas de cisalhamento conforme a Figura 3.

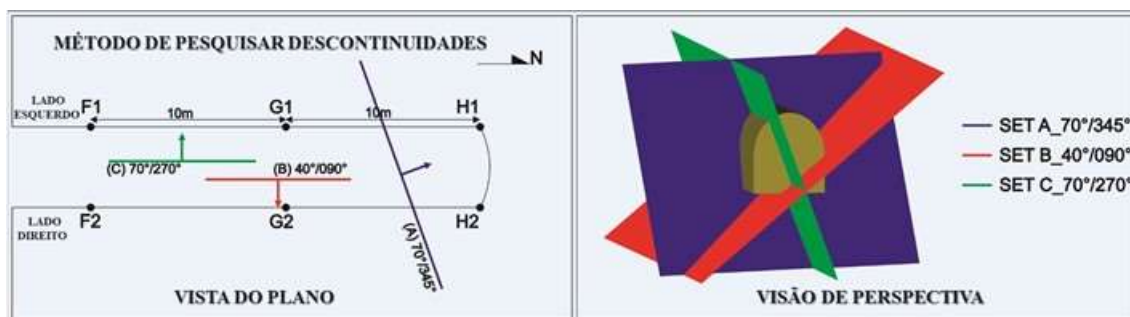


Figura 3. Método de levantamento das discontinuidades

Essa metodologia é possível na maioria das vezes quando temos um maciço rochoso formado por Dip/Dip Direction bem definidos. Em maciço rochoso que apresentam falhas consideradas como rochas estruturais tendo como exemplo: intrusivas, xistos, brechas, etc. São estruturas geológicas identificadas e que estão associados a maioria dos problemas com estabilidades das escavações. Estas estruturas afetam diretamente o maciço rochoso de duas formas: alterando localmente os campos de tensões e aumentando o grau de compartimentação do maciço. Os efeitos mais observados em campo são os estalos, ruídos, queda de placas, blocos e em menor frequência a projeção de fragmentos de rocha (Hoek *et al.* 1997). Alterações bruscas e significativas nas características geomecânicas dos maciços rochosos dentro de um mesmo trecho são causas de variações na resistência da rocha, na compartimentação do maciço, nas condições de água ou nas condições de tensões *in situ*, demandando um mapeamento com cautela. As principais feições geológicas que podem causar alterações geotécnicas bruscas são as seguintes: contatos geológicos, camadas, lentes, intercalações ou diques, envolvendo rochas como por exemplo: intrusivas, xistos ou rochas brechadas; presença de falhas e famílias de falhas ou concentrações de juntas aleatórias em quantidades expressivas (Lima 2018).

Estas heterogeneidades geotécnicas do maciço rochoso vão direcionar para três tipos diferentes de mapeamentos e das etapas seguintes da metodologia:

CASO1: Incorporar diretamente o efeito da feição (ou rocha de qualidade inferior) na avaliação do maciço



dentro do trecho em consideração. Deverá ser levado em conta, no trecho mapeado de 10 metros, a presença da rocha de qualidade inferior, através da adição de famílias de falhas resultando no rebaixamento dos cálculos de RMR e Q de Barton (Lima 2018).

CASO 2: Descrever apenas o maciço de qualidade inferior, quando causar grande impacto, como representativo de todo o trecho de mapeamento. No caso por exemplo de intrusivas, xistos ou rochas brechadas espessas (2 metros ou mais) acompanhando o teto da galeria (vide Figura 4) ou as laterais e parte do teto, a estabilidade da galeria passa a ser governada por essa rocha de qualidade inferior. Portanto, neste caso, a classificação é feita sem considerar a rocha de melhor qualidade, simplificando a situação e preservando a segurança. Nessas situações é recomendado fazer um desenho esquemático, similar ao da Figura 4 (Lima 2018).

