

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

**COMPARTIMENTAÇÃO GEOMECÂNICA DE TETO IMEDIATO DE MINA DE
CARVÃO A PARTIR DA CORRELAÇÃO DOS MÉTODOS RMR E CMRR.**

Camilla Mariano da Silva

Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis

Rio Claro (SP)

2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

CAMILLA MARIANO DA SILVA

COMPARTIMENTAÇÃO GEOMECÂNICA DE TETO
IMEDIATO DE MINA DE CARVÃO A PARTIR DA
CORRELAÇÃO DOS MÉTODOS RMR E CMRR.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Rio Claro - SP

2022

S586c Silva, Camilla Mariano da
Compartimentação geomecânica de teto imediato de mina de carvão
a partir da correlação dos métodos RMR e CMRR / Camilla Mariano
da Silva. -- Rio Claro, 2022
74 p. : tabs., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) -
Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e
Ciências Exatas, Rio Claro
Orientador: Fábio Augusto Gomes Vieira Reis

1. Geomecânica. 2. Correlação. 3. Mineração de carvão. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de
Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CAMILLA MARIANO DA SILVA

COMPARTIMENTAÇÃO GEOMECÂNICA DE TETO
IMEDIATO DE MINA DE CARVÃO A PARTIR DA
CORRELAÇÃO DOS MÉTODOS RMR E CMRR.

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Geociências e
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro,
da Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do grau
de Geólogo.

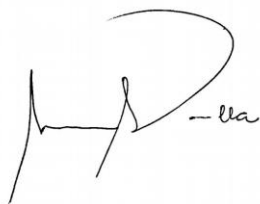
Comissão Examinadora

Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis (orientador)

MsC. Victor Carvalho Cabral

Eng. Anderson Luis Weiss

Rio Claro, 13 de dezembro de 2022.



Assinatura do(a) aluno(a)



Assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me fortalecido até aqui.

Agradeço aos meus pais, Silvana e Lourival, por terem acreditado no meu sonho e terem feito o possível e impossível para torná-lo realidade, sem vocês, eu certamente não teria chegado aonde cheguei. Esta conquista é NOSSA!

Ao Enrico, meu namorado e melhor amigo, por todo o apoio, incentivo, carinho, conselhos e por ter lutado esta (e tantas outras) batalha ao meu lado, sem hesitar. Você tornou o trajeto até aqui mais leve e certamente fez tudo isso valer a pena!

Aos meus avós, Giselda e Antônio, pelas ligações e mensagens nos momentos mais inesperados e por todos os almoços de domingo regados de despedida que com certeza me fizeram criar forças para vencer todas as etapas desta graduação.

Ao meu irmão Thiago e minha cunhada Camila por terem me dado o bem mais precioso da vida, minha sobrinha Cecília, que é o motivo pelo qual eu quero lutar por um mundo melhor.

As amigas Luiza e Sarah pelo ombro amigo, pelas conversas e por terem compartilhado os piores e melhores momentos dessa graduação comigo.

Aos meus pais postiços, Carmen, Marco e Cátia por terem sido meu abrigo nos momentos de maior solidão em Rio Claro.

Por último e não menos importante, à minha gaiola, e suas integrantes, Marcela, Marcelle, Nadine e Niágara por terem sido meu suporte enquanto estavam fisicamente comigo e por hoje em dia virtualmente, espalhadas por esse mundo continuarem sendo minhas companheiras.

A todos, o meu muito obrigada!

Nasci num país de grandiosas proporções
geológicas e miseráveis dimensões ideológicas.
Esta lástima, porém, em nada fere minha
apreciação por suas totais amplitudes.

Helenilson Persi.

RESUMO

A compartimentação de teto imediato é um procedimento importante para a análise do comportamento mecânico das rochas e suas descontinuidades frente às solicitações que lhes serão impostas em decorrência de projetos de engenharia como, por exemplo, os de avanço de lavra de minas subterrâneas. O estudo buscou reconhecer e interpretar a compartimentação geomecânica do teto imediato da mina Amando Simões PI-08, Figueira – PR, Brasil, a partir da correlação por regressão linear dos métodos *Rock Mass Rating* (RMR) e *Coal Mine Roof Rating* (CMRR) com a finalidade de colaborar com informações de mapeamento geológico e geomecânico para projetos de ancoramento de teto imediato e de avanço de lavra das minas de carvão. Para a realização do estudo, o teto imediato foi mapeado a partir de dois pilares de segurança e as informações foram utilizadas para interpretar e classificar o maciço rochoso de acordo com os sistemas RMR e CMRR. Os resultados para os dois pilares a partir do RMR foram 70 e 68, enquanto para o CMRR foram de 65 e 64 respectivamente. Estes resultados foram correlacionados entre si a fim de se avaliar sua aplicabilidade e, para ambos os sistemas, o teto imediato foi bem representado, pois convergiram para um resultado em comum, um maciço rochoso regular. Por isso, a utilização desta correlação para avaliação do teto imediato é recomendada no intuito de diminuir a subdivisão do maciço em pequenas faixas com classes diferentes, o que aumenta a segurança nas decisões, uma vez que, esta metodologia se provou adequada. Estes resultados preliminares devem ser validados em diferentes locais da mina de modo que aumente sua precisão.

Palavras-chave: RMR; CMRR; Teto Imediato; Compartimentação Geomecânica; Correlação.

ABSTRACT

Immediate roof compartmentalization is an important procedure for analyzing the mechanical behavior of rocks and their discontinuities in the face of the demands that will be imposed on them as a result of engineering projects, such as, those for advancing mining in underground mines. The study sought to recognize and interpret the geomechanical compartmentalization of the immediate roof of the Amando Simões PI-08 mine, Figueira - PR, Brazil, based on the correlation by linear regression of the Rock Mass Rating (RMR) and Coal Mine Roof Rating (CMRR) methods, with the aim of collaborating with geological and geomechanical mapping information for immediate roof anchoring and coal mine advance projects. To carry out the study, the immediate ceiling was mapped from two safety pillars, and the information was used to interpret and classify the rock mass according to the RMR and CMRR systems. The results for the two pillars using the RMR were 70 and 68, while using the CMRR method the results were 65 and 64 respectively. These results were correlated with each other in order to assess their applicability and, for both systems, the immediate ceiling was well represented, converging to a common result: a rock mass classified as a regular quality. Therefore, the use of this correlation to evaluate the immediate ceiling is recommended to reduce the subdivision of the massif into small strips with different classes, which increases security in decisions, since this methodology has proven to be adequate. These preliminary results must be validated in different locations in the mine in order to increase their accuracy.

Keywords: RMR; CMRR; Immediate Roof; Geomechanical Compartmentalization; Correlation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da Mina PI-08.....	4
Figura 2: Gráfico de precipitação mensal entre 2005 e 2014 no município de Figueira (PR).....	6
Figura 3: Localização do município de Figueira dentro do Planalto de Ponta Grossa ...	6
Figura 4: Localização da área de estudo em sua respectiva bacia hidrográfica.....	8
Figura 5: Localização da Bacia do Paraná.	9
Figura 6: Mapa geológico da região de Figueira (PR) com foco para a área de estudo.	14
Figura 7: Procedimento de obtenção de dados e cálculo do RQD.	17
Figura 8: Ajuste do RMR para atividades de mineração.....	21
Figura 9: Parâmetros de classificação que compõe o CMRR.	22
Figura 10: Indicação da resistência à compressão uniaxial ao impacto do martelo geológico.	25
Figura 11: Mapeamento geomecânico em janelas amostrais por meio de linha de referência em maciço com descontinuidades sem persistência (escala gráfica).	29
Figura 12: Empilhamento das Unidades 1,2 e 3 como teto imediato do carvão.....	30
Figura 13: Correlação linear entre dados de classificação RMR e CMRR.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classes RQD.....	18
Tabela 2: Valores dos parâmetros que compõem a classificação RMR.....	20
Tabela 3: Classificação segundo sistema RMR.	21
Tabela 4: Índices para coesão e rugosidade.	23
Tabela 4.1: Índices para espaçamento e persistência	29
Tabela 4.2: Ajuste para múltiplas descontinuidades	30
Tabela 4.3: Índices para sensibilidade à umidade (relacionado ao intemperismo)	30
Tabela 4.4: Ajuste para camada forte (SDB)	31
Tabela 4.5: Ajuste para contato entre as unidades	31
Tabela 4.6: Ajuste para presença de água no teto do pilar	32
Tabela 5: Avaliação dos parâmetros de RMR para as unidades estabelecidas <i>in situ</i> ...	34
Tabela 6: Resultados obtidos a partir do método RMR.	34
Tabela 7: Avaliação dos parâmetros de CMRR para as unidades estabelecidas em cada um dos pilares.....	36
Tabela 8: Resultados obtidos a partir do método CMRR.....	37

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	3
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS	4
3.1 Mina Amando Simões	4
3.2 Clima e Vegetação	5
3.3 Geomorfologia.....	6
3.4 Hidrologia.....	7
4. GEOLOGIA.....	9
4.1 Regional	9
4.1.1 <i>Bacia do Paraná.....</i>	9
4.1.2 <i>Grupo Itararé</i>	10
4.1.3 <i>Subgrupo Guatá.....</i>	11
4.1.3.1 <i>Formação Rio Bonito</i>	11
4.1.3.2 <i>Formação Palermo.....</i>	12
4.1.4 <i>Grupo Passa Dois.....</i>	12
4.1.4.1 <i>Formação Irati</i>	12
4.1.4.2 <i>Formação Serra Alta</i>	13
4.1.4.3 <i>Formação Teresina</i>	13
4.1.4.4 <i>Formação Serra Geral</i>	14
4.2 Geologia Local	14
4.3 Metalogênese	15
5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
5.1 Rock Quality Designation (RQD).....	17
5.2 Rock Mass Rating (RMR).....	18
5.3 Coal Mine Roof Rating (CMRR)	21
5.3.1 <i>Índice de Unidade (unit rating – UR).....</i>	23
5.3.2 <i>Índice de teto (roof rating)</i>	25
6. MATERIAIS E MÉTODOS	28
6.1 Aquisição de dados	28
6.1.1 <i>RQD.....</i>	28
6.1.2 <i>CMRR</i>	29
6.1.3 <i>RMR.....</i>	30
6.3 Regressão Linear	31
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32

7.1 Comparação dos parâmetros do método RMR e CMRR.....	32
7.2 Classificação Geomecânica	33
7.2.1 RQD.....	33
7.2.2 RMR.....	33
7.2.3 CMRR	35
7.3 Correlação RMR e CMRR	37
8. CONCLUSÕES.....	39
9. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	40

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o carvão é a maior fonte de combustível não renovável para geração de eletricidade e as maiores reservas são encontradas nos estados do Rio Grande do Sul (totalizando 89,25% do total nacional), seguido por Santa Catarina (10,41%), Paraná (0,32%) e São Paulo (0,02%). As reservas nacionais de carvão ocupam o 10º lugar no ranking mundial e totalizam 7 bilhões de toneladas, o que corresponde a menos de 1% da reserva mundial total (ANEEL, 2008), porém em quantidade suficiente para atender a demanda atual por mais de 500 anos (BRASIL, 2007).

No estado do Paraná, mais precisamente no município de Figueira, está localizada a mina de carvão Amando Simões (PI-08) pertencente à Companhia Carbonífera do Cambuí que faz parte da maior reserva de carvão ainda em exploração no estado com 22,7 Mt estimados (BIZZI et al., 2003). Esta jazida tem espessura que varia entre 0,6-1,0 m de minério e começou a ser explorada em 2014 através de lavra subterrânea em uma profundidade de 100-150 m com a utilização do método de câmaras e pilares (*room and pillar*).

Até o final dos anos 80, o DNPM (Departamento Nacional da Produção Mineral) permitia a recuperação dos pilares na lavra em recuo, entretanto, após um acidente onde houve o colapso da cadeia de pilares, o órgão proibiu esta prática. Essa decisão obrigou as empresas a realizarem um controle mais rigoroso dos procedimentos de lavra e melhorar a caracterização estrutural e do comportamento geomecânico das diferentes camadas que formam o sistema teto-pilar-piso das minas (ZINGANO, 2002). Ademais, na indústria do carvão, muitos acidentes geológicos induzidos pela mineração foram associados com incompreensão do comportamento mecânico das rochas (PENG, 1998a).

Sistemas de classificação geomecânica foram desenvolvidos para auxiliar e prevenir essas situações pois permitem a conversão de informações geológicas em dados quantitativos de engenharia (BIENIAWSKI, 1988). Esta classificação consiste na individualização e delimitação dos maciços em porções relativamente homogêneas, baseado em suas características geológico-geotécnicas de resistência e deformabilidade.

Mundialmente conhecidos, os sistemas de classificação Rock Quality Designation (RQD) de Deere (1963) e Rock Mass Rating de Bieniawski (1973) estão entre os mais utilizados com a finalidade de caracterizar o maciço rochoso. Além disso, Molinda & Mark (1994) desenvolveram um sistema aplicado especificamente para tetos de mineração subterrânea de carvão, o Coal Mine Roof Rating (CMRR), com a finalidade de representar as características das unidades litológicas separadamente. No entanto, o

CMRR foi projetado para ser equivalente ao RMR, de modo que seus valores devem ser semelhantes em ambos os sistemas.

É neste contexto que a correlação dos sistemas RMR e CMRR por regressão linear permite o agrupamento de seus parâmetros, apesar de obter resultados diferentes. A finalidade desta correlação é prever o comportamento do maciço mediante às solicitações que lhes serão impostas em decorrência do planejamento do avanço de lavra, segurança nos projetos de suporte de teto ou até mesmo, da recuperação dos painéis já lavrados.

