

Uso da Classificação Geomecânica RMR Relacionado à Estimativa de Auto Sustentação em Mina Subterrânea de Sal

Using the RMR Geomechanical Classification Related to the Stand-Up Time Estimation in an Underground Salt Mine

Alisson Carvalho Santos Brasil¹; Pedro Alameda Hernández²; Rodrigo Pelucci de Figueiredo³

¹ UFOP, NUGEO, Ouro Preto/MG, Brasil. Email: alisson_engh@yahoo.com.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9411-8859>

² UFOP, Escola de Minas/Departamento de Engenharia Urbana, Ouro Preto/MG, Brasil. Email: pedroalameda@ufop.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1830-1912>

³ UFOP, Escola de Minas, Ouro Preto/MG, Brasil. Email: rpfigueiredo@ufop.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7573-7734>

Resumo: A classificação geomecânica de mina de sal (em especial mina de potássio) baseia-se nos seguintes parâmetros: posição e ângulo da camada estratificada, espessura dos estratos, teto imediato da escavação, distância ao topo da camada de estéril, profundidade, orientação da lavra e espessura da argila. Existem poucas minas de sal subterrâneas, os estudos de cunho científico e publicações sempre foram limitados, principalmente relacionadas às classificações geomecânicas. Este estudo visa verificar se o sistema RMR (Rock Mass Rating) proposto por Bieniawski (1973) pode ser adotado para correlacionar o tempo de auto sustentação (*stand up time*) específico na mina. Com uso de estudos estatísticos e regressões matemáticas foi observado que o sistema RMR mostrou forte correlação com o tempo máximo de abertura estável, podendo ser útil na previsibilidade estimativa do tempo do auto sustentação do teto na mina de sal em estudo.

Palavras-chave: Mina de Sal; Rock Mass Rating; Classificação Geomecânica.

Abstract: Geomechanical classification in a salt mine (especially a potash mine) is based on the following parameters: position and angle of the stratified layer, thickness of the strata, immediate roof of the excavation, distance to the top of the overburden layer, depth, mining direction and clay thickness. There are few underground salt mines, scientific studies and publications are scarce, especially related to geomechanical classifications. This study aims to verify if the RMR (Rock Mass Rating) system proposed by Bieniawski (1973) can be adopted to correlate with the specific stand-up time in the mine. Using statistical studies and mathematical regressions, it was noticed the RMR system presented strong correlation with the maximum stand up time and it can be useful to estimate the roof self-support time in this salt mine.

Keywords: Salt Mine; Rock Mass Rating; Geomechanical Classification.

Recebido: 08/01/2024; Aceito: 06/09/2024; Publicado: 31/01/2025.

1. Introdução

Os trabalhos em minas subterrâneas apresentam, em resumo, três macro aspectos para sua exequibilidade operacional: a estabilidade do maciço rochoso, que visa aos princípios técnicos da estabilidade das escavações; a segurança, saúde e conforto ambiental subterrâneo; e o custo operacional, que se refere à saúde financeira empresarial do empreendimento mineiro. Silva (2009) afirma que os métodos de lavra são geralmente classificados em duas tipologias clássicas: a céu aberto, com categorias de extração como bancadas, pedreiras e tiras; e subterrâneo, com categorias de extração como câmaras e pilares, realces abertos, subníveis, recalque, corte e enchimento, abatimento de blocos e poços.

Quando escavados, os maciços rochosos, seja para fins mineiros ou para obras civis, têm seu estado original de tensões alterado, resultando em uma redistribuição das tensões no meio circunvizinho às escavações, denominada tensões induzidas. Curi (2017) afirma que essa redistribuição de tensões gera concentrações e dispersões, que podem causar a ruptura do maciço rochoso por eventos de compressão, cisalhamento e/ou tração.

Hudson e Harrison (1997) afirmam que a abordagem empírica, que une experiência prática com aproximações de modelos teóricos, assume considerável importância no desenvolvimento de projetos em atividades de lavra e escavação. Uma das soluções qualitativas e quantitativas para o desenvolvimento de trabalhos mineiros é a aplicação de modelos teóricos de reconhecimento e identidade geotécnica do maciço rochoso, especificamente a classificação geomecânica dos maciços. A classificação geomecânica orienta a compreensão do comportamento e da qualidade do maciço rochoso, baseando-se em parâmetros específicos. Contudo, sua utilização deve ser realizada de forma criteriosa, para evitar interpretações errôneas ou simplistas, especialmente devido à heterogeneidade dos maciços rochosos, conforme observado por Hoek (2006).

Segundo Franklin e Dusseault (1989) os sistemas de classificação geomecânica podem ser agrupados em uni, bi e, por vezes, multiparmétricos, de acordo com o número de variáveis consideradas. Os parâmetros podem ser descritos como qualitativos ou analíticos/quantitativos, conforme a finalidade a que se propõem e os tipos de variáveis adotadas. Parâmetros e medidas facilmente quantificáveis reduzem a subjetividade de uma classificação. É importante não confundir caracterização com classificação: caracterizar implica considerar informações relacionadas a uma questão específica, enquanto classificar envolve a interpretação de informações relevantes para um problema particular (Figueiredo, 2023).

Bieniawski (1973) afirma que os sistemas de classificação de maciços rochosos têm sido desenvolvidos desde Ritter (1879), com o objetivo de apoiar o processo de abertura de túneis e a mecânica das rochas aplicadas à mineração. O principal resultado da classificação geomecânica é proporcionar uma parametrização das informações sobre reforço, suporte e retenção nas escavações subterrâneas, conforme exemplificadas na Figura 1.

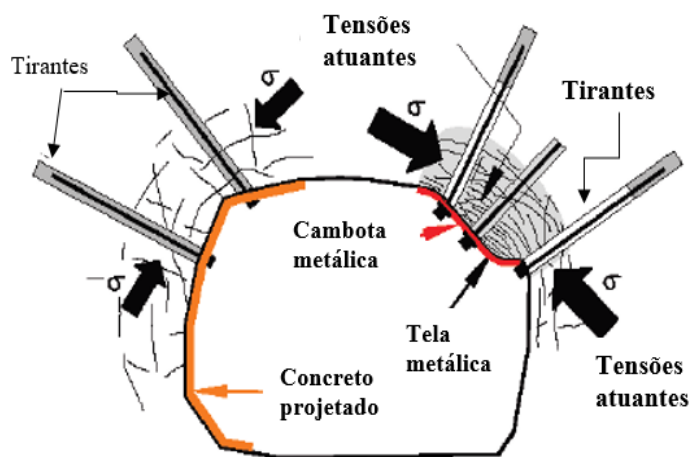


Figura 1 – Princípio de estabilização em escavações subterrâneas.