CASO 3: Criar um outro trecho para mapeamento separando o maciço de qualidade inferior, geralmente nos casos em que a sua influência for superior a 5 metros, contendo áreas de falha ou rochas de qualidade inferior, como mostrado na Figura 5. Essas seções devem ser divididas em uma classe II de 10 metros, um trecho de 5 m na classe IV e um trecho de 10 metros na classe II, como mostrado na Figura 5. As seções de 5 metros devem ser usadas somente em casos especiais, para não dificultar a criação de mapas por interpolação automática usando softwares, que será tratado no capítulo de geração de dados 3D. Quando ocorre mudança brusca e persistente na qualidade dos maciços é recomendado que sejam feitas avaliações próximas aos contatos das mudanças. Isso irá permitir uma clara separação entre os domínios, no momento da elaboração dos mapas geotécnicos (Lima 2018).

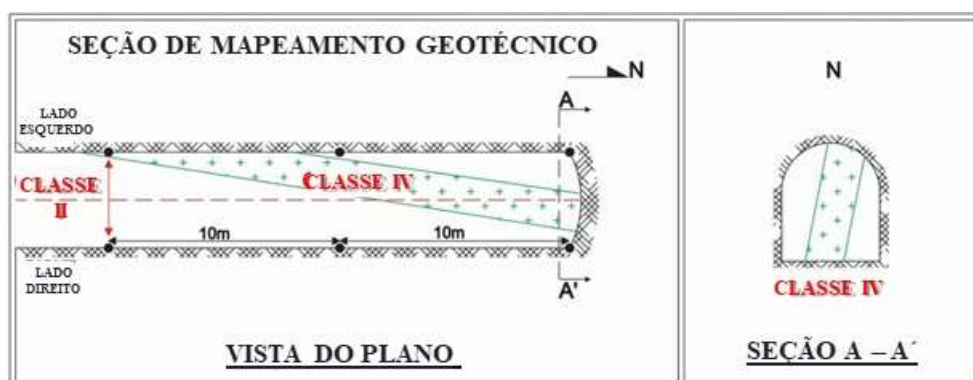


Figura 4. Desenho esquemático para descrição apenas do maciço de qualidade inferior.

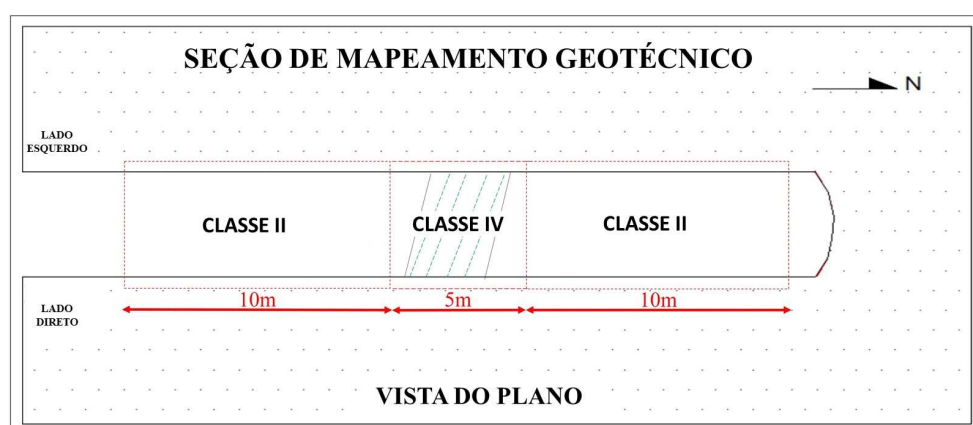


Figura 5. Desenho esquemático do trecho para mapeamento subdividido.

Os domínios de qualidade inferior, representados pelas classes IV e V, tem os seus limites estendidos 5m para ambos os lados no modelo 3D como forma de incluir a zona de transição entre os domínios. Essa separação entre os maciços de qualidade geotécnica diferentes é importante para a determinação dos tipos de suportes de contenção a serem utilizados nas galerias, o que constitui um dos principais objetivos desse trabalho (Lima 2018).



