



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

Orlando Faria Prado

Florianópolis - SC
2023

Orlando Faria Prado

**Caracterização Geológica e Classificação Geomecânica da Cava de uma Mina
de Ferro do Quadrilátero Ferrífero**

Qualificação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Geologia em Evolução Crustal e Análise de Bacias

Orientador: Prof. Dr. Murilo da Silva Espíndola

Florianópolis- SC,

2023

Prado, Orlando

Caracterização Geológica e Classificação Geomecânica da Cava de uma Mina de Ferro do Quadrilátero Ferrífero / Orlando Prado ; orientador, Murillo da Silva Espíndola, 2023.

106 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Geologia. 2. Cava a céu aberto; Mapeamento; Classificação Geomecânica; Modelo Geomecânico Tridimensional. I. Espíndola, Murillo da Silva. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Geologia. III. Título.

Orlando Faria Prado

Caracterização Geológica e Classificação Geomecânica da Cava de uma Mina de Ferro do Quadrilátero Ferrífero

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado em 20 de outubro de 2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. MURILO DA SILVA ESPÍNDOLA
Presidente – PPGGEOL/UFSC

Prof. Dr. RODRIGO DE ALMEIDA HERINGER
Examinador Interno - PPGGEOL/UFSC

Prof. Dr. ORLANDO MARTINI DE OLIVEIRA
Examinador Interno - PPGGEOL/UFSC

Prof. Dr. RAFAEL AUGUSTO DOS REIS HIGASHI
Examinador Externo - PPGTG/UFSC

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestra em Geologia.

Prof. Dr. Marivaldo dos Santos Nascimento
Coordenador do Programa de Pós-Graduação

Prof. Dr. Murilo da Silva Espíndola
Orientador

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer com todo meu coração à minha família por ter me proporcionado condições e oportunidades de buscar conhecimento, em especial, a minha mãe professora Célia Marcia onde sempre encontrei resiliência e inspiração, sem a senhora nada disso seria possível.

Não posso deixar de agradecer meu orientador Dr. Murilo da Silva Espíndola, pela paciência, dedicação e parceria durante estes anos de mestrado. Sempre disposto a ajudar e compartilhar conhecimento, motivando para a conclusão do trabalho.

Por último gostaria de agradecer a DAM Projetos de Engenharia, por proporcionar as condições e ferramentas necessárias para a elaboração deste trabalho, me proporcionando em diversos momentos o tempo necessário para a elaboração desta dissertação.

RESUMO

O gerenciamento seguro e eficiente de operações de mineração a céu aberto é um desafio, que pode ser potencializado por incertezas no conhecimento das condições geológicas e mecânicas do maciço rochoso que contém o bem mineral de interesse. No processo de extração mineral por meio de cava à céu aberto, o maciço a ser explorado sofre diversas modificações durante o processo de lavra, alterando sua geometria original, portanto, a caracterização das propriedades geológicas – geotécnicas através de investigações de campo são indispensáveis para a operação de mineração de maneira eficiente e segura. Neste sentido, esta dissertação apresenta técnicas utilizadas para a caracterização das propriedades geológicas – geotécnicas e o mapeamento dos atributos mecânicos de um maciço rochoso de uma cava do Quadrilátero Ferrífero brasileiro, aplicando critérios de classificação geomecânica proposto como o *Rock Mass Rating* (RMR) e o *Weak Rock*, proporcionando uma previsão do comportamento mecânico do maciço através do mapa geomecânico, fornecendo subsídios para estudos de estabilidade dos taludes presentes na cava estudada. Após o mapeamento geomecânico, os critérios de classificação RMR e *Weak Rock* foram aplicados em uma campanha de sondagens rotativas executada na cava estudada, avaliando e validando a consistência dos dados presente nesta campanha, elaborando-se um modelo geomecânico tridimensional. Esta dissertação serve como um guia para a integração de dados geomecânicos superficiais e subsuperficiais em modelos tridimensionais, contribuindo para futuras pesquisas e aplicações práticas na indústria de mineração.

Palavras-chave: cava a céu aberto; mapeamento; classificação geomecânica; modelo geomecânico tridimensional.

ABSTRACT

The safe and efficient management of open-pit mining operations is a challenge, potentially intensified by inconsistencies in the knowledge of the geological and mechanical conditions of the rocky mass containing the mineral property of interest. In the process of mineral extraction in open-pit mining, the rocky mass to be explored undergoes various modifications during the lava process, changing its original geometry, therefore, the characterization of geological – geotechnical properties through field research are indispensable for the operation of mining efficiently and safety. In this sense, this dissertation presents techniques used for the characterization of the geological – geotechnical properties and the mapping of the mechanical attributes of a rocky mass in open pit mining of Brazilian Iron Quadrangle, applying geomechanical classification proposed such as the Rock Mass Rating (RMR) and the Weak Rock, providing a prediction of mechanical behavior of the rocky mass through the geomechanical map, providing subsidies for Slope stability present in the open pit studied. After the geomechanical mapping, the classification criteria RMR and Weak Rock were applied in a drilling campaigns carried out in the open pit study, evaluating and validating the consistency of the data present in this campaign, drawing up a three-dimensional geomechanical model. This dissertation serves as a guide to the integration of surface and subsurface geomechanical data into three-dimensional models, contributing to future research and practical applications in the mining industry.

Keywords: open-pit mining; mapping; geomechanical classification; three-dimensional geomechanical model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de pontos.....	14
Figura 2 - Localização do Quadrilátero Ferrífero no Cráton do São Francisco.	18
Figura 3 - Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero, destacado pelo retângulo vermelho a área de estudo contemplada.....	19
Figura 4 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero	23
Figura 5- Mapa geológico regional da cava.....	24
Figura 6- Correlação entre RQD e Contador volumétrico de juntas.	29
Figura 7- Orientação de uma descontinuidade.....	31
Figura 8- Esquema representativo de Persistência.	32
Figura 9- Medida do espaçamento de descontinuidades.	33
Figura 10- Tipos de descontinuidade: 1 - Fechada; 2 - Aberta; 3 - Preenchida com água.....	33
Figura 11- Esquema martelo de Schimdt.	36
Figura 12- Característica da rugosidade nas descontinuidades segundo recomendações da ISRM (1978).....	37
Figura 13- Gráficos para determinação dos pesos segundo a resistência à compressão uniaxial (1), RQD (2), Espaçamento das descontinuidades (3) e a correlação entre o RQD e o espaçamento das descontinuidades (4).	44
Figura 14- (A) Itabirito friável pulverulento (Ponto 001); (B) itabirito friável fragmentado em lascas (Ponto 056).	47
Figura 15- (A) Itabirito médio com deslocamento (Ponto 095); (B) itabirito médio com dobras centimétricas fechadas (Ponto 042).....	48
Figura 16- (A) e (B) itabirito compacto em maciço pouco fraturado, formando blocos métricos (A - Ponto 104 B - Ponto 385).	48
Figura 17- (A) hematitita friável pulverulenta (Ponto 331); (B) hematitita friável formando lascas (Ponto 349).	49
Figura 18- (A) hematitita média com dobras centimétricas fechadas (Ponto 563); (B) hematitita média fragmentando-se em lascas (Ponto 564).	50
Figura 19- (A) hematitita compacta com brilho metálico (Ponto 178); (B) maciço pouco fraturado de hematitita compacta (Ponto 005).	51

Figura 20- (A) Filito friável de coloração rosa a roxa clara (Ponto 320); (B) filito Piracicaba fragmentando-se em lascas com resistência mais alta em relação ao filito friável. (Ponto 369).....	52
Figura 21- (A) Quartzito friável de coloração branca rosada e granulometria areia fina (Ponto 307); (B) quartzito compacto de coloração branca com planos de foliação e clivagens evidentes (Ponto 314).....	53
Figura 22- (A) Intrusiva em contato com formação ferrífera (Ponto 617); (B) intrusiva apresentando coloração amarela e rosa (Ponto 617).....	53
Figura 23- (A) talude de canga na cava (Ponto 354); (B) canga com pedregulhos a pedras de mão de hidróxidos de ferro e formação ferrífera (Ponto 445).	54
Figura 24- (A) Talude conformado por colúvio na cava (Ponto 065); (B) Colúvio areno-siltoso com pedregulhos (Ponto 449).....	55
Figura 25- Destaque em amarelo com a localização da cava, no contexto do Quadrilátero Ferrífero. (1) Traço axial do sinclinal Mangabeiras; (2) Sinclinal Moeda; (3) Sinclinal Dom Bosco; (4) Sinclinal Gandarela; (5) Sinclinal Vargem do Lima; (6) Sinclinal Santa Rita;(7) Anticlinal Mariana; (8) Anticlinal Furquim; (9) Sinclinal Ouro Fino; (10) Anticlinal Santo Antônio.	56
Figura 26- (A) Sb em itabirito compacto (Ponto 028); (B) Sb em hematitita compacta (Ponto 035); (C) Sb em itabirito médio com sílica livre e deslocamento das bandas de hematitita (Ponto 605); (C) Sb em itabirito friável (Ponto 491).	58
Figura 27- Estereograma total de Sb. Máx. 087/38.	58
Figura 28- (A) Sn em quartzito compacto (Ponto 310) indicado em amarelo; (B) Sn em filito Piracicaba (Ponto 371).	59
Figura 29- Estereograma total de Sn. Máx. 070/39.	59
Figura 30- (A) Plano Sn+1 no filito Piracicaba (Ponto 371); (b) Sn+1 em itabirito compacto (Ponto 028).	60
Figura 31- Estereograma total de Sn+1. Máx. 194/85.	61
Figura 32- Figura 32 - (A) Diaclase Sn+2 em filito Piracicaba (Ponto 023); (B) Diaclase Sn+2 em hematitita compacta (Ponto 546).....	61
Figura 33- Estereograma total de Sn+2. Máx. 286/50.	62

Figura 34- Blocos formados pelas interseções dos planos S_b , S_{n+1} e S_{n+2} em itabirito compacto (Ponto 385).....	62
Figura 35- Interseções dos planos S_b , S_{n+1} e S_{n+2} , condicionando a formação de blocos.....	63
Figura 36- Lineação (Li) em itabirito médio indicado em amarelo (Ponto 577).	64
Figura 37- Figura 37 - Estereograma total de Li. Máx. 111/39.	65
Figura 38- (A) Dobras decimétricas fechadas em itabirito médio (Ponto 377); (B) dobra métrica aberta em itabirito friável (Ponto 388).....	66
Figura 39- Estereograma total de Ex. Máx. 107/37.	67
Figura 40- Famílias de fraturas identificadas no itabirito médio (Ponto 037).	68
Figura 41 - (A) Classe very weak / weak rock em itabirito friável R2 (ponto 061); (B) e em filito R2 (ponto 320).	74
Figura 42 - (A) Maciço Classe III em itabirito médio (ponto 037) (B)em itabirito compacto (381).	75
Figura 43 - (A) Maciço classe II em itabirito compacto (ponto 211) (B) em quartzito compacto.....	76
Figura 44 - Localização das seções geomecânicas elaboradas e as sondagens utilizadas.....	93
Figura 45 - (A) Sólidos gerados das classes; (B) Lentes após a geração das superfícies.....	94
Figura 46 - Correlação entre Grau de Fraturamento e RQD.	95
Figura 47 - Correlação entre Grau de Fraturamento e Espaçamento.....	96
Figura 48 - Modelo Geomecânico blocos tridimensionais com os blocos carimbados por classe.	97
Figura 49 – Seção tipo com as principais classes geomecânicas, indicando a ocorrência superficial das variedades Weak Rocks e Classes RMR não aflorantes.	99
Figura 50 - Inconsistências encontradas entre o Modelo Geomecânico elaborado e descrição litológica no furo de sondagem.	100

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Percolação de água.....	38
Quadro 2 - Proposta de classificação geomecânica de maciços.....	41
Quadro 3- Classificação RMR.	42
Quadro 4 - Classes de maciço segundo o critério do RMR de Bieniawski. ..	73
Quadro 5 - Classe de maciço do universo <i>weak rock</i>	73
Quadro 6 - Parâmetros de resistência da ISRM	89
Quadro 7- Parâmetros e pesos relativos para classificação geomecânica no sistema RMR.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Planilha de campo - Mapeamento Geológico - Geomecânico.....	16
Tabela 2 - Equações de correlação do RQD.	28
Tabela 3 - Classificação de contagem volumétrica de juntas.	28
Tabela 4 - Principais tipos de descontinuidade.....	30
Tabela 5 - Principais características das descontinuidades e técnicas para medição.....	31
Tabela 6 - Classificação de Persistência.....	32
Tabela 7 - Classificação de abertura das descontinuidades.....	33
Tabela 8 - Classificação quanto ao grau de resistência.	34
Tabela 9 - Graus de alteração das rochas.....	39
Tabela 10 - Critérios para quantificação da coerência em rochas.	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	OBJETIVOS.....	12
2.1	Objetivo geral	12
2.2	Objetivos específicos	12
3	MATERIAIS E MÉTODO	12
3.1	Primeira Etapa.....	13
3.2	Segunda etapa	13
3.3	Terceira Etapa.....	15
4	REFERÊNCIAL TEÓRICO	17
4.1	Geologia regional	17
4.2	Caracterização de maciços rochosos.....	25
4.3	Condições geológicas regionais e locais.....	26
4.4	Identificação e descrição litológica	26
4.5	Índice de Qualidade da Rocha (RQD).....	27
4.6	Caracterização das discontinuidades.....	29
4.6.1	Espaçamento	32
4.6.2	Abertura	33
4.6.3	Rugosidade	36
4.6.4	PERCOLAÇÃO	37
4.6.5	ESTADO DE ALTERAÇÃO	38
4.6.6	COERÊNCIA.....	39
4.7	Classificação geomecânica de maciços	40
4.7.1	<i>ROCK MASS RATING</i> – RMR	42
5	CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOMECÂNICA	45
5.1	Litotipos.....	45
5.1.1	Itabiritos.....	46

5.1.2	HEMATITITAS.....	49
5.1.3	FILITOS.....	51
5.1.4	QUARTZITOS.....	52
5.1.5	INTRUSIVA.....	53
5.1.6	CANGA.....	54
5.1.7	COBERTURAS.....	54
5.2	Geologia Estrutural.....	55
5.2.1	BANDAMENTO (SB).....	57
5.2.2	FOLIAÇÃO (SN).....	59
5.2.3	CLIVAGEM (SN+1).....	60
5.2.4	DIACLASE (SN+2).....	61
5.2.5	LINEAÇÃO.....	64
5.2.6	EIXO DE DOBRA.....	66
5.2.7	FRATURAS.....	68
5.3	Caracterização geomecânica.....	68
5.3.1	ITABIRITO FRIÁVEL.....	69
5.3.2	ITABIRITO MÉDIO.....	69
5.3.3	ITABIRITO COMPACTO.....	69
5.3.4	HEMATITITA FRIÁVEL.....	70
5.3.5	HEMATITITA MÉDIA.....	70
5.3.6	HEMATITITA COMPACTA.....	71
5.3.7	FILITO.....	71
5.3.8	QUARTZITO.....	72
5.3.9	INTRUSIVA.....	72
6	CONCLUSÃO.....	77
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
8	APÊNDICE.....	83

9	ARTIGO CIENTÍFICO.....	84
	INTRODUÇÃO.....	85
	MATERIAIS E MÉTODO	86
	RESULTADOS	94
	DISCUSSÃO	98
	CONCLUSÕES.....	100
	REFERÊNCIAS	101

1 INTRODUÇÃO

No âmbito da mineração o maciço rochoso que contém um depósito mineral sofre diversas modificações durante o processo de lavra, modificando sua geometria original (Braga Neto, 2019).

O conhecimento das feições geológicas-geotécnicas é imprescindível ao projeto, operação e desativação de empreendimentos mineiros, seu detalhamento está diretamente relacionado ao tamanho e complexidade de cada projeto. Em minas a céu aberto, a caracterização das propriedades geológicas-geotécnicas tem por objetivo principal conhecer o corpo mineralizado e o estéril, avaliar a estabilidade dos taludes que compõem a cava e fornecer subsídios para o planejamento do plano de fogo com segurança.

Esta caracterização abrange os estudos relacionados à descrição geológica do maciço bem como o levantamento dos parâmetros geotécnicos deste, através de uma investigação de campo, possibilitando assim a sua classificação geomecânica. As investigações de campo contemplam uma série de etapas que devem seguir e acompanhar toda a execução do projeto.

A classificação do maciço de interesse deve proporcionar uma previsão do comportamento mecânico, além de determinar sua composição geológica - estrutural, porém, a classificação por si só é uma ferramenta que irá auxiliar na resolução de problemas, determinando o caminho a ser seguido no plano de exploração da mina, sempre prezando pela segurança.

Neste sentido, esta dissertação visou a caracterização geológica e classificação geomecânica, segundo os sistemas RMR e *WEAK ROCK*, de uma cava de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero brasileiro no estado de Minas Gerais, fornecendo assim subsídios para os estudos de estabilidade de taludes desta cava.

Os capítulos seguintes compreendem os objetivos propostos, a justificativa para realização do trabalho, a metodologia empregada nas etapas de trabalho de campo e o tratamento destes dados. Em sequência é exibido o referencial teórico, no qual são apresentadas as definições acerca da caracterização de maciços rochosos, descontinuidades e fundamentos dos sistemas de classificação utilizados. Por último são apresentados os dados de caracterização geomecânica da cava estudada e o modelo geomecânico elaborado.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral compreende a caracterização geológica e geomecânica da Cava de uma Mina de Ferro do Quadrilátero Ferrífero, analisando as discontinuidades encontradas nos trabalhos de campo, visando o estudo dos principais fatores geomecânicos e estruturais determinantes no comportamento do maciço rochosos, fornecendo subsídios para o estudo de estabilidade dos taludes que compõem a cava.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aquisição, análise e consolidação dos dados existentes, incluindo projetos já realizados na área, imagens aéreas, mapas, base de dados coletados, dentre outros;
- Apresentar a compartimentação lito estrutural e geomecânicos dos taludes da cava, objeto de estudo
- Elaborar o mapa lito estrutural e setorização estrutural da cava;
- Elaborar o mapa geológico e geomecânico através da interpolação das informações coletadas nos mapeamentos;
- Elaborar mapas temáticos da Cava (Grau de consistência, grau de alteração e grau de fraturamento).
- Elaborar modelo geomecânico da Cava;

3 MATERIAIS E MÉTODO

Esta dissertação foi dividida em três grandes etapas: uma compreendo o levantamento bibliográfico acerca de classificações geomecânicas aplicadas a mina a céu aberto, juntamente com dados sobre a geologia regional do Quadrilátero Ferrífero na qual a cava objeto de estudo dissertação se enquadra; a segunda etapa compreende trabalho de campo envolvendo descrição litológica dos taludes que compõe a cava, avaliação do grau de alteração, grau de coerência e de fraturamento dos maciços, índice de resistência pontual (martelo Schimidt) e na caracterização

geomecânica das rochas identificadas na área de estudo; a terceira e última etapa de trabalho abrangerá a organização dos dados coletados em campo por meio de planilhas eletrônicas e posteriormente a análise destes por meios de softwares específicos. A seguir será descrito cada uma dessas etapas e todos os métodos envolvidos em cada uma delas.

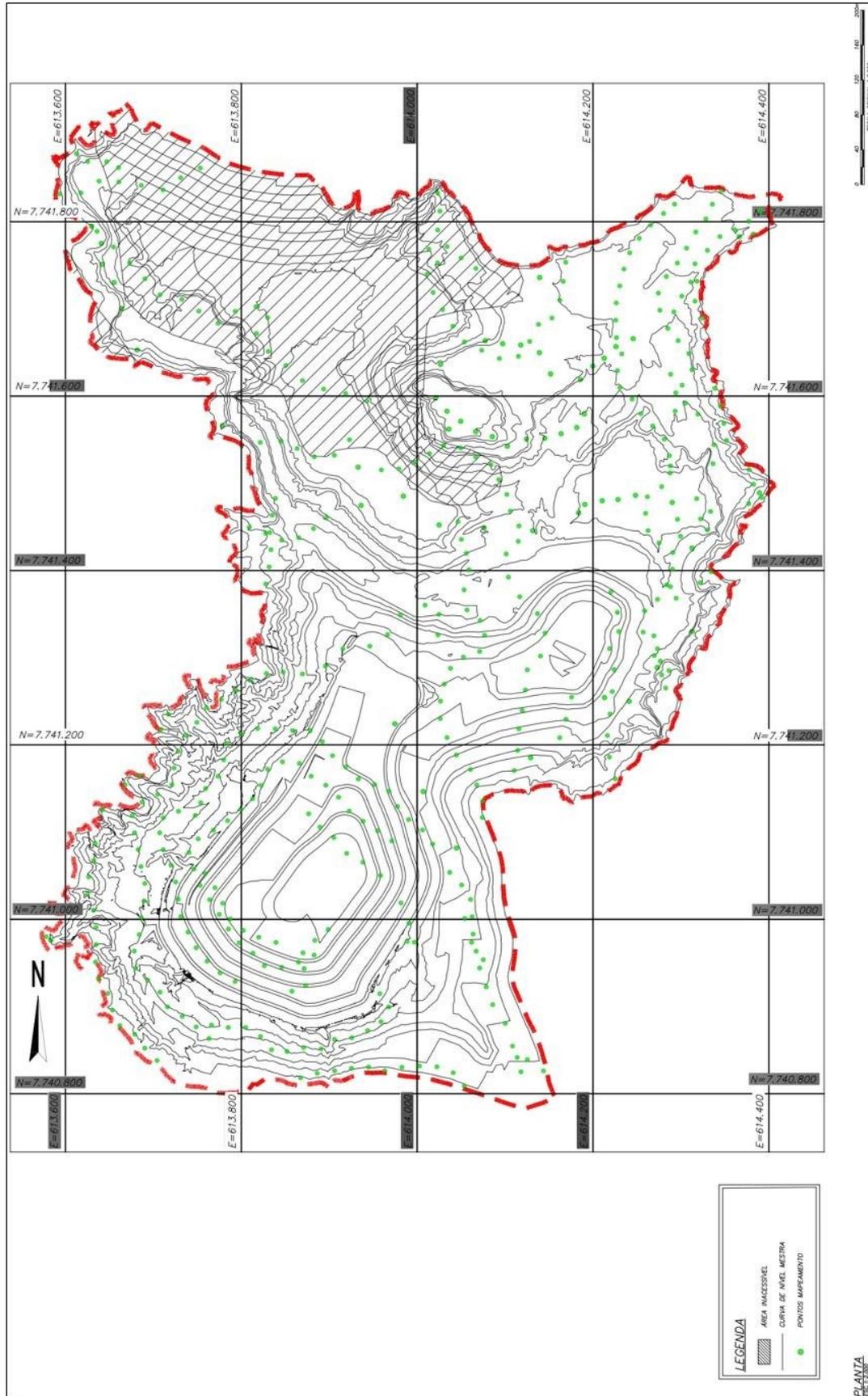
3.1 PRIMEIRA ETAPA

Inicialmente foi realizado um levantamento bibliográfico sobre caracterização geomecânica de minas a céu aberto, bem como levantamento acerca da geologia regional na qual a Cava objeto de estudo desta dissertação se enquadra, além de informações gerais a respeito da área de estudo compreendendo imagens de satélite, levantamento topográficos a fim de planejar a etapa sequente que é o trabalho de campo.

3.2 SEGUNDA ETAPA

O trabalho de campo foi executado em duas semanas em escala 1:2.000 totalizando 629 pontos amostrados (Figura 1). A metodologia escolhida foi de *scanline*, também conhecida como *detail-line*, linha de varredura ou, ainda, amostragem linear, sendo um método sistemático amplamente utilizado no estudo de compartimentação de maciços rochosos, na qual cada afloramento investigado é dividido por uma trena graduada paralela a face exposta do maciço, a fim de realizar a medição de todas as descontinuidades que intersectam a linha da trena, descrevendo as características e suas respectivas atitudes em toda extensão exposta do maciço.

Figura 1 - Mapa de pontos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Durante o mapeamento de campo foram levantados parâmetros da rocha intacta, das discontinuidades e do maciço rochoso. Para a rocha intacta, foram identificados o tipo litológico, o grau de resistência e o grau de intemperismo; para as discontinuidades foram identificados o tipo de estrutura geológica, as atitudes das principais famílias de discontinuidades, o espaçamento entre elas, persistência, abertura, coeficiente de rugosidade de junta - JRC, grau de alteração das paredes, percolação e a resistência a compressão da superfície da junta - JCS.

O JRC foi obtido com o auxílio de uma régua de alumínio de 20 cm, medindo-se a amplitude da rugosidade da parede. Quando não foi possível o encaixe da régua, o valor do JRC foi estimado a partir de perfis típicos elaborados por Barton & Choubey (1977) e então transformados para valores finais de JRC.

A determinação do JCS foi feita mediante a utilização do martelo de Schmidt cujos valores de rebote foram correlacionados para determinar o valor do JCS. Para o maciço rochoso foi identificado o contador volumétrico de juntas - Jv (determinado a partir do espaçamento médio entre famílias, a partir do qual foi determinado o RQD). O grau de fraturamento utilizado na elaboração do mapa temático foi calculado a partir do Jv de acordo com o método apresentado em Palmström (2005).

Para a classificação do maciço rochoso adotou-se a aplicação do método RMR (Bieniawski, 1989). Foram levantados também parâmetros relativos ao perfil intempérico (solo), quando oportuno. Para caracterização do solo foi catalogado o tipo de material (origem), granulometria, cor, tonalidade e plasticidade.

3.3 TERCEIRA ETAPA

A fim de facilitar a análise das informações coletadas em campo, estes foram organizados em planilhas de Excel, contendo informações a respeito do ponto mapeado, informações para rocha e parâmetro das discontinuidades.

Foi atribuído um peso para cada metodologia de mapeamento utilizada (

Coordenadas do Ponto				Dados da rocha intacta (pesos)					
Pontos	Norte	Leste (m)	Cota (m)	Tipo de material	Litologia	Resistência (peso)	Intemperismo		
Dados da descontinuidade (pesos)									
Mergulho	Orientação	Espaçamento (peso)	RQD (peso)	Persistência (peso)	Abertura (peso)	Rugosidade (peso)	Intemperismo da parede (peso)	Material de preenchimento	Espessura do preenchimento (peso)

).

Tabela 1 - Planilha de campo - Mapeamento Geológico - Geomecânico

Coordenadas do Ponto				Dados da rocha intacta (pesos)					
Pontos	Norte	Leste (m)	Cota (m)	Tipo de material	Litologia	Resistência (peso)	Intemperismo		
Dados da descontinuidade (pesos)									
Mergulho	Orientação	Espaçamento (peso)	RQD (peso)	Persistência (peso)	Abertura (peso)	Rugosidade (peso)	Intemperismo da parede (peso)	Material de preenchimento	Espessura do preenchimento (peso)

As informações geológicas e geomecânicas coletadas em campo foram processadas a fim de determinar os valores de RMR para cada ponto mapeado. Posteriormente, foi realizado uma interpolação estatística com os valores obtidos, agrupando os pontos com as faixas de valores proposta por Bieniawski (1989), obtendo, desta forma, regiões da cava com comportamento geomecânico similar. Isso vale para os pontos em qual a classificação geomecânica pertence ao universo *Weak Rock*, interpolados em função dos valores de resistência (R) levantados em campo.