Fonte: Hoek (1995).

As principais aplicações dos sistemas de classificação de maciços rochosos têm sido na construção civil, especialmente em túneis, e na mineração. Desde a criação dos primeiros sistemas de classificação, esses métodos evoluíram significativamente, incorporando novas pesquisas e avanços tecnológicos. Ao longo dos anos, diversas classificações geomecânicas foram desenvolvidas e continuamente atualizadas para melhorar a precisão e a aplicabilidade dos métodos utilizados. Essas classificações não apenas fornecem uma base sólida para a avaliação da estabilidade e segurança das estruturas subterrâneas, mas também auxiliam na seleção de métodos de escavação, tipos de suporte e estratégias de mitigação de riscos. As principais classificações geomecânicas são detalhadas na Figura 2, que apresenta uma visão abrangente das diferentes abordagens e parâmetros utilizados ao longo do tempo.

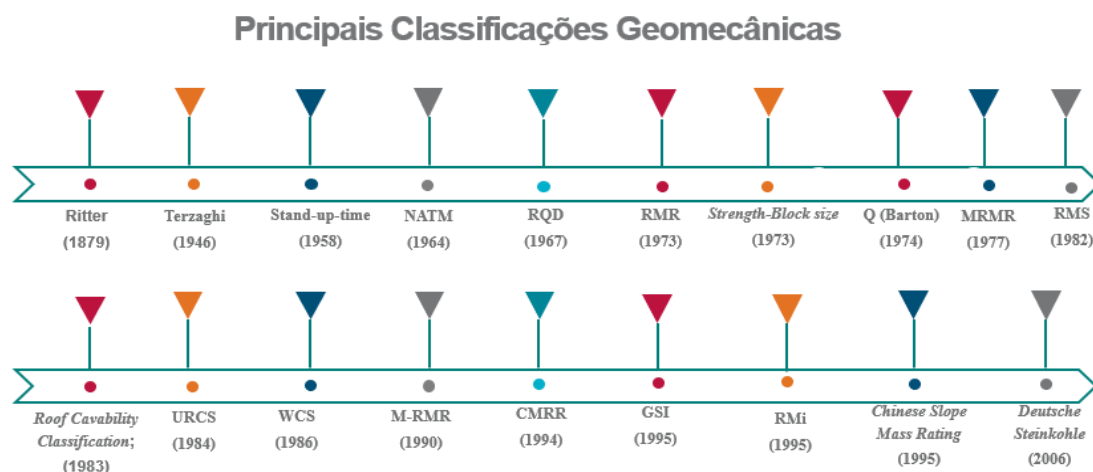


Figura 2 – Linha do tempo para os principais sistemas de classificação do maciço rochoso.

Fonte: Autores (2023).

A avaliação geomecânica em depósitos evaporíticos, especialmente em minas de sal, apresenta peculiaridades e requer parâmetros específicos. Exemplos desses parâmetros incluem a posição e ângulo da camada estratificada, espessura dos estratos, características do teto imediato, distância ao topo da camada de estéril, localização e orientação da lavra, bem como a espessura da camada de argila. Na literatura consultada para a realização deste trabalho, não foram encontrados casos específicos de classificações geomecânicas aplicadas a minas de sal, o que evidencia uma lacuna significativa no conhecimento e limita o tratamento de temas correlacionados, conforme observado por Jeremic (1994).

Em um painel de lavra estratégico, ao longo de um período de 18 meses, foram realizadas 115 inspeções geotécnicas para a classificação geomecânica RMR (*Rock Mass Rating*). O objetivo dessas inspeções foi relacionar o valor do RMR ao tempo de auto-suporte (*stand-up time*) da escavação. Devido à natureza reológica do maciço em minas subterrâneas de sal, o tempo de auto-suporte é constantemente monitorado através do surgimento de trincas e/ou fissuras, que indicam a estabilidade do maciço. O modelo de inspeções geotécnicas, bem como a metodologia empregada, está detalhado na Figura 3. Este modelo ilustra como as inspeções foram conduzidas, destacando a importância do monitoramento contínuo e da avaliação precisa para garantir a segurança e a estabilidade das operações de mineração em ambientes de sal.

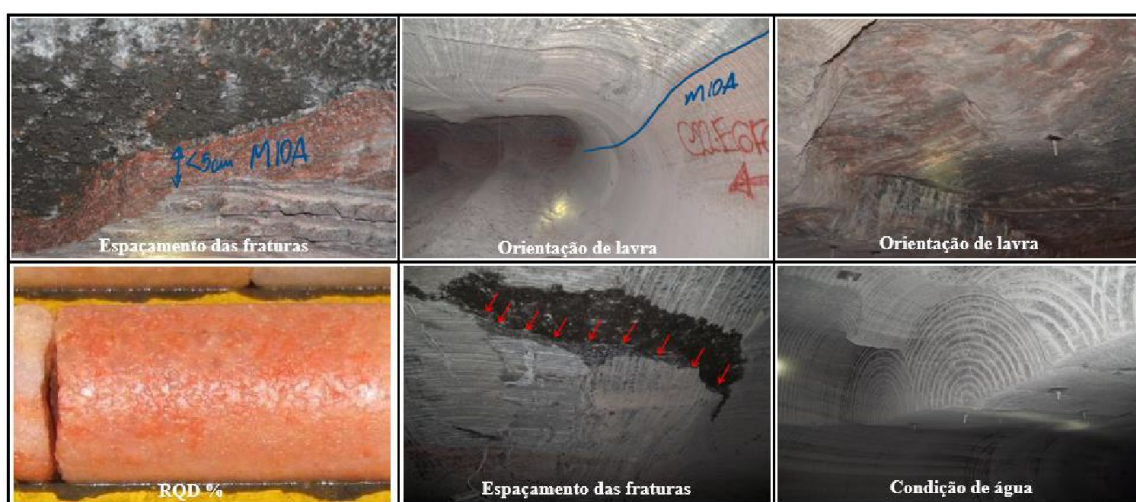


Figura 3 – Modelo da classificação RMR efetuada em campo.

Fonte: Autores (2023).