2.2 Banco de Dados

As informações obtidas através do mapeamento geotécnico são inseridas e processadas em planilhas Excel, pois permite uma maior facilidade e agilidade nos tratamentos dos dados. Os dados do mapeamento são inseridos no Excel, através de fórmulas rigorosas que permitem uma alta confiança de seus resultados. Os resultados de RMR (Bieniawski 1989) e Q-system ((Barton 1977, Barton 2002 & NGI 2015) estão com seus respectivos valores e classes, existem também histogramas de todos os parâmetros que são levantados em campo. O intuito é que as galerias das minas sejam monitoradas de forma constante e que os resultados sigam um padrão. Os dados que são enviados em formatos 2D no AutoCAD são: as informações de mina, nome do responsável pelo mapeamento, data, RMR, Q de Barton e suas classes, GSI (Marinos et al. 2005).

3 Resultados de discussões

3.1 Geração de dados em 2D

Após todas as informações dos mapeamentos geotécnicos passarem pelo banco de dados, que tem como base os sistemas de classificação de maciço rochoso Rock Mass Rating (RMR) e Q-system, eles são inseridos em 2D no *software* Autocad. A definição dos parâmetros é subdividida em classes para melhor entendimento da metodologia, onde cada classe é determinada por cores como: (Classe I – rocha muito boa – cor azul), (Classe II – rocha boa – cor verde), (Classe III – rocha fraca – cor amarela), (Classe VI – rocha pobre – cor laranja) e (Classe V – rocha muito pobre – cor vermelha). Os domínios podem ser definidos por cores, na maioria das vezes se apresenta como uma rocha boa e sua cor correspondente é verde, já uma rocha fraca apresenta-se na cor amarela e os locais onde interceptam estruturas que apresentam rochas pobres são da cor laranja isso dá um bom entendimento nas distribuições que podem ser rapidamente compreendidas, este método de classificação e cores também é usado no Leapfrog. Essas definições adotadas do ábaco do Q-system também são usadas para estimar o tipo de contenção necessária de cada trecho de desenvolvimento da mina conforme a Figura 6. As informações do Q-system nos mapas em 2D e as suas respectivas classes definidas por cores, resultam nos mapas em 2D conforme o da Figura 7.