De posse dos pontos classificados geomecânicamente, foram importados e analisados através do *software* Arcgis, onde foi realizado operações de geoprocessamento e confeccionados os mapas temáticos (mapa lito estrutural e geomecânico da cava, grau de consistência, grau de alteração e grau de fraturamento). As informações coletadas nas estruturas mapeadas foram analisadas através do *software* Dips, buscando sempre uma correlação com as estruturais regionais presentes no Quadrilátero ferrífero.

4 REFERÊNCIAL TEÓRICO

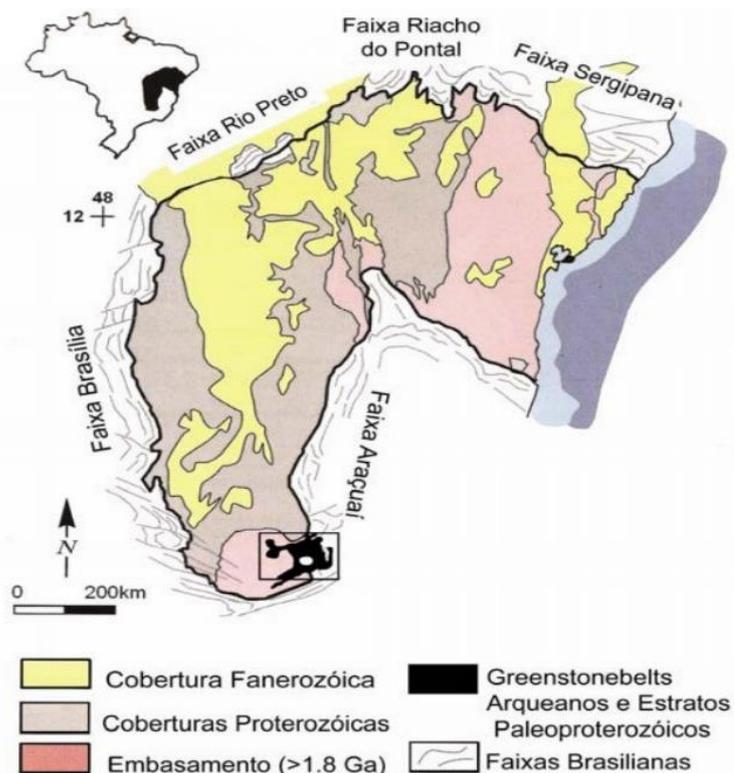
4.1 GEOLOGIA REGIONAL

O Cráton São Francisco (Almeida, 1967) compreende uma das porções mais interiores e estáveis da placa Sul-Americana, composta por rochas arqueanas e paleoproterozóicas que não foram afetadas pelo Ciclo Brasileiro ou por orogênias mais jovens.

A porção oeste do Quadrilátero Ferrífero (Dorr, 1969) situa-se em parte na porção sudeste do Cráton São Francisco, enquanto a parte leste pertence ao Orógeno Araçuaí (Figura 2).

A geologia do Quadrilátero Ferrífero é representada por uma típica sequência arqueana composta por terrenos granito-gnáissicos de alto grau metamórfico. Sobre estes foram depositadas rochas do Supergrupo Rio das Velhas, metavulcanosedimentares do tipo *greenstone belts*, também de idade arqueana (Dorr, 1969). Sobrepondo essa sequência, encontram-se rochas metassedimentares proterozóicas do Supergrupo Minas (Dorr, 1969), e dos Grupos Sabará (Renger *et al.*, 1994) e Itacolomi.

Figura 2 - Localização do Quadrilátero Ferrífero no Crátón do São Francisco.



Fonte: Alkmin, 2004.

O Quadrilátero Ferrífero constitui uma importante província mineral brasileira, em virtude dos seus expressivos depósitos de minério de ferro, principalmente ouro. O termo Quadrilátero Ferrífero foi introduzido por Dorr (1957), devido ao formato aproximadamente retangular da expressão em superfície das formações ferríferas e quartzitos associados ao Supergrupo Minas, mais resistentes à erosão que os terrenos dominados pelo *Greenstones Belts* e os complexos granito- gnáissicos. Geralmente, essas rochas mais resistentes se encontram nas cristas das serras que limitam a província mineral e representam a expressão superficial de uma série de sinclinais e anticlinais que constituem o arcabouço estrutural da região.

O contexto Geológico do Quadrilátero Ferrífero (Figura 3) é caracterizado por um complexo metamórfico basal de idade arqueana, uma Sequência Metavulcanosedimentares do tipo *Greenstone Belt*, também de idade arqueana correspondente ao Supergrupo Rio das Velhas, litotipos supracrustais de idade paleoproterozóica do Supergrupo Minas e Super Grupo Estrada Real, rochas metassedimentares de idade mesoproterozóica do Super Grupo Espinhaço (Endo *et. al.* 2019) e unidades sedimentares correspondentes às coberturas do Paleógeno e Holoceno composta majoritariamente por sedimentos terrígenos. Além destas

O supergrupo Rio das Velhas é composto por uma típica sucessão *greenstone belt* agrupando um conjunto de litofáceis, da base para topo, de rochas metavulcânicas máfica, ultramáficas e félsicas; metavulcanoclásticas, metavulcanossedimentar química, metassedimentar clástica marinha e metassedimentar costeiro (Zucchetti *et. al.* 1998, Baltazar & Pedreira 1998, Baltazar & Zucchetti 2007). A idade das vulcânicas félsicas da base desta unidade é de 2.776 Ma (Machado *et. al.*, 1992 *apud* Alkmim, 2014). As rochas deste Supergrupo são subdivididas entre os grupos Quebra Osso, Nova Lima e Maquiné.

Grupo Quebra Osso é a unidade basal do Super Grupo Rio das Velhas, associado ao conjunto de rochas vulcânicas ultramáficas, que ocorrem na borda leste do QFe. O Grupo Nova Lima é constituído principalmente por rochas de origem sedimentar e vulcânica que sofreram processo metamórficos e hidrotermais (deformação cisalhante), transformando-se em xistos, filitos e xistos cloríticos, e subordinadamente por filitos, filitos grafitosos, clorita-xistos, sericita-xistos, metagrauvas, rochas máficas e ultramáficas, formações ferríferas do tipo álgoima, metacherts e metadolomitos.

O Grupo Maquiné é a unidade de topo do Supergrupo Rio das Velhas este grupo é composto pelas formações, da base para o topo: Palmital, constituída por sericita filito, quartzo-clorita xisto e xistos; e Casa Forte, originalmente definida por Gair (1962), constituída por quartzitos, metaconglomerado e metadiamicritos (Endo *et. al.*, 2019).

Grupo Superminas, composto por quatro Grupos: Tamanduá, Caraça, Itabira e Piracicaba. Esta unidade sobrepõe-se em discordância sobre o Supergrupo Rio das Velhas. Esse supergrupo, com idade máxima de 2650 Ma, constituída por uma sequência continental-marinha representando um dos estágios de evolução de uma bacia de margem passiva (Alkmim & Martins Neto 2012). Na base da unidade tem-se os grupos Tamanduá e Caraça constituídos predominantemente por psamitos e, subordinadamente, por pelitos e conglomerados aluviais e marinhos (Dorr 1969).

O Grupo Tamanduá é caracterizado por um espesso pacote de ortoquartzitos, quartzitos com lâminas ferruginosas, xistos quartzosos e argilosos da Formação Cambotas (inferior) e de xistos filíticos e quartzosos, xistos ferruginosos e formação ferrífera dolomítica da Formação Morro Grande (superior) (Endo *et. al.* 2019).

O Grupo Caraça consiste, predominantemente, da base para o topo, de quartzitos, quartzitos sericíticos, filitos e metaconglomerado da Formação Moeda

(inferior), a Formação Batatal (Maxwell 1958) é constituída de filitos e, subordinadamente, por formações ferríferas bandadas, metacherts, filitos grafitosos e mármore dolomíticos.

A unidade intermediária é o Grupo Itabira constituído por uma sequência de metassedimentos químicos iniciada pela Formação Cauê seguida da Formação Gandarela. A Formação Cauê é composta por itabirito, itabirito dolomítico, dolomito ferruginoso e filito. A Formação Gandarela é formada por dolomitos, filito dolomítico e dolomito silicoso.

A unidade de topo é o Grupo Piracicaba com as seguintes formações da base para o topo: Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro. A Formação Cercadinho caracteriza-se pela alternância de quartzitos e filitos, frequentemente ferruginosos. A Formação Fecho do Funil é constituída por filitos, filitos dolomíticos e lentes de dolomito. Os ortoquartzitos de granulometria fina da Formação Taboões e os filitos e filitos grafitosos da Formação Barreiro são de ocorrência restrita.

O Supergrupo Estrada Real origina-se da redefinição do Grupo Sabará (Almeida *et. al.*, 2005), compostos pelos grupos Sabará e Itacolomi, representa uma sucessão do tipo flysh e molassa sin-orogénicos. As Rochas metassedimentares apresentam idades de 2.125 +/- 4 Ma para o Grupo Sabará e de 2.059 +/- 58 Ma para o Grupo Itacolomi (Machado *et. al.* 1996), que as posicionam por volta de 2.100 Ma.

O grupo Sabará é composto pelas formações Saramenha (Almeida *et. al.* 2005), Córrego do Germano (Endo *et. al.* 2019) e Catarina Mendes (Freitas *et. al.* 2019). A Formação Córrego do Germano é a unidade basal do Grupo Sabará, sendo constituída essencialmente de formação ferrífera bandada do tipo granular e quartzitos ferruginosos.

A Formação Saramenha é constituída, principalmente, por clorita xistos, mica xistos com intercalações de metagrauvas, quartzitos e formação ferrífera bandada. Formação Catarina Mendes é a unidade de topo do Grupo Sabará, sendo constituída por biotita-quartzo xistos, quartzitos e filitos

O Grupo Itacolomi é restrito às porções sudeste e sul do Quadrilátero Ferrífero e assenta discordantemente sobre todas as demais unidades (Alkmim, 2014). O grupo é composto pelas Formações Florália na base, composta de ortoquartzitos, e Formação Pico do Itacolomi, predominantemente composta de quartzitos com estratificação cruzada acanalada, marcada por trilhos de óxido de ferro,

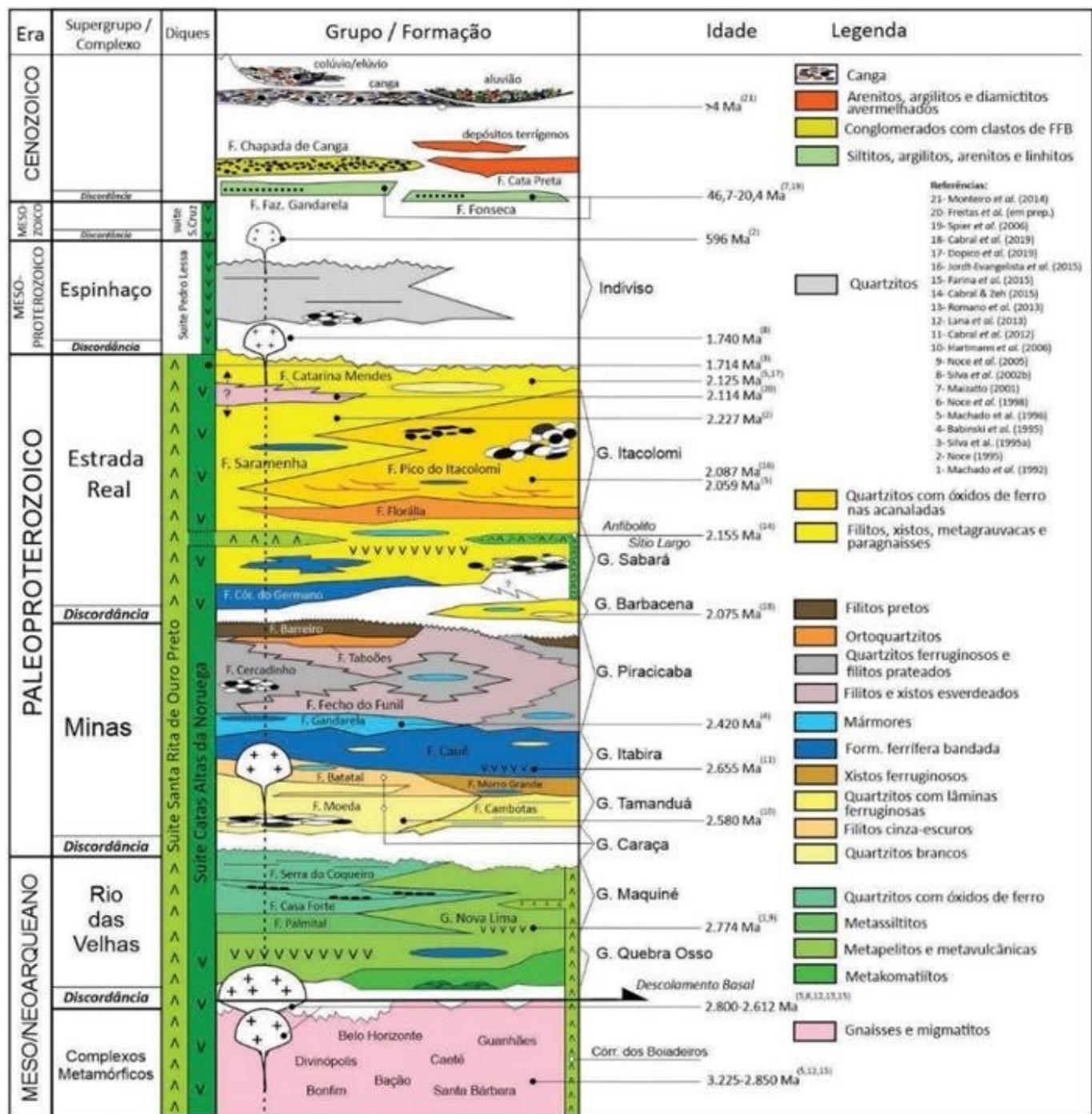
metaconglomerado com seixos, calhaus e subordinadamente matacões de veios de quartzo, quartzito, itabirito, filito e granito (Barbosa, 2018).

O grupo Barbacena é composto por grafita xistos, gonditos, queluzitos, metacherts, xistos manganésíferos, micaxistos, quartzitos feldspáticos, filitos com intercalações de anfibólito e metaultramáficas (Cabral *et. al.* 2019).

As rochas intrusivas foram mapeadas cortando as rochas do Supergrupo Minas e embasamento (Herz, 1970). Constituem diques máficos de direção N-NW com idades de datação de 1,714 Ga (Silva *et. al.* 2002).

Dorr (1969) atribui às rochas metaultramáficas (*greenschists*) que afloram a leste da Serra do Caraça uma idade pós-Minas, as quais, posteriormente, foram interpretadas por Schorscher (1978) como corpos pertencentes ao greenstone Rio das Velhas e denominadas de Grupo Quebra Osso. Diques e sills de diabásio e gabro são também localmente encontrados (Pomerene, 1964; Wallace, 1965).

Figura 4 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero

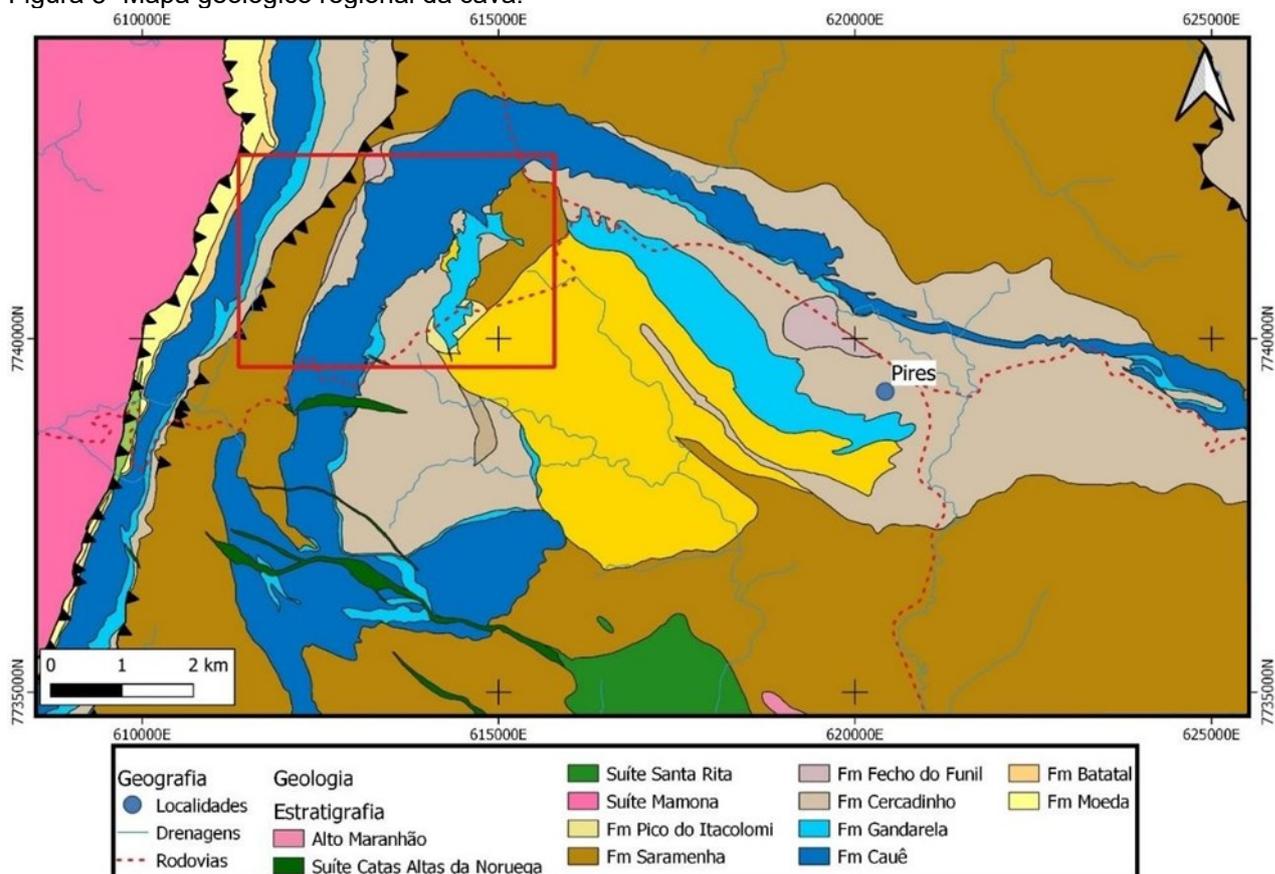


Fonte: Endo et al., 2019

A Cava está localizada na confluência das calhas do Sinclinal Moeda (aba oeste) e Sinclinal Dom Bosco.

Uma megaestrutura regional que na área de estudo envolve rochas do Grupo Itacolomi, da Formação Saramenha do Grupo Sabará, e rochas das Formações Fecho do Funil e Cercadinho, do Grupo Piracicaba; além das Formações Cauê e Gandarela, do Grupo Itabira, conforme mostrado no mapa geológico da Figura 5. (Endo *et. al.*, 2019).

Figura 5- Mapa geológico regional da cava.



Fonte: modificado de Endo *et. al.*, 2019.

Na região de estudo, a formação ferrífera apresenta uma geometria em planta na forma de “bumerangue”, devido a uma inflexão que faz com que as camadas na área da cava, apresentem direção NW-SE, invertendo a oeste, para NE-SW. A porção central do “bumerangue” é preenchida principalmente pelos quartzitos e quartzitos ferruginosos do Grupo Itacolomi.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

Compreende-se por caracterização a colocação dos atributos de um maciço rochosos em evidência, que, isolado ou em conjunto, condicionam o seu comportamento mediante a solicitações importas por uma dada obra. A caracterização geológica corresponde ao conjunto de informações obtidas através de investigações e ensaios de um maciço rochoso. Portanto, esta caracterização deve fornecer informações suficientes para estimar o comportamento mecânico do maciço diante de uma determinada obra de engenharia (Guerra, 2011).

O processo de obtenção de dados geológicos se dá através de investigações realizadas na superfície por meio de mapeamentos geológicos, interpretação de imagens e em subsuperfície, por investigações diretas e indiretas, podendo associar ensaios "in situ" ou laboratoriais.

Os métodos de investigação diretas compreendem as técnicas utilizadas com o intuito de reconhecer o maciço, seja ele terroso ou rochoso, permitindo a observação direta do subsolo, através de amostras coletadas ao longo de uma perfuração ou medição direta de propriedades in situ. Os métodos de investigação indireta compreendem a prospecção geofísica, utilizando técnicas indiretas e interpretativas na detecção das anomalias verificadas nos maciços (ABGE, 1998).

As características físicas que condicionam a qualidade dos maciços rochosos para determinada obra de engenharia, estão ligadas a condição geológica regional, condição geomecânica da rocha intacta, ao estado de alteração e principalmente à classificação das descontinuidades e suas propriedades mecânicas.

No estudo da caracterização de maciços rochosos, é importante observar que, na maioria dos casos, eles são fraturados e não homogêneos. O que determina o comportamento da estrutura é a escala relativa entre a obra e essas descontinuidades.

A relação entre as dimensões da obra e a classe geomecânica do maciço está diretamente relacionada a como se deve estudar o maciço rochoso, seja ele regido mecanicamente pelas propriedades: da rocha intacta, propriedade das descontinuidades ou um somatório de ambos. Cada uma destas faixas de comportamento mecânico apresenta diferentes propriedades, critérios e principalmente modos de ruptura, por isso é imprescindível descrever cada qual de forma individual.

Um maciço rochoso intacto é uma extensão significativa de uma formação rochosa que permanece em sua condição original, sem rachaduras, fraturas ou alterações estruturais. É fundamental em geotecnia e engenharia civil, pois fornece informações sobre a resistência e estabilidade do material rochoso em projetos de construção e mineração. (IRSM, 2007).

4.3 CONDIÇÕES GEOLÓGICAS REGIONAIS E LOCAIS

A descrição da geologia regional compreende a história geológica, tectônica e orogênica da área de interesse. Através da descrição da história geológica regional é possível conhecer a origem das rochas, as unidades litológicas predominantes e a estratigrafia. A história tectônica é utilizada para estabelecer as formações das estruturas principais e o estado de tensões naturais. O estudo orogênico é relacionado à ciência dos processos e movimentos que deram lugar ao relevo terrestre da região (Guerra, 2011). Estas informações podem ser levantadas através de revisões bibliográficas apoiando-se em visitas de campo.

O entendimento dos processos geológicos regionais permite a compreensão da geologia estrutural e sua variabilidade no maciço rochoso, tornando-se imprescindível para a definição antecipada de possíveis mecanismos de ruptura e eventuais abordagens para tratar o problema.

Após a análise das condicionantes geológicas regionais, a investigação geológica local é iniciada. Nesta etapa, busca-se detalhar as principais feições estruturais, descrever afloramentos rochosos e grupos litológicos, identificar áreas de alteração, avaliar o regime freático local, bem como determinar a resistência e a qualidade da rocha intacta. Todos esses fatores mencionados neste parágrafo serão explorados nos capítulos subsequentes, constituindo o foco principal desta dissertação.

4.4 IDENTIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO LITOLÓGICA

A descrição litologia para obras de engenharia baseia-se em conceitos petrográficos, de acordo com a ABGE (1998), deve ser mais clara e objetiva possível,

evitando o emprego de termos complexos, facilitando a interdisciplinaridade entre geologia e engenharia.

As rochas devem sempre classificadas segundo sua gênese, estruturas principais, cor, textura granulação e mineralogia. Estas características podem ser determinadas por meio de diversos procedimentos, seja em laboratório ou em campo.

A classificação geológica baseada na litologia é de extrema importância para a engenharia, visto que, segundo o tipo de rocha, pode - se esperar determinadas características mecânicas, podendo se avaliar a representatividade destas propriedades extrapolando os resultados pontuais para o maciço como um todo (ISRM, 2007).

Tomando de base o processo de formação, as rochas podem ser classificadas em três grandes grupos: ígneas, sedimentares e metamórfica, cada qual com suas características diferenciadas. Os tipos de minerais que compõem as rochas, seu arranjo, tamanho e proporção de cada mineral constituinte, são a base para classificar geologicamente a rocha.

4.5 ÍNDICE DE QUALIDADE DA ROCHA (RQD)

Introduzido por Deere *et. al.* (1967) com o intuito de quantificar a qualidade de rochas em testemunhos de sondagem. O RQD é calculado segundo a Equação 1.

Equação 1 - Equação contator volumétrico de juntas. Fonte:
Palmström, 1982

$$RQD = \frac{(Porções\ de\ rocha\ intacta\ com\ mais\ de\ 10\ cm)}{Comprimento\ total\ do\ testemunho} \times 100$$

Na ausência de testemunhos de sondagem, alguns autores elaboraram formas de se estimar RQD por meio de correlações empíricas, sugerido por Palmström (1975 *apud* Pereira, 2007), utilizando a frequência de descontinuidades, estabelecendo equações de correlação Tabela 2.

Tabela 2 - Equações de correlação do RQD.

Equação	Autor
$RQD = 100e^{-0,1fx(0,1f + 1)}$	Hudson e Harrison (1997)
$RQD = 115 - 3,3Jv$	Palmström (1982)

Fonte: Autor, 2020.

Nesta dissertação será utilizada a equação proposta por Palmström (1982) para se estimar os valores de RQD em afloramento. O valor de Jv é relacionado ao contador volumétrico de juntas e a classificação é feita de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação de contagem volumétrica de juntas.

Termos para descontinuidade	Grau de faturamento (Palmström)	Valores de Jv (m3)
Sem descontinuidade	Extremamente baixo	<0,3
Muito pouco descontinuo	Muito baixo	0,3 - 1,0
Pouco descontinuo	Baixo	1 - 3
Moderadamente descontinuo	Moderadamente alto	3 - 10
Muito descontinuo	Alto	10 - 30
Bastante descontinuo	Muito alto	30 - 60
Extremamente descontinuo	Extremamente alto	> 100

Fonte: Palmström, 1982.