2. Metodologia

Este estudo está diretamente ligado às inspeções de campo realizadas em locais escavados e lavrados durante o período de janeiro de 2021 a junho de 2022, resultando em 115 inspeções em um determinado painel de lavra, conforme ilustrado no mapa da Figura 4. Durante essas inspeções de campo, foram realizadas avaliações geomecânicas utilizando o sistema RMR (*Rock Mass Rating*). Posteriormente, procurou-se estabelecer correlações entre o valor do RMR, o vão livre das escavações e o tempo de auto-sustentação (*stand-up time*).

As inspeções foram conduzidas por um único profissional técnico, o que ajudou a reduzir a variabilidade qualitativa das avaliações, garantindo maior consistência nos dados coletados. Esse fator é particularmente importante em estudos geomecânicos, onde a precisão e a uniformidade das observações podem influenciar significativamente os resultados e conclusões.

A análise dos dados coletados revelou insights valiosos sobre a relação entre a qualidade do maciço rochoso, medida pelo RMR, e a estabilidade das escavações. A determinação do tempo de auto-sustentação foi fundamental para avaliar a segurança e a viabilidade operacional das escavações, especialmente em ambientes subterrâneos de minas de sal, onde a natureza reológica do maciço pode apresentar desafios únicos.

Além disso, este estudo destaca a importância de um monitoramento contínuo e rigoroso das condições geomecânicas em minas de sal, contribuindo para a literatura ao abordar uma área ainda pouco explorada. A metodologia detalhada na Figura 3 e a análise dos dados no mapa da Figura 4 fornecem uma base sólida para futuras pesquisas e aprimoramentos nas técnicas de classificação e monitoramento geomecânico em depósitos evaporíticos.

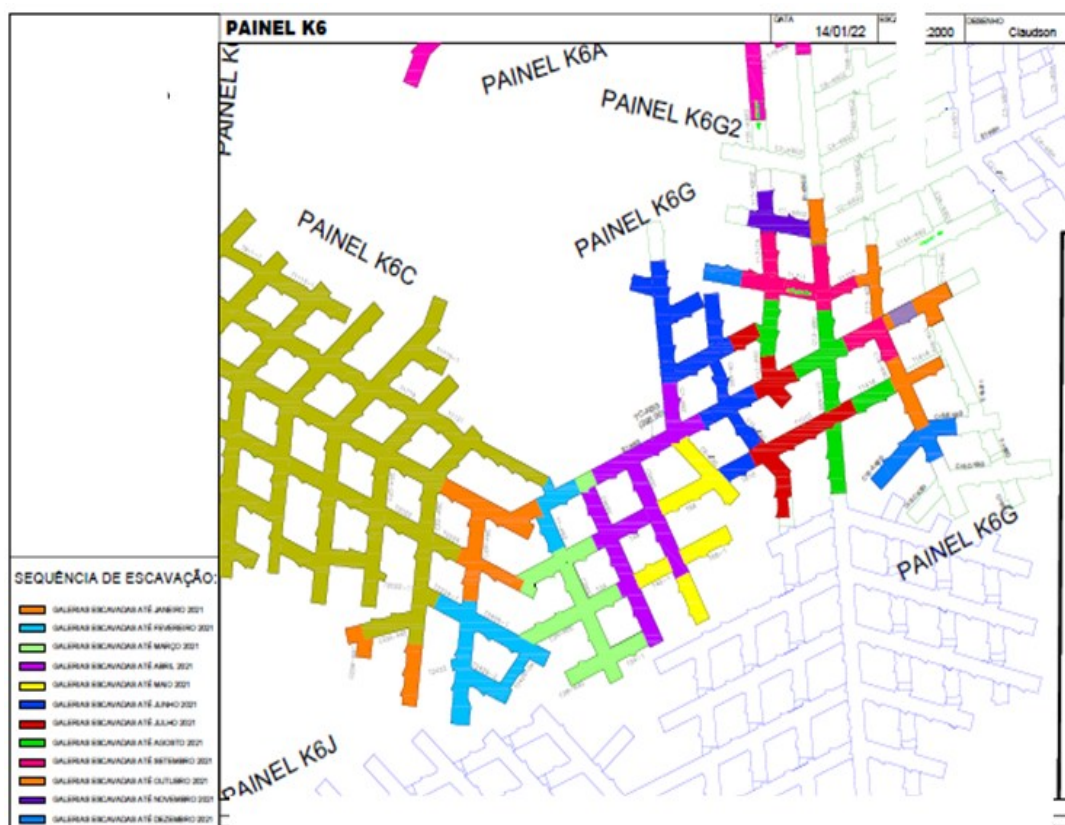


Figura 4 – Locais escavados em um painel de lavra no ano de 2021.

Fonte: Autores (2021).

A Figura 5 apresenta uma das áreas onde foram realizadas as inspeções, onde os seguintes dados quantitativos e qualitativos foram registrados:

- PAINEL de lavra: local em que ocorreram a escavação compreendido por subdivisões do tipo câmeras - travessas;
- Local futuro de correia ou acesso: permanente ou temporário;
- Teto imediato: marco geológico que fica exposto, após a escavação - (variável qualitativa);
- Geometria da escavação: largura x comprimento da área escavada (m^2) - (variável quantitativa);
- Posição dos marcos em relação ao teto da galeria: condição de cunha (considerado D); condição de teto < 1 m (considerado C); condição de teto > 1 m (considerado B); condição 1 parede (considerado A) - (variável qualitativa);
- Geometria da escavação: trecho com interseção das galerias (considerado I); trecho de galeria com rampa (considerado II); trecho com batente no teto (considerado III); trecho da galeria sem travessas (considerado IV) - (variável qualitativa);
- Tempo de abertura: tempo médio da escavação, até primeira inspeção realizada - (variável quantitativa);



Figura 5 – Análise de campo evidenciando abertura de trinca do teto escavado
Fonte: Autores (2023).

3. Resultados e discussão

Neste estudo, foram compilados dados referentes ao tempo de auto-sustentação do teto imediato (medido em horas) e a classificação geomecânica pelo sistema RMR (*Rock Mass Rating*). Esses dados foram coletados a partir de 115 inspeções geotécnicas realizadas no período de janeiro de 2021 a junho de 2022, e foram organizados e resumidos na Tabela 1.

A Figura 6 apresenta uma síntese dos resultados obtidos, permitindo uma análise detalhada da relação entre a classificação RMR e o tempo de auto-sustentação do teto imediato das escavações. A análise desses dados é crucial para compreender o comportamento do maciço rochoso em minas de sal e para desenvolver estratégias eficazes de suporte e reforço, garantindo a segurança das operações subterrâneas.