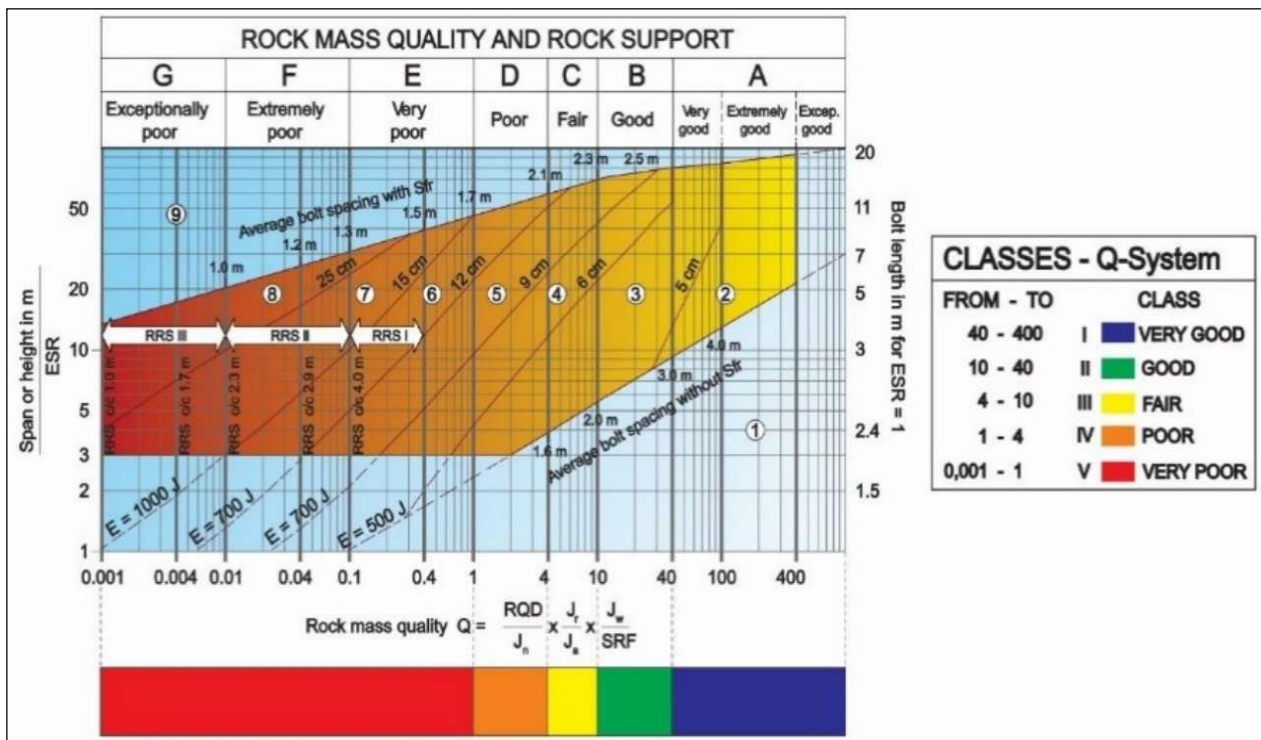


Figura 6. Método de classes adaptado para o tipo de suporte associado ao sistema Q.

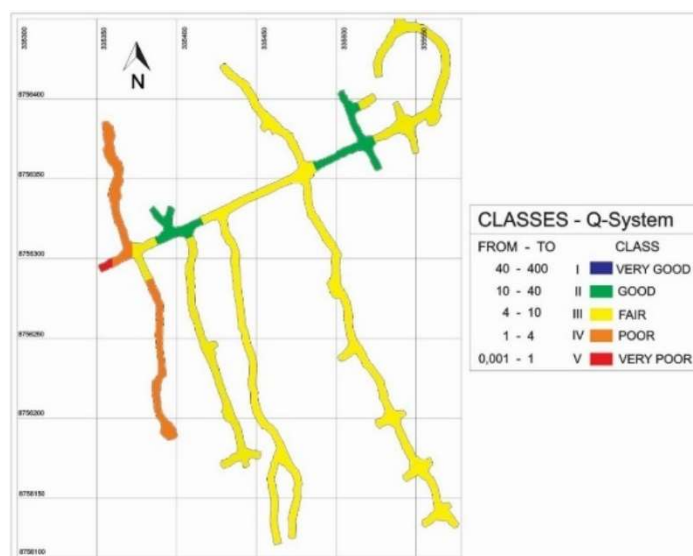


Figura 7. Classificação do maciço rochoso – Domínios 2D – Q-system.

3.2 3D Geração de dados

O banco de dados geotécnicos precisa-se ser bem robusto, fazendo com que as análises dos tipos de suportes adequados e as avaliações empíricas para os desmontes dos blocos sejam precisos, esses dados geotécnicos são fundamentais e controlam os projetos de desenvolvimento de qualquer mina. Os modelos são projetados no layout futuro da mina para obter um bom planejamento. Para os métodos de lavras, são observados em 3D os blocos e os tipos de classe do maciço rochoso de cada nível, onde poderá ter interferências que possam causar riscos, isso também ajuda nas avaliações de ELOS (*Equivalent Linear Overbreak/Slough*) e diluição. Todos os dados que são integrados nos softwares 3D fazem com que as visualizações sejam valiosas para o entendimento espacial dos dados.