2. OBJETIVO

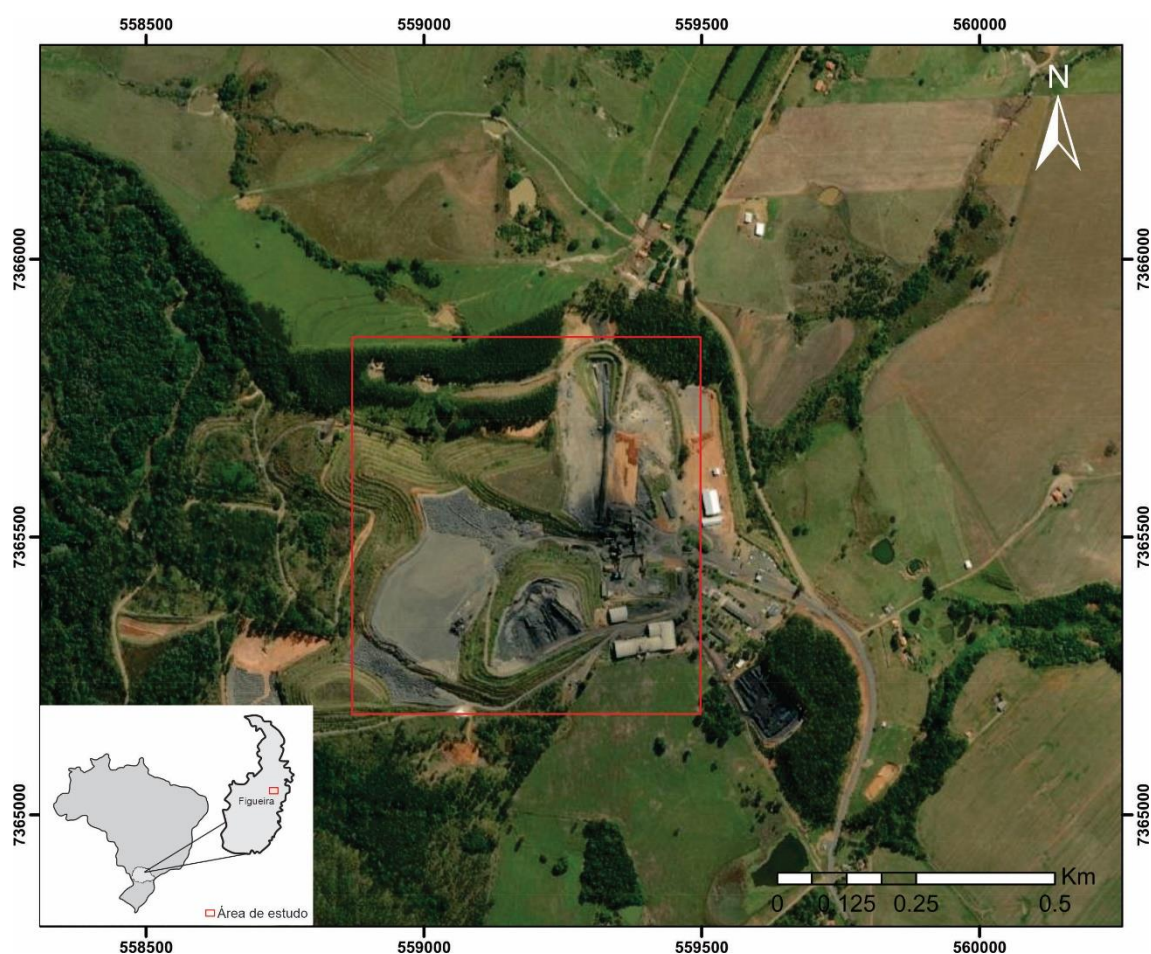
Este trabalho tem como objetivo reconhecer e interpretar a compartimentação geomecânica de teto imediato do carvão na Mina Amando Simões PI-08, em Figueira – PR a partir da comparação e correlação dos métodos ***Rock Mass Rating*** (RMR) e ***Coal Mine Roof Rating*** (CMRR) por regressão linear em dois pilares analisados.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

3.1 Mina Amando Simões

A mina Amando Simões (PI-08) está inserida no Complexo Industrial do Norte Pioneiro e é administrada pela Companhia Carbonífera do Cambuí. O Complexo Industrial por sua vez, está localizado na porção nordeste do Planalto de Ponta Grossa e na região nordeste do Estado do Paraná, mais especificamente, no município de Figueira (Figura 1).

Figura 1: Localização da Mina PI-08



Fonte: Autora

As pesquisas de carvão no Paraná iniciaram em 1910 e foram intensificadas em 1940. Em 1942, foi dado início às atividades de exploração pela Companhia Carbonífera Brasileira, entretanto, com a crise carbonífera nacional de 1950 essa atividade foi postergada e, com isto, na região de Figueira muitas empresas foram fechadas e outras vendidas (LACTEC, 2001). Esse foi o caso da Companhia Carbonífera Brasileira que foi

vendida para a Companhia Carbonífera do Cambuí e, que a partir de então foi a única a prevalecer no Estado do Paraná.

A jazida de carvão PI-08, com espessuras de 0,6-1,0 m de minério, começou a ser explorada em 2014 e está ativa. Esta jazida faz parte da maior reserva de carvão ainda em exploração no Paraná com 22,7 Mt estimados (BIZZI et al., 2003). A lavra do minério é subterrânea em uma profundidade de 100-150 m com a utilização do método de câmaras e pilares (*room and pillar*) com dimensões de 7x7 m ou 7x9 m e galerias de 5 m.

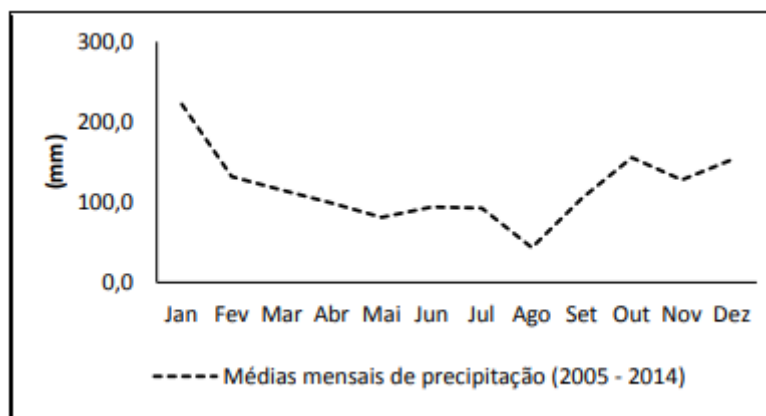
O beneficiamento é apenas físico onde o minério de carvão bruto (ROM) extraído é submetido as operações de grelha fixa, cata manual, britagem (até 19 mm) e separações gravimétricas por jigagem e peneiramento. A partir destes processos são gerados três tipos de produto, o carvão grosso com granulometria > 1 mm e o carvão fino que pode ser subdividido em fino misto ($< 8\#$) e fino nobre ($< 150\#$). O carvão grosso é utilizado pela termelétrica do município de Figueira e o carvão fino é depositado em uma pilha localizada em área externa da mina, e geralmente é comercializado para indústrias cerâmicas (SALIM, 2018).

Ainda segundo Salim (2018), os rejeitos da mina estão dispostos em duas pilhas principais: a do rejeito estéril e a do rejeito piritoso. O rejeito estéril consiste em material de baixa qualidade que é desprezado como produto para beneficiamento devido ao seu baixo rendimento calorífico e este é disposto em uma pilha que acumula material produzido há mais de 50 anos. A pilha de rejeito piritoso, mais recente, acumula material resultante do tratamento do minério por meio de lavagem, que aumenta a concentração da matéria carbonosa e remove alguns minerais, como a pirita.

3.2 Clima e Vegetação

O clima presente na região de Figueira é caracterizado como subtropical úmido mesotérmico ou Cfa (segundo a classificação de Köpenn-Geiger). O inverno conta com temperaturas entre 13°C e 17°C com geadas menos frequentes. Os verões, por sua vez, são quentes com temperaturas máximas que variam de 24°C e 27°C e tendem a ser a estação em que as chuvas são mais volumosas, embora não haja uma estação seca definida. Além disso, a umidade relativa do ar é de 67%. A precipitação média mensal varia de 2.005 a 2.014 mm, com janeiro sendo o mês com maiores taxas de precipitação no município com aproximadamente 245 mm, ao passo que agosto é o mês com as menores taxas de precipitação, aproximadamente 45 mm (ÁGUAS PARANÁ, 2022) (Figura 2).

Figura 2: Gráfico de precipitação mensal entre 2005 e 2014 no município de Figueira (PR).



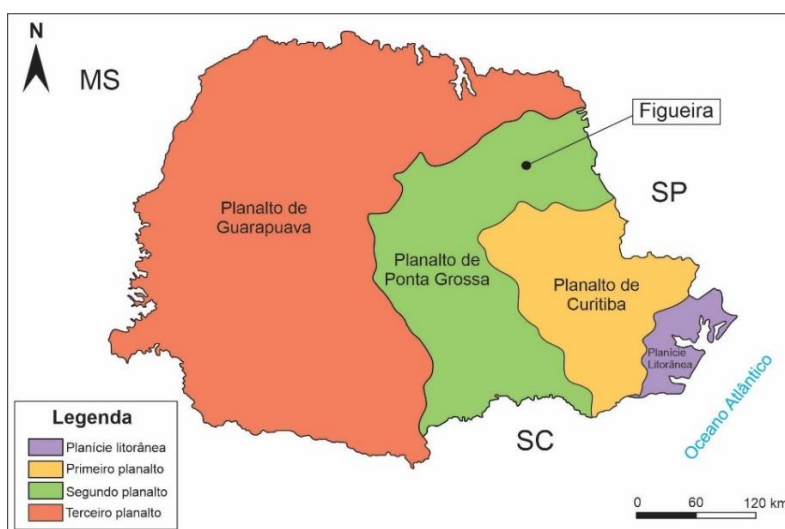
Fonte: Águas Paraná

A região é composta em sua maioria pelo Domínio Natural da Floresta Estacional Semidecidual e, subordinadamente, ocorre o Domínio Natural de Floresta Ombrófila Mista (IBGE, 1992).

3.3 Geomorfologia

O município de Figueira está inserido na região morfológica do Segundo Planalto do Paraná ou Planalto de Ponta Grossa cuja constituição são sedimentos paleozóicos e mesozóicos, não perturbados por movimentos orogênicos (MAACK, 2002) (Figura 3). O Planalto conta com um modelo de caráter estrutural monoclinal, subhorizontal, com mergulho na direção oeste. A leste, seu limite é através da escarpa devoniana formada pelo arenito branco da Formação Furnas, com altitudes de cimeira entre 1100-1200 m, enquanto na borda oeste, é limitado pela escarpa arenito-basáltica triássica-jurássica, com altitudes entre 350 e 1200 m. (SANTOS et al., 2006).

Figura 3: Localização do município de Figueira dentro do Planalto de Ponta Grossa



Fonte: Adaptado de Mineropar (2011).

Na região são encontradas duas sequências de relevo características de uma bacia sedimentar utilizando como parâmetro divisório o rio Laranjinha. A leste do rio, o relevo é caracterizado por uma estrutura concordante horizontal com camadas homogêneas e tenras, com pouca influência de relevo estrutural, mas com o surgimento de uma série de cristas e vales mais ou menos entalhados de acordo com a resistência das rochas (CAMPANER, 2005). As camadas de resistência diferencial formam bacias enxodadas pelo plano de fraqueza aos quais os rios entalham nas rochas (LACTEC, 2001).

Inclinados na direção do rio, aparecem os espigões, uma forma de relevo com topos arredondados que apresentam formas lineares SE para NW que suaviza para N, seguindo a rede de drenagem (CAMPANER, 2005). Em direção ao vale principal do rio Laranjinha estes espigões recortados se tornam cada vez mais baixos com inclinação suave e, se fragmentam em pequenas colinas de topos arredondados. Segundo LACTEC (2001), neste relevo é comum a presença de algumas superfícies exumadas onde o processo erosivo avançado faz surgir a superfície estrutural da camada subjacente.

Em geral, os relevos do Planalto de Ponta Grossa são caracterizados por uma topografia suave, de colinas arredondadas e mesetas estruturais. As séries de diques paralelos de diabásios nas cristas das elevações constituem características importantes para a topografia do Segundo Planalto por serem linhas principais dos sistemas orográficos do Paraná, que determinam a orientação da maior parte dos espigões rumo N 45° W (MAACK, 2002). E ainda, juntamente com os diques de diabásios são encontrados sills de grande extensão, relacionados a fenômenos de metamorfismo.

3.4 Hidrologia

A região estudada se beneficia de rios da sub-bacia do rio Cinzas cujos principais afluentes são o ribeirão Grande, o ribeirão Jaboticabal, o ribeirão Vermelho e o rio Laranjinha, também denominado “rio do Peixe” (Figura 4). Esta bacia é constituída por rochas de derrames basálticos ou gabróicas com fraturas e lineações e por sedimentos permianos (MAACK, 2002). A rede de drenagem foi formada por influência das estruturas e dos litotipos presentes na região. Além disso, apresenta média a alta densidade com padrões dendríticos, sinuosidade mista e direção NW com forte assimetria.

A disponibilidade hídrica superficial da bacia do rio Cinzas é de 28.000 L/s, o que representa apenas 4% do total disponível na bacia enquanto a disponibilidade subterrânea é estimada em 9.000 L/s proveniente das unidades aquíferas Pré-Cambriana, Paleozóica

4. GEOLOGIA

4.1 Regional

A Mina Amando Simões (PI-08) está situada na Faixa Oriental da Bacia do Paraná, uma bacia intracratônica evoluída ao longo da Plataforma Sul-Americana cujo registro estratigráfico é de aproximadamente 400 Ma disposto entre os períodos Neo-Ordoviciano e Neo-Cretáceo (MILANI et al., 2007).

4.1.1 Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná consiste em uma ampla região sedimentar com área de aproximadamente 1.500.000 quilômetros quadrados localizada na América do Sul, onde incorpora porções territoriais do Brasil meridional, Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai (MILANI et al., 2007). Na porção brasileira, compreende os estados do Mato Grosso, Mato grosso do Sul, Goiás, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul totalizando 1.100.00 km² (Figura 5).

Figura 5: Localização da Bacia do Paraná.



Fonte: Adaptado de Milani (1997)

Segundo Bocardi et al. (2008), é possível individualizar em 4 fases de subsidência a Bacia do Paraná. A primeira, corresponde a sedimentação inicial da bacia e é responsável pela deposição da Sequência Rio Ivaí (Ordoviciano). Após um período de aproximadamente 12 Ma, já durante o Devoniano, foi depositada a Sequência do Paraná. Na terceira fase, que compreende do Permocarbonífero ao início do Triássico, foi depositado a Sequência Gondwana I, seguida da subsidência relacionada ao magmatismo basáltico conhecida como Sequência Gondwana II, com um hiato de aproximadamente 100 Ma (Neojurássico-Eocretáceo). Ao final do evento de magmatismo, foi depositada a Sequência Bauru.

A estratigrafia da Bacia do Paraná é composta por seis supersequências na forma de pacotes rochosos envelopados por superfícies de discordância de caráter inter-regional, onde cada uma delas integra uma idade específica: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (NeoCarbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso-Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo) (MILANI et al., 1997;2007).

A geologia da área de investigada é representada pela Supersequência Gondwana I que compreende rochas sedimentares do Neocarbonífero ao Eotriássico (MILANI et al., 2007) e representam um ciclo Transgressivo-Regressivo que termina com a restrição da Bacia do Paraná com relação ao Oceano Panthalassa. A sedimentação desta Supersequência está associada a eventos de glaciação e deglaciação, desenvolvimento de sistemas deltaicos, estuários e ilhas barreiras ao longo da costa (NORTHFLEET et al., 1969). As unidades estratigráficas aflorantes tem espessuras de até 2.500 m e pertencem ao Grupo Itararé, Subgrupo Guatá e Grupo Passa Dois (SHUQUAIR, 2002). Ocorrem ainda nesta região, diques de diabásio da Formação Serra Geral.

4.1.2 Grupo Itararé

Na área de estudo, o Grupo Itararé apresenta uma espessura de 700 metros, constituído por diamictitos, folhelhos e arenitos de granulação fina a grosseira, depositados em ambientes periglacial, lacustre e marinho (BIZZI et al., 2003).

Apesar da grande heterogeneidade composicional dos arenitos que constituem o Grupo Itararé, algumas características são mais frequentes, tais como granulação fina à média e constituição principal de quartzo, feldspatos e fragmentos líticos e arenitos constituídos essencialmente por quartzo (BIZZI et al., 2003).

A deposição do Grupo Itararé teve início após a terceira fase de subsidência da Bacia do Paraná através de um ambiente continental na porção Norte e, transicionou

rapidamente para um ambiente marinho, o que indica a entrada de um mar epicontinental na porção Sul (ZALÁN et al. 1987).

4.1.3 Subgrupo Guatá

O Subgrupo Guatá sucede os estratos de sedimentação glacial do Grupo Itararé em contato discordante e é subdividido nas Formações Rio Bonito (porção basal) e Palermo (porção superior). É constituído por siltitos, arenitos intercalados com camadas de carvão e folhelhos carbonosos sobrepostos estratigraficamente (SCHNEIDER et al., 1974). Segundo Lavina e Lopes (1987), estes sedimentos estão relacionados a uma transgressão permiana.