Os dados coletados foram essenciais para identificar padrões e correlações significativas, contribuindo para a elaboração de modelos preditivos que podem ser aplicados em futuras escavações. A análise comparativa entre o RMR e o tempo de auto-sustentação possibilita uma melhor compreensão das condições geomecânicas do maciço rochoso, facilitando a tomada de decisões informadas no planejamento e execução das atividades de mineração.

Resumo das Inspecões					
Teto imediato	Tempo de abertura da escavação (h)	Vão (m)	RMR	Quantidade de inspecões	Espessura média do marco geológico (m)
M-1	247	13,5	32,0	39	0,30
M-2	320	13,2	38,0	30	0,42
M-4A	416	12,5	40,0	28	0,58
M-6A	619	12,3	42,0	18	0,83
Média	489	12,9	38,0	115	0,56

Figura 6 – Análise de campo evidenciando abertura de trinca do teto escavado
Fonte: Autores (2023).

Avaliado o resumo das 115 inspeções realizadas, demonstrado na Figura 6 e Figura 7.

- Foram observados 4 marcos geológicos expostos no teto escavado: M-1, M-2, M-4A, M-6A. Em que N significa a quantidade de inspeções realizadas com determinado marco geológico. Por exemplo, o M-1 obteve 39 inspeções e M-2 com 30 inspeções realizadas.

- Em média, o maciço rochoso apresentou valor RMR de 38, sendo classificado como “pobre” conforme classificação RMR proposto por Bieniawski.
- O marco geológico que obteve melhor classificação RMR foi o M-6A, com valor médio de 42, caracterizado como “regular”.
- O marco geológico que apresentou maior tempo de auto sustentação foi o M-6A, indicando que quanto maior a espessura média do marco geológico (m), maior poderá ser o efeito de auto suporte devido ao efeito viga que consiste no aumento da resistência das camadas.
- O marco geológico M-1 apresentou a pior classificação, indicado como maciço “pobre” com média RMR de 32.

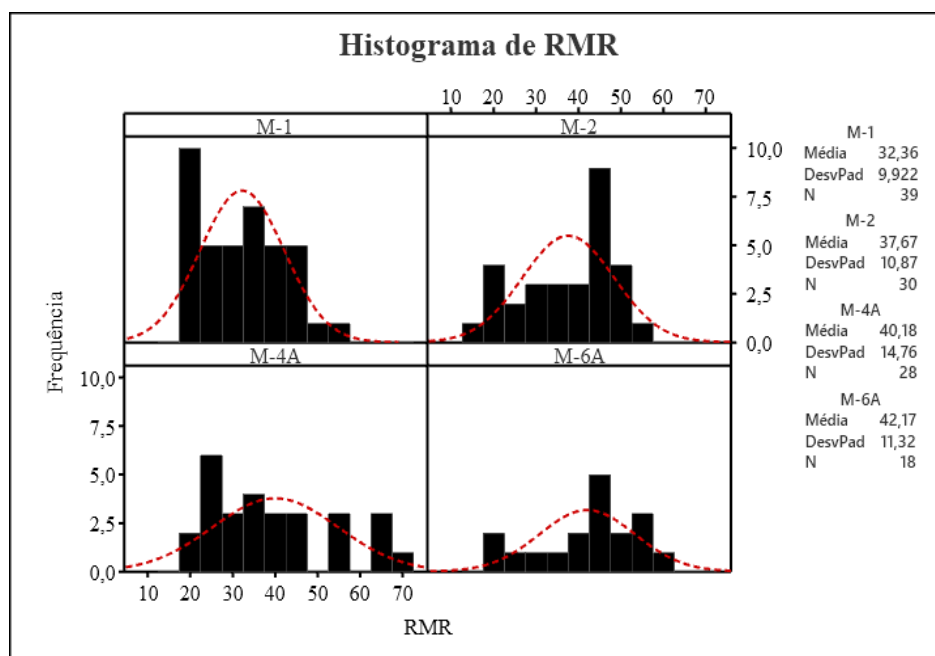


Figura 7 – Histograma da classificação geomecânica baseado no RMR.

Fonte: Autores (2023).

Com o *software* Minitab, foram realizadas regressões lineares, quadráticas, log lineares e log quadráticas relacionando o tempo de abertura da escavação (Y) com os valores de RMR (X) obtidos, buscando observar se há padrão entre essas duas variáveis, conforme pode ser visto na Figura 8.