Os softwares de modelagem 3D, como Vulcan e Leapfrog, utilizados pelas empresas fornecem um conjunto excelente de ferramentas de importações, visualizações e, principalmente, criação de sólidos 3D e delimitação de seus domínios. Os modelamentos feitos de forma padrão permitem que os dados sejam tratados de forma rápida em um curto prazo, resultando na atualização das classes dos domínios e, principalmente, nas informações estruturais das minas.

Os valores de Q gerados através do mapeamento geotécnico e que são inseridos no *software* Leapfrog é um procedimento simples, pois é caracterizado pela delimitação nos contatos das classes como mostrado na Figura 8. Em seguida, os mapas são modelados em 3D no Leapfrog para criação dos sólidos, com as cores de suas respectivas classes são divididas de acordo com os mesmos critérios em 2D, como rocha boa representado por verde, como mostra a Figura 9, a rocha fraca na cor amarela, Figura 10, e os locais onde interceptam estruturas na cor laranja, Figura 11, conforme os mesmos critérios em 2D com a finalidade de determinar o tipo de suporte a ser utilizado em cada mina ou em cada nível conforme Figura 6 do ábaco. Em locais onde existem estruturas e falhas, que são rochas de má qualidade, haverá um maior detalhamento dos sólidos.

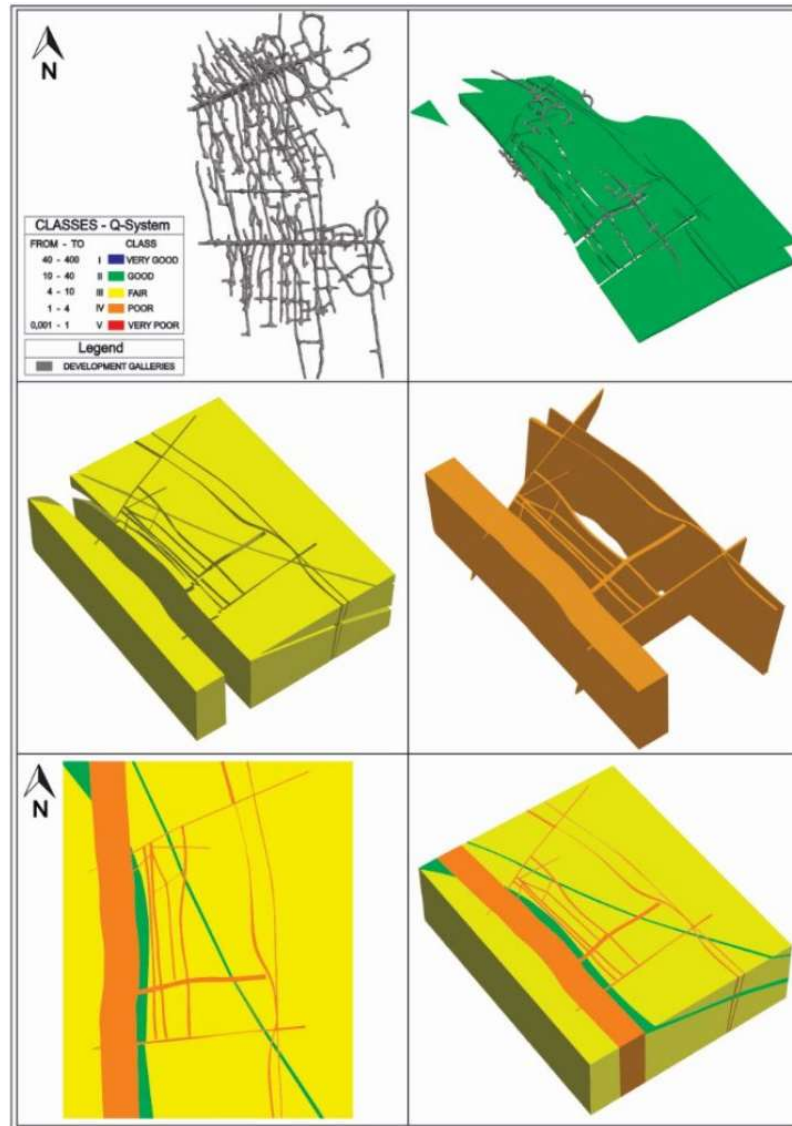
Como citado inicialmente na metodologia, no modelamento do software em 3D, o maciço rochoso de qualidade inferior terá uma envoltória delimitada com 5 metros a mais para cada lado da galeria, porque seu comportamento não é homogêneo próximo a essas estruturas, fazendo com que a rocha fique toda fragmentada ao seu redor. Portanto, as contenções daquele ponto serão observadas de forma criteriosa.