A porção basal representada pela Formação Rio Bonito é composta por uma sucessão de sedimentos de ambientes costeiros, seguidos pela Formação Palermo com sedimentos de ambiente marinho plataformal raso. Entretanto, segundo Holz et al. (2010), a interação destas formações é complexa pois em um grande período elas se depositaram simultaneamente o que resultou em ciclos e interdigitações dessas unidades.

4.1.3.1 Formação Rio Bonito

A Formação Rio Bonito conta com uma espessura que varia de 120-140 m e é composta por arenitos associados a siltitos, pelitos e camadas de carvão e calcário, aflorantes ao longo da borda leste da Bacia do Paraná (WHITE, 1908). Esta Formação foi dividida por Schneider et al. (1974) em três membros denominados da base para o topo Triunfo, Paraguaçu e Siderópolis.

O Membro Triunfo, porção inferior da unidade, é constituído por arenitos finos a médios e grossos, com estratificações cruzadas, grãos subarredondados e seleção moderada, ocorrendo siltitos, pelitos carbonosos e carvão intercalados. Esta unidade é de grande importância do ponto de vista econômico e ambiental, uma vez que, além da mineralização de carvão, ocorre mineralização uranífera em seus sedimentos cuja espessura varia entre 15 e 30 m (BIZZI et al., 2003).

O Membro Paraguaçu representa a porção intermediária da formação, e se sobrepõe ao Membro Triunfo. É composto por camadas de siltitos bioturbados (MEDEIROS; THOMAZ FILHO, 1973), por vezes laminados, e folhelhos intercalados com arenitos finos e rochas carbonáticas (GALHARDI, 2016).

O Membro Siderópolis constitui o topo da unidade e é formado por camadas de arenito fino a muito fino intercalados com folhelhos carbonosos e carvão. De acordo com

Bizzi et al. (2003), esta última unidade é pouco desenvolvida nas proximidades de Figueira e no nordeste do Paraná.

A deposição da Formação Rio Bonito pode ser descrita como fluvial durante o intervalo inferior, e transicional e marinha durante os intervalos médio e superior (TOMMASI, 1973). Bizzi et al. (2003) propõe para a porção inferior um ambiente deposicional de canais e mangues costeiros, para a porção média um ambiente marinho transgressivo e para o intervalo superior um ambiente litorâneo. O contato da Formação Rio Bonito com as formações adjacentes varia localmente.

4.1.3.2 Formação Palermo

A Formação Palermo (Artinskiano) consiste em siltitos cinza, frequentemente alterados para amarelo-esverdeado, apresentando camadas arenosas e calcíferas no topo da unidade (VIEIRA, 1973). Apresentam, ainda, uma sucessão de siltitos laminados, por vezes bioturbados e com moderados níveis de sílex (BIZZI et al., 2003). As características litológicas e sedimentares da Formação Palermo indicam deposição em ambiente marinho transgressivo de águas rasas, abaixo do nível de ação de ondas (SCHNEIDER et al., 1974)

O contato com a Formação Rio Bonito é do tipo transicional com presença de intercalação de camadas enquanto com a Formação Irati, é do tipo gradacional (GALHARDI, 2016).

4.1.4 Grupo Passa Dois

Segundo Milani et al. (2007), as rochas do Grupo Passa Dois correspondem aos últimos depósitos da Supersequência Gondwana I durante o intervalo do Neocarbonífero-Eotriássico e registram grandes ciclos transgressivo-regressivos durante o Paleozóico. O Grupo Passa Dois é constituído de rochas carbonáticas, arenitos, argilitos, siltitos e folhelhos e é composto pelas formações Irati, Serra Alta, Teresina e Rio do Rastro na porção sul da bacia e nas formações Irati e Corumbataí nos estados de São Paulo, Mato Grosso e Goiás (GORDON JR., 1947; SCHNEIDER et al., 1974). Os afloramentos deste Grupo estão nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo, Mato Grosso e Goiás.

4.1.4.1 Formação Irati

A Formação Irati corresponde a porção basal do Grupo Passa Dois e é dividida em uma sequência inferior (Membro Taquaral) e uma superior (Membro Assistência). O Membro Taquaral possui siltitos e argilitos cinza escuros não betuminosos, maciços ou

com laminação plano paralela, enquanto o Membro Assistência possui folhelhos ricos em matéria orgânica, intercalados com calcários que podem conter estratificações cruzadas *hummocky*, marcar onduladas e laminações cruzadas cavalgantes (CPRM, 2006).

Holz et al. (2010) acredita que o sistema deposicional desta formação estaria relacionado a um ambiente marinho raso com uma conexão restrita ao oceano aberto, onde o Membro Taquaral possuía melhor circulação oceânica em relação ao Membro Assistência, que registra condições restritas mais severas com acumulação de evaporitos.

4.1.4.2 Formação Serra Alta

A Formação Serra Alta recobre a Formação Irati e apresenta uma espessura média de 85 m. É constituída por uma sequência de folhelhos, siltitos e argilitos intercalados com lentes e concreções de calcários, depositados em ambiente marinho de águas calmas águas calmas e profundas de um mar interior (VIEIRA, 1973; SCHNEIDER et al., 1974; BIZZI et al., 2003).

A Formação Serra Alta seria responsável por documentar a última incursão marinha no Permiano na Bacia do Paraná (MILANI et al., 2007). O início de sua deposição é marcado pelo desaparecimento de camadas carbonáticas e a presença de folhelhos pretos, que representam um ambiente redutor. No entanto, a presença de pelitos laminados acinzentados sucedidos por fácies mais arenosas e pelitos avermelhados em sua porção superior, indicam mudança para um ambiente mais oxidante (WARREN et al. 2015).

4.1.4.3 Formação Teresina

A Formação Teresina é composta por intercalações de arenitos finos calcíferos ou calcários com sedimentação carbonática especialmente no topo e por uma alternância de lâminas silticas e argilosas na porção inferior (GALHARDI, 2016). Os arenitos apresentam laminações *wavy*, *linsen* e *flaser* com diferentes níveis de bioturbação, estratificações cruzadas por ondas e gretas de contração em alguns níveis mais argilosos (MEGLHIORATTI, 2006). No Paraná, a Formação Teresina pode atingir 120 metros e apresenta cores cinza ou verde e, à medida que se aproxima do Estado de São Paulo, adquire coloração avermelhada, recebendo denominação, naquela região, de Formação Corumbataí (VIEIRA, 1973).

De acordo com Rohn (2001), a Formação Teresina apresenta ciclos granocrescentes ascendentes de espessuras decimétricas à decamétricas, que se assemelham aos ciclos agradacionais pontuados – “PAC” de Godwin e Anderson (1985).

Estes ciclos seriam responsáveis por representar os intervalos de “raseamento” da Formação onde iniciariam com depósitos de águas mais distais (pelitos) e terminariam com depósitos de águas proximais (arenitos finos ou carbonatos). O “raseamento” marca o contato entre as formações Teresina e Serra Alta, que é caracterizado como transicional.

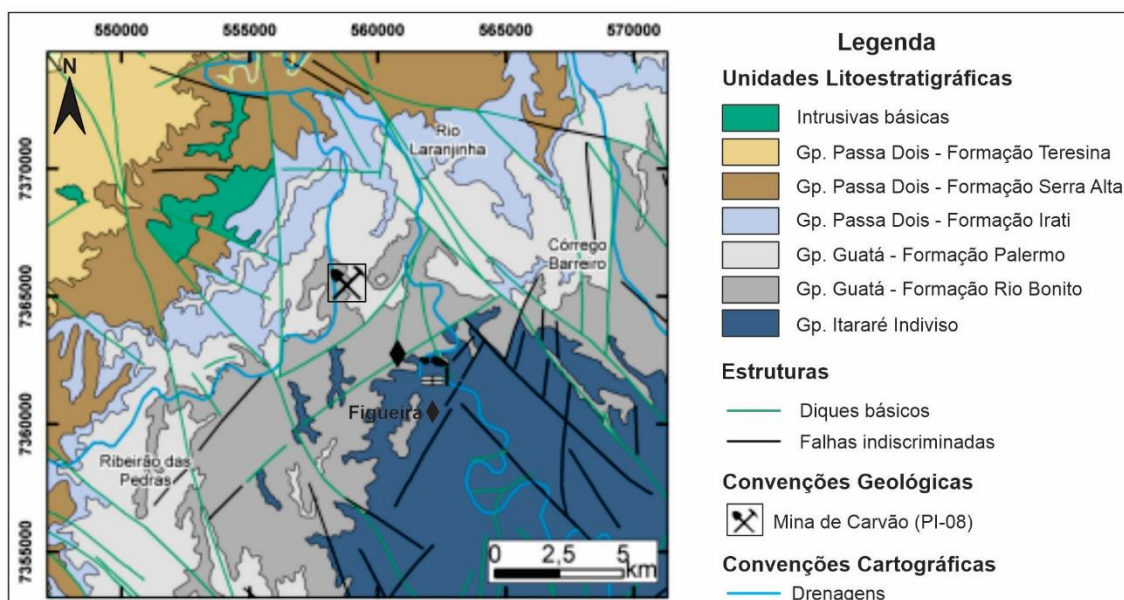
4.1.4.4 Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral representa um derrame de lava inserido na sequência Gondwana III da Bacia do Paraná e é descrita por diabásios e basaltos que se desenvolvem em forma de diques, soleiras e derrames (MACHADO et al., 2009). No Estado do Paraná, a formação representa um importante reservatório de recursos hídricos subterrâneos. Campaner (2013) identificou na região de estudo diques de diabásio da Formação Serra Geral que passaram a ser lavrados para uso em obras civis e para minerações da região.

4.2 Geologia Local

A mina Amando Simões (PI-08) é composta litologicamente por uma sequência da base para o topo de carvão, siltito maciço, camada de carbonato intercalada com siltito e siltito carbonático pertencentes ao Membro Triunfo. Este Membro é uma subdivisão da Formação Rio Bonito, que está associada à sedimentação pós-glacial na Bacia do Paraná durante o Eopermiano (Figura 6).

Figura 6: Mapa geológico da região de Figueira (PR) com foco para a área de estudo.



Fonte: Adaptado de Galhardi (2016)

Na área estudada, essa sequência foi individualizada em quatro fácies sedimentares diferentes: carvão, siltito maciço, intercalação de camadas carbonáticas com camadas de

siltito e siltito laminado, onde o carvão representa a unidade de base, e as outras três representam o teto imediato da mina.

A unidade 1 é composta por uma camada de carvão encontrada a 100-150 m de profundidade que varia de 0,6 a 1 m, lateralmente contínua e em formato lenticular com afinamento em direção as bordas da bacia. O carvão é constituído por detritos vegetais alóctones, retrabalhados e concentrados por agentes marinhos (ZACHARIAS; ASSINE, 2005). Além disso, em alguns pontos o carvão é encontrado ondulado, o que sugere retrabalhamento por correntes marinhas e não uma acumulação de restos vegetais “*in situ*”. (ZACHARIAS, 2004)

A unidade 2 é caracterizada pela presença de siltito cinza escuro maciço (Fm) e tem aproximadamente 10 cm de espessura. A presença de matéria orgânica quase nula nesta unidade sugere um indicador de mudança nas condições de deposição com aumento da quantidade de sedimentos e de energia envolvida no sistema.

A intercalação entre camadas de carbonato e siltito cinza claro maciço tem aproximadamente 30 cm. Essa unidade é laminada paralelamente e conta com a presença de pirita que nas frentes já lavradas está em forte processo intempérico responsável pela formação de ácido sulfídrico. Os bancos de calcários argilosos indicam retrabalhamento no sítio deposicional e exposição dos sedimentos (ZACHARIAS, 2004). A pirita, por sua vez, indica um ambiente de formação anóxico e redutor.

A unidade 3 é composta de aproximadamente 60 cm de um siltito de matriz carbonática de coloração cinza claro, bastante fraturado, muito em consideração do alívio de tensão das frentes de lavra e, com certa laminação plano paralela (fácies Fl).

4.3 Metalogênese

A sedimentação carbonífera na Bacia do Paraná teve início com a deposição de arenitos e diamictitos da Formação Aquidauana (Carbonífero superior) enquanto a deposição da porção inferior do Itararé já havia se iniciado, ao sul, nos Estados de Santa Catarina e Paraná (GALHARDI, 2016). Essa deposição prosseguiu no Permiano com arenitos finos, siltitos rítmicos e folhelhos esverdeados, com intercalações de diamictitos e folhelhos pretos. A paleogeografia durante o Permiano na bacia indica o predomínio de um mar raso epicontinental, que teve início com a sedimentação dos folhelhos superiores do Grupo Itararé (MEDEIROS; THOMAZ FILHO, 1973).

No início do Permiano Médio, a Bacia do Paraná era uma plataforma plana, com declive suave, entretanto, as regiões deltaicas foram desenvolvidas em consequência do movimento dos rios em direção às áreas costeiras, onde a subsidência era mais intensa e a sedimentação favorável (MEDEIROS; THOMAZ FILHO, 1973). Esse desenvolvimento deltaico resultou na deposição da Formação Rio Bonito, cujo sistema deposicional dominante no intervalo inferior era flúvio-deltaico.

O carvão é encontrado principalmente nos intervalos inferior e superior da Formação Rio Bonito, onde os carvões da porção inferior pertencem às fácies fluviais e da planície deltaica e podem ser encontrados em todo o Sudeste brasileiro enquanto os da porção superior estão associados com as fácies de lagunas e areias litorâneas e podem ser encontrados no estado de Santa Catarina (MEDEIROS; THOMAZ FILHO, 1973).

A flora *Gangamopteris* - *Glossopteris*, predominante nos períodos Carbonífero e Permiano no que hoje corresponde ao sul do Brasil, foi a grande responsável pela formação do carvão na Formação Rio Bonito, em um ambiente inter e pós-glacial, por meio de acumulação em um momento de estabilidade da bacia (BIZZI et al., 2003). Entretanto, ciclos de tempestades danificaram as barreiras arenosas o que promoveu a destruição das proto camadas de carvão e, somados com as inundações do mar nas turfeiras, ocorreu a deposição de areias, siltes e argilas juntamente com a matéria carbonosa. Estas frequentes intercalações de material orgânico e inorgânico formaram, após diagênese, os carvões da Bacia do Paraná (BIZZI et al., 2003).

Devido à relativa estabilidade tectônica e as declividades tênues em direção ao fundo da bacia, os estratos sedimentares na Bacia do Paraná são pouco espessos em relação à sua distribuição em área (BIZZI et al., 2003). Esta característica se pronuncia também regionalmente e localmente nos horizontes de carvão que, devido à baixa taxa de subsidência, são verticalmente heterogêneos, pouco espessos e com baixa concentração de matéria orgânica (GALHARDI, 2016).