O contador volumétrico das juntas é uma medida do número de juntas presentes em uma unidade de volume do maciço rochosos, definido pela .

$$Jv = \sum \frac{1}{s_i}$$

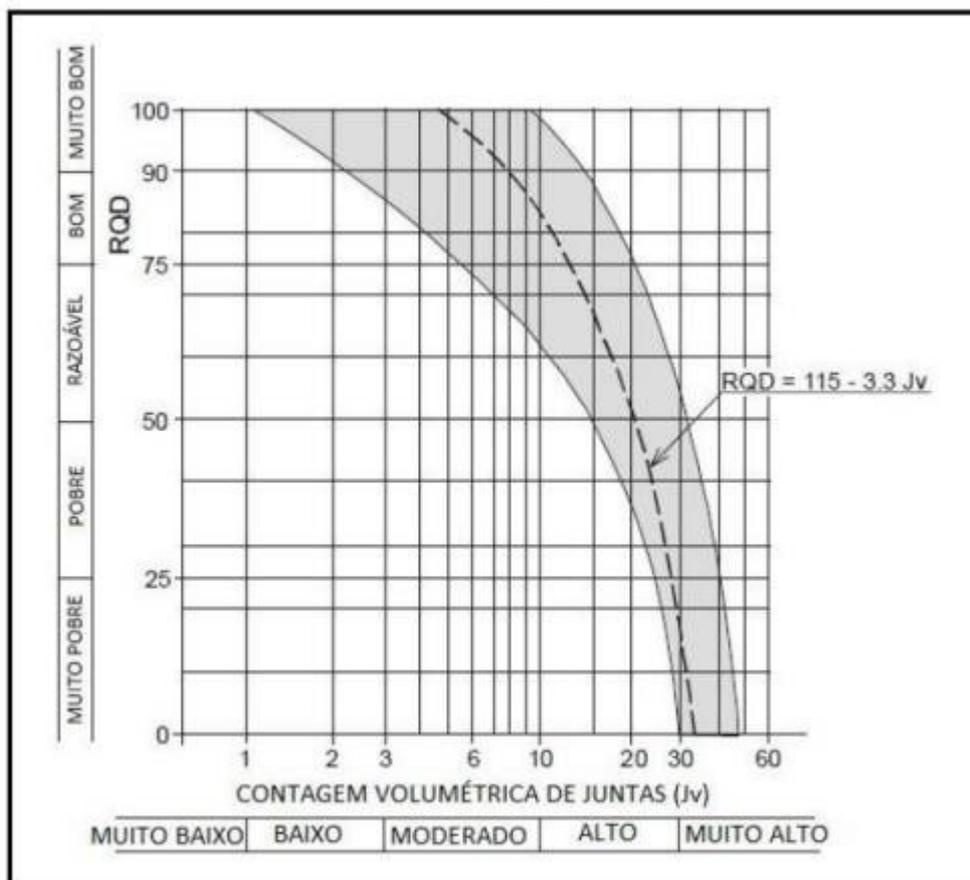
Equação 2 - Equação contador volumétrico de juntas. Fonte: Palmström, 1982

Onde:

S_i é o espaçamento das descontinuidades em metros para a referida família de descontinuidades.

Esta equação foi obtida empiricamente e ilustrada segundo o ábaco de correlação entre o Jv e RQD (Figura 6). Este ábaco é uma maneira de penalizar o RQD, pois é um parâmetro relativo à direção, ou seja, diferentes seções de análise para um mesmo maciço podem apresentar valores de RQD distintos.

Figura 6- Correlação entre RQD e Contador volumétrico de juntas.



Fonte: Palmström, 1982.

4.6 CARACTERIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES

Descontinuidades são definidas como quaisquer feições geológicas que interrompam a continuidade física de uma rocha, ou seja, qualquer superfície natural em que a resistência à tração é nula ou muito baixa (ISRM, 1983).

As descontinuidades em análises de estabilidade de obras em rochas são imprescindíveis, visto que elas podem afetar significativamente a resistência, a deformabilidade e a permeabilidade de um maciço, sendo fundamental para se realizar uma caracterização adequada. Através do resultado da caracterização das descontinuidades pode-se ter uma ideia dos mecanismos de ruptura que podem ocorrer em uma obra.

4.5.1 TIPOS DE DESCONTINUIDADES

As descontinuidades podem ser identificadas de acordo com a sua formação, sua distribuição espacial e parâmetros geométricos são fundamentais na concepção de um modelo estrutural e comportamental do maciço (ISRM, 1983). A Tabela 4 apresenta uma breve descrição dos principais tipos de descontinuidades observados na natureza.

Tabela 4 - Principais tipos de descontinuidade.

Tipos de descontinuidade	Descrição
Falha	As falhas ou zonas de cisalhamento rúptil são descontinuidades ao longo das quais blocos separados sofrem deslocamentos, friccionando entre si e, ocasionalmente, causando fragmentação e cominuição das rochas.
Planos de acamamento	Os planos de acamamento, ou estratificação, representam descontinuidades formadas pelo arranjo de rochas sedimentares em camadas distintas, com espessuras variando de centímetros até poucos metros
Foliação	Foliação é o termo que se aplica a determinadas feições planares que são inerentes às rochas metamórficas. O termo agrupa vários tipos de estruturas, entre elas as xistosidades
Dobras	As dobras são ondulações adquiridas por feições planares (camadas e foliações) mediante a deformação heterogênea de massas rochosas
Clivagem de fratura	Fratargas paralelas formadas em camadas rochosas de baixa resistência, ditas incompetentes, intercaladas em camadas com graus de resistência superior. Tais tipos podem, por exemplo, formar-se em um filito grafitoso intercalado entre duas camadas de arenito de resistência superior
Juntas	As juntas ou diáclases são descontinuidades que ocorrem de forma sistemática, segundo orientações preferenciais, formando famílias de descontinuidades. Em geral, comparecem duas ou mais famílias que se entrecruzam, formando blocos poliédricos, cujas formas e dimensões dependem das orientações e dos espaçamentos das famílias de descontinuidades

Fonte: ABGE, 1988.

Jaques (2014) destaca a importância da caracterização das descontinuidades em maciços, ressaltando seu impacto direto na resistência e no comportamento mecânico deles. As descontinuidades podem ser encontradas na natureza de maneira difusa, próximas ou afastadas, em menor ou maior quantidade, com ou sem material de preenchimento, e apresentar diferentes níveis de rugosidade em suas paredes.

Os principais parâmetros que melhor caracterizam uma descontinuidade, passíveis de medição em campo e objeto de estudo desta dissertação, estão detalhados na Tabela.

Tabela 5 - Principais características das discontinuidades e técnicas para medição.

Características das discontinuidades	Técnicas de medição em campo
Atitude	Bússola de geólogo
Espaçamento	Fita métrica (graduada)
Persistência	Fita métrica (graduada)
Rugosidade	Ábacos de referência
Resistência da Parede	Martelo de Schimdt
Abertura	Escala
Preenchimento	Descrição táctil-visual
Condição de fluxo	Observações no tempo pela vazão
Número de famílias	Diagramas de rosetas, projeções estereográficas ou diagrama de polos.
Tamanho dos blocos	Frequência de abertura

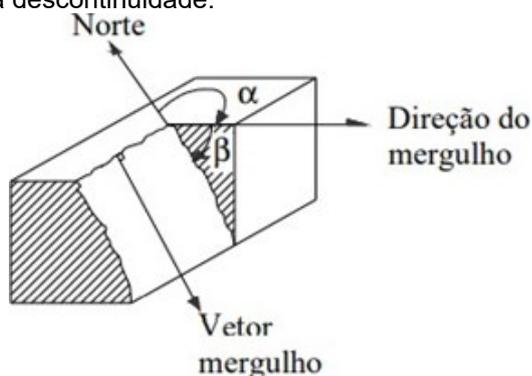
Fonte: Modificado de Hudson, 1989.

4.5.2 FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES E ORIENTAÇÃO

Família de discontinuidades é o termo designado as discontinuidades que se apresentam no maciço de forma sistemática com predominância de uma direção preferencial. A orientação espacial de uma discontinuidade planar é definida pelo ângulo de mergulho (β) formado entre a linha de máxima inclinação e a horizontal (0 a 90 °) e a direção de mergulho (α), medido desde onorte em sentido horário (Figura 7) (0 a 360 °) (ISRM, 2007).

Comumente a orientação é expressa por: direção do mergulho(α) / ângulo de mergulho (β). Graficamente, as orientações podem ser expressas por diagramas de rosetas, projeções estereográficas ou diagrama de polos.

Figura 7- Orientação de uma discontinuidade.

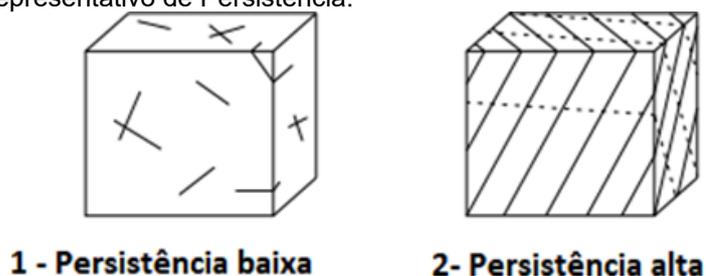


Fonte: Modificado de Guerra, 2011.

4.5.3 PERSISTÊNCIA

Definida como a extensão do traço de uma descontinuidade conforme observado em um afloramento, representando a penetratividade (extensão) da descontinuidade dentro do maciço rochoso (Figura 8) (Assis, 2003).

Figura 8- Esquema representativo de Persistência.



Fonte: Modificado de Assis, 2003

A ISRM sugere a terminologia apresentada na Tabela 6 para a classificação da persistência das descontinuidades.

Tabela 6 - Classificação de Persistência.

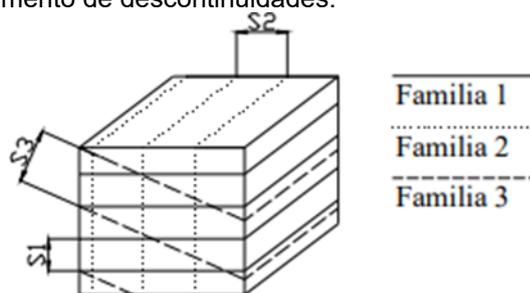
ID	Espaçamento (metros)	Descrição
6	< 1	Persistência muito baixa
4	1 - 3	Persistência baixa
2	3 - 10	Persistência média
1	10 - 20	Persistência alta
0	> 20	Persistência muito alta

Fonte: ISRM, 1978

4.6.1 Espaçamento

Distância medida perpendicularmente entre descontinuidades adjacentes pertencentes a uma mesma família, sendo determinado como espaçamento médio ou espaçamento modal (Figura 9) (Assis, 2003).

Figura 9- Medida do espaçamento de descontinuidades.

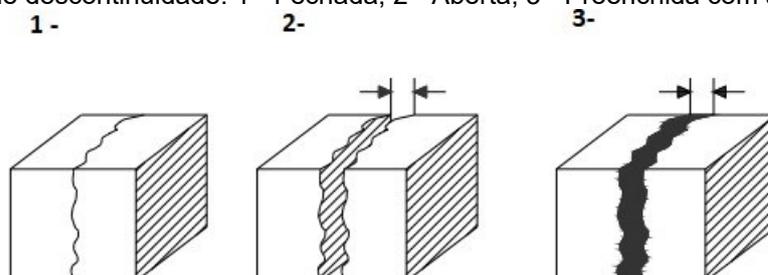


Fonte: Modificado de Assis, 2003.

4.6.2 Abertura

Definido como a distância entre as paredes de uma descontinuidade aberta, onde o espaço é preenchido por água ou ar, inclui as descontinuidades que foram preenchidas e lixiviadas (Figura 10). A abertura dos espaçamentos geralmente é determinada em afloramentos com auxílio de uma trena graduada (Assis, 2003).

Figura 10- Tipos de descontinuidade: 1 - Fechada; 2 - Aberta; 3 - Preenchida com água.



Fonte: modificado de Maia, 2003.

A Tabela 7 apresenta a terminologia sugerida Por Bieniawski (1989) para classificação das aberturas de descontinuidades.

Tabela 7 - Classificação de abertura das descontinuidades.

Abertura	Descrição
Nula	Fechada
<0,1 mm	Fechada
0,1 - 1,0 mm	Parcialmente aberta
1,0 - 5,0 mm	Moderadamente largas
> 5,0 mm	Largas

Fonte: Bieniawski, 1989

4.5.4 RESISTÊNCIA

O grau de resistência de uma rocha intacta está relacionado com os valores de resistência a compressão simples determinado em campo. A Tabela 8 apresenta a classificação de maciços rochosos quanto ao grau de resistência.

Tabela 8 - Classificação quanto ao grau de resistência.

R	Descrição	Características do Material	Resistência Uniaxial Estimada (MPa)	Point Load Index (MPa)
R0	Solo estruturado coesivo, rijo a duro	É facilmente atravessado pela lâmina do canivete ou pela ponta fina do martelo de geólogo; sofre penetração pela ponta do polegar; pode ser moldado com as mãos; escavada por equipamento manual.	< 1,00	**
R1	Rocha muito branda (friável) Saprolito	Desintegra-se facilmente sob o impacto do martelo de geólogo; é indentada facilmente pela ponta fina do martelo de geólogo; pode ser riscado e raspado facilmente pela lâmina do canivete; desloca-se ao longo do plano de foliação sob pressão dos dedos; as bordas dos fragmentos são facilmente quebradas pela pressão dos dedos, exceto àqueles menores que 2 x 2 x 2 cm; Escavação por equipamentos mecanizados.	1,00 - 5,00	**
R2	Rocha branda	Quebra-se sob um único impacto do martelo de geólogo; Sofre indentação rasa sob impacto firme da ponta fina do martelo de geólogo; A lâmina do canivete provoca sulco acentuado na superfície do fragmento; Pode ser raspado pela lâmina do canivete; as bordas dos fragmentos podem ser quebradas pela pressão dos dedos; Escavação por equipamentos mecanizados, exigindo em alguns casos, fogo de afrouxamento do maciço.	5,00 - 25,00	**
R3	Rocha medianamente resistente	Quebra-se sob poucos golpes firmes do martelo de geólogo; risca com dificuldade com a lâmina do canivete; não pode ser raspado pela lâmina do canivete; as bordas finas dos fragmentos podem ser quebradas pelas mãos com certa dificuldade; escavada por desmonte a fogo.	25,00 - 50,00	1,00 - 2,00
R4	Rocha resistente	Requer alguns golpes do martelo de geólogo para ser quebrado; dificilmente riscado pela lâmina do canivete; as bordas dos fragmentos são dificilmente quebradas pelas mãos; escavada por desmonte a fogo.	50,00 - 100,00	2,00 - 4,00
R5	Rocha muito resistente	Quebra-se com muitos golpes do martelo de geólogo; dificilmente riscado pela lâmina do canivete; as bordas dos fragmentos são cortantes; escavada por desmonte a fogo.	100,00 - 250,00	4,00 - 10,00

R6	Rocha extremamente e resistente	A rocha somente pode ser lascada com omartelo de geólogo.	> 250,00	> 10.00
----	---------------------------------	---	----------	---------

Fonte: modificado de ISRM, 1981.

Adaptado de Brown, 1981 "*Suggested Methods for Rock Characterization Testing and Monitoring*" - ISRM.

(**) Ensaios de PLT em rochas com Resistência Compressiva Uniaxial (UCS) abaixo de 25 Mpa

provavelmente fornecerá resultados muito ambíguos.

A ISRM (2007) define como resistência das paredes (JCS) a resistência à compressão uniaxial das paredes adjacentes de uma dada descontinuidade, geralmente menor que a resistência da rocha intacta devido à ação de agentes intempéricos nas descontinuidades. Essa característica é de extrema importância, visto que tem influência não apenas na resistência ao corte de maciços rochosos, mas também condicionam a deformabilidade para descontinuidades fechadas.

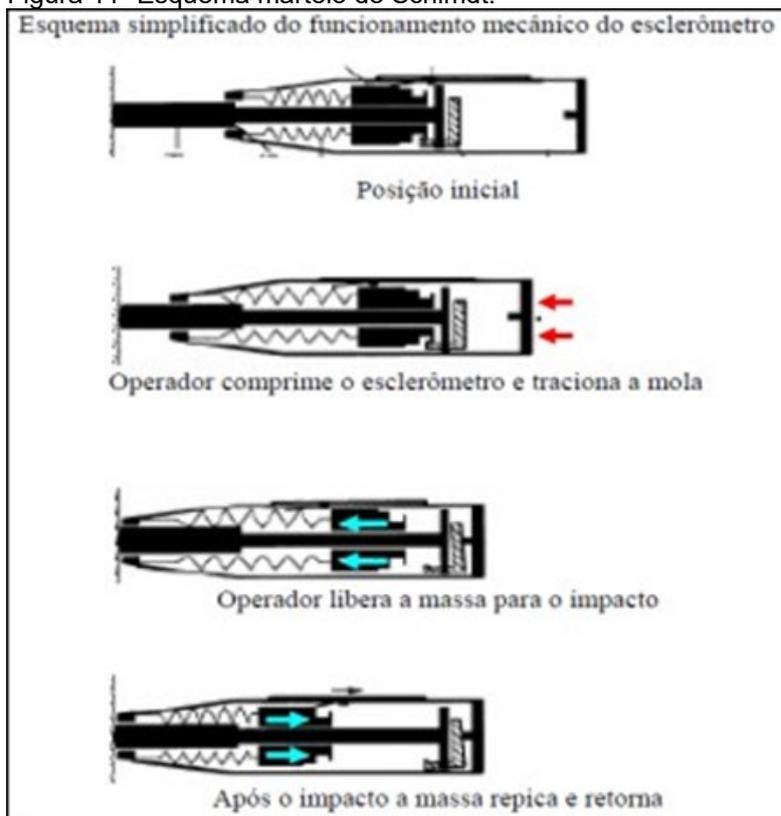
O valor de JCS pode ser estimado através de testes manuais utilizando o martelo do geólogo ou o esclerômetro de Schmidt (Figura 11), este sendo o método sugerido pela ISRM para a determinação da dureza das rochas, correlacionando o número de rebotes determinados pelo martelo de Schmidt com os parâmetros de resistência a compressão simples (σ_c) e/ou elasticidade (E).

O procedimento para execução do ensaio consiste em:

- liberação da mola de compressão
- posicionamento do martelo de Schmidt na superfície a ser ensaiada preferencialmente na direção perpendicular
- carregamento do equipamento através da pressão externa exercida pelo executor para compressão do embolo, energia ativa
- rebote exercido pelo equipamento, energia passiva

O posicionamento do martelo em relação a superfície afeta diretamente nos valores obtidos, sendo indicado a realização sempre em sentido vertical, horizontal com uma variação máxima de 5% em relação a posição de 90° (ISRM, 1978).

Figura 11- Esquema martelo de Schimdt.



Fonte: Autor, 2022.

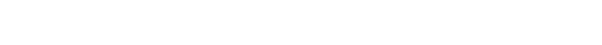
4.6.3 Rugosidade

Representa as irregularidades observadas nas superfícies de descontinuidades. Estas irregularidades podem se manifestar em dimensões milimétricas a centimétricas, caracterizadas como asperezas, ou em dimensões de afloramento, sendo caracterizadas como ondulações.

A rugosidade das paredes de uma dada descontinuidade é uma característica potencialmente importante na resistência ao cisalhamento, especialmente para descontinuidades não preenchidas. A importância da rugosidade diminuiu à medida que a abertura ou material de preenchimento aumenta (JAQUES, 2014).

Para se determinar o grau de rugosidade de uma descontinuidade (JRC) Barton e Choubey(1977) propuseram uma estimativa através da comparação visual do perfil real da superfície com perfis de rugosidade padrão (Figura 12).

Figura 12- Característica da rugosidade nas descontinuidades segundo recomendações da ISRM (1978).

Classe	Escala		Perfil Típico de Rugosidade da Descontinuidade	JRC ₂₀	JRC ₁₀₀
	Intermédia	Menor			
I	Escalonada	Rugosa		20	11
II		Lisa		14	9
III		Polida		11	8
IV	Ondulosa	Rugosa		14	9
V		Lisa		11	8
VI		Polida		7	6
VII	Plana	Rugosa		2.5	2.3
VIII		Lisa		1.5	0.9
IX		Polida		0.5	0.4

Fonte: ISRM, 1978.

NOTAS: O comprimento de linha amostral deve estar na faixa de 1 a 10 m. As escalas verticais e horizontais são iguais. JRC e JRC100 correspondem ao valor estimado do coeficiente de rugosidade da descontinuidade (Barton & Chubey (1977) quando o perfil se assimila a um comprimento de 20 e de 100 cm respectivamente.

4.6.4 PERCOLAÇÃO

Corresponde ao fluxo de água livre, visível em descontinuidades ao longo do maciço rochoso. Em sua maioria, a percolação é controlada predominantemente pelo sistema de descontinuidades, com exceção das rochas sedimentares, onde a percolação se dá principalmente através da matriz rochosa. (Assis, 2003).

Para determinar a condição de percolação na área da cava foi utilizado a metodologia proposta pelo ISRM (1981) (Quadro 1)

Quadro 1 - Percolação de água.

Fluxo em 10m de comprimento de túnel (L/min)	Pressão de água nas descontinuidades/ Tensão principal maior	Condições Gerais	Descrição
Nulo	0	Completamente seco	Paredes e tetos secos, percolação não detectável.
< 10	< 0.1	Úmido	Pequena percolação, gotejamento em algumas descontinuidades com fluxo contínuo, a mão fica úmida depois de passar pela superfície da descontinuidade.
10 - 25	0.1 - 0.2	Molhado	Influxo médio, algumas descontinuidades com fluxo contínuo. A mão fica molhada depois de passar pela superfície da descontinuidade.
25 - 125	0.2 - 0.5	Gotejando	Grande influxo, algumas descontinuidades com grandes fluxos, gotejamento contínuo das descontinuidades.
> 125	> 0.5	Fluxo	Influxo excepcionalmente alto, algumas partes com fluxo excepcionais

Fonte: ISRM, 1981

4.6.5 ESTADO DE ALTERAÇÃO

O grau ou estado de alteração corresponde ao grau de intemperismo sofrido pela rocha, principalmente devido ao intemperismo, referindo-se, às mudanças mineralógicas sofridas pelos minerais formadores de rocha.

Apesar das diferentes classificações do estado de alteração das rochas, do ponto de vista geotécnico, a caracterização do estado de alteração é feita através da descrição tátil visual, contemplando a percepção das variações do brilho e da cor dos minerais, das características mecânicas da rocha (degradação) além da friabilidade (JAQUES, 2014).

O ISRM, reúne as principais siglas e denominações utilizadas na avaliação do grau de alteração das rochas, apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Graus de alteração das rochas.

W	Descrição	Características do Material
W6	Solo residual maduro	Material totalmente transformado em solo. Estruturação da rocha original destruída.
W5	Rocha completamente alterada (friável) - saprolito	Material completamente alterado para solo estruturado. Extremamente descolorido, minerais resistentes quebrados e outros transformados em argilominerais. Foliação preservada. Descontinuidades não discerníveis.
W4	Rocha intensamente alterada	Alteração mineralógica muito acentuada, alguns minerais parcialmente decompostos em argilominerais. Matriz totalmente oxidada e cores muito modificadas. Descontinuidades abertas (>2 e <5 mm) e oxidadas, preenchidas por materiais alterados. Foliação realçada pelo intemperismo, deslocamento ao longo da foliação. Resistência muito afetada pela alteração.
W3	Rocha moderadamente alterada	A matriz apresenta-se descolorida, com evidências de oxidação. Descontinuidades abertas (<1 mm) e oxidadas, podendo ocorrer material mais alterado ao longo das descontinuidades. Foliação realçada pelo intemperismo. Resistência afetada pelo intemperismo.
W2	Rocha levemente alterada	Alteração mineralógica perceptível, cores esmaecidas e perda de brilho. Leve descoloração e oxidação na matriz e ao longo das descontinuidades. Foliação visível e selada. Descontinuidades fechadas, paredes ligeiramente alteradas. Resistência original da rocha parcialmente afetada pela alteração.
W1	Rocha sã	Alteração mineralógica nula a incipiente. Minerais preservam brilho original, cor e clivagem. Eventual descoloração nas descontinuidades. Foliação visível e selada. Resistência original da rocha não afetada pela alteração.

Fonte: ISRM, 1981

4.6.6 COERÊNCIA

A coerência de uma rocha é definida com base nas propriedades de tenacidade, dureza e friabilidade. É caracterizada através da descrição tátil visual, com auxílio do martelo de geólogo, tomando-se nota da resistência que a rocha oferece ao impacto e ao risco da lâmina de aço (ABGE, 1998).

Os critérios utilizados para a quantificação da coerência são padronizados e estão expostos na Tabela 10.

Tabela 10 - Critérios para quantificação da coerência em rochas.

Grau	Denominação	Características da rocha
C1	Muito coerente	Quebra com dificuldade ao golpe do martelo, formando poucos fragmentos combordas cortantes. Características mecânicas elevadas. Superfície difícil ou levemente riscável por lâmina de aço. Somente escavável a fogo.
C2	Medianamente coerente	Quebra facilmente ao golpe do martelo em vários fragmentos e as bordas podem ser quebradas pela pressão dos dedos. A lâmina de aço provoca um sulco pouco acentuado na superfície do fragmento. Características mecânicas boas.
C3	Pouco coerente	Quebra facilmente ao golpe do martelo, produzindo fragmentos que podem ser partidos manualmente. A lâmina de aço produz sulcos profundos na superfície do fragmento. Características mecânicas baixas.
C4	Incoerente	Desagrega e esfarela com a pressão digital. Pode ser cortado por lâmina de aço. Friável e escavável com lâmina de aço. Características mecânicas muito baixas.

Fonte: ABGE, 1998.

4.7 CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DE MACIÇOS

Os sistemas de classificação geomecânica de maciços englobam critérios qualitativos e/ou quantitativos, fornecendo indicações no que diz respeito as propriedades intrínsecas sobre a qualidade do maciço.

Os métodos mais utilizados no Brasil são os sistemas RMR (*Rock Mass Rating*, Bieniawski, 1989), Q - *Tunneling Quality Index* (Barton *et. al.*, 1974) e GSI (*Geological Strength Index*, Hoek 1994, Marinos & Hoek, 2000). Todos os três métodos atribuem pesos os parâmetros relativos às características do maciço, concedendo posteriormente, um índice geomecânico que é resultado de expressões algébricas associadas ao sistema empírico utilizado.

As rochas do Quadrilátero Ferrífero apresentam um grau de alteração relativamente elevado, consideradas em sua maioria como rochas brandas, portanto, possuem uma baixa aplicabilidade no sistema de classificação RMR. Sendo assim, o autor optou por utilizar o sistema de classificação *Weak Rock* (Martin & Stacey 2018), baseado no grau de resistência da rocha intacta, implicando na subdivisão das faixas de resistência R1 e R2 conforme Quadro 2.

É importante frisar que neste trabalho a classificação geomecânica das rochas do Quadrilátero Ferrífero será elaborada a partir de análise tátil-visual, com auxílio do esclerômetro de Schmidt para a determinação do parâmetro de resistência à compressão uniaxial.

Quadro 2 - Proposta de classificação geomecânica de maciços.