Após o modelamento do sólido, como mostram as Figuras 12 e 13, os mapas são avaliados e comparados com os padrões de contenção e as estruturas no maciço previamente estabelecidos pelo setor de planejamento.

Os modelos das classes e as estruturas quando criados no Leapfrog são planares onde é construído diretamente a partir de dados de orientação de direção e mergulhos, sendo que toda área mineralizada se encontra em sentido norte/sul seguindo um padrão, facilitando muito os mapeamentos, caracterização dos domínios nos softwares.



Os modelos tanto geológicos como geotécnicos são fundamentais no controle de distribuição da qualidade do minério e do maciço rochoso, onde as litologias e suas estruturas são muito importantes na mecânica das rochas no subsolo. Quando as informações das duas áreas se juntam em formato 3D, resultando em uma avaliação muito poderosa, classificando o maciço rochoso de forma confiável, principalmente nos locais onde a rocha se comporta de forma alterada, prevendo os riscos e mantendo a segurança das pessoas e a preservação dos equipamentos.



Figures 8-13. Modelo final de classificação do maciço rochoso final no *software* Leapfrog.



4 Conclusão

A metodologia atualizada para a geração dos modelos 2D e 3D tem como benefícios fornecer parâmetros para o estudo de correlação de dados geológicos e geomecânicos das diferentes minas. Além da agilidade e confiabilidade na análise empírica.

Critérios foram criados e padronizados para mapeamento geotécnico, banco de dados 2D, mapas e sólidos em 3D, resultando em melhorias para futuros trabalhos das empresas. Assim, a construção dos modelos de classes será projetada para níveis acima e abaixo das minas, melhorando na adequação e antecipação dos suportes de contenção no desenvolvimento mensal e anual, garantindo a segurança.

A metodologia funciona quando temos Dip/Dip Direction bem definidos e isso resultará em um melhor entendimento do modelo do maciço rochoso, garantindo o controle dos tipos de suporte, o que contribuirá para o aumento da recuperação da mina e proporcionará um melhor controle da diluição da mineração e do *Equivalent Linear Overbreak / Slough* (ELOS).

Finalmente, a futura inserção dos domínios com suas respectivas cores, juntamente com os modelos de blocos a serem feitos pelos engenheiros de planejamento e analisados pelo setor da geomecânica. Melhorando, portanto, as informações disponíveis para o planejamento de mina a curto e longo prazo.

5 Referências

- Barton, N. R. 2002. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *International journal of rock mechanics & mining sciences* 39: 185–216.
- Barton, N.R. & Choubey, V. 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock mechanics and rock engineering* 10: 1-54.
- Bieniawski, Z.T. 1989. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. New York: John Wiley & Sons.
- Hoek, E., Kaiser, P. K. & Bawden, W. F. 1997. *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam: A.A. Balkema.
- Lima, A. A. 2018. Technical report: revision and validation of the geotechnical procedures adopted in the Jacobina Mineração e Comércio (JMC).
- Marinos, V., Marinos, P. & Hoek, E. 2005. The geological strength index: applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 64(1): 55-65.
- NGI 2015. Using the Q-system - Rock mass classification and support design, Oslo: NGI.
- Palmstrom, A. 2005 Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology* 20 (4): 362–377.