5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

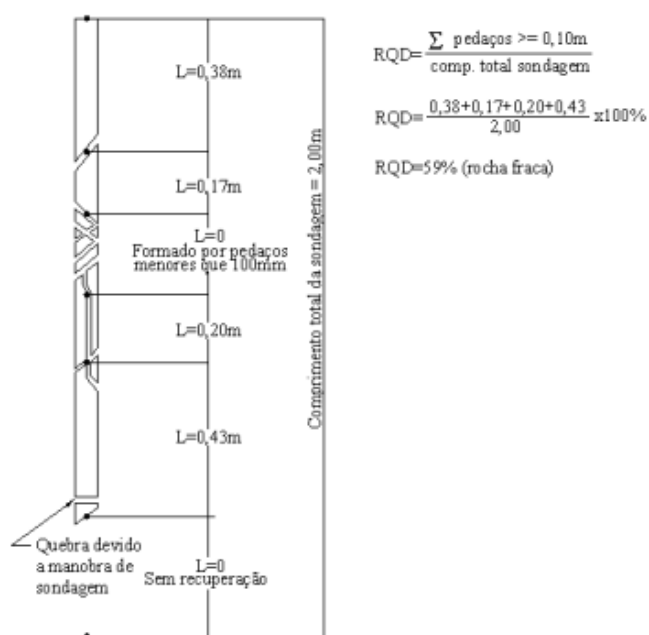
5.1 Rock Quality Designation (RQD)

O índice Rock Quality Designation (RQD) é uma metodologia simples de classificação que leva em consideração a qualidade da rocha avaliada a partir de testemunhos de sondagem (DEERE, 1963) (Figura 7). O método consiste na modificação da recuperação da sondagem que considera apenas porções de testemunho maiores que 10 centímetros, como é explicitado na Equação 1.

$$RQD = \frac{\sum \text{porções} > 10 \text{ cm}}{\text{comprimento total da sondagem}} \quad (\text{Eq. 1})$$

Apesar de ser um método simples e barato de classificação, o RQD não é suficiente para determinar com precisão a qualidade do maciço rochoso, porque não leva em consideração outros parâmetros importantes como orientação e qualidade das descontinuidades, fluxo de água no maciço rochoso e resistência à compressão da rocha.

Figura 7: Procedimento de obtenção de dados e cálculo do RQD.



Fonte: Bieniawski (1989)

Em situações em que o testemunho de sondagem não está disponível ou não existe, o RQD pode ser estimado por fórmulas empíricas. Palmström (1982) sugeriu obter o valor de RQD a partir da correlação entre o número de descontinuidades por unidade de volume conforme a Equação 2.

$$RQD^* = 115 - 3.3 \lambda_3 \quad \text{Eq. (2)}$$

onde: J_v = número de descontinuidades por metro cúbico

O parâmetro volumétrico λ_3 é a medida para o número de descontinuidades dentro de uma unidade de volume. Uma descontinuidade em um volume de rocha é representada por um plano. Quando a descontinuidade é cortada por um plano ela é representada por uma linha. Se a direção da família de descontinuidades for paralela à direção da face, essa família não será visível.

O mapeamento geomecânico deve ser realizado por meio de janelas ou *scanlines* perpendiculares entre si, para capturar todas as descontinuidades. Como (λ_3) é muito difícil de estimar, principalmente quando as descontinuidades possuem persistência muito baixa ou não existe mapeamento geomecânico em direções diferentes, então, é possível estimá-lo a partir da densidade de descontinuidades por área (λ_2) (PALMSTRÖM, 1982) encontrado a partir da Equação 3.

$$\lambda_2 = \sum \frac{1}{S_i} \quad \text{Eq. (3)}$$

onde: S_i = espaçamento médio das descontinuidades em metros

Apesar de ser um tipo de classificação geomecânica, o RQD também é utilizado como parâmetro para outras classificações geomecânicas como o *Rock Mass Rating* (RMR). Para o cálculo dos índices de RMR em minas de carvão, foi proposta a utilização das equações 2 e 3 para obter o valor de RQD* a partir de medidas realizadas em janelas de amostragem. O resultado é avaliado a partir da divisão de classes do RQD (Tabela 1).

Tabela 1: Classes RQD

Classe	Qualidade da rocha	RQD (%)
I	Muito ruim	< 25
II	Ruim	25 – 50
III	Regular	50 – 75
IV	Bom	75 – 90
V	Excelente	90 – 100

Fonte: Adaptado de Deere (1989).

5.2 Rock Mass Rating (RMR)

O sistema RMR foi desenvolvido por Bieniawski (1973) e pode ser utilizado a partir de ajustes em função de cada tipo de escavação ou maciço rochoso estudado

(UNAL, 1983; ROMANA, 1985; NEWMAN; BIENIAWSKI, 1986). Para classificação do maciço rochoso são utilizados 5 parâmetros:

- Resistência à compressão uniaxial da rocha;
- RQD;
- Espaçamento entre as descontinuidades;
- Condições das descontinuidades;
- Presença de água no maciço rochoso.

O RMR é aplicado a partir da divisão do maciço rochoso em unidades homogêneas com características estruturais e geológicas semelhantes (BIENIAWSKI, 1989). Normalmente os limites entre essas divisões são as estruturas geológicas principais (falhas, diques, zonas de cisalhamento) ou mudança no tipo de rocha. No caso de jazidas de carvão, é possível dividir o maciço a partir das unidades litológicas encontradas (siltito, arenito, carvão etc.). Dentro dessas zonas, em regiões de mesma litologia, podem ocorrer casos em que seja necessária uma nova subdivisão devido a mudanças significativas no espaçamento das descontinuidades ou características dessas (HOEK, 2000).

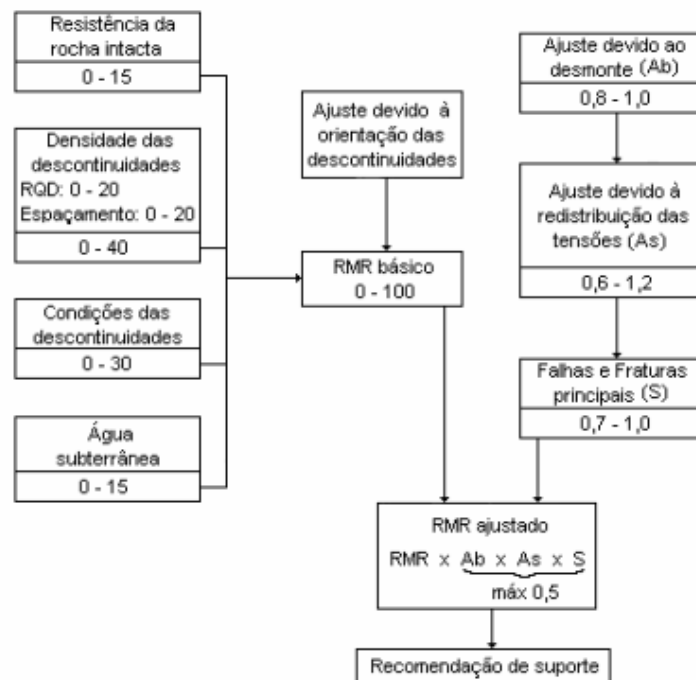
Após a divisão do maciço em zonas homogêneas, os parâmetros necessários para a classificação geomecânica para cada unidade podem ser determinados a partir de furos de sondagem ou *scanlines* e com auxílio da Tabela 2 (BRADY & BROWN, 1985).

Tabela 2: Valores dos parâmetros que compõem a classificação RMR

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

Fonte: Zingano (2002).

Em seguida é determinado os valores dos cinco primeiros parâmetros apresentados acima e realizada a soma para obtenção do valor básico de RMR. O sexto parâmetro, por sua vez, é responsável pelo ajuste do RMR em função da relação entre a orientação das descontinuidades e o tipo de escavação estudada (Figura 8).

Figura 8: Ajuste do RMR para atividades de mineração.

Fonte: Laubscher (1977)

Ao final o maciço rochoso pode ser classificado segundo cinco classes de maciços onde o RMR poderá variar entre 0-100 (BIENIAWSKI, 1989) (Tabela 3).

Tabela 3: Classificação segundo sistema RMR.

RMR	Qualidade da Rocha
< 20	Muito Fraca
21 - 40	Fraca
41 - 60	Média
61 - 80	Competente
81 - 100	Muito Competente

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

5.3 Coal Mine Roof Rating (CMRR)

A classificação geomecânica CMRR foi desenvolvida com a finalidade de descrever quantitativamente as informações geológicas exclusivas de maciços rochosos sedimentares, que influenciam na competência estrutural do teto das galerias de minerações subterrâneas de carvão (MOLINDA & MARK, 1994). A competência é determinada a partir das propriedades das descontinuidades existentes no maciço rochoso, pois são os principais planos de enfraquecimento da rocha (WEISS, 2003).

O CMRR emprega parâmetros diferentes do RMR proposto por Bieniawski (1989), devido a sua aplicação específica para minas subterrâneas de carvão (Figura 9):

- Resistência ao cisalhamento, a partir da coesão e da rugosidade das juntas;
- Intensidade das juntas, a partir do espaçamento (densidade) e persistência das descontinuidades;
- Número de famílias de fraturas;
- Resistência à compressão (determinada com o martelo de ponta redonda);
- Resistência da rocha ao intemperismo, devido à sensibilidade da rocha exposta à umidade, temperatura da mina e percolação de água nas fraturas;
- Presença de camada maciça, ou seja, mais competente acima do teto imediato;
- Número de unidades (camadas) que formam o teto e suas espessuras;
- Presença de água subterrânea;
- Qualidade do maciço rochoso acima dos parafusos.

Figura 9: Parâmetros de classificação que compõe o CMRR.



Fonte: Molinda & Mark (1994)

A obtenção desses parâmetros em campo é realizada de acordo com os recursos disponíveis da mina e, pode ser feita a partir da exposição das camadas em subsolo, nos afloramentos, furos de sondagem, *borescope*, entre outros (WEISS, 2003). Normalmente, apenas as rochas na zona de ancoragem e logo acima do parafuso são consideradas para a determinação do CMRR. Após classificar e separar visualmente o teto da mina em unidades estruturais, é realizada a descrição de suas propriedades geológicas e geomecânicas, além disso, são definidos os limites e espessuras de cada unidade. Para facilitar a coleta e organização dos dados de campo é sugerida a utilização da tabela que reúne todos os parâmetros adaptada de Molinda & Mark (1994) (Anexo III).

Segundo Molinda & Mark (1994) a classificação CMRR divide a obtenção e análise dos parâmetros em dois grupos. O primeiro leva em consideração as características da rocha e das descontinuidades, chamada de índice da unidade (**unit rating – UR**). O segundo grupo, chamado de índice do teto (**roof rating**), considera características do teto, como presença de camada forte ou maciça, presença de água etc.

O cálculo do CMRR é dividido em etapas onde, primeiramente é determinado o índice individual para cada unidade (UR) mapeada na mina a partir da pontuação atribuída para cada família de descontinuidade. Posteriormente, cada valor de UR é combinado com suas respectivas espessuras para obtenção do RRw (*thickness-weighted average*). O valor final de CMRR é obtido a partir da soma dos fatores individuais que variam na escala de 0 a 100 e que serão descritos abaixo. Este sistema é universal e aplicável para todas as camadas rochosas que formam o teto das minas de carvão, independentemente da idade, ambiente deposicional, *rank* ou localização geográfica (WEISS, 2003).

5.3.1 Índice de Unidade (*unit rating – UR*)

Os planos de fraquezas responsáveis por tornarem a rocha bastante suscetível ao deslocamento e ao cisalhamento são a laminação, xistosidade, juntas ou falhas e, portanto, um dos fatores determinantes no cálculo do CMRR é a constatação da resistência ao cisalhamento desses planos de fraqueza, a qual representa 35% do CMRR final (WEISS, 2003). A capacidade de uma descontinuidade resistir a este deslocamento é avaliada a partir dos parâmetros de coesão e rugosidade das superfícies, que são contabilizadas para cada unidade estrutural previamente definida. Em minas de carvão, a coesão varia de zero a fortemente coesiva e, é avaliada a partir da utilização de um martelo onde o número de golpes dados ao longo do maciço rochoso que compõe o teto determina sua magnitude (MOLINDA & MARK, 1994). A rugosidade, por sua vez, é estimada e classificada visualmente como rugosa, ondulada e planar a partir de amostras de mão ou da exposição dos caimentos (Tabela 4).

Tabela 4: Índices para coesão e rugosidade.

Rugosidade	Coesão			
	Forte	Moderada	Fraca	Slikenside
Rugosa	35	29	24	10
Ondulada	35	27	20	10
Planar	35	25	16	10

Fonte: Molinda & Mark (1994).

A intensidade de uma família de descontinuidades é outro fator que influencia a competência estrutural da unidade e, é determinada pelo espaçamento entre as descontinuidades de uma mesma família e a sua persistência. Quanto mais próximas elas estiverem dispostas e quanto maior for sua extensão, mais fraco será o maciço rochoso. O espaçamento é a distância média entre as descontinuidades de uma mesma família dentro de uma mesma unidade e, normalmente é determinado pelo número de descontinuidades observadas ao longo de uma linha previamente estabelecida (*scanline*) no teto enquanto a persistência é a extensão ou área do plano de fraqueza que pode ser tanto vertical quanto horizontal (MARK & MOLINDA, 1996) (Tabela 4.1).

Tabela 4.1: Índices para espaçamento e persistência.

Persistência (m)	Espaçamento (m)				
	> 1,8	0,6 - 1,8	0,2 - 0,6	0,06 - 0,2	< 0,06
0 - 0,9	35	30	24	17	9
0,9 - 3,0	32	27	21	15	9
3,0 - 9,0	30	25	20	13	9
> 9,0	30	25	20	13	9

Fonte: Molinda & Mark (1994).

Depois de obtido o valor individual para cada família de descontinuidade presente na unidade estrutural, pela soma dos valores referentes à resistência ao cisalhamento e a intensidade das fraturas, é realizado o ajuste para múltiplas famílias de descontinuidades. Esse ajuste é aplicado quando há mais de um conjunto de fraturas na unidade analisada e, nesse caso, são analisadas as duas famílias de menor índice, de maneira que ambas possuam valores abaixo de 30, 40 ou 50 pontos na sua classificação individual (WEISS, 2003). Os fatores de ajuste para esse parâmetro podem ser obtidos a partir da Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Ajuste para múltiplas descontinuidades

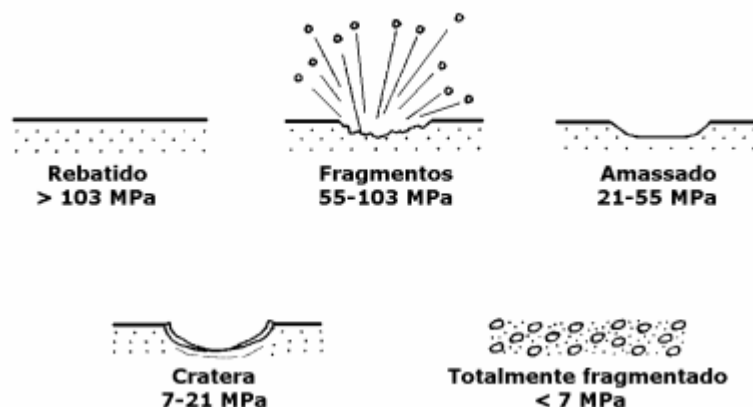
Índice das duas famílias de descontinuidades menores	Fator de ajuste
30	-5
40	-4
50	-2

Fonte: Molinda & Mark (1994).

A determinação da resistência à compressão também é muito importante na estimativa da qualidade do maciço do teto imediato e, o seu teste é realizado a partir de golpes de martelo na face da rocha exposta onde a resistência é determinada ao comparar as

características da superfície da rocha após o impacto do martelo (WILLIAMSON, 1984) (Figura 10).

Figura 10: Indicação da resistência à compressão uniaxial ao impacto do martelo geológico.



Fonte: Molinda & Mark (1994)

O teste de sensibilidade à umidade é realizado a partir da observação do grau de desagregação da unidade depois de imersão em água durante 24 horas (SICKLER, 1986). Os valores do CMRR relacionados a esse parâmetro estão na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Índices para sensibilidade a umidade (relacionada ao intemperismo)

Sensibilidade	Índice
Não sensível	0
Levemente sensível	-3
Moderadamente sensível	-10
Muito sensível	-25

Fonte: Molinda & Mark (1994).