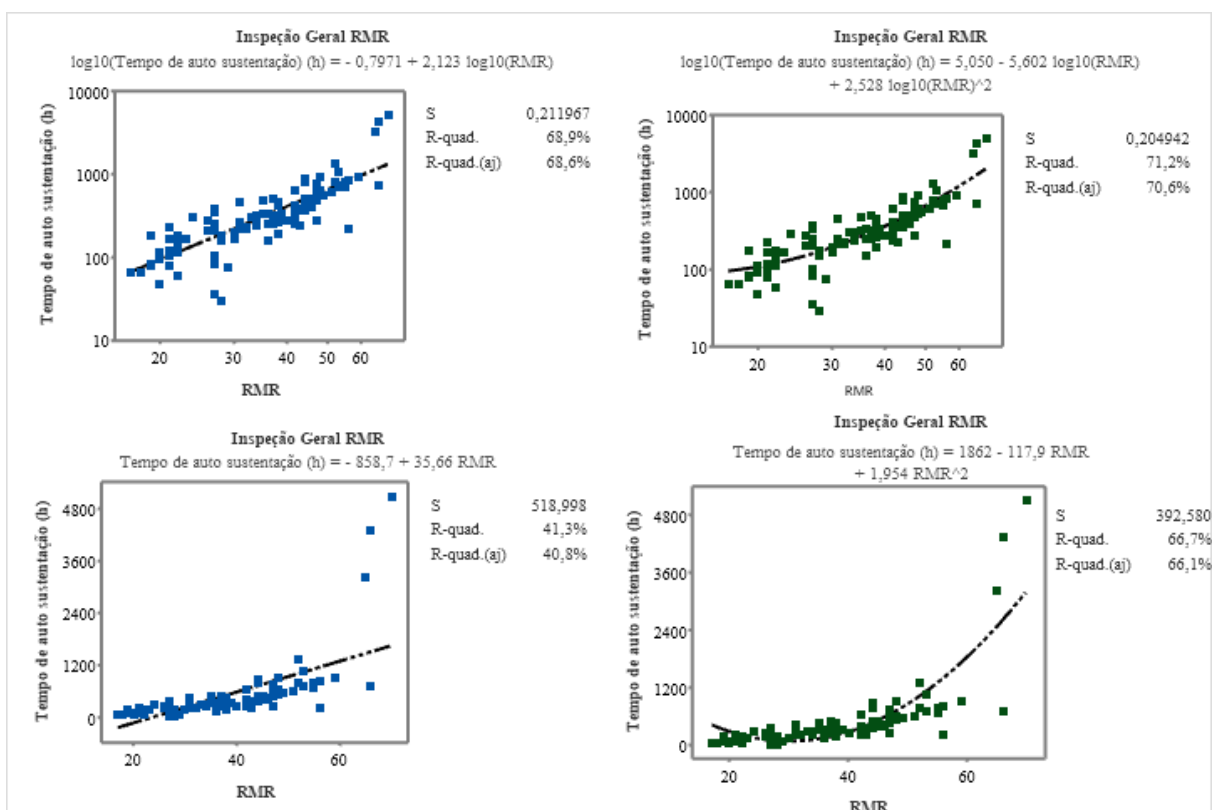


Figura 8 – Gráfico de linha ajustada para a correlação do RMR e tempo de abertura da escavação.

Fonte: Autores (2023).

A regressão que manifestou a maior correlação foi a equação logarítmica, com um valor de aproximadamente 71,2%, indicando uma forte correlação entre os dados de tempo de abertura e o Índice de Qualidade da Rocha (RMR), conforme o coeficiente de regressão descrito por Larson (2015). Esse resultado sugere que a equação logarítmica é eficaz em modelar a relação entre essas variáveis, proporcionando uma compreensão mais precisa da influência do RMR no tempo de auto suporte das estruturas geotécnicas.

Além disso, foi desenvolvido um mapa de calor com o principal objetivo de oferecer uma gestão visual da correlação entre o valor do RMR e o tempo de auto suporte. Este mapa de calor, apresentado na Figura 9, permite uma interpretação intuitiva e imediata dos dados, evidenciando que, quanto maior o valor do RMR, maiores serão os tempos de auto sustentação do teto da escavação.

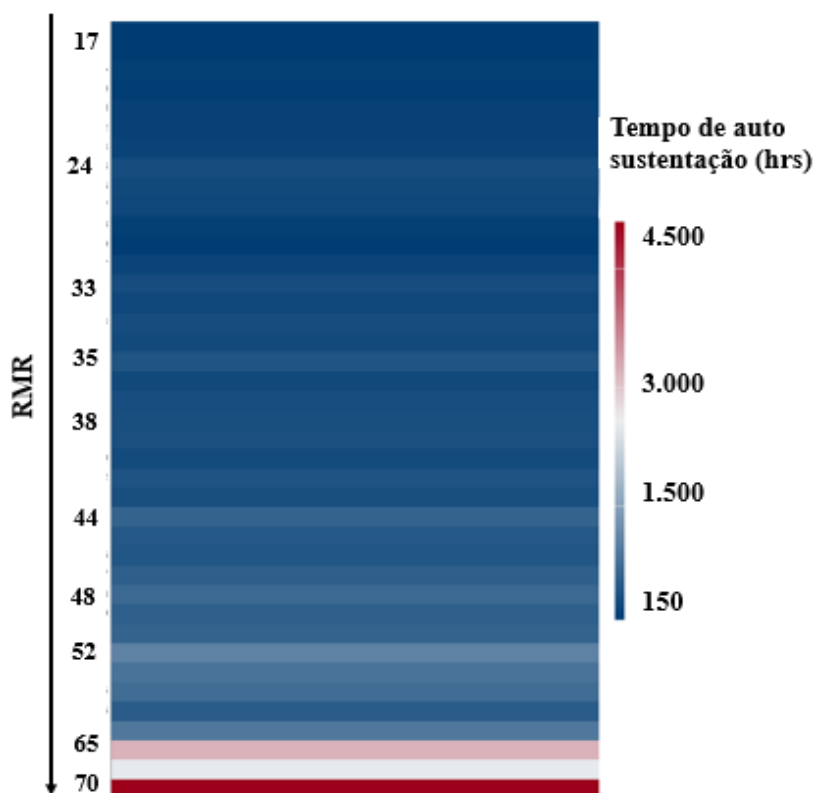


Figura 9 – Gráfico de mapa de calor do RMR e tempo de abertura da escavação.
Fonte: Autores (2023).

Os dados coletados durante as inspeções de campo foram organizados e agrupados com base nos quatro diferentes marcos geológicos identificados (M-1, M-2, M-4A, M-6A). Esse agrupamento permitiu uma análise mais detalhada das correlações entre a classificação do Índice de Qualidade da Rocha (RMR) e o tempo de abertura das estruturas rochosas.

Para cada um dos marcos geológicos, foram determinadas as correlações específicas, proporcionando uma visão clara de como as características geológicas influenciam o comportamento do tempo de auto suporte. A Figura 10 ilustra essa correlação específica para o marco M-2, utilizando tanto equações lineares quanto logarítmicas como exemplos. Esta figura destaca a capacidade das diferentes formas de regressão em capturar a relação entre o RMR e o tempo de abertura, com a intenção de identificar a abordagem mais eficaz para prever o comportamento estrutural das rochas sob condições variadas.

A análise revelou que as equações logarítmicas, em particular, demonstram uma maior precisão e ajuste aos dados observados, evidenciando a robustez desse modelo em comparação às equações lineares. Este resultado é fundamental para a compreensão detalhada das dinâmicas geotécnicas presentes nos diferentes marcos geológicos, permitindo uma previsão mais precisa e confiável do tempo de auto suporte com base no RMR.