ÍNDICE DE RESISTÊNCIA	DESCRIÇÃO	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO UNIAIXIAL	AVALIAÇÃO DE CAMPO						MÉTODO	
			martelo	risco canivete ¹	queda canivete	raspagem canivete ¹	risco unha	pressão manual		
R6	Extremamente resistente	>250	lasca	não	não	não	não	não	RMR 1993	
R5	Muito resistente	250-100	quebra com dificuldades e vários golpes	não	não	não	não	não		
R4	Resistente	100-50	quebra com vários golpes	risco superficial	-	não	não	não		
R3	Medianamente resistente	50-25	quebra com dificuldade com um golpe			com muita dificuldade	não	não		
R2	R2+ (concreto)	Pouco resistente	25 - 10	quebra com um golpe	risca	ponto pequeno	com dificuldade	não		não
	R2- (solo-cimento)	Branda	10 - 5	fragmenta com um golpe	risca fundo	ponto grande	produz pó	risco superficial	não	WEAK
R1	R1+ (tijolo)	Muito branda superior	5 - 3		risca fundo	penetra	com facilidade produz muito pó	risca	quebra pontualmente	
	R1-	(saprólito)	Muito branda inferior	3 - 1	desagrega	corta (separa)	penetra	descasca esculpe	penetra	quebra as bordas
R0	Extremamente branda	1 - 0,25	-	penetra		-	corta	desagrega	EXTREMELY WEAK	
¹ varia conforme presença de minerais de hábito lamelar			Índice de Reação ao Método							
Método de avaliação da consistência das Rochas				ALTA						
1 - Reação ao golpe com martelo de geólogo				MÉDIA						
2 - Resistência ao risco com a ponta do canivete				BAIXA						
3 - Reação à queda do canivete										
4 - Reação à raspagem da lâmina do canivete na borda da amostra										
5 - Reação ao risco com a unha										
6 - Reação à pressão dos dedos										

Fonte: Traduzido de Martin & Stacey,2018.

4.7.1 ROCK MASS RATING – RMR

Desenvolvido por Bieniawski (1973) sofreu atualizações nos anos de 1979 e 1989. Inicialmente este sistema foi desenvolvido a fim de determinar o vão livre de túneis e seu tempo de sustentação sem suporte, posteriormente, foi utilizado para estimar a coesão e o ângulo de atritode maciços rochosos.

De acordo com Bieniawski (1989), para que a classificação RMR seja corretamente obtida, primeiramente é necessária a separação do maciço rochoso em porções homogêneas e, nasequência, são atribuídas notas para cinco parâmetros avaliados, conforme mostra a seção 1 do Quadro 3- Classificação RMR.. Sobre o somatório dos cinco pesos, adiciona-se a sexta pontuação, referente à influência das orientações de descontinuidades (seção 2 do Quadro 3- Classificação RMR.), que varia de acordo com o tipo de obra, de forma a obter o índice RMR. Com isso, verifica-se na seção 3 a classe do maciço e na seção 4 suas principais características.

(Continua)

Quadro 3- Classificação RMR.

1 - PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO E SEUS PESOS									
PARÂMETROS		INTERVALO DE VALORES							
1	Resistência do material intacto	Índice de resistência a carga pontual (MPa)	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Para esses valores baixos, é preferível realizar o teste de compressão uniaxial		
		Resistência a compressão uniaxial (MPa)	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	< 1
	Peso	15	12	7	4	2	1	0	
2	Qualidade do testemunho (%): RQD (do inglês- <i>Rock Quality Designation</i>)	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25			
	Peso	20	17	13	8	3			
3	Espaçamento das descontinuidades	> 0,6 m	0,6 m - 2 m	200 mm - 600 mm	60 mm - 200 mm	< 60 mm			
	Peso	20	15	10	8	5			
4	Condição das descontinuidades	Superfícies muito rugosas descontínuas, fechadas, paredes duras	Superfícies pouco rugosas, abertura < 1 mm, paredes	Superfície pouco rugosa, abertura < 1 mm, paredes	Superfícies estriadas ou preenchimento < 5 mm ou abertura de 1 mm - 5 mm,	Preenchimento mole 5 mm ou abertura 5 mm, contínuas			

(continuação)

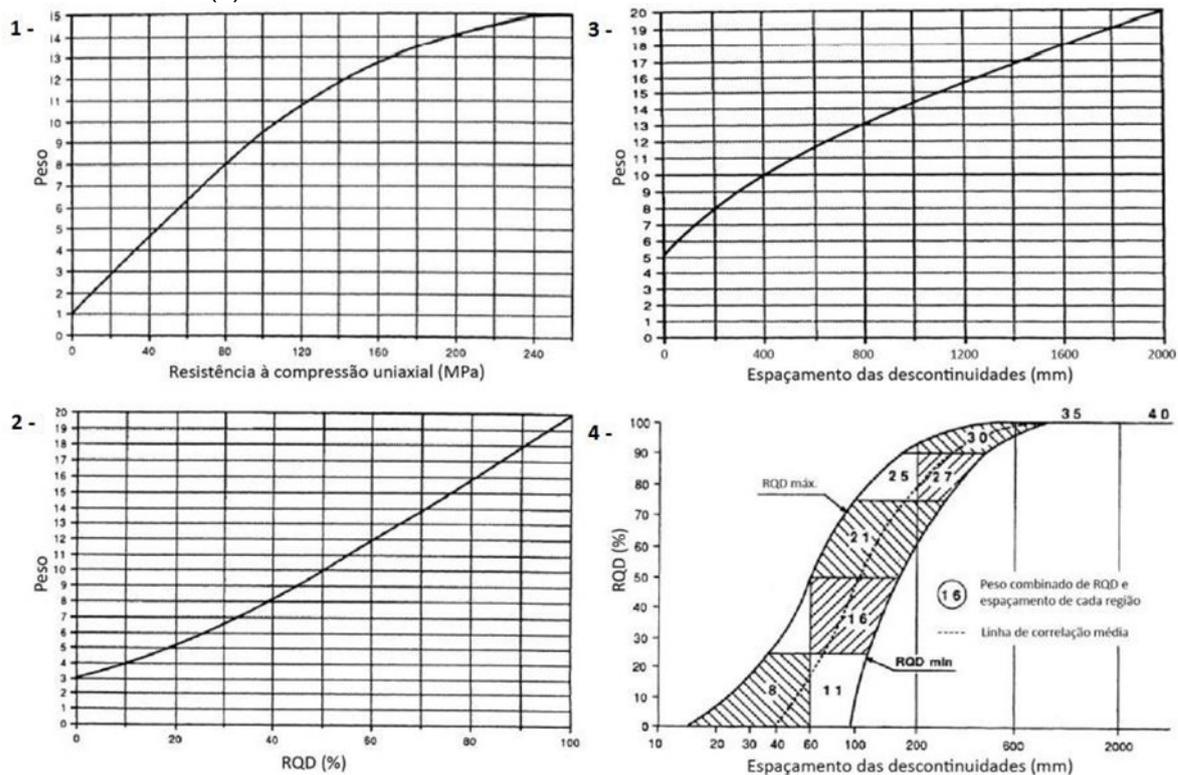
			duras	moles	contínuas		
Peso		30	25	20	10	0	
5	Água subterrânea	Infiltração em 10m de túnel (L/min)	0	< 10	10 - 25	25 - 125	>125
		Relação entre a pressão da água na fratura e a tensão principal	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5
		Condições gerais	Seco	Umedecido	Úmido	Gotejamento	Fluxo abundante
Peso		15	10	7	4	0	
2 - PESO DE AJUSTE EM FUNÇÃO DA ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES							
Direção e mergulho das descontinuidades		Muito favorável	Favorável	Aceitável	Desfavorável	Muito desfavorável	
Peso	Túneis	0	-2	-5	-10	-12	
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25	
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60	
3 - CLASSE DE MACIÇOS ROCHOSOS DETERMINADA PELA SOMATÓRIA DOS PESOS							
Somatória dos pesos		100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20	
Classe nº		I	II	III	IV	V	
Descrição		Muito bom	Bom	Regular	Pobre	Muito pobre	
4 - CARACTERÍSTICAS DOS MACIÇOS ROCHOSOS SEGUNDO A CLASSIFICAÇÃO RMR							
Classe nº		I	II	III	IV	V	
<i>Stand-up time</i> médio		20 anos para abertura de 15m	1 ano para abertura de 10 m	1 semana para abertura de 5 m	10 horas para abertura de 2,5 m	30 minutos para abertura de 1 m	
Coesão da massa rochosa (kPa)		> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100	
Ângulo de atrito (graus)		> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15	

Fonte: Bieniawski, (1989).

Nesse sentido, os conjuntos de descontinuidades de cada seção-tipo do maciço são analisadas e suas classificações RMR obtidas conforme os pesos apresentados. No entanto, com o intuito de determinar o peso de alguns parâmetros com mais precisão, especialmente para casos limítrofes, Bieniawski (1989) também apresenta ábacos (gráficos 1, 2 e 3 da Figura 13), em que é possível obter os pesos inerentes à resistência à compressão uniaxial, ao RQD e ao espaçamento das descontinuidades, respectivamente.

Além disso, o Gráfico 4 da Figura 13 desenvolvido com base nos dados de correlação de Priest e Hudson (1976) relativos ao RQD e ao espaçamento das descontinuidades - permite a estimativa de um dos parâmetros supracitados quando não se tem ambos.

Figura 13- Gráficos para determinação dos pesos segundo a resistência à compressão uniaxial (1), RQD (2), Espaçamento das descontinuidades (3) e a correlação entre o RQD e o espaçamento das descontinuidades (4).



Fonte: Bieniawski, 1989.

5 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOMECÂNICA

A região objeto de estudo desta dissertação compreende uma área de aproximadamente 3 quilômetros de comprimento e 2 quilômetros de largura está localizada na confluência das calhas do Sinclinal Moeda (aba oeste) e Sinclinal Dom Bosco, no sudeste do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais.

Durante as etapas de mapeamento foi identificado que em sua maioria as rochas que compõem a cava são predominantemente pertencentes ao Supergrupo Minas, representadas localmente pelo Grupo Itabira e Grupo Piracicaba, além de rochas do Grupo Itacolomi.

A seguir será descrito cada uma das litologias encontradas com sua devida classificação geomecânica. Todos os pontos de mapeamento com suas respectivas classes geomecânicas são apresentados no Apêndice 1.

5.1 LITOTIPOS

As litologias presentes na cava, em sua maioria, fazem parte do Supergrupo Minas, como é o caso das formações ferríferas (Formação Cauê). Rochas estéreis foram classificadas tanto no Grupo Piracicaba (Supergrupo Minas) quanto no Grupo Itacolomi. A predominância é de itabiritos friável e médio, sendo o primeiro o mais abundante. Ocorrem, em forma de lentes e corpos alongados que variam de dimensões métricas a decamétricas, itabirito compacto e hematititas (friável, média e compacta) imersas no itabirito friável.

As rochas estéreis, filito e quartzitos, majoritariamente, ocorrem encaixadas nas formações ferríferas a oeste e leste, sendo a leste o maior volume destas, raramente encontram-se em forma de lentes métricas em meio ao itabirito friável, como é o caso da intrusiva que sua maior exposição mapeada ocorre encaixante em formações ferríferas. A cava é ainda composta por coberturas coluvionares, canga e pilhas.

5.1.1 Itabiritos

Os itabiritos são o principal litotipo presente na cava, perfazendo quase que a totalidade da extensão da cava, ocorrendo nas porções sul, central e norte, sendo menos frequente nas bordas, principalmente na porção leste, onde dá lugar às rochas estéreis encaixantes.

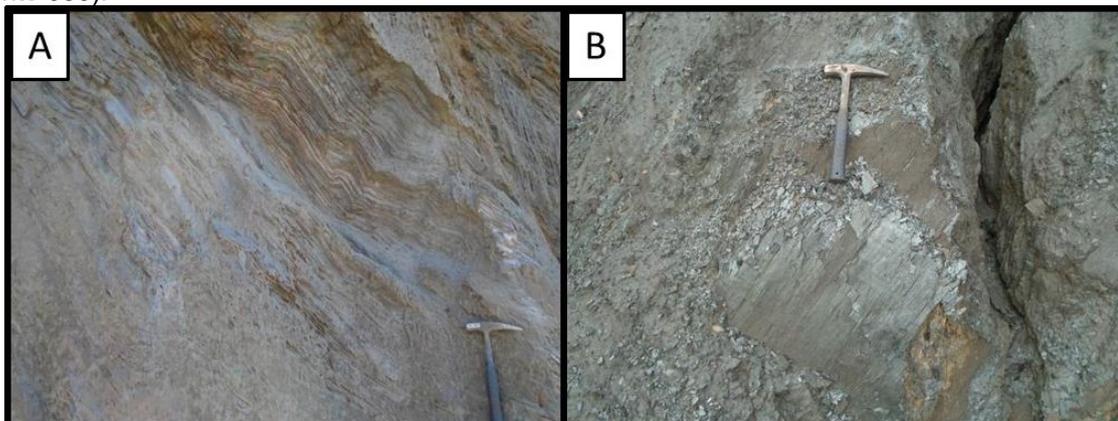
Seus corpos possuem direção preferencial NW-SE, podendo haver inflexões para NE-SW e para E-W, principalmente na porção central e norte. É caracterizado pelo típico bandamento alternando bandas milimétricas a centimétricas de sílica e hematita. Na cava são divididos de acordo com a variação de sua resistência, sendo classificados como friável, médio e compacto.

5.1.1.1 *Itabiritos friáveis*

O itabirito friável é o litotipo predominante na cava, sendo o arcabouço litológico principal sustentando lentes de itabiritos médios e compactos e, em menor proporção de hematitas, intrusiva, coberturas coluvionares e canga. Apresentam baixa resistência, conferindo características similares a de um solo estruturado, por vezes com estruturas pouco visíveis, sendo estes denominados pulverulentos (Figura 14A).

Podem também apresentar um sutil aumento da resistência em relação ao pulverulento, em que bandas de hematita e porções ricas em hidróxidos de ferro possuem maior resistência que as bandas de sílica, formando lascas a partir dos planos de bandamento e clivagens (Figura 14B). Os itabiritos friáveis podem conter concentrações maiores de hidróxidos de ferro, seja limonita ou goethita, ou ainda de manganês, sendo este último caracterizado como itabirito argiloso, apresentando coloração preta mais escura, ocorrendo em menor proporção na cava.

Figura 14- (A) Itabirito friável pulverulento (Ponto 001); (B) itabirito friável fragmentado em lascas (Ponto 056).



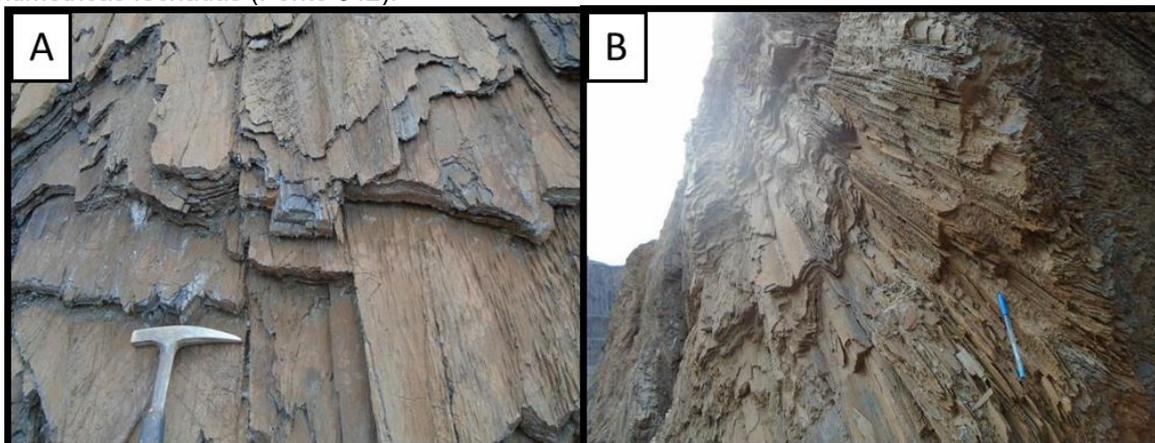
Fonte: Autor, 2022.

5.1.1.2 *Itabiritos médios*

O itabirito médio é o segundo litotipo com maior predominância na cava, presente nas porções sul, central e norte, ocorre como lentes que variam de 20 m em seu maior comprimento até corpos com 300 m de maior eixo, como o caso de 4 ocorrências nas porções central e norte da cava. Apresentam maior resistência ao golpe do martelo de geólogo em relação aos itabiritos friáveis, e similarmente a estes, ocorrem deslocamento das bandas de hematita, mais resistentes que as de sílica, que é liberada (Figura 15A).

Os itabiritos médios com frequência encontram-se dobrados, em escala centimétrica a métrica, quando menores, as dobras são fechadas e formam calhas que condicionam a fragmentação do maciço diferentemente dos deslocamentos observados, fragmentando-se em lascas menores (Figura 15B).

Figura 15- (A) Itabirito médio com deslocamento (Ponto 095); (B) itabirito médio com dobras centimétricas fechadas (Ponto 042).



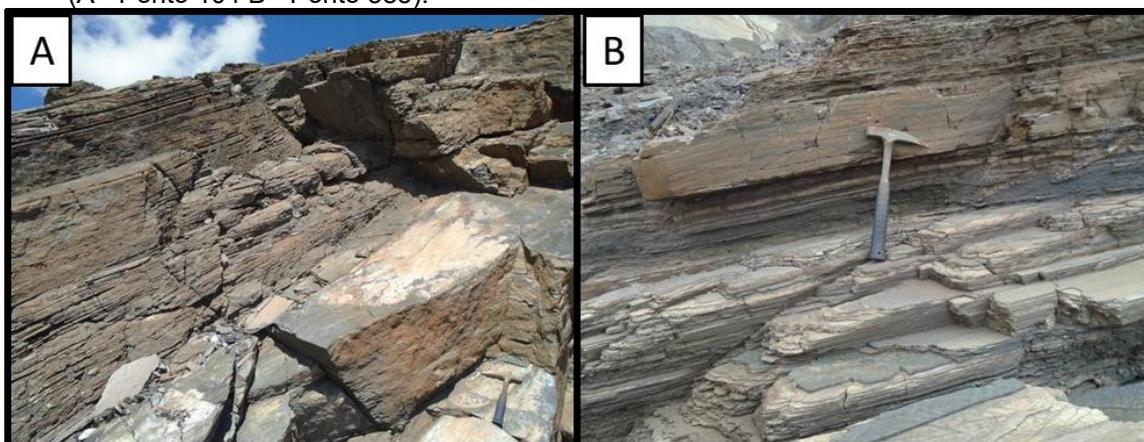
Fonte: Autor, 2022.

5.1.1.3 *Itabiritos compactos*

Ocorrendo em menor proporção dentre os itabiritos friáveis e médios, o itabirito compacto apresenta-se como lentes intercaladas entre estes outros litotipos. É frequente em toda a cava e seus corpos são de menor dimensão, com tamanho médio de 30 m de maior eixo, à exceção da porção sudoeste e noroeste, onde encontra-se um corpo alongado de direção NW-SE com 200 m de eixo maior.

O itabirito compacto possui alta resistência e geralmente não se encontra fragmentado, exibindo um maciço coeso formando blocos de dimensões métricas a partir da interseção dos planos de bandamento e clivagens (Figura 16).

Figura 16- (A) e (B) itabirito compacto em maciço pouco fraturado, formando blocos métricos (A - Ponto 104 B - Ponto 385).



Fonte: Autor, 2022.

5.1.2 HEMATITITAS

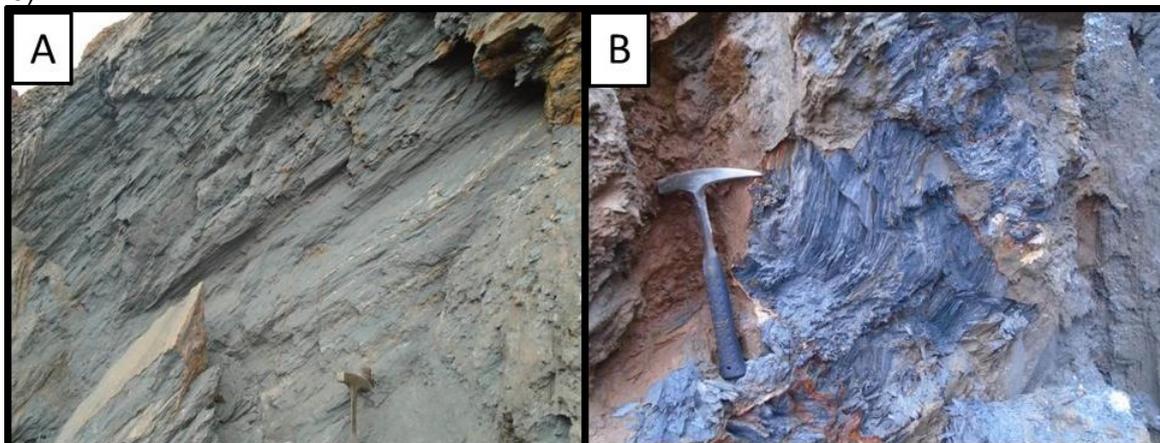
As hematititas ocorrem principalmente nas porções leste e nordeste e a leste em contato com as encaixantes, em corpos com direção NW-SE e inflexões para NE-SW e E-W. Possuem dimensões de maior eixo entre 20 m e 200 m, com os corpos menores ocorrendo de maneira restrita nas porções sul e central da cava.

Assim como os itabiritos, foram individualizadas as hematititas friáveis, médias e compactas, quase sempre encontradas associadas umas às outras. As hematititas são diferenciáveis em relação aos itabiritos por essas apresentarem menor proporção de sílica, quase inexistente, ocorrendo pontualmente como lâminas delgadas não contínuas. Pode ainda concentrar hidróxidos de ferro, formando porções de coloração amarelada.

5.1.2.1 *Hematititas friáveis*

A hematitita friável é a mais abundante entre as hematititas, possui o corpo de maior dimensão na porção leste, com 200 m de extensão de maior eixo, com lentes de hematititas média e compacta no seu centro. A hematitita friável apresenta coloração cinza escura típica e ausência de sílica, ocorrendo por vezes com concentrações de hidróxidos. Analogamente ao itabirito, ocorre pulverulenta e como lascas (Figura 17).

Figura 17- (A) hematitita friável pulverulenta (Ponto 331); (B) hematitita friável formando lascas (Ponto 349).

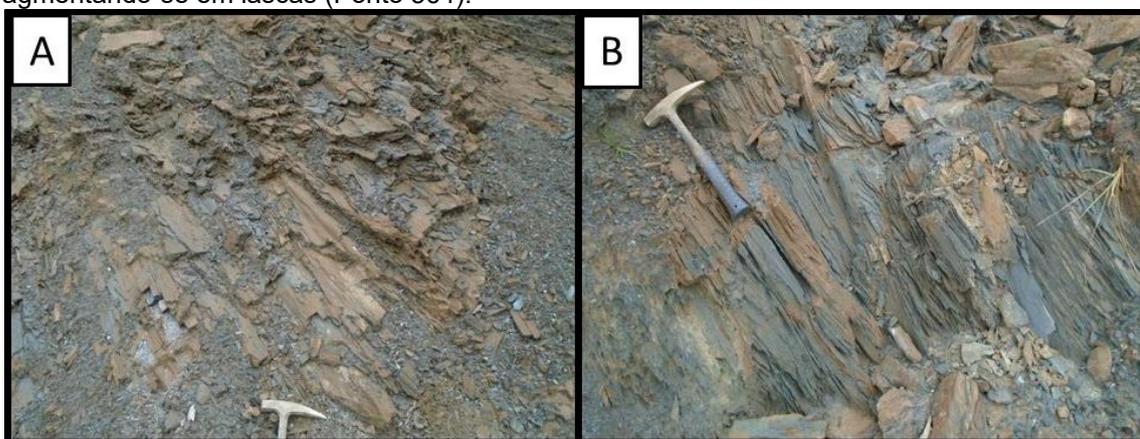


Fonte: Autor, 2022.

5.1.2.2 *Hematititas médias*

A hematitita média ocorre menos frequentemente na cava, está mais presente na porção leste juntamente com as hematititas média e compacta, há uma ou outra ocorrência na porção central da cava. Apresenta-se comumente dobrada, dobras centimétricas fechadas, e fragmentando-se como lascas nas interseções dos planos de bandamento e clivagens (Figura 18).

Figura 18- (A) hematitita média com dobras centimétricas fechadas (Ponto 563); (B) hematitita média fragmentando-se em lascas (Ponto 564).

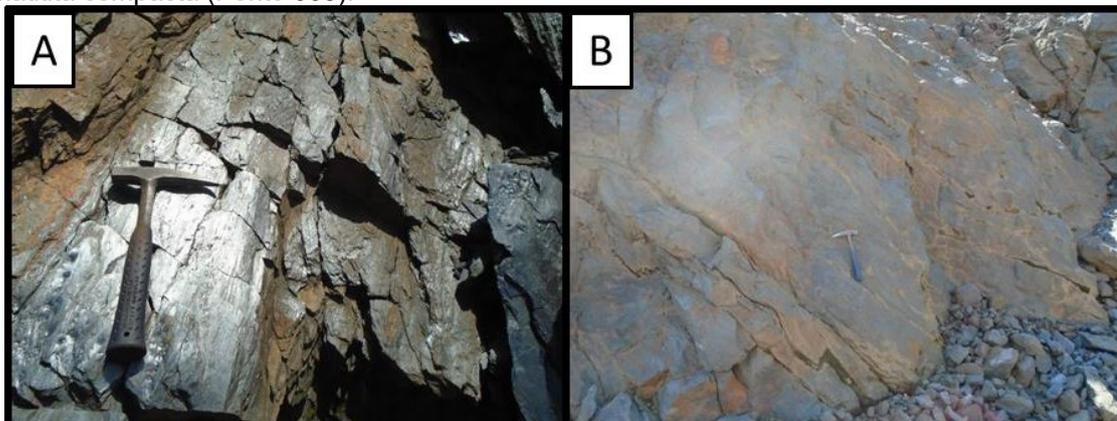


Fonte: Autor, 2022.

5.1.2.3 *Hematititas compactas*

A hematitita compacta ocorre tanto a leste quanto a oeste da cava com um corpo de maior representatividade à oeste em contato com filito. Uma ou outra lente ocorre nas porções sul, centrale norte, porém pouco representativas. Possui coloração cinza e brilho metálico característico, porvezes a hematitita compacta apresenta-se em um maciço homogêneo (Figura 19).

Figura 19- (A) hematitita compacta com brilho metálico (Ponto 178); (B) maciço pouco fraturado de hematitita compacta (Ponto 005).