5.3.2 Índice de teto (roof rating)

Após determinar os índices individuais das unidades, estes são combinados em um único valor de CMRR válido para todo o teto da mina. Posteriormente, é determinado o grau de importância da unidade estrutural na estabilidade global do teto imediato. A atribuição do peso médio da espessura da unidade (RRw) é obtida em função do comprimento do parafuso e o intervalo das unidades em que ele está compreendido (WEISS, 2003). O maior peso será atribuído para a unidade que tiver maior espessura, ou seja, aquela que obtiver a maior porção de toda a extensão do parafuso.

A competência estrutural global das unidades ancoradas pelo parafuso é determinada a partir da qualidade da camada mais competente (“camada forte”) no intervalo

compreendido pelo parafuso (MOLINDA & MARK, 1994). O ajuste para camada forte no CMRR depende de fatores como o contraste entre a competência da camada forte e as outras unidades (quanto mais competente, maior sua contribuição) e camada com espessura mínima de 0,30 m para satisfazer a ancoragem e promover qualquer suporte adicional (WEISS, 2003) (Tabela 4.4). Quando essa condição não é alcançada o ajuste da camada forte não é aplicado.

Tabela 4.4: Ajuste para a camada forte (SDB).

Espessura da camada forte (m)	Diferença da camada forte (SDB*)							
	5,0 - 9,0	10,0 - 14,0	15, 0 - 19,0	20,0 - 24,0	25,0 - 29,0	30,0 - 34,0	35,0 - 40,0	> 40
0,3 - 0,6	0	2	4	5	7	8	9	10
0,6 - 0,9	2	4	7	9	12	14	17	20
0,9 - 1,2	3	5	10	14	18	21	25	30
> 1,2	4	8	13	18	23	28	34	40

Fonte: Molinda e Mark (1994).

Por apresentarem diversas camadas, o teto das minas de carvão possui contatos litológicos que tornam o maciço menos competente ao comparar com o comportamento geomecânico de uma única camada rochosa. Esse contato é relativamente fraco e, pode ser observado nos furos de sondagens ou nos caimentos, além disso, seu ajuste é mostrado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Ajuste para os contatos entre as unidades

Número de contatos	Fator de ajuste
0	0
1,0 - 2,0	-2
3,0 - 4,0	-4
> 4,0	-5

Fonte: Molinda & Mark (1994).

A presença de água nas galerias da mina pode ativar a sensibilidade das rochas do teto à umidade e prejudicar a capacidade de suporte. O valor de sensibilidade é baseado na quantidade de água percolada no teto das galerias ao longo de 10 m de extensão a partir de observações realizadas em campo (WEISS, 2003). Dessa forma, a mina pode estar localmente ou totalmente seca (fator de redução nulo), ou pode apresentar um fluxo de água intenso e consequentemente reduzir o valor do CMRR (Tabela 4.6).

Tabela 4.6: Ajuste para a presença de água no teto do pilar

Condição	Fator de ajuste
Seco	0
Levemente umedecido	-2
Gotejamento leve	-4
Gotejamento intenso	-7
Fluxo de água	-10

Fonte: Molinda & Mark (1994).

A resistência das rochas acima do espaço fixado pelos parafusos pode afetar a estabilidade do sistema de suporte, isso porque se as rochas forem mais fracas, uma carga adicional será transferida e aplicada sobre o teto imediato portanto, é empregado um ajuste de sobrecarga sobre o teto imediato quando a situação for desfavorável à segurança da mina (MOLINDA & MARK, 1994).

Ainda de acordo com Molinda & Mark (1994) os resultados podem ser avaliados em três tipos de tetos baseado em uma escala que varia de 0-100: fraco (0-45), moderado (45-65) e forte (65-100).

6. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho pode ser dividido em 3 etapas: a revisão bibliográfica da compartimentação geomecânica, etapa de campo, interpolação e discussão dos dados que resultaram nesta monografia. A etapa de campo ocorreu entre os dias 6 de agosto de 2022 a 21 de setembro de 2022 e, consistiu na classificação geológica-geotécnica do teto imediato da mina de carvão Amando Simões a partir da utilização dos sistemas RQD (DEERE, 1963), RMR (BIENIAWSKI, 1989) e CMRR (MOLINDA & MARK, 1994) com auxílio de tabelas estabelecidas pré-campo (Anexos II e III). Posteriormente, foi realizada a correlação dos sistemas RMR e CMRR através da regressão linear.

6.1 Aquisição de dados

6.1.1 RQD

Como a mineração está em atividade atualmente, os testemunhos de sondagem já não estão mais disponíveis portanto, o mapeamento geomecânico para o cálculo do RQD foi feito a partir de janelas amostrais *in situ*. Em cada janela foi contabilizado o número de descontinuidades (N), onde todas foram consideradas, mesmo as que possuíam extensão fora da janela.

Os pilares estudados foram divididos em 4 janelas amostrais de 1 m² cada para abranger o maior número de descontinuidades, que foram fotografadas e, posteriormente, digitalizadas e inseridas no *CorelDraw*. A escala das fotos foi ajustada com o objetivo de medir e calcular o espaçamento médio em escala absoluta da janela. Em cada janela foram traçadas todas as descontinuidades visíveis juntamente com o limite da janela e, essas descontinuidades foram contabilizadas e calculadas suas respectivas densidades (λ_2), técnica semelhante a apresentada por Priest (1993) (Figura 11).

Figura 11: Mapeamento geomecânico em janelas amostrais por meio de linha de referência em maciço com descontinuidades sem persistência (escala gráfica).



Fonte: Zingano (2002).

Sobre as descontinuidades traçadas nas fotografias, foram desenhadas linhas de referências horizontais, perpendiculares às descontinuidades com o objetivo de medir o espaçamento entre cada descontinuidade e, posteriormente, o espaçamento médio de cada janela e de todas as janelas juntas. Como as linhas devem ser em número suficiente para que sejam representativas de toda a área da janela, foram traçadas seis linhas de referência de forma a cortar o maior número de descontinuidades possível (Anexo I).

A distância entre cada linha de amostragem é em média de 0,18 m, mas pode variar em função da altura da janela. O número de linhas de referência máximo deve ser calculado em função da persistência média das descontinuidades, na qual a distância máxima entre as linhas de referência deve ser no máximo igual a menor persistência das descontinuidades (ZINGANO, 2002).

Pode ser observado que as descontinuidades contabilizadas *in situ* são sempre menores que as descontinuidades identificadas na fotografia, isso ocorre devido algumas condições adversas como pouca luminosidade e local perigoso. Entretanto, o mapeamento geomecânico *in situ* é importante porque as características qualitativas e as orientações das descontinuidades só podem ser obtidas através deste método, apesar do mapeamento através de fotografia ter a vantagem da obtenção de informações iguais ou superiores em relação ao espaçamento entre descontinuidades.

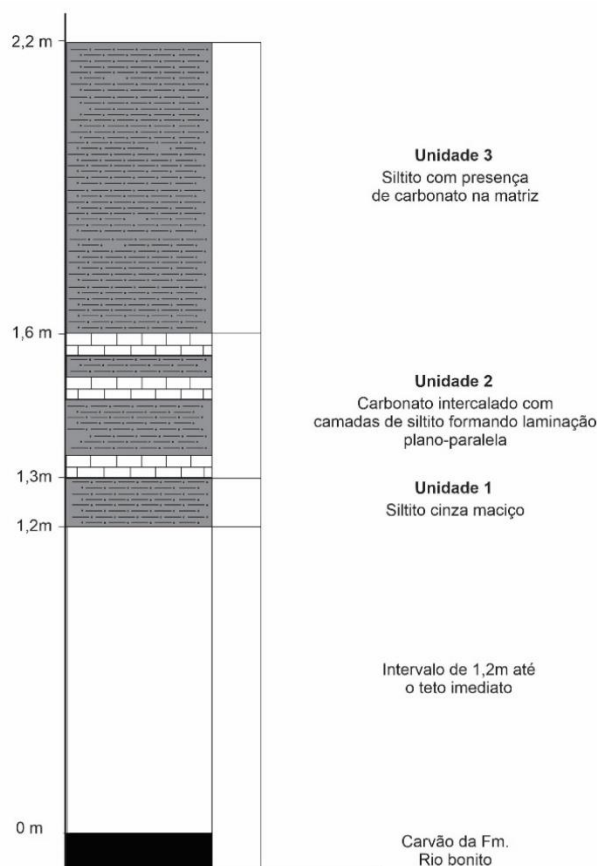
6.1.2 CMRR

Essa etapa permitiu o reconhecimento, divisão do teto imediato de dois pilares de segurança em unidades litológicas, coleta de medidas estruturais para as diversas

descontinuidades identificadas em cada unidade e, posteriormente, a validação de cada aspecto do cálculo CMRR para cada unidade.

Com base na análise do teto realçado a partir da utilização do equipamento minerador contínuo em dois pilares de segurança, foram identificadas três unidades litológicas distintas na mina. Dessa forma, de acordo com as diretrizes do CMRR, o teto imediato das galerias foi dividido em três de acordo com a litologia: Siltito Maciço (Unidade 1), Carbonato intercalado com siltito (Unidade 2) e Siltito laminado com presença de carbonato na matriz (Unidade 3) (Figura 12).

Figura 12: Empilhamento das Unidades 1,2 e 3 como teto imediato do carvão.



6.1.3 RMR

Para análise dos parâmetros do RMR o maciço foi dividido nas mesmas três unidades litológicas utilizadas no sistema CMRR. Além disso, foram aproveitados os dados de espaçamento médio, presença de água e o índice de RQD*. Apenas os valores de resistência da rocha e as condições das descontinuidades foram obtidas *in situ*.

6.3 Regressão Linear

A regressão linear é geralmente utilizada para analisar qualitativamente e quantitativamente relações entre variáveis. Esse método é responsável por se ajustar a uma linha reta que minimiza as discrepâncias entre os valores de saída previstos e reais e, em seguida, os valores de X (variável dependente) e Y (variável independente) são estimados. No caso dos métodos RMR e CMRR, não existe uma equação responsável por correlacioná-los, entretanto, quando analisados os dados há indícios da existência de uma relação direta entre as duas variáveis e, portanto, é preciso determinar uma equação de regressão que exprima tal relacionamento.

É neste contexto, que a regressão linear foi escolhida para realizar tal função neste trabalho, pois, mesmo com o pequeno espaço amostral, é possível gerar um gráfico e uma equação de regressão linear com os dados obtidos pelos dois sistemas e correlacionar esses valores para estimar o comportamento do maciço rochoso e do teto imediato.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Comparação dos parâmetros do método RMR e CMRR

De acordo com Hill (2007) a classificação CMRR representa uma adaptação da classificação RMR, direcionado à indústria do carvão, de modo que as relações do tempo de auto-sustentação de uma escavação em rocha são semelhantes em ambos os sistemas. Os parâmetros utilizados para caracterizar cada um desses sistemas de classificação, apesar de diferirem em alguns aspectos podem ser comparados entre si de modo a facilitar a correlação.

A resistência à compressão da rocha para o RMR pode ser estimada a partir de golpes de martelo, risco com unha ou canivete na superfície de rocha exposta e deverá ser classificada em extremamente fraca (R0), muito fraca (R1), fraca (R2), medianamente competente (R3), competente (R4), muito competente (R5) e extremamente competente (R6). Para o método CMRR, é possível definir apenas com golpes de martelo na face exposta da rocha, onde os valores podem variar >103 MPa (rebatido) a < 7 MPa (totalmente fragmentado). Entretanto, para que a correlação entre os métodos seja mais precisa, este parâmetro deverá assumir um único valor para ambos os sistemas a partir da utilização da resistência perpendicular.

O RQD* presente no cálculo do RMR, se assemelha com o parâmetro de número de famílias de descontinuidades dentro da unidade litológica do CMRR. Isso porque, o valor de RQD* foi extraído de janelas amostrais a partir da contabilização de descontinuidades por m².

O espaçamento e persistência das descontinuidades assim como o teste de sensibilidade à umidade avaliam os mesmos fatores em ambos os sistemas, apesar de contar com intervalos de valores diferentes. Para o espaçamento e persistência no RMR, os valores variam de $< 0,02$ m - > 6 m e <1 m - > 20 m, enquanto no CMRR, variam de $< 0,06$ - $> 1,8$ m e 0 - > 9 m. O teste de sensibilidade, por sua vez, avalia a presença de água e a sensibilidade da rocha quando imersa (intemperismo) *in situ*.

As condições das descontinuidades nos dois sistemas, são representadas pela rugosidade, abertura ou separação e resistência ao intemperismo. Apesar disso, no CMRR, existe outro parâmetro avaliado conhecido como coesão, esta, por sua vez, é avaliada a partir de golpes de martelo na superfície rochosa e varia de forte (> 7 golpes) a fraca (1-3 golpes). Os resultados para este parâmetro deverão ser próximos ou idênticos devido a sua forte semelhança.

7.2 Classificação Geomecânica

7.2.1 RQD

A partir da utilização da técnica proposta por Palmström (1982), os pilares estudados foram divididos em 4 janelas de 1m², com a finalidade de dividir as descontinuidades em famílias a partir dos dados de atitudes tomados. Posteriormente o espaçamento médio de cada família foi medido para incorporar os cálculos do RQD* e do RMR.

Para o Pilar 01, o espaçamento médio encontrado nas famílias de fraturas foi 0.205m e 0.128m respectivamente. Baseado na equação de λ_2 , temos:

$$\lambda_2 = \sum \frac{1}{si} = \frac{1}{0.205} + \frac{1}{0.128} = 12.7$$

Portanto, ao calcular o índice de RQD*, temos:

$$RQD^* = 115 - 3.3 \lambda_2 = 115 - 3.3 (12.7) = 73\%$$

Para o Pilar 02, foi realizado o mesmo procedimento, onde o espaçamento médio encontrado para cada família de fratura foi 0.40m, 0.15m e 0.33m respectivamente. Baseado na equação λ_2 , temos:

$$\lambda_2 = \sum \frac{1}{si} = \frac{1}{0.40} + \frac{1}{0.15} + \frac{1}{0.33} = 12.19$$

Portanto, ao calcular o índice de RQD* obtemos:

$$RQD^* = 115 - 3.3 \lambda_2 = 115 - 3.3 (12.19) = 74,75\%$$

De acordo com a Tabela 8, os pilares 01 e 02 podem ser classificados como medianos, ou seja, pertencente a classe III, que abrange valores entre 50-75% de RQD*.

Desse modo, para o cálculo dos índices da classificação geomecânica RMR de Bieniawski o valor do RQD* será baseado nos resultados obtido por meio da equação (2), que são respectivamente, 73% e 74,75%. Os espaçamentos médios, os quais, também, são considerados nos índices da classificação RMR devem ser respectivamente, 0,205m e 0,33m.

7.2.2 RMR

Os valores de resistência da rocha, assim como as condições das descontinuidades foram avaliados *in situ*. A resistência da rocha intacta é difícil de obter em empreendimentos de mineração, entretanto, foi possível estimar a partir do teste do martelo de geólogo, onde a superfície da rocha foi golpeada e os resultados comparados com os valores de compressão uniaxial da Figura 10. As condições das descontinuidades,

por sua vez, consistiram na avaliação das características de cada uma das famílias de juntas contidas nas unidades litológicas pré-estabelecidas pelo sistema CMRR.

A avaliação de cada um dos parâmetros deste sistema pode ser visualizada na Tabela 5.

Tabela 5: Avaliação dos parâmetros de RMR para as unidades estabelecidas *in situ*.