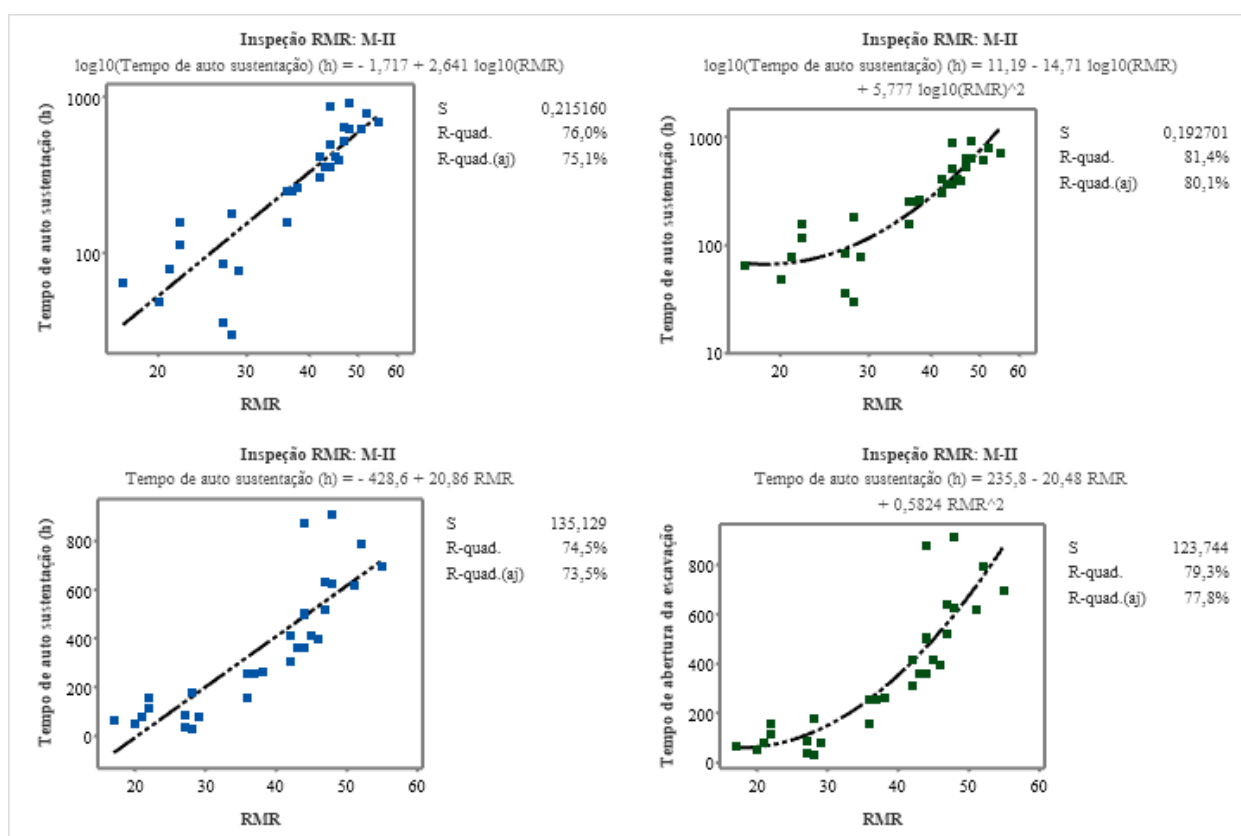


Figura 10 – Gráfico de linha ajustada para a correlação do RMR marco M-2A x tempo de abertura
Fonte: Autores (2023).

As equações derivadas das regressões realizadas são detalhadamente apresentadas na Tabela 2. Esses resultados evidenciam uma forte correlação entre o valor do Índice de Qualidade da Rocha (RMR) e o tempo de abertura da escavação, também conhecido como "stand up time". A análise estatística demonstra que, com o aumento dos valores do RMR, há uma tendência clara de prolongamento do tempo de auto suporte das estruturas rochosas.

Essas equações são fundamentais para a modelagem preditiva no campo da geotecnia, fornecendo uma base quantitativa robusta para estimar o comportamento das escavações em diferentes condições geológicas. O alto grau de correlação observado sugere que o RMR é um parâmetro altamente eficaz e confiável para prever o tempo de estabilidade inicial das escavações sem suporte adicional.

Além disso, a Figura 11 oferece uma visão comparativa das diferentes equações obtidas a partir de diversas formas de regressão, como linear, logarítmica e potencial. Essa comparação permite uma avaliação crítica das metodologias empregadas, destacando a eficiência relativa de cada abordagem na captura das dinâmicas entre o RMR e o tempo de abertura da escavação.

Marco Geológico	Tipo de modelo de regressão	Equação Tempo de escavação (h)	R ² (%)	R ² aj (%)
M-I	Linear	Tempo de auto sustentação (h)= -393,9 + 21,59 * (RMR)	61,13	60,08
	Quadrático	Tempo de auto sustentação (h)= 676,3 - 47,71 * (RMR) + 1,026 * (RMR) ²	74,47	73,05
	Log linear	log10(Tempo de auto sustentação (h))= -0,6138 + 1,998 * log10 (Vão (m))	74,3	73,6
	Log quadrático	log10(Tempo de auto sustentação (h))= 4,380 - 4,805 * log10 (Vão (m)) + 2,297 log10 (Vão (m)) ²	75,9	74,5
M-II	Linear	Tempo de auto sustentação (h)= -428,6 + 20,86 * (RMR)	74,5	73,5
	Quadrático	Tempo de auto sustentação (h)= 235,8 - 20,48 * (RMR) + 0,5824 * (RMR) ²	79,3	77,8
	Log linear	log10(Tempo de auto sustentação (h))= -1,717 + 2,641 * log10 (Vão (m))	76,0	75,1
	Log quadrático	log10(Tempo de auto sustentação (h))= 11,19 - 14,71 * log10 (Vão (m)) + 5,777 log10 (Vão (m)) ²	81,4	80,1
M-4A	Linear	Tempo de auto sustentação (h)= -1.765+ 62,50 * (RMR)	53,1	51,3
	Quadrático	Tempo de auto sustentação (h)= 3.297 - 192,4 * (RMR) + 2,855 * (RMR) ²	74,6	72,6
	Log linear	log10(Tempo de auto sustentação (h))= -0,5364 + 2,013 * log10 (Vão (m))	62,8	61,4
	Log quadrático	log10(Tempo de auto sustentação)= 11,36 - 13,13 * log10 (Vão (m)) + 4,775 log10 (Vão (m)) ²	71,0	68,7
Marco 6A	Linear	Tempo de auto sustentação (h)= - 162,3 + 16,02 * (RMR)	72,7	71,0
	Quadrático	Tempo de auto sustentação (h)= 368,7 - 13,29 * (RMR) + 0,3711 * (RMR) ²	77,6	74,6
	Log linear	log10(Tempo de auto sustentação (h))= 0,6229 + 1,275 * log10 (Vão(m))	78,5	77,1
	Log quadrático	log10(Tempo de auto sustentação (h))= 3,369 - 2,306 * log10 (Vão (m)) + 1,157 log10 (Vão (m)) ²	79,5	76,8

Figura 11 – Inspeção de painel de lavra baseado no sistema RMR.