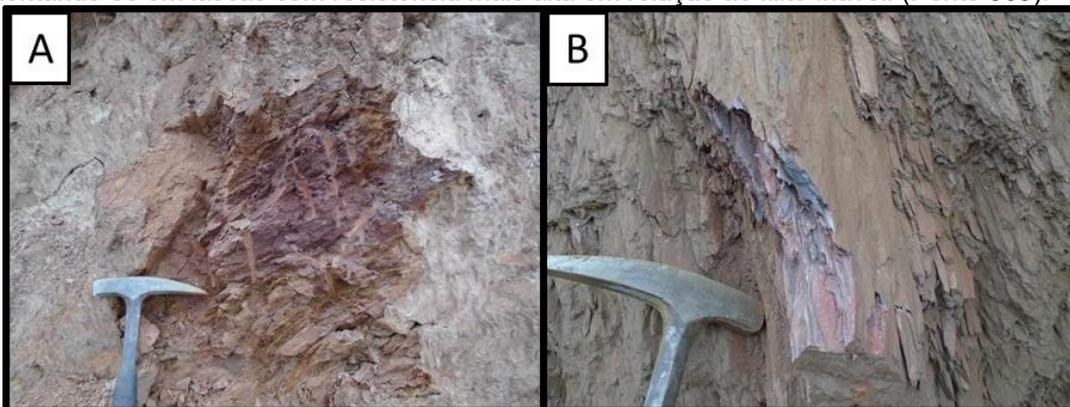
Fonte: Autor, 2022.

5.1.3 FILITOS

O filito ocorre majoritariamente nas bordas da cava, tendo seu corpo mais representativo na porção leste, em um corpo com extensão contínua do Norte até a porção central. Outro corpo representativo ocorre na porção oeste, em contato e com a formação ferrífera compacta e friável, este filito foi individualizado como pertencente ao Supergrupo Minas, Grupo Piracicaba.

O filito indiviso apresenta-se como material friável, de baixa resistência, de coloração rosa clara (Figura 20A) com clivagem de difícil visualização. O filito Piracicaba apresenta resistência mais alta que o filito indiviso, de coloração roxa, amarela clara e cinza quando menos intemperizado, exhibe estruturas de foliação e clivagens bem marcadas, fragmentando-se em lascas, assim como nas formações ferríferas, com presença de porções ferruginosas (Figura 20B).

Figura 20- A) Filito friável de coloração rosa a roxa clara (Ponto 320); (B) filito Piracicaba fragmentando-se em lascas com resistência mais alta em relação ao filito friável. (Ponto 369).



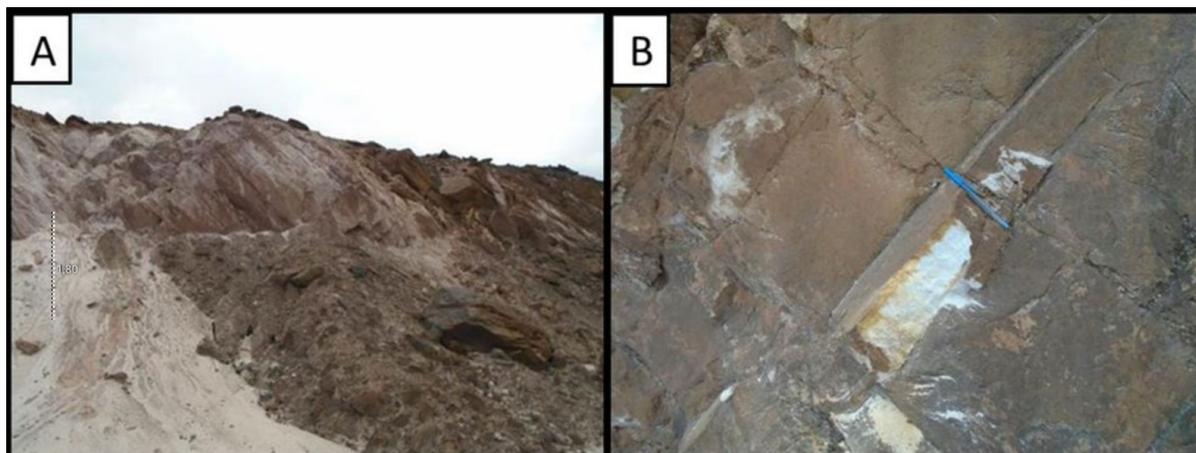
Fonte: Autor, 2022.

5.1.4 QUARTZITOS

Os quartzitos mapeados restringem-se na porção leste da cava, estão em contato com o corpo de filito indiviso à oeste, além de formações ferríferas friáveis, médias e compactas à leste. É, em sua maior parte, caracterizado pela coloração que varia entre amarela, branca e rosa clara, com baixa resistência, assemelhando-se aos outros materiais friáveis presentes na cava, apresenta grãos de quartzo de granulometria fina marcando uma foliação por vezes pouco evidente (Figura 21A).

Foram mapeadas lentes e corpos com algumas dezenas de metro de maior eixo, em meio ao quartzito friável, uma variação compacta, com maior resistência, de coloração branca clara e granulometria areia fina a média, com planos de foliação e clivagens bem definidos (Figura 21B).

Figura 21- (A) Quartzito friável de coloração branca rosada e granulometria areia fina (Ponto 307); (B) quartzito compacto de coloração branca com planos de foliação e clivagens evidentes (Ponto 314).

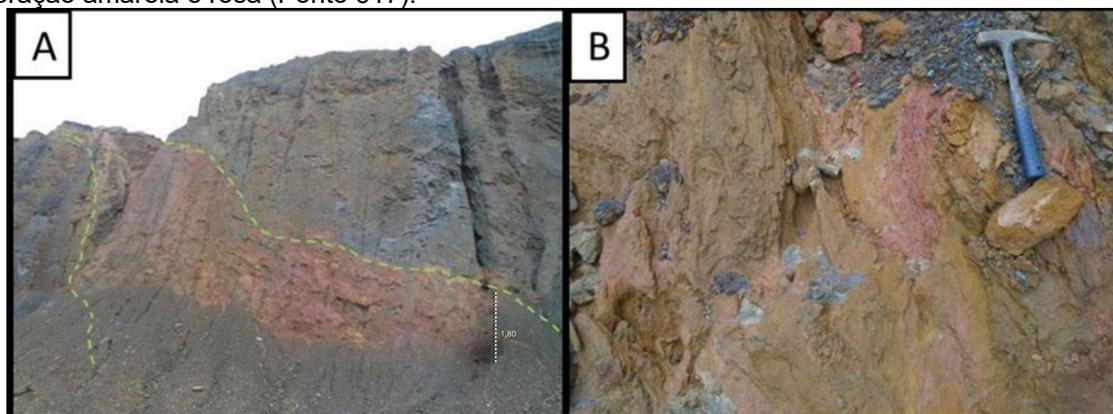


Fonte: Autor, 2022.

5.1.5 INTRUSIVA

A rocha intrusiva possui pouca representatividade na cava, sendo restrita a um sill intemperizado com algumas centenas de metros no extremo sudeste, e um corpo alongado com 350 m de extensão a noroeste da cava. Caracteriza-se pela coloração rosa e amarela escura devido ao grau de alteração elevado em relação às suas encaixantes formação ferrífera (Figura 22A) , apresenta-se com baixa resistência, condizentes com material friável, possui foliação pouco desenvolvida (Figura 22B).

Figura 22- (A) Intrusiva em contato com formação ferrífera (Ponto 617); (B) intrusiva apresentando coloração amarela e rosa (Ponto 617).

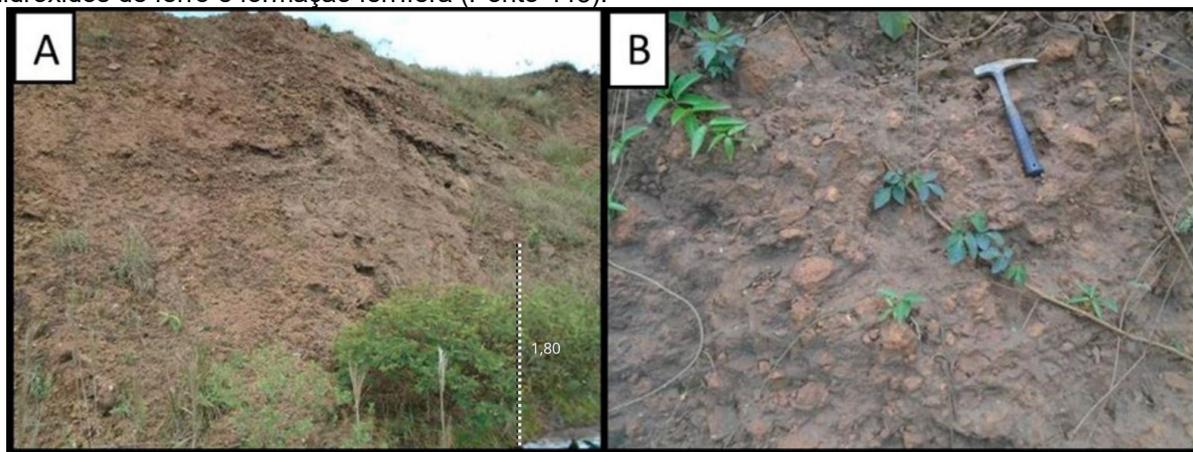


Fonte: Autor, 2022

5.1.6 CANGA

A canga está presente em maior quantidade na porção leste da cava, possuem em média 150 m de dimensão de maior eixo. Sua característica é a alta resistência e presença de pedregulhos e pedregulhos arredondados de itabirito e hematita compacta conforme mostrados nas Figura 23 A e B.

Figura 23- (A) talude de canga na cava (Ponto 354); (B) canga com pedregulhos a pedras de mão de hidróxidos de ferro e formação ferrífera (Ponto 445).

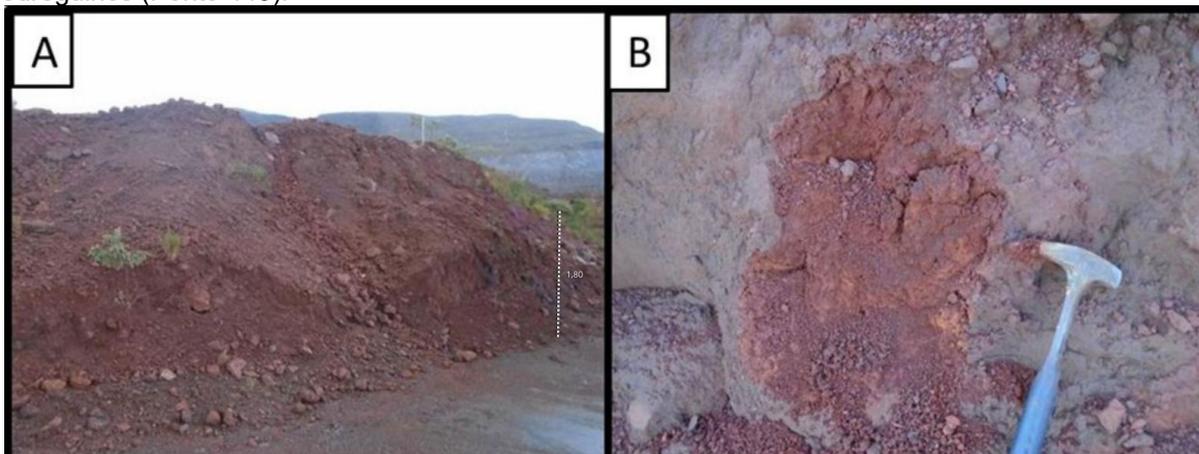


Fonte: Autor, 2022

5.1.7 COBERTURAS

O solo coluvionar (Figura 24A) está presente em boa parte da porção sudeste e leste. É caracterizado pela coloração vermelha escura e granulometria areno-siltosa, com presença de seixos subarredondados finos a médios (Figura 24B).

Figura 24- (A) Talude conformado por colúvio na cava (Ponto 065); (B) Colúvio areno-siltoso com pedregulhos (Ponto 449).

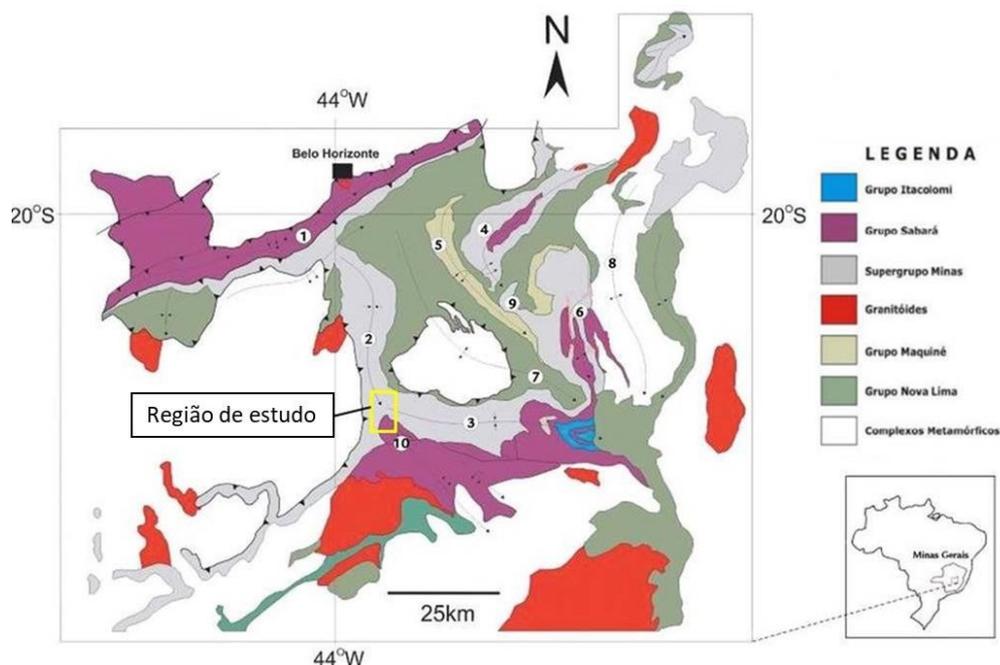


Fonte: Autor, 2022.

5.2 GEOLOGIA ESTRUTURAL

A cava está localizada na confluência das calhas do Sinclinal Moeda (aba oeste) e Sinclinal Dom Bosco (Figura 25). Regionalmente, as macroestruturas predominantes na área são falhas de empurrão com direção geral NE-SW e vigência para oeste e falhas indiscriminadas transversais às de empurrão, com direção geral NW-SE.

Figura 25- Destaque em amarelo com a localização da cava, no contexto do Quadrilátero Ferrífero. (1) Traço axial do sinclinal Mangabeiras; (2) Sinclinal Moeda; (3) Sinclinal Dom Bosco; (4) Sinclinal Gandarela; (5) Sinclinal Vargem do Lima; (6) Sinclinal Santa Rita; (7) Anticlinal Mariana; (8) Anticlinal Furquim; (9) Sinclinal Ouro Fino; (10) Anticlinal Santo Antônio.



Fonte: Modificado de Rossi, 2015

O cisalhamento que afetou as unidades do Supergrupo Minas na área da mina produziu a transposição dos planos de acamamento de modo que o bandamento da formação ferrífera (Sb) comumente confunde-se com a foliação tectono-metamórfica (Sn) gerada durante o cavalgamento (Sn//Sb) de orientação NNE-SSW.

Além dessa estrutura, o levantamento de campo permitiu identificar mais duas estruturas planares principais que condicionam geotecnicamente os taludes da cava: uma clivagem Sn+1 de orientação NW-SE, transversal a Sn e um sistema de planos de descascamento bastante regular de direção NNE-SSW, sub-perpendicular a Sn//Sb, aqui denominados Sn+2. Foram também individualizadas uma lineação de interseção paralela à lineação mineral (Li) além de eixos de dobras (Ex) em escala de afloramento.

Os estereogramas do bandamento Sb e foliação Sn (Figura 27 e Figura 30) exibem concentrações polares condizentes com a estrutural regional, apresentando valores modais com direção geral NNE-SSW e mergulho para leste, tal qual marcam os planos das falhas de empurrão regionais. As inflexões presentes serviram de subsídio para a divisão lito estrutural da cava, que será discutida mais adiante.

As estruturas S_{n+1} e S_{n+2} são discretas e de natureza distinta. A clivagem S_{n+1} (Figura 32) está em posição plano-axial a um sistema de dobras inclinadas de eixo ESE-WNW (Figura 40) encontradas também regionalmente e que deformam os planos $S_n//S_b$. A interseção entre S_{n+1} e S_n define uma lineação paralela aos eixos da dobra (Figura 38). A estrutura S_{n+2} (Figura 34) tem sua orientação perpendicular aos eixos e é aqui classificada como um sistema de diáclases.

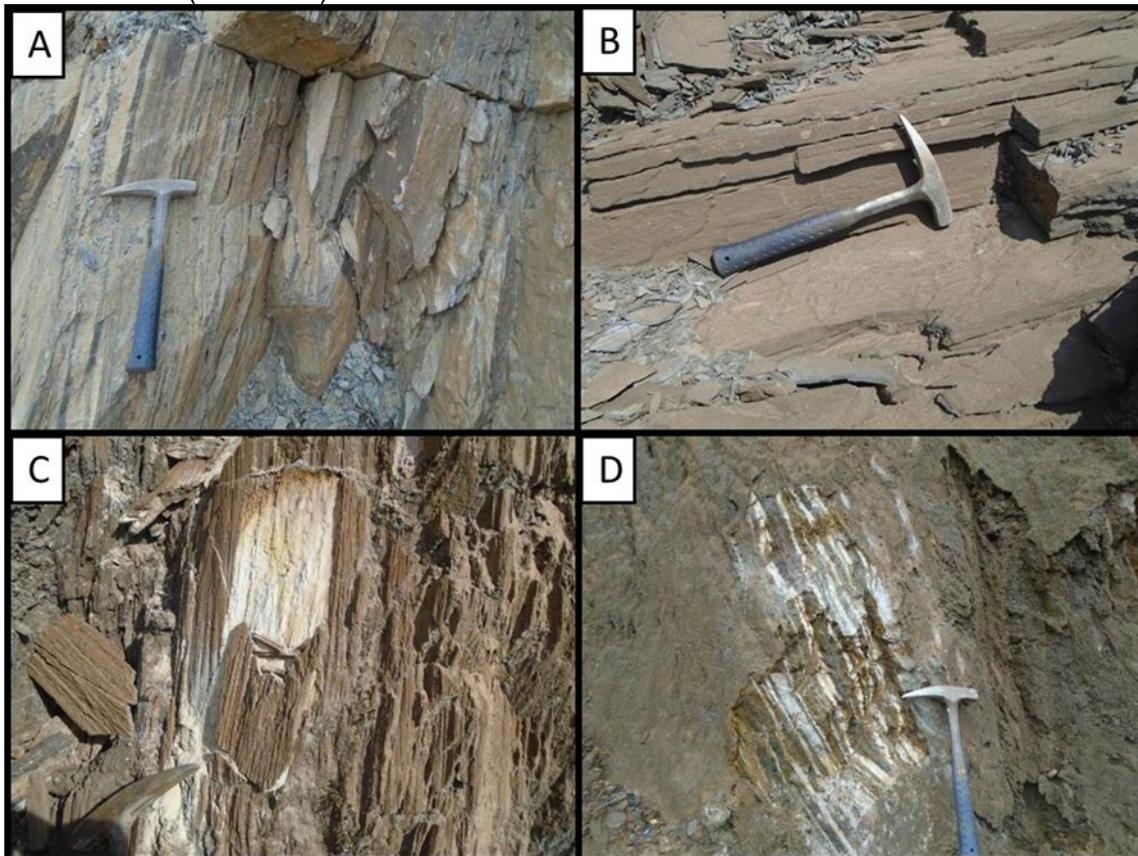
Foram identificadas e mapeadas as seguintes estruturas planares e lineares: bandamento (S_b), foliação (S_n), clivagens (S_{n+1} e S_{n+2}), lineação de interseção (L_i), eixos de dobras (Ex) e fraturas.

Os estereogramas resultantes da compilação dos dados de campo, bem como a descrição das estruturas estão apresentados abaixo. A análise das orientações das estruturas foi realizada como auxílio do programa computacional DIPS, versão 6.0 fornecido pela *Rocscience*®, foi utilizado projeção estereográfica de igual-área (Rede de Schmidt) com projeção do hemisfério inferior e distribuição do contorno pelo método de Fisher.

5.2.1 BANDAMENTO (SB)

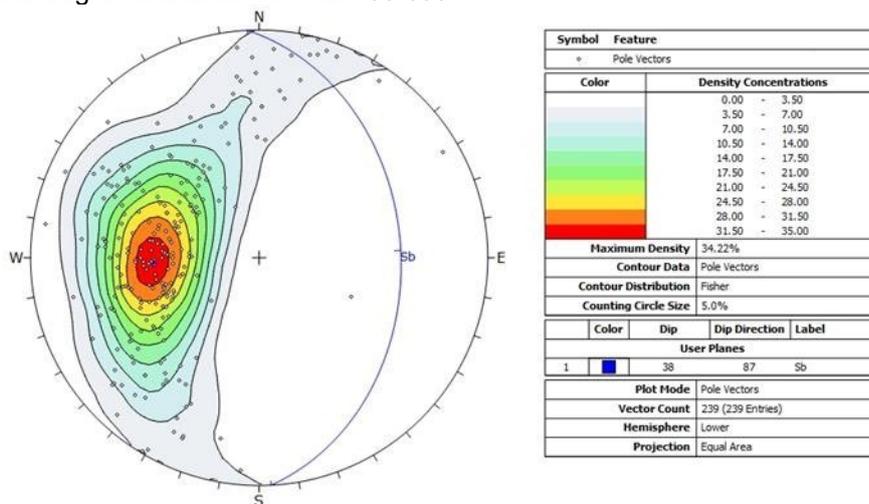
O bandamento é a estrutura mais comum em formações ferríferas, sendo observada em todos os tipos (compacta, média e friável). As bandas de sílica alternam com as bandas de hematitita em escalas de centímetros a decímetros. Nas formações friáveis e médias, a sílica frequentemente se separa das bandas de ferro, levando as camadas mais resistentes de hematitita a deslocar-se em camadas decimétricas (Figura 26). A concentração polar máxima exhibe um plano modal de orientação 087/38 (Figura 27).

Figura 26- (A) Sb em itabirito compacto (Ponto 028); (B) Sb em hematitita compacta (Ponto 035); (C) Sb em itabirito médio com sílica livre e deslocamento das bandas de hematitita (Ponto 605); (C) Sb em itabirito friável (Ponto 491).



Fonte: Autor, 2022.

Figura 27- Estereograma total de Sb. Máx. 087/38.

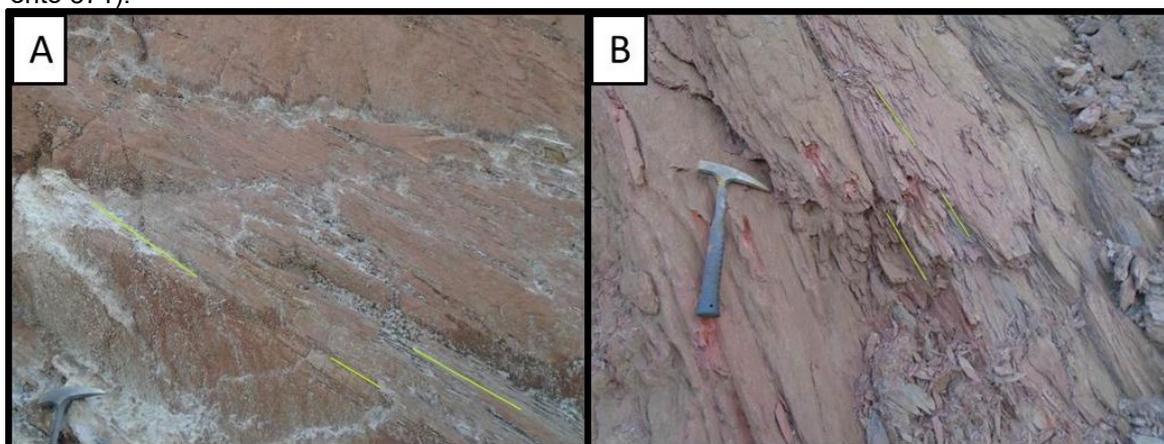


Fonte: Autor, 2022.

5.2.2 FOLIAÇÃO (Sn)

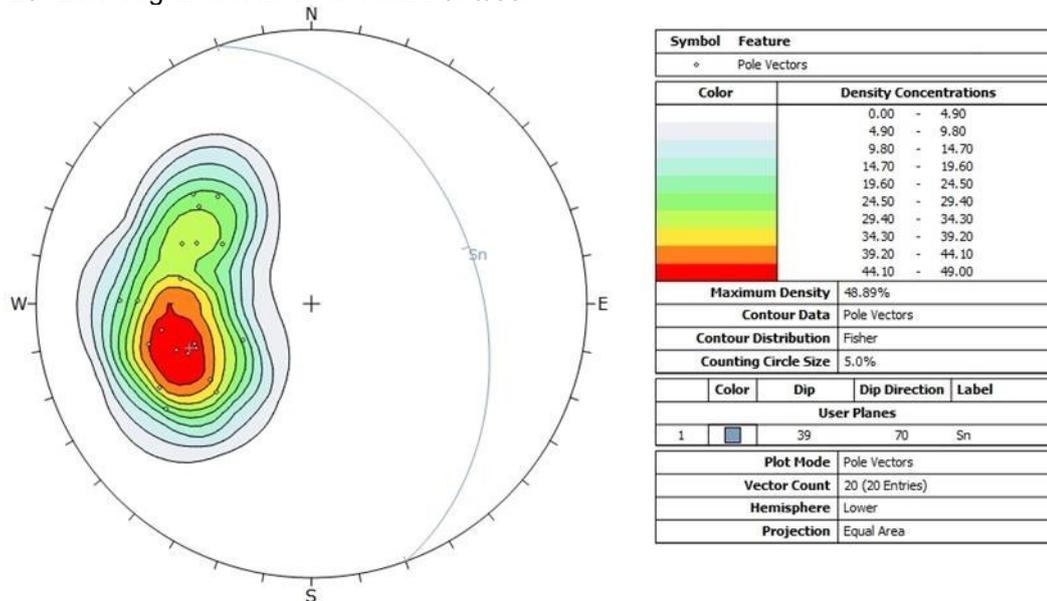
A foliação (Sn), subparalela ao bandamento, foi discriminada nos litotipos filitos, quartzitos e intrusiva, encaixantes das formações ferríferas. Distinguido pela orientação de minerais micáceos e de quartzo (Figura 28). A concentração máxima polar exhibe um plano com orientação 070/39 (Figura 29).

Figura 28- (A) Sn em quartzito compacto (Ponto 310) indicado em amarelo; (B) Sn em filito Piracicaba (Ponto 371).



Fonte: Autor, 2022.

Figura 29- Estereograma total de Sn. Máx. 070/39.