Parâmetros	Pilar 01	Pilar 02
Resistência da rocha	50 - 100 MPa	50 - 100 MPa
RQD*	73%	74,75%
Espaçamento médio	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m
Condições das descontinuidades	rugosa com leve intemperismo	rugosa com leve intemperismo
Presença de água	Seco	seco

Para o índice RMR, cada parâmetro de interesse foi avaliado *in situ* com a finalidade de preencher a tabela elaborada pré-campo. O parâmetro de resistência a compressão foi adaptado para o teste do martelo de geólogo pois não era possível realizar outros ensaios, entretanto, os valores obtidos estão em faixas de valores satisfatórias para aplicação.

A somatória de pesos foi realizada para cada um dos pilares, e resultou nos valores dispostos na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados obtidos a partir do método RMR.

Pilar 01	
Presença de água	15
Resistência à compressão uniaxial	7
Espaçamento médio (m)	10
RQD*	13
Condições das descontinuidades	25
RMR/ RMR*	70/68
Pilar 02	
Presença de água	15
Resistência à compressão uniaxial	7
Espaçamento médio (m)	8
RQD*	13
Condições das descontinuidades	25
RMR/ RMR*	68/66

Conforme os critérios considerados para o ajuste dos índices citados acima, o valor do RMR para os pilares 1 e 2 é 70 e 68 respectivamente. Portanto, conforme a classificação da Tabela 3, o maciço rochoso que forma o teto imediato do carvão é considerado competente (Classe II) e o seu tempo de auto-sustentação é 1 ano para 10m de largura, valor já esperado pela realidade da mina em funcionamento.

O valor do RMR foi calculado para o maciço intacto, sem influência do desmonte com explosivo, entretanto, na Mina PI-08 parte da escavação das galerias é realizada com explosivos, os quais afetam consideravelmente a resistência na borda do pilar (em torno de 1 metro). Portanto, a qualidade do maciço rochoso na borda do pilar é menor que a qualidade do maciço no interior intacto do pilar e, por consequência, a classificação RMR deve ser menor que o RMR calculado.

Laubscher (1977) sugeriu que, o desmonte por explosivos deve afetar no máximo 20% da classificação geomecânica, então, o valor original de RMR deve ser reduzido em 20%. Logo, o valor do pilar 01 passará de 70 para 56 e o do pilar 02 de 68 para 54,4.

7.2.3 CMRR

Durante a análise *in situ* do teto imediato dos pilares de segurança da Mina PI-08, as unidades encontradas foram subdivididas em conjuntos estruturais. O primeiro conjunto é representado pela laminação plano-paralela, que está presente em todas as unidades litológicas enquanto o segundo conjunto é representado por diferentes famílias de descontinuidades existentes em cada uma das unidades pré-definidas.

Os dois pilares investigados possuem um total de 1,20 m de teto imediato e contam com o empilhamento das unidades 1, 2 e 3. A unidade 1 é composta pelo siltito maciço (Fm) com aproximadamente 10 cm de espessura e apresenta laminação plano-paralela e duas famílias de descontinuidades. A unidade 2 é formada por 30 cm de uma intercalação de carbonato com siltito (Fc) e assim como a unidade 1 conta com laminação plano paralela e duas famílias de descontinuidades. A unidade 3, por sua vez, é composta por 60 cm de um siltito laminado com presença de carbonato na matriz (Fl) e apresenta laminação plano-paralela, além de três famílias de descontinuidades no pilar 1 e duas famílias no pilar 2 (Tabela 7).

Tabela 7: Avaliação dos parâmetros de CMRR para as unidades estabelecidas em cada um dos pilares.

PILAR 01						
Unidade 1	Rugosidade	Coesão	Persistência	Espaçamento	Sensibilidade à umidade	Água subterrânea
Laminação plano-paralela	Planar	Moderada	> 9 m	< 0,06 m	Seco	0
Família 1	Denteada	Moderada	3 - 9 m	0,6 - 1,8 m	Seco	0
Família 2	Denteada	Fraca	3 - 9 m	0,2 - 0,6 m	Seco	0
Unidade 2						
Laminação plano-paralela	Planar	Moderada	> 9 m	< 0,06 m	Seco	0
Família 1	Ondulada	Moderada	3 - 9 m	0,2 - 0,6 m	Seco	0
Família 2	Ondulada	Fraca	> 9 m	0,2 - 1,5 m	Seco	0
Unidade 3						
Laminação plano-paralela	Planar	Fraca	> 9 m	< 0,06 m	Seco	0
Família 1	Denteada	Moderada	> 9 m	0,2 - 0,6 m	Seco	0
Família 2	Planar	Moderada	3 - 9 m	0,2 - 0,6 m	Seco	0
Família 3	Denteada	Moderada	0 - 0,9 m	0,2 - 0,6 m	Seco	0
PILAR 02						
Unidade 1	Rugosidade	Coesão	Persistência	Espaçamento	Sensibilidade à umidade	Água subterrânea
Laminação plano-paralela	Planar	Moderada	0,9 - 3 m	0,06 - 0,2 m	Seco	0
Família 1	Denteada	Moderada	3 - 9 m	0,06 - 0,2 m	Seco	0
Família 2	Denteada	Fraca	0,9 - 3 m	0,06 - 0,2 m	Seco	0
Unidade 2						
Laminação plano-paralela	Planar	Moderada	> 9 m	< 0,06 m	Seco	0
Família 1	Ondulada	Moderada	3 - 9 m	0,6 - 1,8 m	Seco	0
Família 2	Ondulada	Fraca	0,9 - 3 m	0,6 - 1,8 m	Seco	0
Unidade 3						
Laminação plano-paralela	Planar	Moderada	> 9 m	< 0,06 m	Seco	0
Família 1	Planar	Fraca	0,9 - 3 m	0,6 - 1,8 m	Seco	0
Família 2	Denteada	Moderada	3 - 9 m	0,2 - 0,6 m	Seco	0

A obtenção do CMRR inicia a partir da determinação da qualidade de cada família de descontinuidade dentro de cada unidade, conhecido como índice de unidade (UR). Cada parâmetro foi avaliado a partir dos valores pré-estabelecidos contidos no Anexo III e os valores obtidos para cada unidade de cada pilar podem ser observados nas Tabela 8.

Tabela 8: Resultados obtidos a partir do método CMRR.

Pilar 01		Pilar 02	
Unidade	Índice da Unidade (UR)	Unidade	Índice da Unidade (UR)
1	64	1	57
2	73	2	75
3	48	3	46

Com base nos dados expostos acima foi executado o cálculo do CMRR para cada um dos pilares. Os resultados foram 65 e 64, respectivamente, e, evidenciam um teto com moderada qualidade para suporte (Anexo IV).

7.3 Correlação RMR e CMRR

A compartimentação geomecânica do teto imediato de dois pilares de segurança da Mina PI-08, a partir da utilização dos sistemas de classificação RMR e CMRR permitiu a correlação de seus resultados. É importante ressaltar que, apesar de não existir uma equação para correlação direta destes dois sistemas, devido à similaridade entre eles identificada por Hill (2007) foi possível realizar uma correlação por regressão linear mesmo com um pequeno espaço amostral.

Para esta correlação, foram efetuadas as duas classificações, onde cada um dos parâmetros comparados anteriormente foi avaliado e, para a resistência da rocha foi adotado um único valor (50-100 MPa) para ambos os sistemas. Foram observadas as porções onde ambas as classificações forneciam informações similares e, os resultados foram valores médios de 70 e 68 para o RMR que indicam um maciço competente pertencente a classe II (61-80). Comparado com os valores obtidos por Zingano (2002) e por Andrade (2019) na Mina Barro Branco, 38 e 48 respectivamente, é possível perceber que, a Mina PI-08 conta com um maciço com maior competência e, portanto, um melhor cenário em relação a queda de blocos.

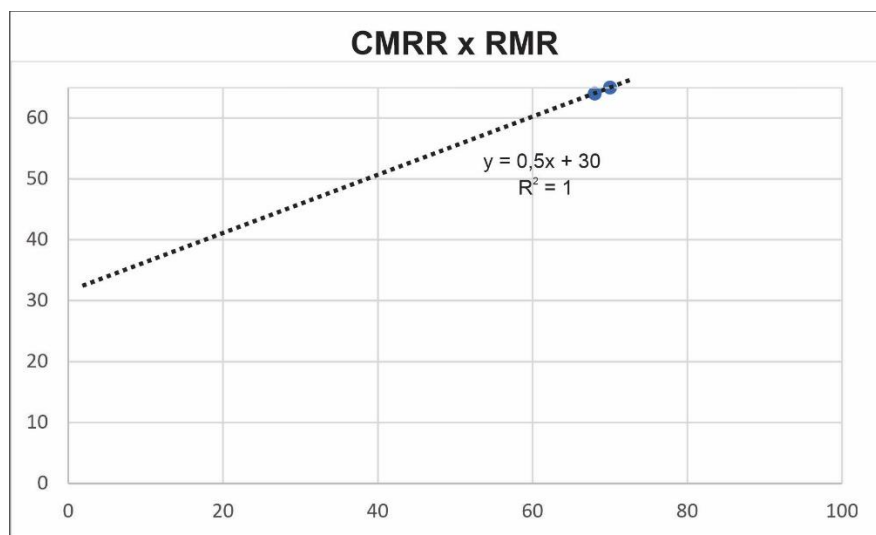
Conforme já mencionado no item 5.3, o CMRR de Molinda & Mark (1994) representa um sistema de classificação geomecânica, dirigido exclusivamente, à avaliação da competência de camadas rochosas que formam o teto de minas subterrâneas de carvão. O trabalho pioneiro de aplicação deste método no Brasil de Weiss (2003) obteve resultados que variam de 30 a 81 para a Mina Barro Branco, enquanto o trabalho de Andrade (2019) aplicado a mesma mineração obteve 42,3 para o teto imediato. Estes resultados indicam em média um teto fraco, isso porque, essa mineração conta com a presença de falhas geológicas além disso, é constituída geologicamente por uma variação de arenito e siltito laminado, diferentemente da Mina PI-08. Já os valores de CMRR para

a Mina PI-08 são 64 e 65 e, portanto, é possível afirmar que estamos trabalhando com um teto moderado (45-65), no limite para um teto forte (> 65).

Estes resultados mostram certa variação entre os sistemas RMR e CMRR, isso porque, o primeiro é responsável pela avaliação do maciço rochoso e o segundo, pela avaliação do teto imediato do carvão a partir da subdivisão em unidades litológicas com competências diferentes devido a sua composição. Apesar disso, é possível dizer que ambos os sistemas de classificação convergem para um mesmo resultado.

A relação entre os dois sistemas de classificação RMR de Bieniawski (1989) e CMRR de Molinda & Mark (1994) é evidenciada pelo gráfico de regressão linear gerado a partir dos dados reais presentes no maciço (Figura 13). O valor de R^2 próximo de 1 indica que a correlação entre os dois parâmetros é direta, entretanto, é preciso ressaltar que, como o espaço amostral é pequeno não é possível fazer muitas afirmações com tal resultado, embora se suponha que o comportamento dos pilares seja semelhante. Neste caso, seria interessante que em trabalhos futuros ocorra uma ampliação do espaço amostral (dentro e fora da mineração) de modo que, a correlação entre esses dois sistemas se torne sólida.

Figura 13: Correlação linear entre dados de classificação RMR e CMRR.



Fonte: Autora.

8. CONCLUSÕES

O uso das classificações geomecânicas como dispositivo para verificar a qualidade e o comportamento do teto imediato e do maciço rochoso se mostrou eficaz, tendo como objeto de estudo dois pilares de segurança pertencentes à mineração Carbonífera do Cambuí Eireli. Os sistemas de classificações geomecânicas tem como foco a identificação de zonas de maior fragilidade da rocha que dificultam a etapa de ancoramento de teto de uma mineração e seu avanço de lavra.

A atividade de caracterização e classificação do maciço rochoso e do teto imediato envolveram diferentes etapas durante o estudo, desde o trabalho de campo até o tratamento dos dados e uso de *software*. A etapa de campo possibilitou mapear três diferentes feições litológicas, as quais são responsáveis por interferir na competência do maciço rochoso. Consequentemente, as características qualitativas e quantitativas das descontinuidades são os fatores mais importantes na estimativa da qualidade desse maciço. Dessa forma, a aplicação dos sistemas de classificação RQD*, RMR e CMRR convergiram para um resultado em comum, um maciço rochoso regular. O RQD* obtido pela equação aplicada foi de 73% e 74,75%, pertencente à Classe III. O RMR foi de 70 e 68 e foi classificado como Classe II. Já os valores de CMRR foram de 65 e 64 e está dentro da Classe II. O resultado indica uma boa competência para escavações e sustentação das vias subterrâneas.

A finalidade da utilização da correlação entre os sistemas RMR e CMRR foi colaborar com possíveis trabalhos de ancoramento de teto e avanço de lavra a partir do mapeamento de informações geológicas e geomecânicas dispostas no teto imediato da mina de carvão. Entretanto, como o espaço amostral é pequeno, não é possível afirmar qual dos sistemas seria mais seguro para avaliar a camada e, neste caso, é preciso primeiro avaliar a situação para posteriormente definir quais métodos deverão ser utilizados.

Portanto, é possível dizer que, o objetivo de confirmar a competência do maciço rochoso da Mina PI-08 a partir da correlação de dois sistemas de classificação geomecânicas em conjunto com informações geológicas foi cumprido. Apesar disso, como sugestão para trabalhos futuros, seria interessante a realização de outras correlações com a finalidade de aperfeiçoar e entender qual a melhor maneira de utilizá-la e quando a situação seria favorável para tal. Além disso, seria interessante uma extensão dessa monografia, para o estudo e aplicação de tratamento de maciços nos pilares já lavrados.

9. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). 2008. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. – Brasília: Aneel, 2008. 236 p.
- ANDRADE, M.S. 2019. **Análise de rupturas de teto imediato nos cruzamentos entre galerias de uma mina subterrânea**. Tese de Mestrado, PPGEM – UFRGS, 198 p.
- BIENIAWSKI, Z.T. 1973. **Engineering Classification of Jointed Rock Masses**. Transactions of South Africa Institute of Civil Engineers, Vol. 15, p. 335-344.
- BIENIAWSKI Z.T. 1988. **Rock mass classification as a design aid in tunneling**. Tunnels and Tunneling. 29:19–23.
- BIENIAWSKI, Z.T. 1989. **Engineering Rock Mass Classification**. Jonh Wiley & Sons, EUA, 251 p.
- BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. (Editores). 2003. Geologia. **Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: texto, mapas e SIG**. Brasília: CPRM. 674 p
- BOCARDI, L. B.; ROSTIROLLA, S. P.; DEGUCHI, M. G. F.; MANCINI, F. 2008. **História de soterramento e diagênese em arenitos do Grupo Itararé - implicações na qualidade de reservatórios**. Revista Brasileira de Geociências, v. 38, p. 207-216.
- BRADY, B.H.G. & BROWN, E.T. 1985. **Rock Mechanics for Underground Mining**. George Allen & Unwin, London, Inglaterra, 527 p.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). 2007. **Plano Nacional de Energia - 2030**. Brasília: MME. 322 p.
- CAMPANER, V. P. 2005. **O Carvão no Município de Figueira/PR: da Mineração à Utilização**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Estadual de Londrina. Londrina.
- CAMPANER, V. P. 2013. **Dispersão geoquímica elementar e isotópica na atmosfera e no solo em área com atividade minerária e termoelétrica a carvão**. 142 f. Tese (Doutorado em Geociências). Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 2006. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. SIG Brasil, CD-ROM, escala 1:750.000. Brasília, CPRM.