Fonte: Autores (2023).

- (M-I): a equação que possui melhor comportamento é a regressão logarítmica ($R^2 > 75,9$ e $R^2_{aj} > 74,5$), possuindo forte coeficiente de correlação para R^2 e R^2_{aj} , além disso verifica-se que os tempos de auto sustentação são maiores em função do aumento dos valores de RMR. A variação do vão (m) também influencia os diferentes tempos de auto suporte da escavação. A regressão linear quadrática também apresentou boa correlação dos dados.
- (M-II): a equação que possui melhor comportamento é a logarítmica ($R^2 > 81,4$ e $R^2_{aj} > 80,1$), apresentando forte coeficiente de correlação para R^2 e R^2_{aj} , sendo verificado que o aumento do valor do RMR ocorre associado com maiores tempo de auto suporte do teto, demonstrando que o indicador RMR pode ser uma boa fonte na interpretação de dados.
- (M-4A): a equação que possui melhor comportamento também é a linear quadrática ($R^2 > 72,1$ e $R^2_{aj} > 69,8$), demonstrando forte coeficiente de correlação para R^2 e R^2_{aj} . Nota-se que para este marco geológico ocorreu redução do vão escavado (m) e maior espessura dos estratos rochosos em relação ao M-1 e M-2, o que resulta em maior estrato rochoso. A equação logarítmica quadrática apresenta boa correlação aparentes dos dados.

- (M-6A): a equação que possui melhor comportamento novamente é a logarítmica ($R^2 > 79,5$ e $R^2_{aj} > 76,8$), expressando forte coeficiente de correlação para R^2 e R^2_{aj} . A interpretação foi similar ao M-4A, em que quanto maiores os valores identificados de RMR, maiores tempos de auto suporte. Este marco geológico é o que detém maior espessura dentre os avaliados em campo. Nota-se que a equação linear também apresenta boas correlações.

A Figura 12 apresenta um mapa de análise (vão x tempo de abertura x RMR) para uma rápida visualização das variações dos parâmetros estudados, indicando que quanto maior o valor RMR, maior o tempo de abertura da escavação.

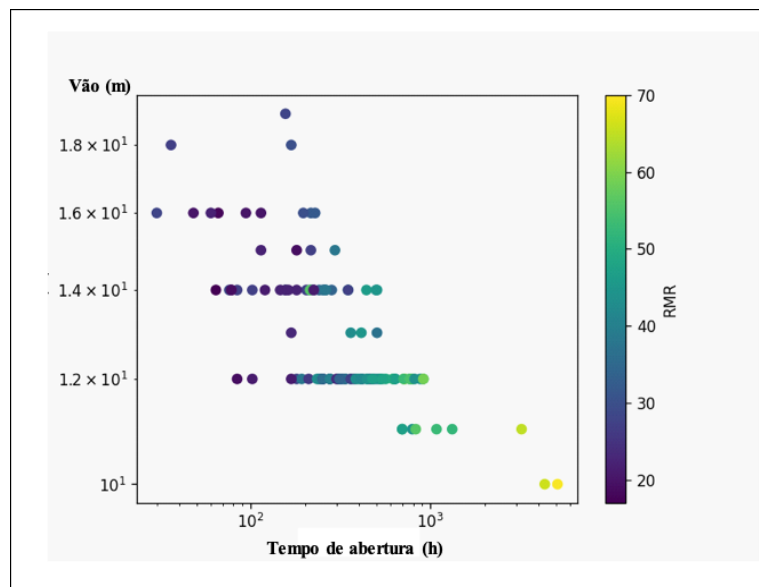


Figura 12 – Gráfico de análise para tempo de abertura (h) x RMR x vão escavado.

Fonte: Autores (2023).

Foi analisada a similaridade das curvas de regressão para cada classe do Índice de Qualidade da Rocha (RMR) em relação ao tempo de auto sustentação. Os resultados indicam uma clara tendência: quanto melhor e maior a classificação geomecânica do RMR, maior será o tempo de auto sustentação das estruturas rochosas. Essa relação é visualmente representada na Figura 12. A análise das curvas de regressão revelou que todas as classes de RMR seguem um padrão consistente, onde um aumento no valor do RMR está associado a um prolongamento do tempo de auto sustentação. Esse padrão reafirma a validade do RMR como um indicador robusto e confiável da estabilidade das escavações.

A Figura 13 ilustra uma tendência de que as curvas de regressão para diferentes classes de RMR. A visualização dessas curvas permite uma compreensão intuitiva e imediata das interações entre a qualidade geomecânica das rochas e o tempo de estabilidade inicial. Esse conhecimento é crucial para a tomada de decisões em projetos de engenharia geotécnica, onde a segurança e a eficiência dependem de previsões precisas do comportamento das rochas. A constatação dessa similaridade nas curvas de regressão também proporciona uma base sólida para a generalização dos resultados. Isso sugere que as equações de regressão desenvolvidas podem ser aplicadas de forma confiável a uma ampla gama de condições geológicas, aumentando a utilidade prática dos modelos preditivos derivados da classificação RMR.

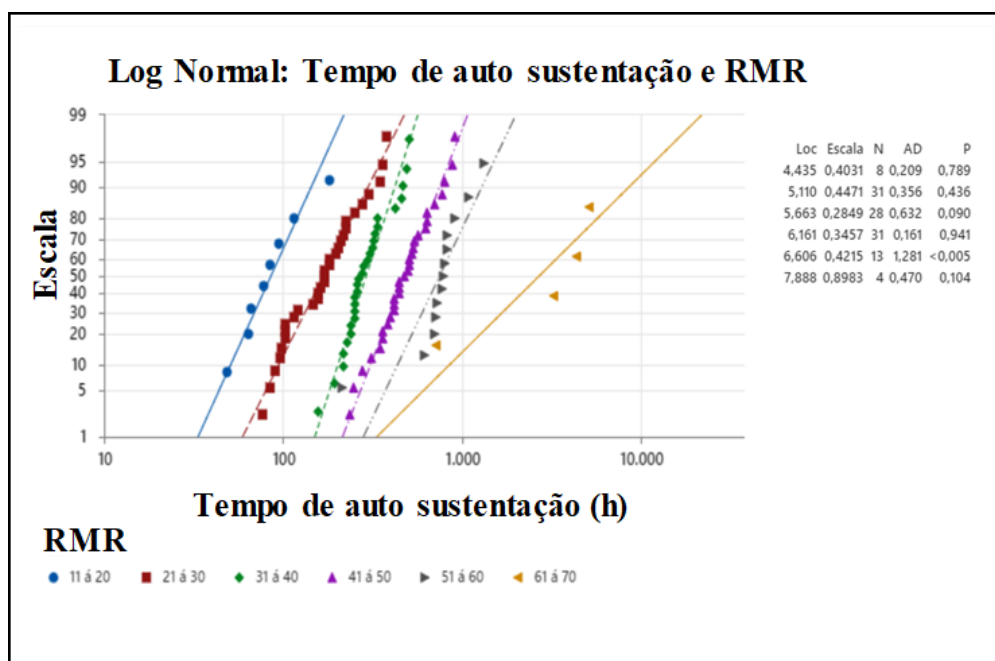


Figura 13–Gráfico de similaridade de faixa entre o tempo de abertura (h) e RMR.