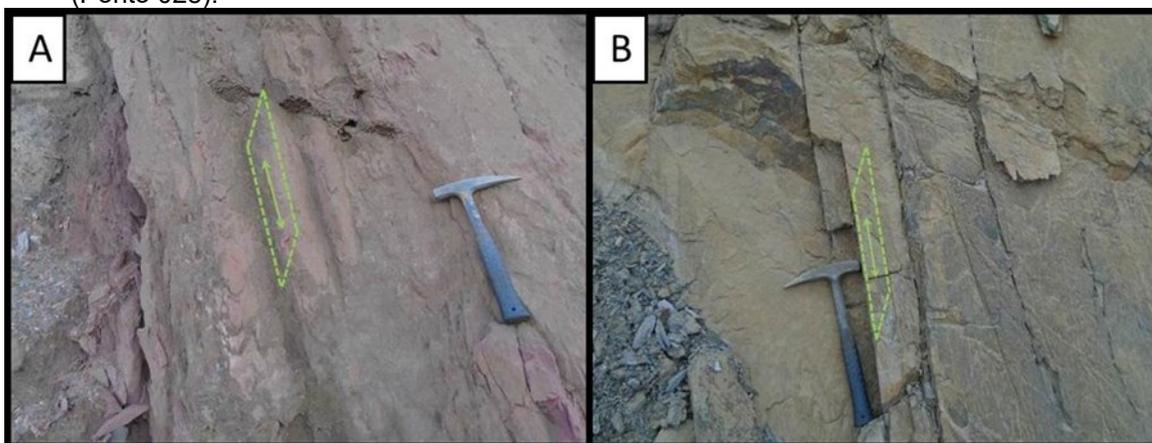


Fonte: Autor, 2022

5.2.3 CLIVAGEM (S_{n+1})

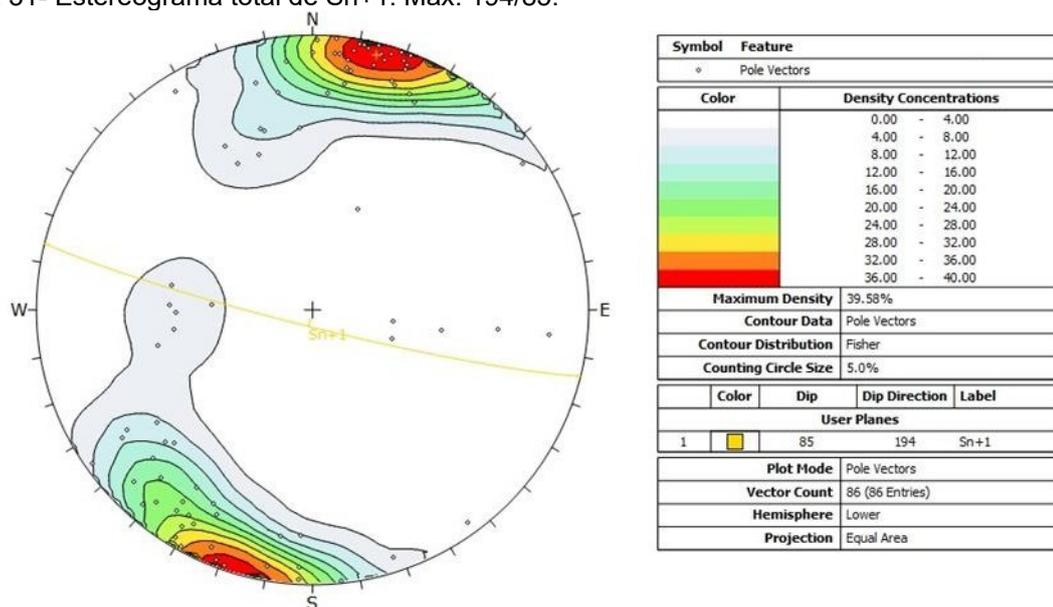
A clivagem S_{n+1} é uma estrutura comumente encontrada nas formações ferríferas médias e compactas e ocorre discretamente nas rochas intrusivas, filitos e quartzitos (Figura 30). Seu plano é sub-vertical e transversal à S_b e juntamente com essas estruturas e a diaclase S_{n+2} , são as principais descontinuidades que condicionam geotecnicamente os taludes da cava. O máximo polar de S_{n+1} mostra um plano com orientação 194/85 (Figura 31).

Figura 30- (A) Plano S_{n+1} no filito Piracicaba (Ponto 371); (b) S_{n+1} em itabirito compacto (Ponto 028).



Fonte: Autor, 2022.

Figura 31- Estereograma total de Sn+1. Máx. 194/85.

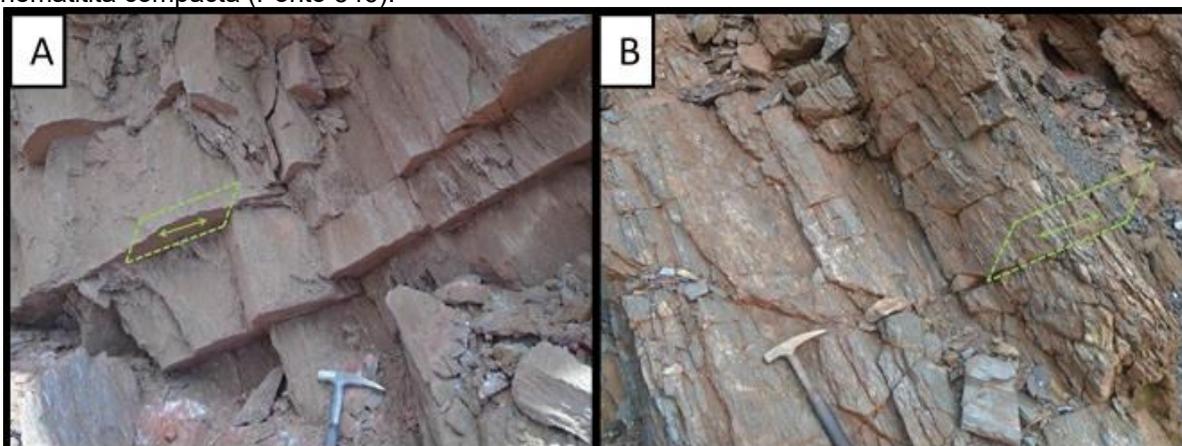


Fonte: Autor, 2022.

5.2.4 DIACLASE (SN+2)

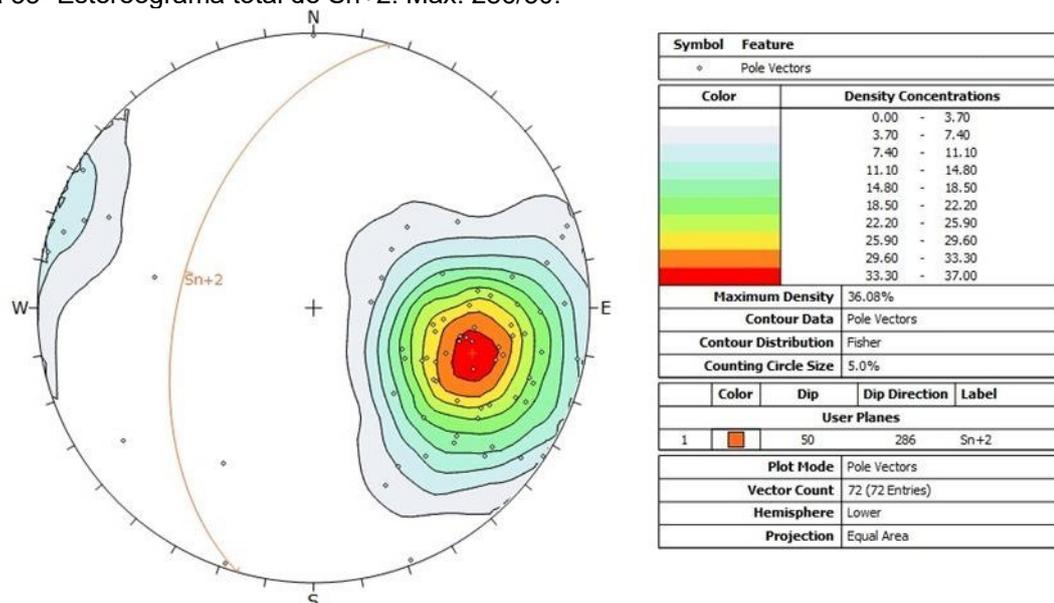
A diaclase Sn+2, sempre muito constante, foi identificada em todos os litotipos médios e compactos da cava (Figura 32). Pode ocorrer sob a forma de planos sub-verticais a verticais, porém com um máximo polar exibindo um plano de atitude 286/50 (Figura 33).

Figura 32- Figura 32 - (A) Diaclase Sn+2 em filito Piracicaba (Ponto 023); (B) Diaclase Sn+2 em hematitita compacta (Ponto 546).



Fonte: Autor, 2022.

Figura 33- Estereograma total de Sn+2. Máx. 286/50.



Fonte: Autor, 2022.

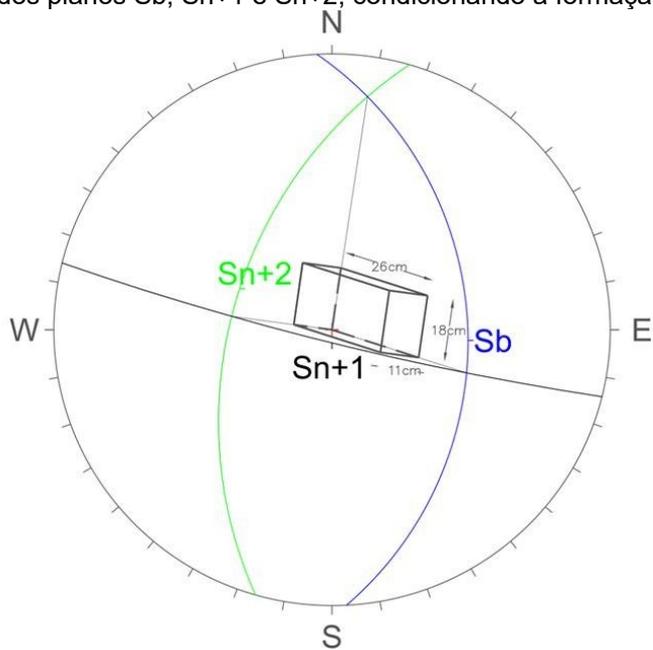
As estruturas Sb, Sn+1 e Sn+2 são as principais descontinuidades encontradas na cava, sendo condicionantes da estabilidade dos taludes em rocha dura. As interseções destes 3 planos formam blocos que são observados principalmente nos litotipos de alta resistência (Figura 34) e estão representados espacialmente na Figura 35, construída utilizando-se o espaçamento médio de cada estrutura (Sb=11cm, Sn+1=18cm e Sn+2=26cm).

Figura 34- Blocos formados pelas interseções dos planos Sb, Sn+1 e Sn+2 em itabirito compacto (Ponto 385).



Fonte: Autor, 2022.

Figura 35- Interseções dos planos S_b , S_{n+1} e S_{n+2} , condicionando a formação de blocos.



Fonte: Autor, 2022.

5.2.5 LINEAÇÃO

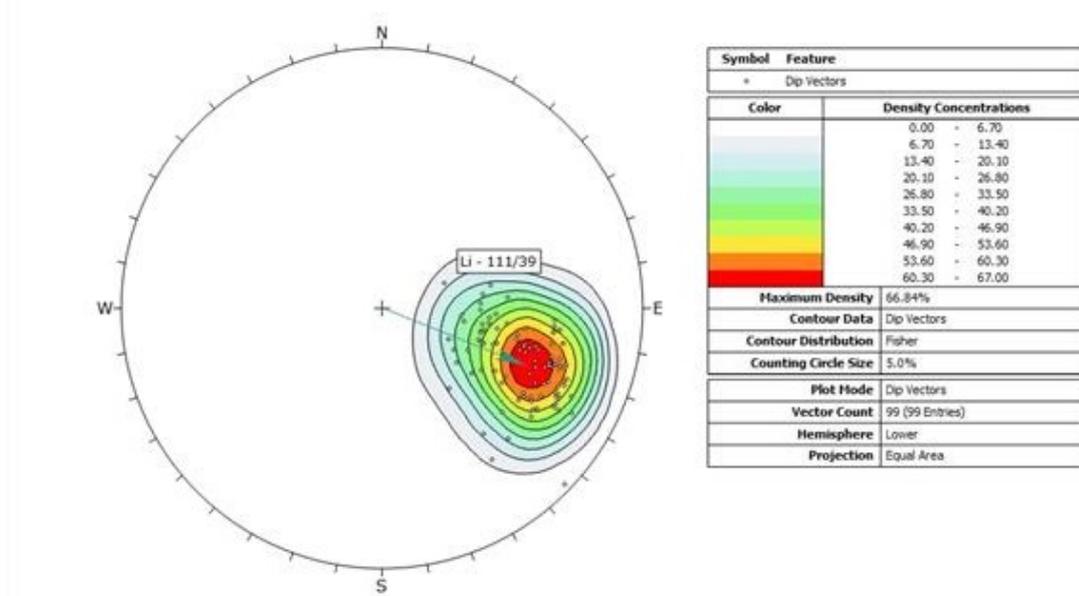
A lineação (Li) ocorre predominantemente nas formações ferríferas, tanto nos tipos friáveis como nos médios e compactos, e menos comumente nas rochas encaixantes estéreis (Figura 36). A estrutura mostrou-se bastante homogênea, exibindo uma concentração polar com caimento 111/39 (Figura 37).

Figura 36- Lineação (Li) em itabirito médio indicado em amarelo (Ponto 577).



Fonte: Autor, 2022.

Figura 37- Figura 37 - Estereograma total de Li. Máx. 111/39.

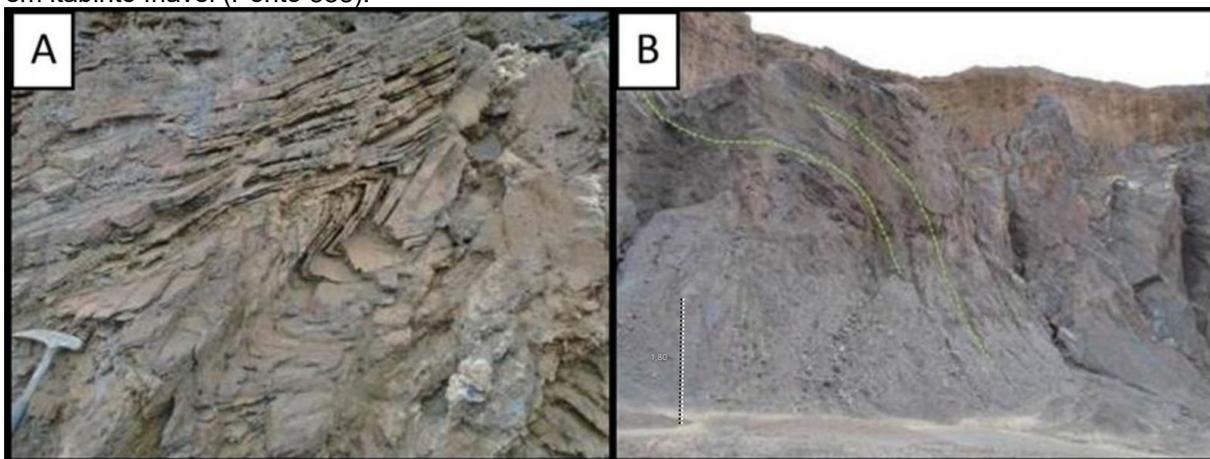


Fonte: Autor, 2022

5.2.6 EIXO DE DOBRA

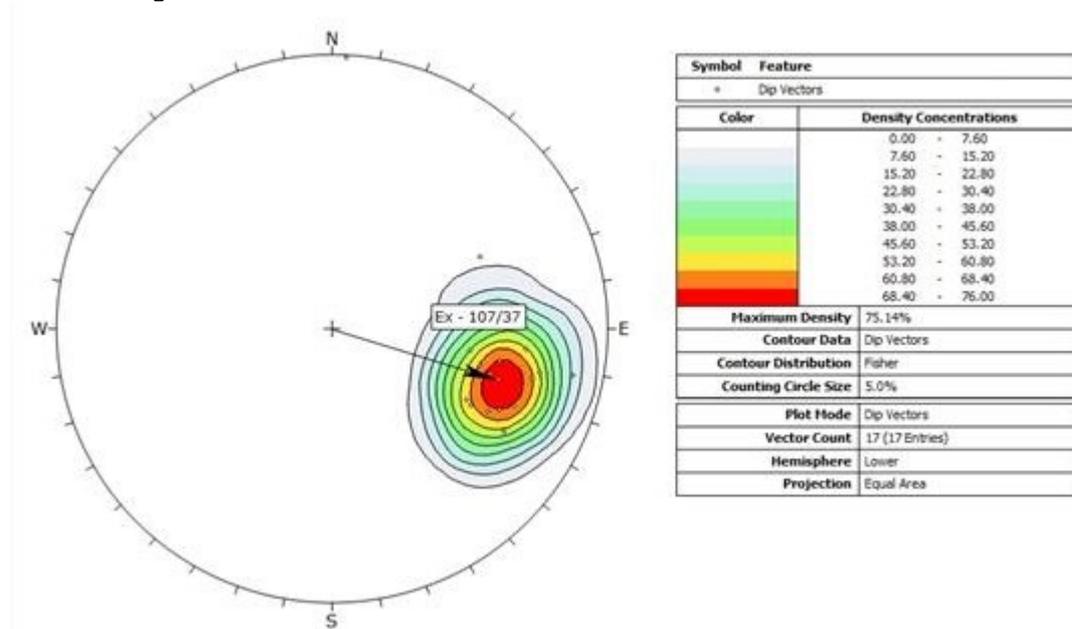
Os eixos de dobras foram medidos principalmente nos litotipos médios, porém dobras diversas foram identificadas nos tipos compactos e friáveis (Figura 38). A concentração polar mostra-se bastante homogênea, exibindo um máximo polar com caimento 107/37 (Figura 39), subparalelo à lineação (Li) e à interseção de S_{n+1} com S_b .

Figura 38- (A) Dobras decimétricas fechadas em itabirito médio (Ponto 377); (B) dobra métrica aberta em itabirito friável (Ponto 388).



Fonte: Autor, 2022.

Figura 39- Estereograma total de Ex. Máx. 107/37.



Fonte: Autor, 2022.

5.2.7 FRATURAS

Duas famílias de fraturas foram identificadas, porém ocorrem pontualmente, com baixa representatividade, tanto no volume de medidas quanto no condicionamento geotécnico dos taludes da cava. A Figura 40 expõem esta estrutura.

Figura 40- Famílias de fraturas identificadas no itabirito médio (Ponto 037).



Fonte: Autor, 2022.

5.3 CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA

De forma a verificar o comportamento predominante dos parâmetros das descontinuidades e do maciço rochoso, foi realizada uma análise estatística dos dados. Para tanto, foram construídos histogramas de frequência para cada parâmetro em função da litologia.

Toda análise estatística a partir dos parâmetros mapeados está descrita a seguir e é apresentada no Apêndice 2.

5.3.1 ITABIRITO FRIÁVEL

O itabirito friável apresenta-se com grau de resistência variando entre rocha branda (R2) e muito branda (R1), sendo o grau R2 encontrado com maior frequência o intemperismo varia entre rocha intensamente alterada (W4) a completamente alterada (W5). Os itabiritos friáveis foram classificados como *weak rock*, já que a natureza do material não permite o levantamento dos parâmetros das descontinuidades, desta maneira, seu comportamento é de um material desagregado.

5.3.2 ITABIRITO MÉDIO

O itabirito médio possui grau de resistência medianamente resistente (R3) e resistente (R4), apresenta grau de intemperismo moderadamente alterado (W3) e intensamente alterado (W4), com poucos casos levemente alterado (W2). O RQD é de 50 a 75% com variações chegando até menor que 25%.

Sb, Sn+1, Sn+2 e fraturas foram identificados no itabirito médio, essas estruturas possuem persistência <1 m, à exceção do bandamento, cuja persistência é >20 m. As aberturas das descontinuidades variam entre parcialmente abertas (0,1-1 mm) a moderadamente largas (1,0-5,0 mm), sem preenchimento, valor de JRC variando entre as faixas 4-6 para S1 e Fr e, 6-8 para Sb e Sn+2 e grau de alteração moderadamente alterada (W3). Os valores de JCS obtidos nas paredes das descontinuidades são coerentes com a resistência do maciço, com UCS variando entre 25-50 e 100-250 Mpa.

5.3.3 ITABIRITO COMPACTO

O itabirito compacto apresenta grau de resistência muito resistente (R5) com situações extremamente resistente (R6) e intemperismo rocha levemente alterada (W2) a sã (W1). O RQD predominante é de 25 a 50 %, apesar de ocorrerem todas as outras faixas de valores, caracterizando o maciço como altamente fraturado.

Sb, Sn+1, Sn+2 e Fr foram identificados no itabirito compacto, o bandamento possui persistência > 20 m, S1 apresenta persistência de 1 a 3 m e o restante das descontinuidades <1 m. A maior parte das descontinuidades apresentam-se com abertura parcialmente aberta (0,1-1 mm), sem preenchimento, JRC variando entre todas as faixas de valores, com concentrações entre 4-6 e 6-8 e alteração das paredes levemente alteradas (W2). Os valores de JCS medidos são compatíveis com a resistência do maciço em rocha sã (R5 e R6), com UCS variando entre 100-250 a >250 MPa.

5.3.4 HEMATITITA FRIÁVEL

A hematitita friável apresenta grau de resistência rocha muito branda (R1) a branda (R2), similar ao itabirito friável, a hematitita é caracterizada com grau de resistência R2. O intemperismo está entre completamente alterada (W5) e intensamente alterada (W4). Trata-se de um litotipo classificado no universo *Weak Rock*.

5.3.5 HEMATITITA MÉDIA

A hematitita média apresenta-se tanto com grau de resistência medianamente resistente (R3) quanto resistente (R4) e grau de intemperismo moderadamente alterada (W3) e intensamente alterada (W4). A hematitita média engloba todas as faixas de RQD, sendo um litotipo com variado grau de fraturamento, de moderado a muito alto.

Sb, S1 e S2 foram identificadas na hematitita média, o bandamento possui persistência >20 m e o restante <1m. As descontinuidades possuem abertura moderadamente largas (1-5 mm), são sem preenchimento, JRC com concentração na faixa 8-10 e alteração variando entre muito alterada (W4) a moderadamente alterada (W3).

5.3.6 HEMATITITA COMPACTA

A hematitita média apresenta grau de resistência muito resistente (R5) e extremamente resistente (R6), com ocorrências de rocha resistente (R4). O intemperismo varia entre rocha sã (W1), levemente alterada (W2) e moderadamente alterada (W3). O RQD predominante é de 90 a 100 %, possuindo também casos que abrangem as outras faixas de valores.

Sb, Sn+1, Sn+2 e Fr ocorrem na hematitita compacta, Sb possui persistência >20 m, Sn+1 com 1 a 3 m e o restante <1 m. As descontinuidades apresentam abertura parcialmente aberta (0,1-1 mm), não possuem preenchimento e as paredes com JRC com concentrações entre as faixas 4-6, 6-8 e 8-10 e, são em sua maioria sem alteração (W1). O JCS medido nas paredes das descontinuidades são coerentes com a alta resistência do maciço, com valores de UCS >250 MPa.

5.3.7 FILITO

Os filitos possuem grau de resistência predominante de rocha branda (R2), variando entre rocha extremamente branda (R0) até rocha resistente (R4), identificada no filito Piracicaba. O grau de intemperismo é majoritariamente intensamente alterado (W4), variando entre completamente alterado (W5) e moderadamente alterado (W3).

A maior parte dos filitos é classificada dentro do universo *Weak Rock*, em que a rocha se encontra desagregada, porém ocorrem casos em que o RQD varia entre faixas de valores de 25 a 50% e 50 a 75%. Sn, Sn+1 e Sn+2 foram identificadas no Filito Piracicaba, a foliação possui persistência >20 m, Sn+1 varia entre 1 e 3 m e <1 m e Sn+2 tem persistência <1 m.

As descontinuidades possuem abertura parcialmente aberta (0,1-1 mm), são sem preenchimento, JRC variando entre as faixas 0-2 e 4-6 e tem a parede da foliação e Sn+1 muito alterada (W4) e de Sn+2 moderadamente alterada (W3). Os valores de JCS medidos são compatíveis com a baixa resistência e maior grau de alteração do maciço, com valores de UCS na faixa de 0-25 MPa.

5.3.8 QUARTZITO

Os quartzitos apresentam boa variabilidade de grau de resistência, sendo a maior parte composta por rocha extremamente branda (R0), porém passando por todos os outros graus até muito resistente (R5). Da mesma maneira, o grau de intemperismo é bem variado, predominando a rocha completamente alterada (W5), mas passando por todas as outras faixas de intemperismo menos acentuado, chegando até levemente alterada (W2). Os quartzitos mapeados variam entre friáveis até compactos, desta maneira, encaixam-se no universo *Weak Rock* para os friáveis e possuem valor de RQD de 75 a 90% para os compactos.

Nos quartzitos compactos onde foram possíveis o levantamento dos parâmetros de estruturas, foram identificadas foliação S_n e as clivagens S_{n+1} e S_{n+2} . A foliação possui persistência >20 m e as clivagens entre 1 até 3 m e <1 m. As aberturas estão entre parcialmente abertas (0,1-1 mm) a moderadamente largas (1-5 mm), as discontinuidades em sua grande maioria não possuem preenchimento, têm JRC com valores 0-2 e 6-8 e apresentam-se muito alteradas (W4).

5.3.9 INTRUSIVA

A rocha intrusiva apresenta grau de resistência rocha branda (R2) a extremamente branda (R0) e grau de intemperismo intensamente alterada (W4) a completamente alterada (W5). Apresenta-se como material desagregado.

Classificação do maciço

O mapa geomecânico foi elaborado conforme procedimento explicitado no item de metodologia (3.3), sendo composto pelos universos RMR e *weak rock*. Os dados do mapeamento de campo foram processados de forma a determinar os valores de RMR para cada ponto levantado.

Posteriormente, foi realizada uma interpolação dos valores obtidos e delimitadas regiões de acordo com as faixas de valores propostas por Bieniawski, agrupando-se, dessa forma, regiões com comportamentos geomecânicos similares.

Da mesma maneira, os pontos pertencentes ao universo *weak rock* foram interpolados a partir dos valores de resistência (R) levantados. Em regiões onde não houve coleta de dados, foram utilizadas técnicas de interpolação para obtenção dos valores. As classes de maciço e as faixas de valores correspondentes estão apresentadas no Quadro 4. Os intervalos do universo *weak rock* considerados estão apresentados no Quadro 5.

Quadro 4 - Classes de maciço segundo o critério do RMR de Bieniawski.

Universo RMR		
Classe de Maciço	Descrição	Faixas de RMR
V	Maciço Muito Pobre	$RMR \leq 20$
IV	Maciço Pobre	$21 < RMR \leq 40$
III	Maciço Regular	$41 < RMR \leq 60$
II	Maciço Bom	$61 < RMR \leq 80$
I	Maciço Muito Bom	$81 < RMR \leq 100$

Fonte: Bieniawski, 1989.

Quadro 5 - Classe de maciço do universo *weak rock*.