- DEERE, D.U. 1963. **Technical Description of Rock Cores for Engineering Proposes**. Rock Mechanics of Engineer Geologists, Vol. 1, p. 16-22.
- DEERE, D.U. 1989. **Rock quality designation (RQD) after 20 years**. U.S. Army Corps Engrs Contract Report GL-89-1. Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station.
- GALHARDI, J. A. 2016. **Geoquímica de radionuclídeos naturais e biomonitoramento em área de mineração de carvão no sul do Brasil** 190f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo, 2016.
- GALVIN, J. M. 2016. **Ground Engineering - Principles and Practices for Underground Coal Mining**. Springer International. Suíça. 684 p.
- GORDON JR., M. 1947. **Classificação das formações gonduânicas do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Notas preliminares e estudos, DNPM, DGM, v. 38, 20p.
- HOEK, E. 2000. **Practical Rock Engineering**. Canadá.
- HOLZ M., FRANÇA A.B., SOUZA P.A., IANNUZZI R., ROHN R. 2010. **A stratigraphic chart of the Late Carboniferous/Permian succession of the eastern border of the Paraná Basin, Brazil, South America**. Journal of South American Earth Sciences, 29:381-399
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Agropecuário 2006: Resultados Preliminares. Rio de Janeiro, 2006. 146 p.
- LACTEC – Instituto de Tecnologia para Desenvolvimento (Empresa Consultora). 2001. **Relatório de impacto ambiental (RIMA) da Usina Termelétrica Figueira – PR**.
- LAVINA, E. L.; LOPES, R. C. 1987. **A transgressão marinha do Permiano Inferior e a evolução paleogeográfica do Supergrupo Tubarão no Estado do Rio Grande do Sul**. Paula-Coutiana, v. 1, p. 51-103.
- LAUBSCHER, D.H. 1977. **Geomechanics Classification of Jointed Rock Masses – Mining Applications**. Transactions of Institute of Mining and Metallurgy. London, Inglaterra. Vol. 86, p. A1-A8.
- MAACK, R. 2002. **Os sistemas hidrográficos do Estado do Paraná**. In: **Geografia física do Estado do Paraná**. 3 a ed. Curitiba: Imprensa Oficial. p. 304-387.
- MACHADO, F.B.; NARDY, A.J.R.; OLIVEIRA, M.A.F. DE. 2009. **Geologia e Litogeoquímica da Formação Serra Geral nos Estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul**. Revista Brasileira de Geociências, v. 28, n. 4, p. 523-540.

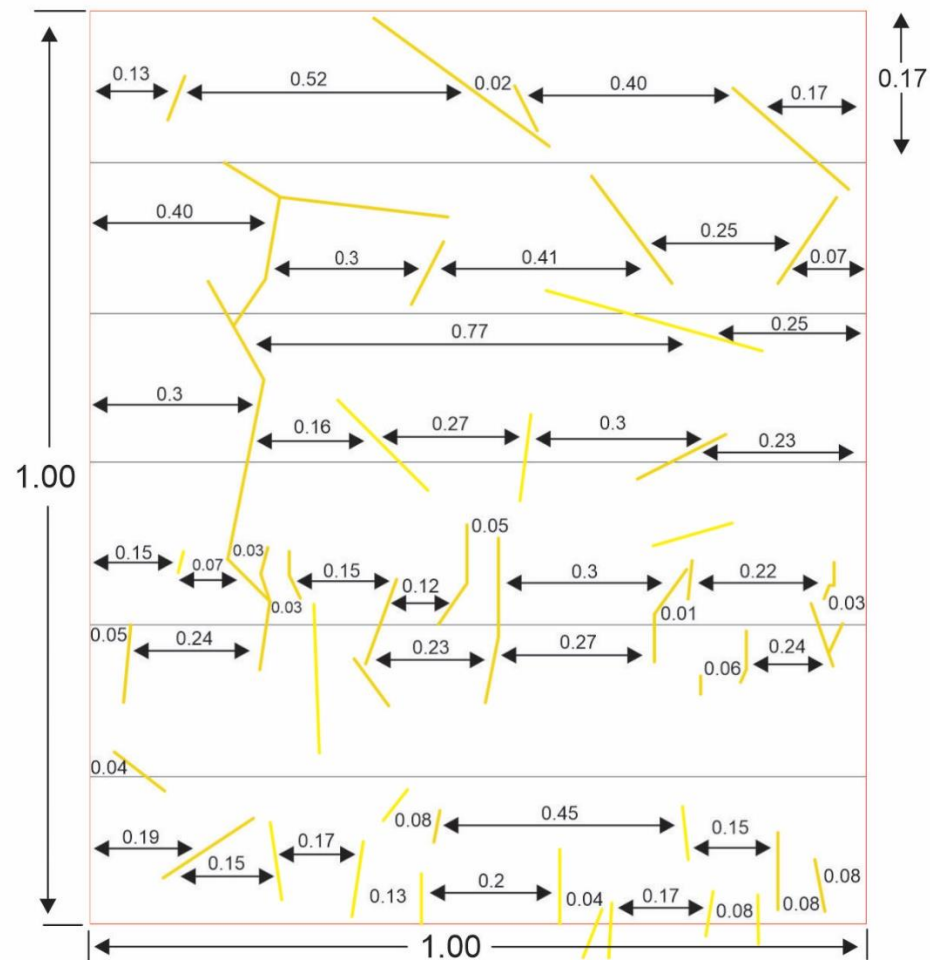
- MARK, C. & MOLINDA, G.M. 1996. **Rating Coal Mine Roof Strength from Exploratory Drill Core**. In: Proceedings, 15th International Conference on Ground Control in Mining, Colorado School of Mines, Golden, EUA, p.415-428.
- MEDEIROS, R. A.; THOMAZ FILHO, A. 1973. **Fácies e ambientes deposicionais da Formação Rio Bonito**. In: XXVII Congresso Brasileiro de Geologia, São Paulo. v. 3, p. 3 – 12.
- MEGLHIORATTI T. 2006. **Estratigrafia de seqüências das formações Serra Alta, Teresina e Rio do Rasto (Permiano da Bacia do Paraná) na porção nordeste do Paraná e centro-sul de São Paulo**. MS Dissertation, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 129 p.
- MILANI, E. J. 1997. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e o seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gonswana Sul-ocidental**. Porto Alegre. 255 p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. 2007. **Bacia do Paraná**. Boletim de Geociências da Petrobrás. 15(2):265-287.
- MOLINDA, G.M. & MARK, C. 1993. **The Coal Mine Roof Rating: A Practical Rock Mass Classification for Coal Mines**. In: Proceedings, 12th International Conference on Ground Control in Mining, West Virginia University, Morgantown, EUA, p. 92-103.
- MOLINDA, G.M., MARK, C. 1994. **Coal Mine Roof Rating (CMRR): A Practical Rock Mass Classification for Coal Mines**. PA: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, IC 9387, Pittsburgh, EUA, 83 p.
- MOLINDA, G. M.; MARK, C. & DEBASIS, D. 2001. **Using the Coal Mine Roof Rating (CMRR) to assess roof stability in U.S. coal mines**. (p. 8). Pittsburgh: NIOSH.
- NEWMAN, D.A. & BIENIAWSKI, Z.T. 1986. Modified Version of the Geomechanics Classification for Entry Design in Underground Coal Mines, Transactions of Society Mining Engineering AIME 280, p. 2134-2138.
- NORTHFLEET, A. A.; MEDEIROS, R. A.; MÜHLMANN, H. 1969. **Reavaliação dos dados geológicos da Bacia do Paraná**. Boletim Técnico da PETROBRAS, Rio de Janeiro, v.12, n.3, p.291-346, jul./set.

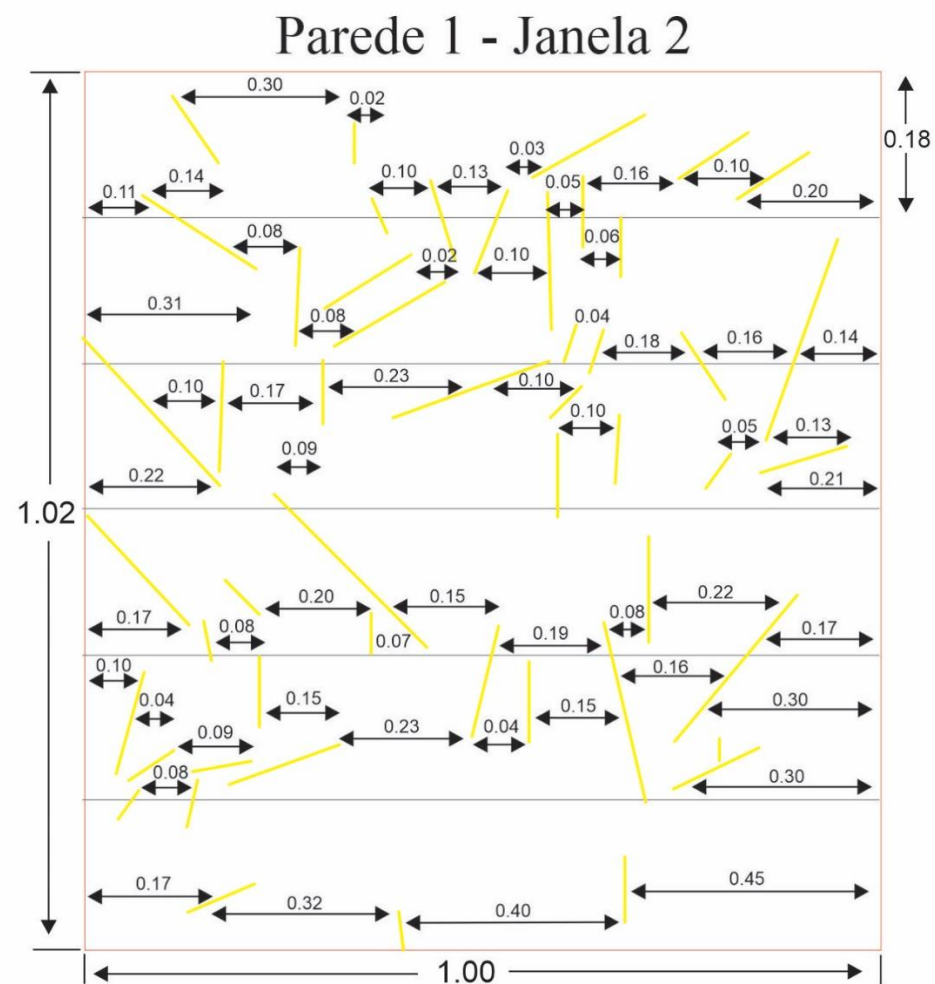
- PALMSTROM, A. 1982. **The Volumetric Joint Count – A Useful and Simple Measure of the Degree of Rock Joint**. In: Proceedings, 4th International Congress of International Association of Engineering Geologists, Delhi, Índia, Vol. 5, p. 221-228.
- PENG, S.S. 1998. **Roof Bolting Adds Stability to Weak Strata – How Does Roof Bolting Work or Not Work**. In: Coal Age, Vol. 103, nº 12, p. 32-38
- PRIEST, S.D., 1993, **Discontinuity analysis for rock engineering**. Chapman & Hall Pub., 473p., Londres.
- ROHN, R., 2001. **A estratigrafia da Formação Teresina (Permiano, Bacia do Paraná) de acordo com furos de sondagem entre Anhembi (SP) e Ortigueira (PR)**. In: MELO, J.H.G. & TERRA, G.J.S. (eds.) Correlação de seqüências Paleozóicas SulAmericanas. Ciência-Técnica-Petróleo. Seção: Exploração de Petróleo, 20: 209-218.
- ROMANA, M. 1985. **New Adjustment Ratings for Application of Bieniawski classification to Slopes**. In: Proceedings, International Symposium Rock Mechanical in Excavation Mining and Civil Works, ISMR, México, p. 59-68.
- SALIM, L. A. **Radônio em Área de Extração de Carvão Mineral no Município de Figueira (PR)**. 2018. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro.
- SANTOS L. J. C.; OKA-FIORI C.; CANALI N, E.; FIORI A. P.; SILVEIRA, C. T.; SILVA J. M. F.; ROSS J. L. S. 2006. **Mapeamento Geomorfológico do Estado do Paraná**. Revista Brasileira De Geomorfologia, 7(2). Curitiba. MINEROPAR, 2006.
- SCHNEIDER, R.L.; MUHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R.A.; DAEMON, R.F.; NOGUEIRA, A. A. 1974. **Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná**. In: Anais. 28º CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Porto Alegre, 1: 41-65.
- SEMA – Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. 2011.
- SHUQAIR, M. S. S. 2002. **Estudo da contaminação do solo e água subterrânea por elementos tóxicos originados dos rejeitos das minas de carvão de Figueira no Estado do Paraná**. 117 fl. Tese (Doutorado). Instituto de Pesquisas Espaciais e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- SICKLER, R.A. 1986. **Engineering Classification of Shales**. In: Proceedings, 5th International Conference on Ground Control in Mining, West Virginia University, Morgantown, EUA, p. 221-233.

- TOMMASI, E. 1973. **Geologia do flanco sudeste da Bacia do Paraná – Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná.** In: XXVII Congresso Brasileiro de Geologia, Aracaju. v. 3, p. 179-188.
- UNAL, E. 1983. **Design Guidelines and Roof Control Standards for Coal Mine Roofs.** PhD thesis, The Pennsylvania State University, EUA, 355 p.
- VIEIRA, A. J. 1973. **Geologia do centro e nordeste do Paraná e centro-sul de São Paulo.** In: XXVII Congresso Brasileiro de Geologia, São Paulo. v. 3, p. 259 – 277.
- WARREN, L. V., ASSINE, M. L., SIMÕES, M. G., RICCOMINI, C., ANELLI, L. E. 2015. **A Formação Serra Alta, Permiano, no centro-leste do Estado de São Paulo, Bacia do Paraná, Brasil.** Brazilian Journal of Geology. 2015. v. 45, n.1, p. 109-126.
- WEISS, A.L. 2003. **Incorporação de dados geomecânicos em projetos de suporte de teto em mina subterrânea de carvão.** PPGEM - UFRGS. 170 p. (Dissertação de Mestrado).
- WHITE, I.C. 1908. **Relatório final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil.** Rio de Janeiro: DNPM 1988, 617 p. (Edição Facsimilar).
- WILLIAMSON, D.A. 1984. Unified Rock Classification System, In: Bulletin of the Assn. of Engineer Geologists, Vol. 21, nº 3, p. 345-354.
- ZACHARIAS, A.A. 2004. **Preenchimento de vales incisos por associações de fácies estuarinas, Formação Rio Bonito, nordeste do Paraná.** Rio Claro. 99 p. (Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista).
- ZACHARIAS, A. A. & ASSINE, M. L. 2005. **Modelo de preenchimento de vales incisos por associações de fácies estuarinas, Formação Rio Bonito no Norte do Estado do Paraná.** Revista Brasileira de Geociências, vol. 35(4), p. 573-583.
- ZALÁN, P.V., Wolff, S., Conceição, J.C.J., Astolfi, M.A.M. & Vieira, I.S. 1987. **Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná.** In: SBG, Simpósio Sul-brasileiro de Geologia, 3, Curitiba, Atas..., v. 1, p. 441-477.
- ZINGANO, A.C. 2002. **Modelamento Geomecânico para o Dimensionamento de Pilares de Carvão.** Tese de Doutorado, PPGEM – UFRGS, 199 p.