Fonte: Autores (2023).

4. Considerações finais

Embora não seja comum em minas subterrâneas de sal, a classificação geomecânica RMR foi aplicada durante as inspeções de campo com o objetivo de avaliar sua aplicabilidade nesse tipo de mina. A escolha do RMR foi fundamentada em seu uso já consolidado na literatura geotécnica, além de ser um sistema concebido para depósitos sedimentares, embora raramente utilizado em minas subterrâneas de sal.

Os resultados obtidos mostraram que a média da classificação RMR foi de 38, indicando um maciço rochoso de qualidade pobre. Apesar dessa classificação, o sistema RMR apresentou resultados significativos nas equações de correlação com o tempo de auto sustentação (stand-up time), com valores de correlação ($R^2 \geq 71\%$) para as equações logarítmicas quadráticas. Além disso, foram observadas fortes correlações para os quatro marcos geológicos identificados. Esses achados sugerem que a adoção do sistema RMR pode ser útil na previsão do tempo de abertura estável da escavação.

A relação entre a classificação RMR e o tempo de auto sustentação indica que, quanto maior o valor do RMR, maior será o tempo de auto sustentação do teto imediato na mina de sal. A utilização da classificação RMR pode, portanto, fornecer suporte valioso na programação e na transição de atividades corretivas geotécnicas para atividades preventivas. A capacidade de prever as necessidades de atirantamento de teto antes da ocorrência de instabilidades pode resultar em uma abordagem mais proativa e eficiente para a gestão da segurança nas escavações. Além disso, o RMR oferece uma possibilidade de estabelecer uma classificação geomecânica sistemática aplicável a minas de sal.

Adicionalmente, foi observado que os maiores tempos de auto suporte estavam associados aos marcos geológicos com maior espessura de estrato rochoso, o que indica uma maior resistência aparente da viga e, consequentemente, um maior tempo de auto sustentação.

É importante salientar que este estudo foi realizado em apenas um local/painel de lavra, abrangendo quatro tipologias geológicas encontradas na escavação. Apesar dos resultados promissores, recomenda-se cautela na interpretação e no uso dos dados obtidos. Há a necessidade de continuar a captação de mais dados, com análises mais estruturadas e modeladas, para validar e aprimorar a aplicação desse modelo de classificação geomecânica a minas de sal. Estudos futuros devem focar na ampliação da base de dados e na aplicação do RMR em diferentes condições geológicas e operacionais para verificar a robustez e a generalizabilidade dos resultados obtidos.

Agradecimentos

Agradeço a disponibilidade de dados da empresa Mosaic Potássio, unidade Taquari Vassouras/SE.

Referências

- ANDRADE, M.S. **Análise de rupturas de teto imediato nos cruzamentos entre galerias de uma mina subterrânea de carvão**. Porto Alegre, 2008. 188f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2008.
- Bieniawski, Z. T. **Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering**. New York, USA: John Wiley e Sons, 1989.272p.
- Bieniawski, Z. T. **Strata control in mineral engineering**. New York, USA: John Wiley e Sons, 1989.132p.
- Brady, B.H.G. E Brown. **Rock Mechanics for Underground Mining**. New Jersey, USA: Springer-Verlag, 2006. 686p.
- BRASIL, A.C.S. **Avaliação do tempo de auto sustentação do teto de mina subterrânea de sal com as classificações geomecânicas RMR e CMRR**. Ouro Preto, 2023. 183f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG, 2023.
- Curi, A. **Lavra de Minas**. São Paulo, Brasil: Oficina de Textos, 2017. 462p.
- Figueiredo, R.P. **Túneis e escavações em rochas**. 2021. Notas de aula Programa de pós-graduação em Geotecnia. NUGEO. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.
- Frankin, J.A, Dusseult, M.B. **Rock Engineering**, New Jersey, USA: McGraw Hill, 1991. 431p.
- Hoek, E. **Practical Rock Engineering**. Vancouver, CAN: Evert Hoek Consulting Engineer, 2007. 276p.
- Hudson, J. A, Harrisson, E. **Engineering rock mechanics: an introduction to the principles**, Elsevier Science, USA, 1997. 197p.
- ISRM. **The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization**, Testing and Monitoring: 1974–2006. Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, , Ankara, Turkey,2007.
- Jeremic, M.L. **Rock Mechanics in Salt Mining**, Laurentian University Sudbury, CAN: Laurentian University Sudbury, 1994. 234p.
- Jeremic, M.L. **Mining Strata Mechanics in Coal Mining**, Laurentian University Sudbury, CAN: Laurentian University Sudbury, 1985. 222p.
- Sefarim, J. L, Pereira, J.P. **Consideration of the geomechanics classification of Bieniawski,**” in: Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and Underground Constructions, v. 1, n. 1, 5-8, 1983.
- Larson, R. **Estatística aplicada**. São Paulo, Brasil: Pearson Universidades, 2015. 656p.
- Peng, S.S. **Ground Control Ground Control Failures: A Pictorial View of Case Studies Hardcover**, Laurentian, John Wiley e Sins, EUA, 2007. 143p.
- PINTO, C. L. L. **Longwall Mining in Boulby Potash Mine: A Numerical Study**, Colorado (1991-1995). Tese (Doutorado em Geotecnia) da Faculty and the Board of Trustees, Colorado School of Mines, Colorado.
- ZINGANO, C.A. **Modelamento Geomecânico para o Dimensionamento de Pilares de Carvão**. Porto Alegre, 2008. 188f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto

Alegre-RS, 2002.