Universo <i>Weak Rock</i>		
Descrição	Resistência (R)	Resistência a compressão uniaxial (Mpa)
<i>Extremely Weak</i>	R0	0,25 a 1
<i>Very Weak / Weak</i>	R1 / R2	1 a 10

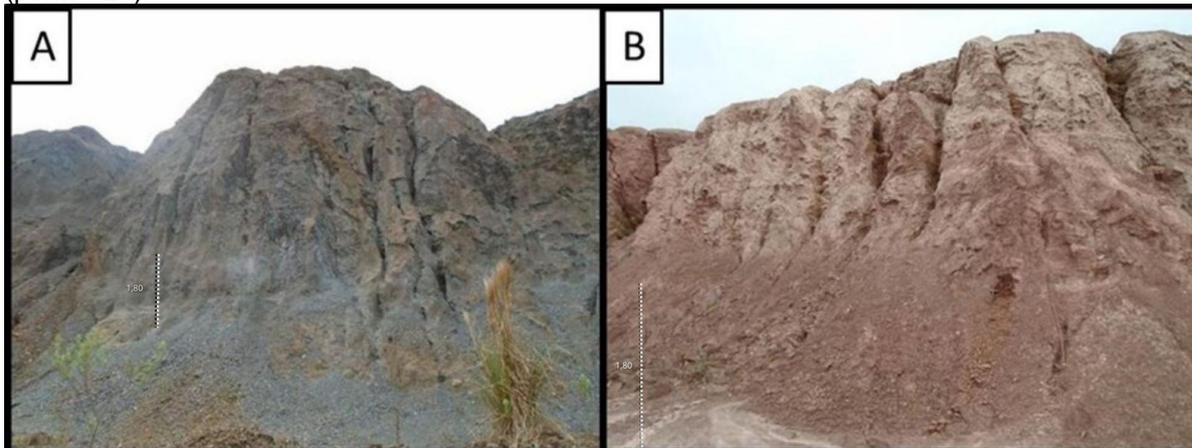
Fonte: Martin & Stacey 2018

Como produto da classificação e delimitação das áreas de comportamento geomecânico similares foi gerado o mapa geomecânico da cava, sendo apresentado no Apêndice 3.

A classe *very weak / weak rock* é a predominante na cava, associada aos tipos friáveis das formações ferríferas, a maior parte dos filitos e a rocha intrusiva, majoritariamente em maciços de resistência R2. (Figura 41). Corpos de menores proporções, até 120 m de extensão de maior eixo, da classe *extremely weak rock* (R0)

ocorrem dispersamente pela cava, principalmente próximos a borda leste. Outra tipologia de maiores extensões é a de solos lateríticos, associada aos colúvios e aterros encontrados na cava.

Figura 41 - (A) Classe *very weak / weak rock* em itabirito friável R2 (ponto 061); (B) e em filito R2 (ponto 320).

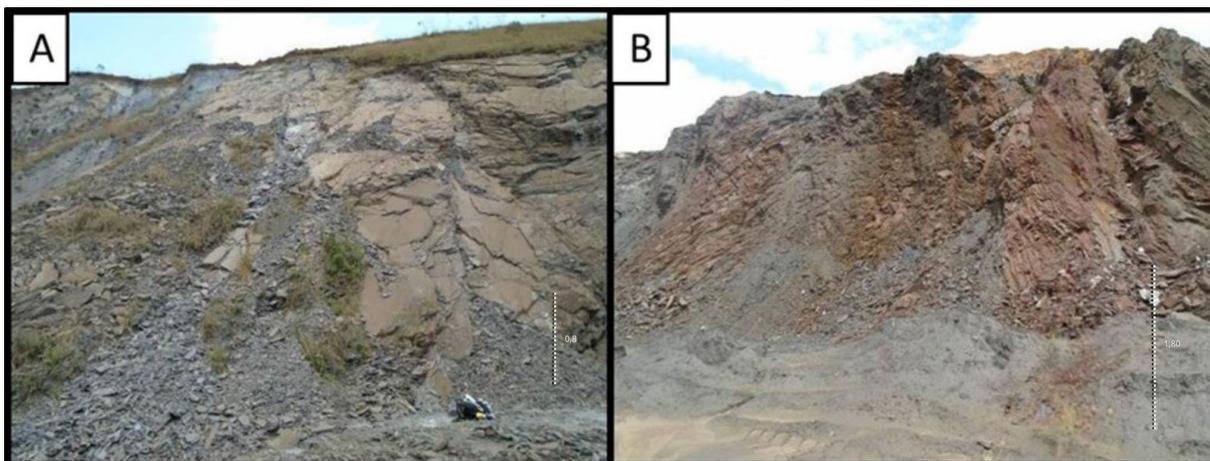


Fonte: Autor, 2022.

Já as classes geomecânicas obtidas pelo cálculo do RMR, estão associados aos litotipos médios e compactos. Ocorrem como lentes em meio ao material *weak rock*, sendo a classe de maior expressividade a Classe III. Majoritariamente relacionada com itabiritos médios e geralmente apresentando alto a muito alto grau de fraturamento, podendo também estar associada a tipos compactos (Figura 42).

Ocorre ainda uma pequena lente desta classe associada ao filito Piracicaba, que apresenta um grau de resistência mais elevado em relação ao comumente encontrado nos filitos. A rocha intrusiva apresenta um importante corpo de Classe III na porção oeste, local onde ocorre o maior representante desta rocha.

Figura 42 - (A) Maciço Classe III em itabirito médio (ponto 037) (B) em itabirito compacto (381).

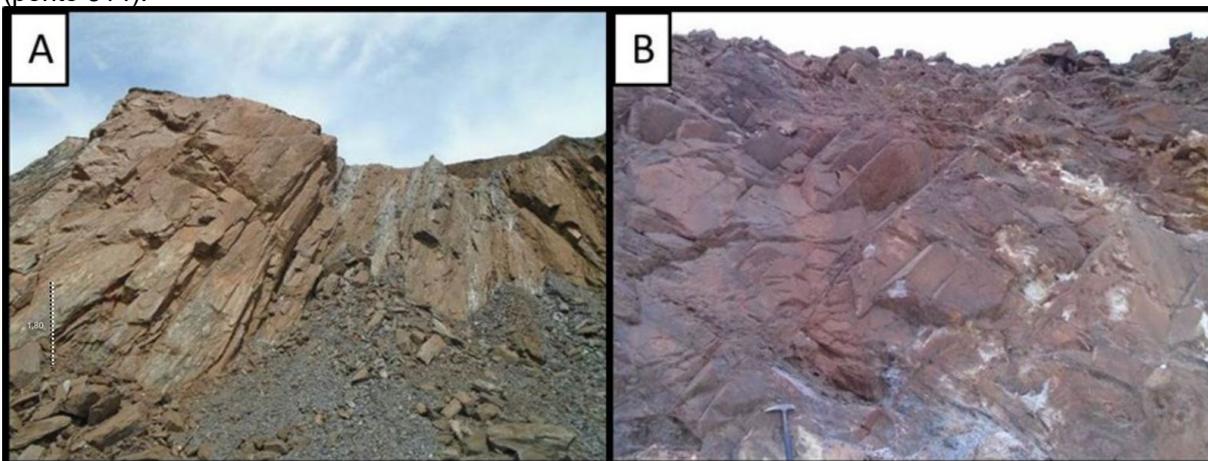


Fonte: Autor, 2022

Em menor quantidade, porém dimensões ainda representativas (300 m de extensão) ocorrem corpos de material classe IV, associadas aos itabiritos médios, principalmente àqueles que possuem grau de fraturamento muito alto. Não menos importante, lentes pontuais de filito classe IV ocorrem na porção nordeste da cava, juntamente com um expressivo corpo alongado de rocha intrusiva, nesta região, filito e intrusiva apresentam grau de resistência de rocha branda (R2) e grau de fraturamento muito alto.

A classe II, classe de melhor qualidade geomecânica, está associada majoritariamente aos litotipos compactos, apesar de ocorrerem ainda em tipos médios com maior grau de resistência (R4) que apresentam grau de fraturamento alto e moderado (Figura 43).

Figura 43 - (A) Maciço classe II em itabirito compacto (ponto 211) (B) em quartzito compacto (ponto 314).



Fonte: Autor, 2022

As classes V e I não ocorrem na cava, mesmo com presença de maciços com resistência 6, devido principalmente ao grau de faturamento

6 CONCLUSÃO

A partir do mapeamento realizado e dos estudos efetuados a partir dos dados coletados, conclui-se que:

- A cava é composta predominantemente por itabiritos friáveis, com baixo grau de resistência (R1 e R2), classificados como *very weak / weak rock*. Isto é refletido na conformação atual dos bancos da cava, os quais se apresentam, em diversas áreas, com erosões que cortam mais de um talude de altura e algumas dezenas de metros de largura (impedindo o acesso às bermas), causadas por efeito de ações intempéricas geodinâmicas externas;
- A divisão das rochas brandas pode ser refinada com a adoção da classificação do universo *Weak Rock*, com o levantamento em campo das nuances R1-, R1+, R2- e R2+, uma vez que neste mapeamento não foi utilizada esta metodologia.
- Os outros litotipos mapeados (formações ferríferas médias e compactas e intrusiva) ocorrem majoritariamente em forma de lentes e corpos em meio ao itabirito friável, com dimensões que chegam até 300 m de comprimento de maior eixo, à exceção dos filitos e quartzitos que ocorrem como encaixante nas bordas leste e oeste da cava.
- A principal estrutura geológica-geotécnica é o bandamento Sb, que possui direção geral N-S e mergulho para E. A inflexão desta estrutura permite identificar guirlandas cujo eixo são os eixos das dobras que afetam parte da cava e refletem a geologia estrutural regional, Estes eixos possuem direção WNW-ESE e mergulham para E, em zonas de charneiras com maior concentração de dobramentos e em litotipos médios, ocasionam maior grau de fraturamento no maciço, como na porção centro-oeste. A estrutura Sn+1 é paralela ao plano axial dos dobramentos e juntamente com o descascamento Sn+2, de direção NNE-SSW, e o Sb//Sn definem a forma e tamanho dos blocos que se rompem em tipologias médias e compactas.

- Os contatos entre as tipologias friáveis, médias e compactas da formação ferrífera são bruscos e por vezes ocorre paralelamente ao bandamento, não sendo regra geral, fazendo com que algumas lentes dos corpos médios e compactos tenham a mesma direção de tal estrutura.
- As encaixantes, tanto à leste quanto oeste, possuem contato com as formações ferríferas subparalelo ao bandamento/foliação.
- As classes de maciço II, III e IV ocorrem como lentes e corpos em meio ao itabirito friável (*weak rock*), sendo destas, a classe IV a mais representativa, ocorrendo em tanto nas formações ferríferas como nos quartzitos, filito e intrusiva.
- O filito Piracicaba (oeste) difere-se do filito indiviso (leste) principalmente por possuir grau de resistência mais alto, ocorrendo porções com grau R4. Isso reflete no comportamento geomecânico desta rocha, apresentando planos de descontinuidades bem definidos, os quais podem desenvolver planos de fraqueza formando “lascas”, blocos definidos por S_n , S_{n+1} e S_{n+2} , ou nos contatos com as formações ferríferas. Já o filito indiviso apresenta comportamento de rocha branda, pertencendo ao universo *weak rock*.
- As bordas da cava onde ocorrem contatos de rochas friáveis estéreis com a formação ferrífera e com as pilhas de estéril, merecem maior atenção no que tange aos aspectos geotécnicos, já que rupturas de grande porte foram observadas nestas regiões.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKMIM F. F. & MARSHAK S., 1998. *Transamazonian orogeny in the Southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in Quadrilátero Ferrífero*. *Precambrian Research*, 90: 29-58.

ALMEIDA L. G., CASTRO P.T. A., ENDO I., FONSECA M. A., 2005. O Grupo Sabará no Sinclinal Dom Bosco: Uma Revisão Estratigráfica. *Revista Brasileira de Geociências*, 35 (2): 177-186.

ALMEIDA, F. F. M. 1967. Origem e evolução da plataforma brasileira. DNPM.

Assis, A.P. 2003. Mecânica e engenharia de rochas. curso avançado. In: G. APAA002/03. Universidade de Brasília - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / FT - Geotecnia.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL (ABGE). *Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE, 1998. 586 p.

BABINSKI M.; CHEMALE F. JR.; SCHUMUS W. R., 1991. Geocronologia Pb/Pb em rochas carbonáticas do Supergrupo Minas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Congresso brasileiro de geoquímica, 3. São Paulo. Anais São Paulo, SBGq. 2, p.628-630.

BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. 1974. *Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support*, v. 6, p. 189-236. ieni, G., Brotzu, P., Comin-Chiaramonti, P, Ernesto, M., Melfi, A.J., Pacca, I.G., Piccirillo, E.M. 1984. *Flood Basalt to Rhyolite Suites in the Southern Paraná Plateau (Brazil): Paleomagnetism, Petrogenesis and Geodynamics Implications*. In: *Journal of Petrology* 25(3): 579-618.

BARTON, N.R. and CHOUBEY, V. *The shear strength of rock joints in theory and practice*. *Rock Mech.* 10(1-2), 1-54, 1977.

BELLIENI, G., Comin-Chiaramonti, P, Marques, L.S, Melfi, A.J., Nardy, A.J.R., Papatrechas, C., Piccirillo, E.M., Roisemberg, A., Stolfa, D. 1986. *Petrogenetic Aspects of Acid and Basaltic Lavas from the Paraná Plateau (Brazil): Geological, Mineralogical and Petrochemical Relationships*. *Journal of Petrology*, 27(4): 915-944.

Bieniawski, Z. T. 1989. *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering*. 272 p.

BIENIAWSKI, Z. T. *Engineering rock mass classification*. New York: John Wiley. 248p, 1989.

BROWN, E. T. 1983. *Suggested method for rock characterization testing and monitoring*, In: *International Society for Rock Mechanics*, ISRM. Pergamon Press, 211p.

DEERE, D. U. A. J; Hendron, J. R; Patton, F.D; Cording, E. J. 1967. *Design of surface and near surface construction in rock*. In *failure and breakage of rock*. C. Fairhurst ed. *Society of Mining Engineers of AIME*, New York, p. 237-302

DEERE, D.U. 1968. *Geological Considerations."* *Rock Mechanics in Engineering Practice*. Staff, R.G. and Zienkiewicz, D.C. (eds.), 1-20. New York, New York: John Wiley Publishing.

DORR J.V.N. 1969. *Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. *US Geological Survey Professional Paper*. 110:641.

ENDO, I. & MACHADO, R. 2002. Reavaliação e novos dados geocronológicos (Pb/Pb e K/Ar) da região do Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, Minas Gerais. Tese de Doutorado, Inst. Geoc. USP. 328 p.

FRANCA, P., Costa, T., & Stacey, P. (2018). *Soft Iron Ores and Other Leached Rocks*. Em D. Martin, & P. Stacey (Eds.), *Guidelines of Open Pit Slope Design in Weak Rocks* (p. 367). Australia: Csiro.

GUERRA, g.j.z. (2011). *Caracterização Geomecânica de Maciços Rochosos Intemperizados*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-191/11, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 186 p.

HOEK, E. 1994. *Strength of rock and rock masses*, ISRM News Journal, 2(2): 4-16.

HUDSON, J. A. 1989. *Rock mechanics principles in engineering practice*. [s.l]. *CIRIA Ground Engineering Report*, Butterworths, p.72.

HUDSON, J. A.; Harrison, J. P. 1997. - *Engineering Rock Mechanics: an introduction to the principles* - 1ªed, Pergamon. 896 p.

Jaques, D. S. 2014. Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos da Mina de Volta Grande, Nazareno, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Viçosa. 154 p.

LANA C., ALKMIN F. F., ARMSTRONG R., SCHOLZ R., ROMANO, R. NALINI, H. A., 2013. *The ancestry and magmatic evolution of Archean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil. Precambrian Research*, 231, p. 157-173.

LIMA, E.F., Philipp, R.P, Rizzon, G.C., Waichel, B.L., Rossetti, L.M.M. 2012. Sucessões vulcânicas e Modelo de Alimentação e Geração de Domos de Lava Ácidos da Formação Serra Geral na Região de São Marcos-Antônio Prado (RS). *Revista Geologia da USP, Série Científica*, 12: 49-64.

MACHADO N.; NOCE C. M.; OLIVEIRA O. A. B. DE; LADEIRA, E. A. 1989., Evolução geológica do Quadrilátero Ferrífero no Arqueano e Proterozóico Inferior, com base em geocronologia U-Pb. In: Simpósio Geologia Minas Gerais e Simpósio Geologia Brasília, Belo Horizonte, 1989. Anais Belo Horizonte, SBG/NMG. p.1-5.

MAIA, J.A.C. 2003. Métodos probabilísticos aplicados à estabilidade de taludes e cavidades em rocha. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília - DF, 196 p.

MANTOVANI, M.S.M., Marques, L.S. Sousa, M.A., Civetta, L., Atalla, L., Innocenti, F. 1985. *Trace element and strontium isotope constraints on the origin and evolution of Paraná continental flood basalts of Santa Catarina State, southern Brazil. Journal of Petrology*, 26: 187-209.

MARINOS, P. & Hoek, E. 2000. *From the Geological to the Rock Mass Model: Driving the Egnatia Highway through difficult geological conditions, Northern Greece. In: 10th International Conference of Italian National Council of Geologists: The fragile territory, Research and application on Hydrogeological disarray in the world, forecasting-prevention-mitigation*, p. 325-334

MARINOS, P. AND HOEK, E. 2000. *GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In: Proceedings of the GeoEng2000 at the international Conference on geotechnical and geological engineering, Melbourne, Technomic publishers, Lancaster*, pp. 1422-1446.

NAVARRO, F.C. 2002. Caracterização Petrográfica como técnica para a previsão do comportamento físico e mecânico de “granitos” ornamentais. Dissertação de Mestrado IGCE/UNESP, Rio Claro, SP. 88p.

PALMSTROM A., 1982. *The volumetric joint count - A useful and simple measure of the degree of rock mass jointing*. In: IAEG Congress, New Delhi. p. 228.

PALMSTROM, 2005. *Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD)*. *Tunneling & Underground Space Techn.*, 20, p. 362-377.

PARKER, H.W. (2004a). *Planning and site investigation in tunneling*. In: I Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas e Seminário Internacional “South American Tunnelling”. CBT/ABMS, São Paulo, SP.

PETRI, S.; Fúlfaro, J. V. 1984. *Geologia do Brasil: Fanerozóico*. São Paulo: EDUSP, 631p.

POLO, L. A. & Janasi, V.A. 2014. *Volcanic stratigraphy of intermediate to acidic rocks in southern Paraná Magmatic Province, Brazil*. *Revista Geologia USP, Série Científica*, 14 (2): 83-100.

PRIEST, S. D.; Hudson, J. A. 1976. *Discontinuity Spacings in Rock*. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 13(5): 135-148.

ROCSCIENCE INC. 2012, Dips Version 6.0 - Graphical and Statistical Analysis of Orientation Data. Toronto, Ontario, Canada.

TEIXEIRA W., SABATÉ P., BARBOSA J., NOCE C. M., CARNEIRO M. A., 2000. *Archean and Paleoproterozoic evolution of the São Francisco Craton*. In: Cordani U. G., Milani E. J., Thomas Filho A., Campos D. A. (Eds). *Tectonic Evolution of South America. XXXI International Geological Congress, Rio de Janeiro, Brazil*, p. 101-137.

ULUSAY, Reşat (Ed.). 2007. *The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring*. Springer, 306 p.

8 APÊNDICE

APÊNDICE I – BASE DE DADOS DE MAPEAMENTO

APÊNDICE II – AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS DO
MACIÇO ROCHOSO E DAS DESCONTINUIDADES

9 ARTIGO CIENTÍFICO

ELABORAÇÃO E VALIDAÇÃO DE BANCO DE DADOS DE SONDAGEM E CONSTRUÇÃO DE UM MODELO GEOMECÂNICO DE UMA CAVA DO QUADRILATERO FERRIFERO

PREPARATION AND VALIDATION OF A DRILLING DATABASE AND CONSTRUCTION OF A GEOMECHANICAL MODEL IN OPEN PIT MINE QUADRILATERO FERRÍFERO

ORLANDO FARIA PRADO¹

MURILO DA SILVA ESPÍNDOLA²

CRISTIAN NUNES ESTEVAM³

RESUMO

O gerenciamento seguro e eficiente de operações de mineração a céu aberto é um desafio, que pode ser potencializado por inconsistências em dados geomecânicos. Propriedades geomecânicas são indispensáveis para o conhecimento de rochas e solos e, devido ao crescente volume de dados e informações gerados em cada empreendimento mineral e a quantidade de equipes envolvidas durante campanhas de sondagens, é necessário realizar a validação destes dados. A validade dos dados é fundamental para a produção de modelos tridimensionais acurados e, analisar a validade dos dados é uma lacuna corriqueira em projetos geomecânicos. Este estudo visa abordar essa lacuna, focando na avaliação da consistência de um banco de dados geomecânicos, sua validação e análises. Utilizando dados de uma mina brasileira, agora inativa, aplicamos critérios de classificação geomecânica para criar um modelo tridimensional geomecânico de uma cava hipotética. A metodologia empregada envolveu a correlação de parâmetros geomecânicos e a aplicação de critérios de classificação como o Rock Mass Rating (RMR) e o Weak Rock. Os resultados indicam uma melhoria significativa na precisão dos modelos geomecânicos com a adoção de variáveis proxy correlacionadas, o que contribui para a operação de minas mais seguras e eficientes. Este trabalho serve como um guia para a integração de dados geomecânicos em modelos 3D, contribuindo para futuras pesquisas e aplicações práticas na indústria de mineração.

Palavras-chave: propriedades geomecânicas; banco de dados geomecânico; validação; modelo geomecânico tridimensional.

ABSTRACT

¹ Geólogo, Pós-Graduando em Geologia pela UFSC. E-mail: orlandoprado.geologia@gmail.com

² Engenheiro, Doutor em Engenharia Civil pela UFSC. E-mail: murilo.espindola@ufsc.br.

³ Geólogo, Pós-Graduando em Geociências pela USP. E-mail: cristian.estevam@usp.br

The safe and efficient management of open-pit mining operations is a challenge, potentially intensified by inconsistencies in geomechanical data. Geomechanical properties are crucial for understanding rocks and soils. Due to the rising volume of data and information generated in each mining project, and the multiple teams involved during drilling campaigns, data validation is essential. The data's validity is key for creating exact three-dimensional models. Analyzing this validity is a common gap in geomechanical projects. This study aims to fill this gap by evaluating the consistency of a geomechanical database, its validation, and analyses. Using data from a now-inactive Brazilian mine, we applied geomechanical classification criteria to create a 3D geomechanical model of a hypothetical pit. The method involved correlating geomechanical parameters and applying classification criteria like the Rock Mass Rating (RMR) and Weak Rock. The results show a significant improvement in the accuracy of geomechanical models with the use of correlated proxy variables. This contributes to safer, more efficient mining operations. This work serves as a guide for integrating geomechanical data into 3D models, aiding future research and practical applications in the mining industry.

Keywords: geomechanical; drilling; data base; model; classification

INTRODUÇÃO

O estudo geomecânico de cavas é fundamental para garantir a segurança e eficiência das operações de mineração a céu aberto. O maciço que contém o depósito mineral sofre alteração durante o processo de lavra (Braga Neto, 2020), que implicam na contínua mudança das características geomecânicas. É claro inferir que a caracterização das propriedades geológicas e geotécnicas, que abrange os estudos relacionados à descrição geológica do maciço e o levantamento dos parâmetros geotécnicos deste, são fundamentais para garantir a seguridade operacional. É importante destacar ainda, que a utilização de modelos geomecânicos vem sendo construída há anos por pesquisadores e profissionais na indústria do petróleo, porém ainda são incipientes os trabalhos no âmbito da mineração.

A elaboração de modelos geomecânicos requer o levantamento de dados e informações acerca das propriedades geológicas e geotécnicas de uma área. Geralmente o levantamento de dados é realizado por diversas equipes, o que pode resultar em inconsistências nos parâmetros de descrição, que são posteriormente incorporadas aos modelos. O agrupamento destes dados e informações em banco de dados e elaboração de modelos tridimensionais vem sendo cada vez mais discutida no meio técnico e acadêmico como nos trabalhos de Hammah & Curran (2006), Vatcher *et. al.* (2016), Kring & Chatterjee (2020), Liu *et. al.* (2021) e Aquino *et. al.* (2021).

Com o avanço das tecnologias de coleta de dados e modelagem 3D, torna-se cada vez mais importante compilar, validar e analisar os dados e informações gerados durante a operação de uma mina. Neste sentido, buscou-se avaliar a consistência dos dados de um projeto de mineração e elaborar um modelo geomecânico tridimensional, que represente a mina, através de banco de sondagens contendo descrições geomecânicas dos testemunhos. As classes geomecânicas aqui estudadas derivam dos trabalhos de referência do *Rock Mass Rating* - RMR de Bieniawski (1993) e do *Weak Rock* (Martin & Stacey 2018).

O objetivo desta pesquisa é a elaboração e avaliação da consistência de um banco de dados, analisando a correlação dos parâmetros geomecânicos correlacionáveis e aplicando critérios de classificação geomecânica, obtendo-se trechos de classe geomecânica em furos de sondagem, que subsidiaram a elaboração de um modelo tridimensional geomecânico de uma cava hipotética.

A base de dados utilizada é oriunda de uma mina brasileira que teve sua operação encerrada e devido ao sigilo imposto pelos proprietários do negócio, ainda vigente, é tratada aqui como uma cava hipotética.

MATERIAIS E MÉTODO

Para alcançar o objetivo proposto esta pesquisa foi dividida em três fases que contemplam a i) compilação, organização e validação do banco de dados espacial, ii) elaboração de seções de resistência mecânica das rochas, grau de alteração e seções geomecânicas e iii) elaboração do modelo geomecânico após a análise crítica dos resultados.

A base de dados foi compilada a partir de levantamentos geológicos e geomecânicos executados durante a operação da mina pela empresa que a opera e por empresas terceiras que prestaram serviços de prospecção de dados em campanhas de sondagens.

A base de dados compilada tem dois tipos principais de dados: sondagens e modelo 3D geológico-geomecânico. Os dados básicos das sondagens, onde constam o código da sondagem, a posição espacial (X, Y e Z, em EPSG 31982 e o azimute (°), foram agrupados e registram as características básicas dos intervalos geomecânicos. Os dados dos parâmetros utilizados na classificação geomecânica, como resistência-consistência (Mega pascal, ISRM, 1981), intemperismo (ISRM, 1981), grau de faturamento (Guidicini *et. al.*, 1972a), RQD (porcentagem, conforme Deere, 1963), tipo de descontinuidade (ABGE, 1988), espaçamento (milímetros, ABGE, 1988), abertura das paredes (milímetros, Bieniawski, 1989), rugosidade (ISRM, 1981), material de preenchimento (Bieniawski, 1989), intemperismo da parede (ISRM, 1981), persistência (ISRM, 1981) e condição de água (ISRM, 1981) compõem as variáveis aqui estudadas. Os dados de investigação direta foram compilados em seu completo teor, fato que permitiu a validação integral dos dados. Dados adicionais de ensaio de granulometria foram obtidos para realizar as análises cruzadas entre as variáveis estudadas.