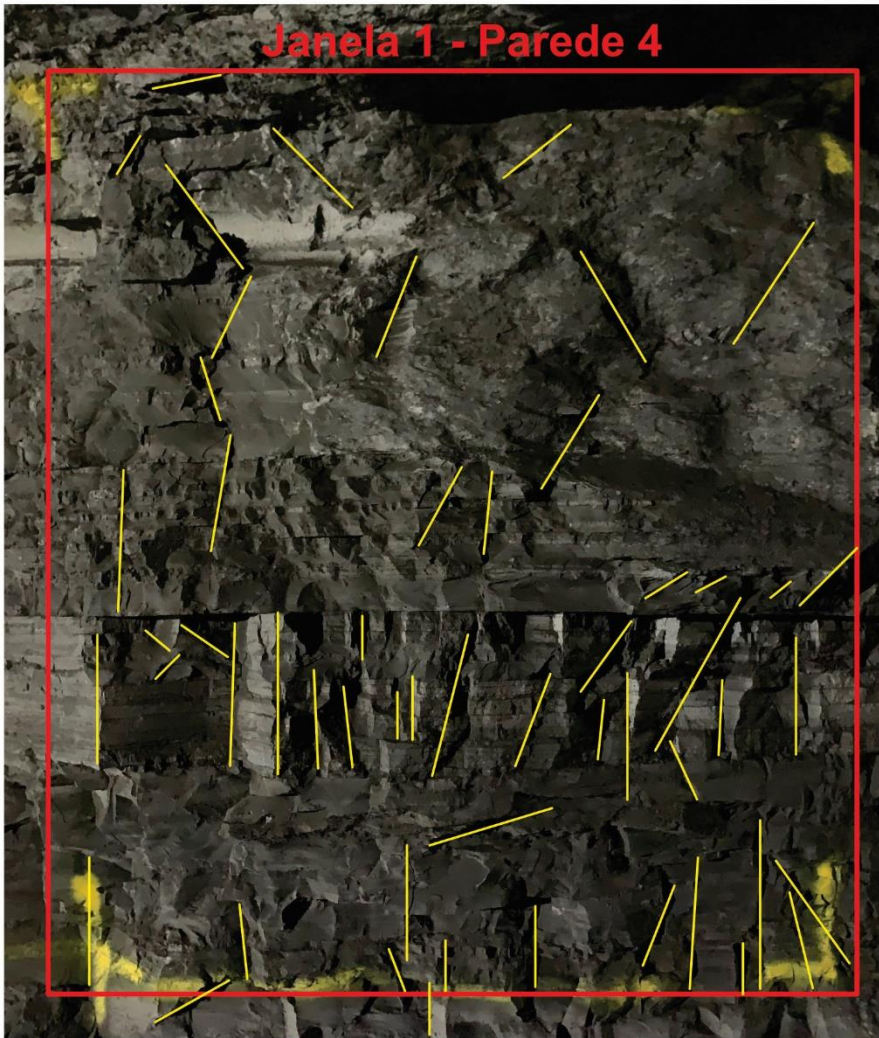
ANEXO I – Janelas amostrais para mapeamento RQD*

Parede 1 - Janela 1

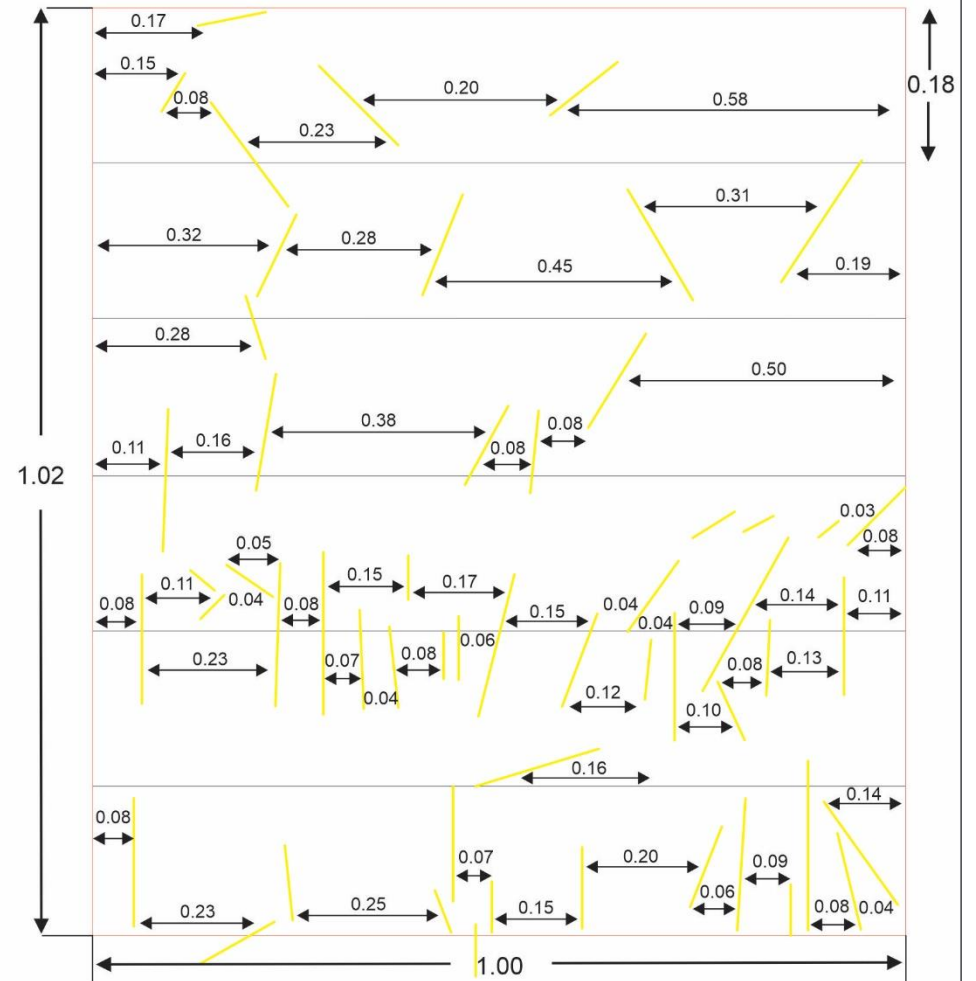




Janela 1 - Parede 4



Janela 1 - Parede 4



**ANEXO II – Planilha de Campo com os parâmetros de
CMRR**

Mina: _____

Localização: _____

Tipo de Exposição: _____

Responsável Técnico: _____

Data: _____

DESCONTINUIDADES POR UNIDADE								
Nº	Família	Descrição	Coesão	Rugosidade	Persistência	Espaçamento	Orientação	
							Direção	Mergulho
3	A							
	B							
	C							
	Contato							
2	A							
	B							
	C							
	Contato							
1	A							
	B							
	C							
			Forte (> 7 golpes)	Denteada	0 - 0,9 m	> 1,8 m	N	Horizontal
			Moderada (4 - 7 golpes)	Ondulada	0,9 - 3 m	0,6 - 1,8 m	NE	Subhoriz.
			Fraca (1 - 3 golpes)	Planar	3 - 9 m	0,2 - 0,6 m	E	45°
			Slickensided (0 golpes)		> 9 m	0,06 - 0,2 m	SE	Subvertical
						< 0,06 m	S	Vertical

Comentários:

Mina: _____

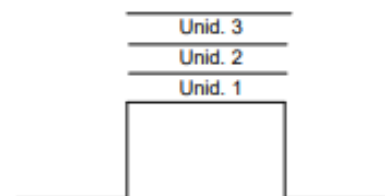
Localização: _____

Tipo de Exposição: _____

Responsável Técnico: _____

Data: _____

UNIDADE					
Nº da Unid.	Espessura	Esboço	Descrição	Resistência a Compressão	Sensibilidade a Umidade
3					
	Contato				
2					
	Contato				
1					
Fluxo de água no teto (fluxo/10 m de comprimento):				↑	↑
Seco (0 L/min)				> 103 MPa	Não sensível
Levemente umedecido (0 - 5 L/min)				103 - 55 MPa	Levemente
Gotejamento Leve (5 - 10 L/min)				55 - 21 MPa	Moderadamente
Gotejamento Intenso (10 - 50 L/min)				21 - 7 MPa	Muito sensível
Fluxo de água (> 50 L/min)				< 7 MPa	



Condições das vizinhanças do caimento:

ANEXO III – Planilha para o Cálculo de CMRR

PLANILHA DE CÁLCULO DO ÍNDICE DE UNIDADE (UR)

Nome da mina _____ Data _____

Localização _____ Nº da unidade _____

Cálculo do Índice Individual das Descontinuidades

Descontinuidades

	Família 1	Família 2	Família 3
Coesão - Rugosidade (Tabela 3)			
	+	+	+
Espaçamento - Persistência (Tabela 3.1)			
Índice Individual das Descontinuidades			

Entrar com menor Índice Individual das Descontinuidades

+

Ajuste para múltiplas descontinuidades (Tabela 3.2)

+

Resistência da rocha à compressão (Tabela 3.3)

+

Sensibilidade da rocha à umidade (Tabela 3.4)

**Índice da Unidade
(UR)**

ANEXO IV – Resultados dos Cálculos de CMRR

PLANILHA DE CÁLCULO DO ÍNDICE DE UNIDADE (UR)

Nome da mina PI - 08 Data Ago/2022
Localização Figueira - PR N° da unidade 01

Cálculo do Índice Individual das Descontinuidades

Descontinuidades

	Família 1	Família 2	Família 3
Coesão - Rugosidade (Tabela 3)	29	24	
	+	+	+
Espaçamento - Persistência (Tabela 3.1)	25	20	
Índice Individual das Descontinuidades	54	44	

Entrar com menor Índice Individual das Descontinuidades	44
	+
Ajuste para múltiplas descontinuidades (Tabela 3.2)	-2
	+
Resistência da rocha à compressão (Tabela 3.3)	22
	+
Sensibilidade da rocha à umidade (Tabela 3.4)	0
Índice da Unidade (UR)	64

PLANILHA DE CÁLCULO DO ÍNDICE DE UNIDADE (UR)

Nome da mina PI - 08 Data Ago/2022
Localização Figueira - PR N° da unidade 02

Cálculo do Índice Individual das Descontinuidades

Descontinuidades

	Família 1	Família 2	Família 3
Coesão - Rugosidade (Tabela 3)	27	20	
	+	+	+
Espaçamento - Persistência (Tabela 3.1)	20	25	
Índice Individual das Descontinuidades	47	45	

Entrar com menor Índice Individual das Descontinuidades	45
	+
Ajuste para múltiplas descontinuidades (Tabela 3.2)	-2
	+
Resistência da rocha à compressão (Tabela 3.3)	30
	+
Sensibilidade da rocha à umidade (Tabela 3.4)	0
Índice da Unidade (UR)	73

PLANILHA DE CÁLCULO DO ÍNDICE DE UNIDADE (UR)

Nome da mina PI - 08 Data Ago/2022
Localização Figueira - PR N° da unidade 03

Cálculo do Índice Individual das Descontinuidades

Descontinuidades

	Família 1	Família 2	Família 3
Coesão - Rugosidade (Tabela 3)	29	25	29
	+	+	+
Espaçamento - Persistência (Tabela 3.1)	20	20	24
Índice Individual das Descontinuidades	49	45	53

Entrar com menor Índice Individual das Descontinuidades	45
	+
Ajuste para múltiplas descontinuidades (Tabela 3.2)	-2
	+
Resistência da rocha à compressão (Tabela 3.3)	5
	+
Sensibilidade da rocha à umidade (Tabela 3.4)	0
Índice da Unidade (UR)	48

PLANILHA DE CÁLCULO DO TETO (CMRR)

Nome da mina PI-08

Data Ago/2022

Localização Figueira - PR

Cálculo do peso médio da Unidade (Rrw)

	UR		Espessura da Unidade (m)	
Unidade 1	64	x	0.1	= 6.4
			+	
Unidade 2	73	x	0.3	= 21.9
			+	
Unidade 3	48	x	0.6	= 28.8

Intervalo do parafuso (m) 1.0 57.1

RRw

57

Cálculo da Diferença da Camada Forte (SDB)

Maior UR 73 $\frac{SB}{73} - \frac{RRw}{57} = \frac{SDB}{16}$

Ajuste para Camada Forte (Tabela 3.5)

10

+

Ajuste para os contatos entre Unidades (Tabela 3.6)

- 2

+

Ajuste para a presença de água (Tabela 3.7)

+

Ajuste da sobrecarga (Tabela 3.8)

CMRR =

65

PLANILHA DE CÁLCULO DO ÍNDICE DE UNIDADE (UR)

Nome da mina PI - 08 Data Ago/2022
Localização Figueira - PR N° da unidade 01

Cálculo do Índice Individual das Descontinuidades

Descontinuidades

	Família 1	Família 2	Família 3
Coesão - Rugosidade (Tabela 3)	29	24	
	+	+	+
Espaçamento - Persistência (Tabela 3.1)	13	13	
Índice Individual das Descontinuidades	42	37	

Entrar com menor Índice Individual das Descontinuidades	37
	+
Ajuste para múltiplas descontinuidades (Tabela 3.2)	-2
	+
Resistência da rocha à compressão (Tabela 3.3)	22
	+
Sensibilidade da rocha à umidade (Tabela 3.4)	0
Índice da Unidade (UR)	57

PLANILHA DE CÁLCULO DO ÍNDICE DE UNIDADE (UR)

Nome da mina PI - 08 Data Ago/2022
Localização Figueira - PR N° da unidade 02

Cálculo do Índice Individual das Descontinuidades

Descontinuidades

	Família 1	Família 2	Família 3
Coesão - Rugosidade (Tabela 3)	27	20	
	+	+	+
Espaçamento - Persistência (Tabela 3.1)	25	27	
Índice Individual das Descontinuidades	52	47	

Entrar com menor Índice Individual das Descontinuidades	47
	+
Ajuste para múltiplas descontinuidades (Tabela 3.2)	-2
	+
Resistência da rocha à compressão (Tabela 3.3)	30
	+
Sensibilidade da rocha à umidade (Tabela 3.4)	0
Índice da Unidade (UR)	75

PLANILHA DE CÁLCULO DO ÍNDICE DE UNIDADE (UR)

Nome da mina PI - 08 Data Ago/2022
Localização Figueira - PR N° da unidade 03

Cálculo do Índice Individual das Descontinuidades

Descontinuidades

	Família 1	Família 2	Família 3
Coesão - Rugosidade (Tabela 3)	16	29	
	+	+	+
Espaçamento - Persistência (Tabela 3.1)	27	20	
Índice Individual das Descontinuidades	43	49	

Entrar com menor Índice Individual das Descontinuidades	43
	+
Ajuste para múltiplas descontinuidades (Tabela 3.2)	-2
	+
Resistência da rocha à compressão (Tabela 3.3)	5
	+
Sensibilidade da rocha à umidade (Tabela 3.4)	0
Índice da Unidade (UR)	46

PLANILHA DE CÁLCULO DO TETO (CMRR)

Nome da mina PI-08

Data Ago/2022

Localização Figueira - PR

Cálculo do peso médio da Unidade (Rrw)

	UR		Espessura da Unidade (m)	
Unidade 1	57	x	0.1	= 5.7
			+	
Unidade 2	75	x	0.3	= 22.5
			+	
Unidade 3	46	x	0.6	= 27.6

Intervalo do parafuso (m) 1.0 55.8

RRw

56

Cálculo da Diferença da Camada Forte (SDB)

Maior UR 75 SB 75 - RRw 56 = SDB 19

Ajuste para Camada Forte (Tabela 3.5)

10

+

Ajuste para os contatos entre Unidades (Tabela 3.6)

- 2

+

Ajuste para a presença de água (Tabela 3.7)

+

Ajuste da sobrecarga (Tabela 3.8)

CMRR =

64