Para avaliar a consistência dos dados de resistência mecânica, que são as faixas de resistência conforme ISRM (1981) foi realizada análise entre as classes de resistência descritas e os ensaios granulométricos (mm). A tipologia quanto ao grau de resistência foi dividida entre materiais friáveis, médios e compactos. Para ensaios granulométricos que apontaram massa de sedimentos com percentual de massa, granulometria maior que 200 milímetros, superior a 50% foram classificados como material compacto; quando o percentual de massa representa entre 50% e 30% foi considerada material médio; e para percentual de massa menor que 30% foram consideradas como material friável, limitado a valores de resistência

Para validar o RQD e o grau de fraturamento foi realizada análise condicional, considerando seis classes (de maciço a fragmentado) para o grau de fraturamento conforme com faixa de valores variando de rocha pouco fraturada (F1) a rocha fragmentada (F5) e valores entre 0 e 100 para o RQD (Deere, 1963).

Os intervalos amostrados considerados validos foram então classificados geomecânicamente com base nos critérios de classificação geomecânica a partir do sistema *Weak Rock* proposto por Martin & Stacey (2018) e o sistema Rock Mass Rating (Bieniawski, 1993) a fim abranger representatividade dos diferentes litotipos presentes na cava. Os sistemas de classificação geomecânica de maciços englobam critérios qualitativos e/ou quantitativos, fornecendo indicações no que diz respeito às propriedades intrínsecas sobre a qualidade do maciço. A aplicabilidade de cada sistema de classificação está relacionada ao grau de resistência da rocha intacta apresentado em cada intervalo amostrado. As rochas presentes na cava em estudo apresentam um grau de resistência baixo, consideradas em sua maioria como rochas brandas, portanto, possuem uma baixa aplicabilidade no sistema de classificação RMR. Sendo

assim, o autor optou por utilizar o sistema de classificação *Weak Rock* (Martin & Stacey 2018), baseado na metodologia modificada da ISRM, que implica na subdivisão das faixas de resistência R1 e R2 conforme Quadro 6, e o sistema para rochas com valores de resistência variando de R6 a R3 apresentado no Quadro 7

1 – PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO E SEUS PESOS								
PARÂMETROS		INTERVALO DE VALORES						
1	Resistência do material intacto	Índice de resistência à carga pontual (Mpa)	> 10	4 – 10	2 – 4	1 – 2	Para esses valores baixos, é preferível realizar o teste de compressão uniaxial	
	Resistência à compressão uniaxial (Mpa)	> 250	100 – 250	50 – 100	25 – 50	5 – 25	1 – 5	< 1
Peso		15	12	7	4	2	1	0
2	Qualidade do testemunho (%): RQD (do inglês – <i>Rock Quality Designation</i>)	90 – 100	75 – 90	50 – 75	25 – 50	< 25		
	Peso	20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades	> 0,6 m	0,6 m – 2 m	200 m – 600 mm	60 mm – 200 mm	< 60 mm		
	Peso	20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades	Superfícies muito rugosas descontínuas, fechadas, paredes duras	Superfícies pouco rugosas, abertura < 1 mm, paredes duras	Superfície pouco rugosa, abertura < 1 mm, paredes moles	Superfícies estriadas ou preenchimento < 5 mm ou abertura de 1 mm – 5 mm, contínuas	Preenchimento mole > 5 mm ou abertura > 5 mm, contínuas.		
	Peso	30	25	20	10	0		
5	Água subterrânea	Infiltração em 10 m de túnel (L/min)	0	< 10	10 – 25	25 – 125	> 125	
	Relação entre a pressão da água na fratura e a tensão principal	0	< 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,5	> 0,5		
	Condições gerais	Seco	Umedecido	Úmido	Gotejamento	Fluxo abundante		
Peso		15	10	7	4	0		

2 – PESO DE AJUSTE EM FUNÇÃO DA ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES						
Direção e mergulho das descontinuidades		Muito favorável	Favorável	Aceitável	Desfavorável	Muito desfavorável
Peso	Túneis	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60
3 – CLASSE DE MACIÇOS ROCHOSOS DETERMINADA PELA SOMATÓRIA DOS PESOS						
Somatória dos pesos		100 – 81	80 – 61	60 – 41	40 – 21	< 20
Classe nº		I	II	III	IV	V
Descrição		Muito bom	Bom	Regular	Pobre	Muito pobre
4 – CARACTERÍSTICAS DOS MACIÇOS ROCHOSOS SEGUNDO A CLASSIFICAÇÃO RMR						
Classe nº		I	II	III	IV	V
<i>Stand-up time</i> médio		20 anos para abertura de 15 m	1 ano para abertura de 10 m	1 semana para abertura de 5 m	10 horas para abertura de 2,5 m	30 minutos para abertura de 1 m
Coesão da massa rochosa (kPa)		> 400	300 – 400	200 – 300	100 – 200	< 100
Ângulo de atrito (graus)		> 45	35 – 45	25 – 35	15 – 25	< 15

Quadro 6 - Parâmetros de resistência da ISRM

ÍNDICE DE RESISTÊNCIA	DESCRIÇÃO	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO UNIAxIAL	AVALIAÇÃO DE CAMPO						MÉTODOS UTILIZADOS
			Martelo	Risco canivete ¹	queda canivete	raspagem canivete ¹	risco unha	pressão manual	
R6	Extremamente resistente	>250	lasca	não	não	não	não	não	RMR 1989
R5	Muito resistente	250-100	Quebra com dificuldade e vários golpes	não	não	não	não	não	
R4	Resistente	100-50	quebra com vários golpes	Risco superficial	-	não	não	não	
R3	Medianamente resistente	50-25	quebra com dificuldade com um golpe		ponto pequeno	com muita dificuldade	não	não	

R2	R2+ (concreto)	Pouco resistente	25 - 10	quebra com um golpe	risca	ponto grande	com dificuldade	não	não	WEAK
	R2- (solo-cimento)	Branda	10 - 5	fragmenta com um golpe			produz pó	risco superficial	não	
R1	R1+ (tijolo)	Muito branda superior	5 - 3		desagrega	risca fundo	penetra	com facilidade produz muito pó	risca	quebra pontualmente
	R1- (saprólitos)	Muito branda inferior	3 - 1	corta (separa)		descasca esculpe		penetra	quebra as bordas	
R0	Extremamente branda		1 - 0,25	-	-	penetra	-	corta	desagrega	EXTREMELY WEAK

¹ varia conforme presença de minerais de hábito lamelar

Método de avaliação da consistência das Rochas
1 - Reação ao golpe com martelo de geólogo
2 - Resistência ao risco com a ponta do canivete
3 - Reação à queda do canivete
4 - Reação à raspagem da lâmina do canivete na borda da amostra
5 - Reação ao risco com a unha
6 - Reação à pressão dos dedos

Índice de Reação ao Método	
	ALTA
	MÉDIA
	BAIXA

Fonte: modificada (Traduzido de Martin & Stacey,2018).

Quadro 7- Parâmetros e pesos relativos para classificação geomecânica no sistema RMR.

(Continua)

1 – PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO E SEUS PESOS								
PARÂMETROS		INTERVALO DE VALORES						
1	Resistência do material intacto	Índice de resistência à carga pontual (Mpa)	> 10	4 – 10	2 – 4	1 – 2	Para esses valores baixos, é preferível realizar o teste de compressão uniaxial	
	Resistência à compressão uniaxial (Mpa)	> 250	100 – 250	50 – 100	25 – 50	5 – 25	1 – 5	< 1
Peso		15	12	7	4	2	1	0
2	Qualidade do testemunho (%): RQD (do inglês – <i>Rock Quality Designation</i>)	90 – 100	75 – 90	50 – 75	25 – 50	< 25		
	Peso	20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades	> 0,6 m	0,6 m – 2 m	200 m – 600 mm	60 mm – 200 mm	< 60 mm		
	Peso	20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades	Superfícies muito rugosas descontínuas, fechadas, paredes duras	Superfícies pouco rugosas, abertura < 1 mm, paredes duras	Superfície pouco rugosa, abertura < 1 mm, paredes moles	Superfícies estriadas ou preenchimento < 5 mm ou abertura de 1 mm – 5 mm, contínuas	Preenchimento mole > 5 mm ou abertura > 5 mm, contínuas.		
	Peso	30	25	20	10	0		
5	Água subterrânea	Infiltração em 10 m de túnel (L/min)	0	< 10	10 – 25	25 – 125	> 125	
	Relação entre a pressão da água na fratura e a tensão principal	0	< 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,5	> 0,5		
	Condições gerais	Seco	Umedecido	Úmido	Gotejamento	Fluxo abundante		
Peso		15	10	7	4	0		

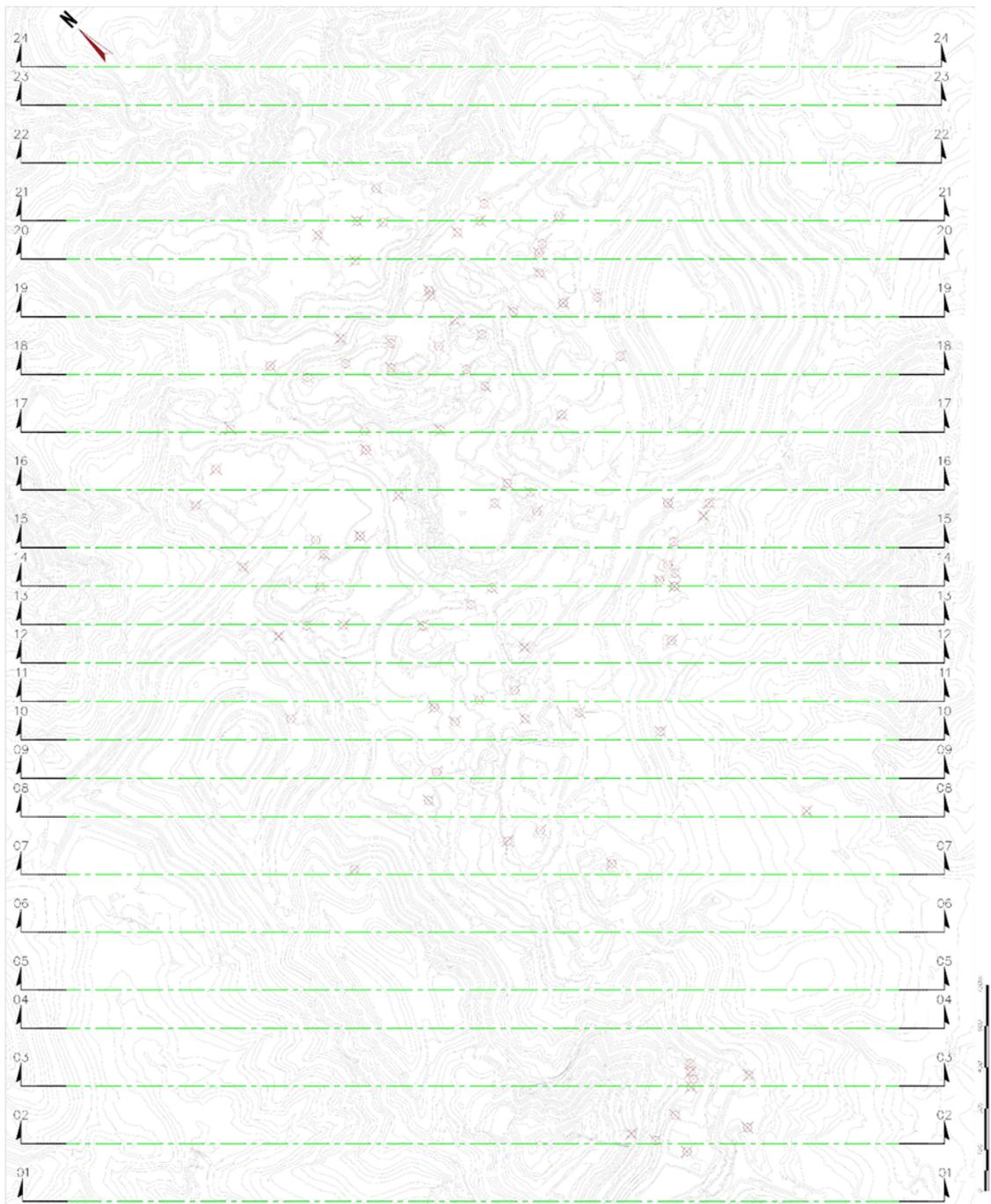
(Continuação)

2 – PESO DE AJUSTE EM FUNÇÃO DA ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES						
Direção e mergulho das descontinuidades		Muito favorável	Favorável	Aceitável	Desfavorável	Muito desfavorável
Peso	Túneis	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60
3 – CLASSE DE MACIÇOS ROCHOSOS DETERMINADA PELA SOMATÓRIA DOS PESOS						
Somatória dos pesos		100 – 81	80 – 61	60 – 41	40 – 21	< 20
Classe nº		I	II	III	IV	V
Descrição		Muito bom	Bom	Regular	Pobre	Muito pobre
4 – CARACTERÍSTICAS DOS MACIÇOS ROCHOSOS SEGUNDO A CLASSIFICAÇÃO RMR						
Classe nº		I	II	III	IV	V
<i>Stand-up time</i> médio		20 anos para abertura de 15 m	1 ano para abertura de 10 m	1 semana para abertura de 5 m	10 horas para abertura de 2,5 m	30 minutos para abertura de 1 m
Coesão da massa rochosa (kPa)		> 400	300 – 400	200 – 300	100 – 200	< 100
Ângulo de atrito (graus)		> 45	35 – 45	25 – 35	15 – 25	< 15

Fonte: Traduzido de Bieniawski (1993)

A elaboração de seções geomecânicas compreendeu a segunda etapa do trabalho e foi realizada a partir do banco de dados de sondagens validado, resultou em 24 seções guias a partir das classes geomecânicas RMR (1993) e classes geomecânicas do *Weak Rock* (2019), com espaçamento médio de 1.668 m entre as seções. Para as seções do grau de intemperismo e do grau de resistência foram geradas 12 seções. Todas estas 24 seções seguiram padrão de melhora da qualidade do maciço com o aumento da profundidade, considerando os materiais de cobertura para agrupar regiões com comportamentos geomecânicos similares (Figura 44).

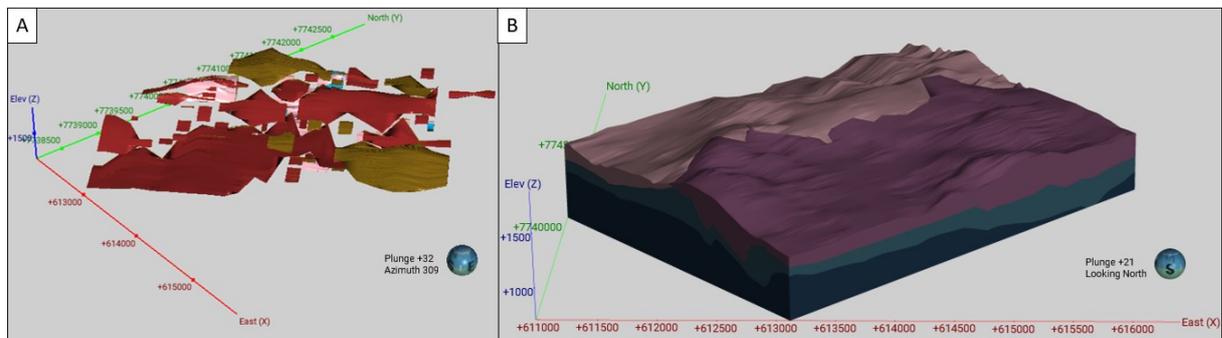
Figura 44 - Localização das seções geomecânicas elaboradas e as sondagens utilizadas.



A produção do modelo geomecânico, último procedimento desta pesquisa, foi realizada com o programa *Leapfrog Geo* a partir dos dados validados das sondagens, mapeamento, seções geomecânicas e de modelo geológico preexistente. Superfícies foram geradas a partir das seções geomecânicas para, posteriormente, criar os sólidos. Os sólidos tomaram como referência as superfícies e os dados de sondagens, de modo a representar todo o registro geológico amostrado. A estimativa do modelo de blocos teve início com a validação dos sólidos a partir do modelo de blocos geológicos, onde os blocos tiveram 70 m, os sub-blocos tiveram 10 m, e o número de blocos para X, Y e Z, foi de 60, 44 e 120, respectivamente.

Devido à dimensão dos blocos, foi realizado carimbo com as classes geomecânicas identificadas nos sólidos (Figura 45A) e nas lentes (Figura 45), para que não houvesse subestimativa ou perda de informações de camadas delgadas. Análise exploratória dos dados foi realizada para identificar padrões e auxiliar a escolha de parâmetros das estimativas. A estimativa foi realizada com o método vizinho mais próximo e inverso do quadrado da distância, com raio de busca de 400, 600 e 200 m para X, Y e Z, respectivamente. Os resultados foram então comparados em termos de volume, média e comportamento espacial.

Figura 45 - (A) Sólidos gerados das classes; (B) Lentes após a geração das superfícies.



RESULTADOS

Esta pesquisa estudou 21.996,00 metros do registro litológico-geotécnico, contido em 180 furos de sondagens, onde foram reconhecidos 1.306 intervalos geomecânicos a partir da documentação dos furos. A fim de se averiguar a veracidade das informações descritas nas sondagens, realizou-se uma série de validações.

A primeira parte da análise concertou na averiguação da consistência dos dados quanto ao parâmetro descrito. A análise dos dados e informações faltantes revelou que para as 1.306 amostras, provenientes dos intervalos dos furos de sondagens analisados, 68% dos intervalos não possuem a descrição do preenchimento de discontinuidades; em 30% dos intervalos cadastrados na base de dados não há descrição da abertura das discontinuidades; em 26% não há descrição do intemperismo da parede; para 21% das amostras a rugosidade não é descrita; em 17% a estrutura não é descrita e também em 17% o tipo de material de preenchimento não é apontado.

A litologia descrita possui predominância de variedades de itabiritos (46,1%), filitos (15,0%), hematitos (8,7%); e apresenta contribuição de aterro (8,0%), xistos (6,6%), rochas intrusivas (4,3%), quartzito (3,1%), sem recuperação (2,0%), laterita (1,8%), material rolado (1,4%), ganga (1,2%), brecha friável (1,1%), material pilha de estéril (0,5%) e dolomito friável (0,3%).

A análise da tipologia do material quanto à resistência foi conduzida em 572 das 1306 amostras totais (34,0%), com base em validação cruzada. Dessas amostras, 252 (19,3%) foram

classificadas como material friável, 10 (0,8%) como material médio e 76 (5,8%) como material compacto. Das 572 amostras, 234 (17,9%) foram consideradas inválidas devido à falta de aderência aos parâmetros de validação.

As etapas subsequentes envolveram a validação das informações, comparando os dados que tinham correspondência. A validação da coerência entre os Parâmetros de Resistência e o Grau de Alteração mostrou uma correlação satisfatória, com 85,1% dos dados compatíveis, 12,4% incompatíveis e 2,5% não puderam ser determinados devido à falta de descrição de algum dos parâmetros.

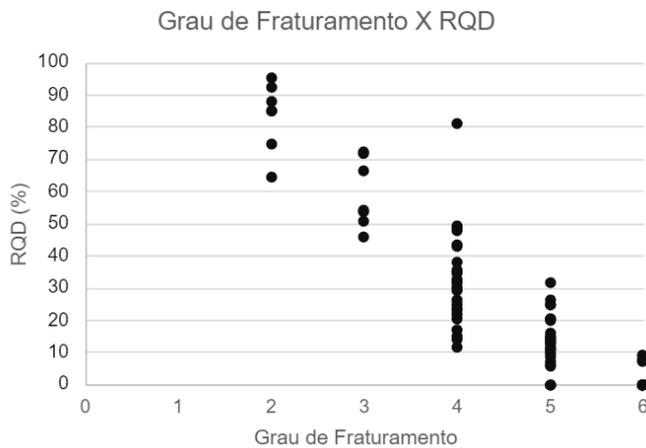
A análise do grau de fraturamento comparado com o valor de RQD foi subdividida em seis classes, conforme o fraturamento identificado. Para a primeira classes de fraturamento foi identificada apenas uma amostra, sendo o RQD de 59,3; para a segunda classe o RQD médio vale 84,9 e foi calculado a partir de 8 amostras; a terceira classe possui 14 amostras e RQD médio de 66,1; a quarta classe apresenta 42 amostras que exibem RQD médio de 33,5; a quinta classe teve 41 amostras computadas e RQD médio de 13,4; e a sexta classe possui 173 amostras com RQD médio de 0,2. A correlação entre os parâmetros é exibida na Figura 46.

Figura 46 - Correlação entre Grau de Fraturamento e RQD.



Para a análise do grau de fraturamento frente ao espaçamento das discontinuidades, utilizou-se cinco classes de acordo com o fraturamento indicado no intervalo amostral. Para a primeira classe de fraturamento (maciço), foi identificada apenas uma amostra, sendo o espaçamento médio é de 3 mm.; para a segunda classe (pouco fraturado) o espaçamento médio 3 mm., calculado a partir de 4 amostras; a terceira classe (moderadamente fraturado) possui 28 amostras e espaçamento médio de 2 mm.; a quarta classe (muito fraturado) apresenta 16 amostras que exibem espaçamento médio de 1.8 mm.; a quinta classe (intensamente fraturado) teve 37 amostras computadas e espaçamento médio de 1,7 mm. A correlação entre os parâmetros é exibida na Figura 47

Figura 47 - Correlação entre Grau de Fraturamento e Espaçamento.



Os resultados acima submetidos a validação foram então agrupados e se dois parâmetros ou mais estiveram ausentes, tais como grau de fraturamento, RQD, resistência e grau de intemperismo, o intervalo amostral com estes parâmetros faltantes foi descartado.

Finalizada a validação cruzada de dados e informações o banco de dados foi considerado validado, onde 21.644,064 metros (98,4 %) dos intervalos amostrados apresentaram dados e informações compatíveis com as descrições fornecidas e 351,94 metros (1,6 %) foram considerados incompatíveis. Os dados e informações incompatíveis foram assim considerados por não possuírem as informações necessárias para a classificação geomecânica.

Para todos os intervalos amostrais validados foram aplicados os critérios de classificação critérios de classificação geomecânica *Weak Rock* (Martin & Stacey, 2018) e *Rock Mass Rating* (Bieniawski, 1993). Foram determinadas nove classes gerais, sendo quatro delas relativas ao universo RMR (67,6%), três delas representativas do universo *Weak Rock* (19,7%) e duas adicionais que representam os perfis intempéricos de solo desenvolvidos na cava e aterros (12,8%).

No universo de classificação geomecânica utilizando a metodologia RMR, à classe de maciço II (bom) o valor médio de RMR determinado foi de 69,7 e apresentou desvio padrão de 6,1; para a classe de maciço III (médio) o RMR médio foi de 50,4 e a dispersão das medidas foi de 5,7; para a classe de maciço IV (pobre) o valor médio de RMR foi de 36,0 e o desvio padrão foi de 5,7.

Após a análise estatística dos dados para o universo RMR (Bienaski, 1993), notou-se que a classe de maciço IV apresenta valor médio de RMR 35 para o Itabirito e o Filito; a classe de maciço III apresenta valor médio de RMR 50 para o Itabirito e Filito, valor médio de RMR de 51 para as Hematitita e RMR de 52 para as Rochas Intrusivas; a classe de maciço II apresenta amostragem apenas no Itabirito com valor médio de RMR 70.

Nas amostras representativas ao universo de classificação geomecânica *Weak Rocks* (Martin & Stacey, 2018), obteve-se que 205 amostras (31,4 %) foram classificadas como *weak rock*; amostras classificadas como *very weak* foram 136 (20,8 %); e *extremely weak* representam 61 (9,3 %) amostras.

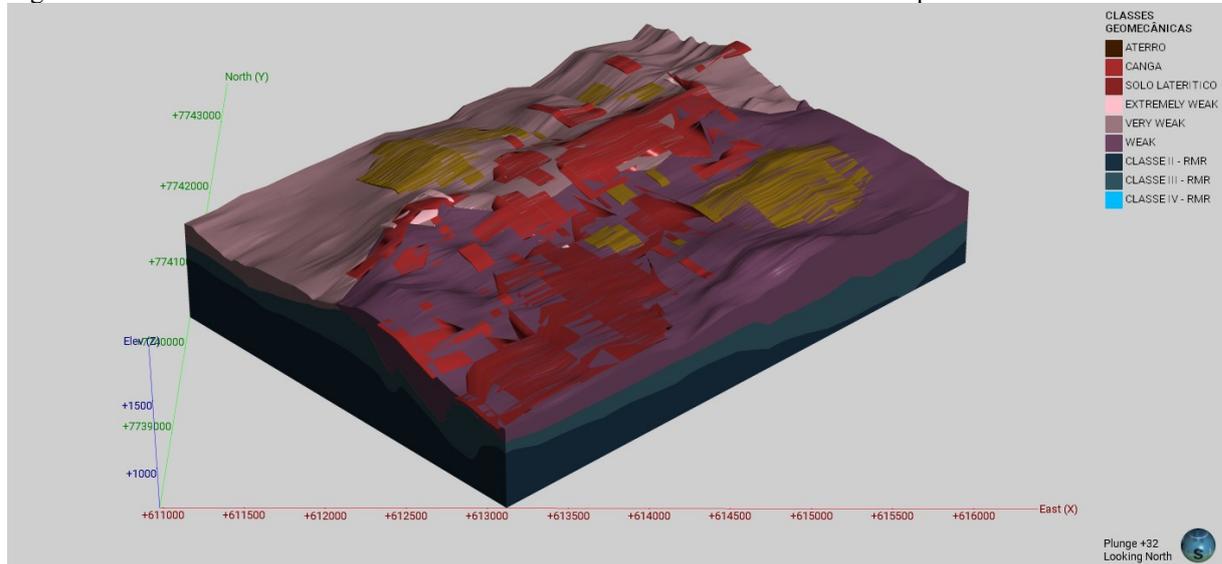
Das litologias representativas englobadas pelo universo de classificação *Weak Rocks* ((Martin & Stacey, 2018), o Itabirito apresenta 235 intervalos, divididos nas classes: *weak* (59,6%) *very weak* (27,7 %) e *extremely weak* (12,8%); o Filito apresenta 70 intervalos amostrais divididos em: *weak* (27,1%), *very weak* (51,4%) e *extremely weak* (21,4%) *very weak* (51,4%); as hematititas possuem 36 intervalos amostrais divididos em: *weak* (66,7%), *very weak* (22,2%) e *extremely weak* (11,1%); as rochas intrusivas possuem 19 intervalos amostrais,

dividas nas classes: *weak* (26,3%), *very weak* (68,4%) e *extremely weak* (5,3%); o Quartzito possui 18 intervalos amostrais divididos nas classes: *weak* (44,4%), *very weak*(27,8%) e *extremely weak* (27,8%).

As 24 seções litológicas-geomecânicas intersectaram todas as classes litológicas e todas as classes geomecânicas, representando o comportamento do maciço ao longo de 66,6 km de transectos. A cava é predominantemente coberta por solos lateríticos, aterro e canga. Este comportamento é verificado em todas as seções e evidenciado pela predominância de classes geomecânicas pertencentes as classes *extremely weak*, *weak* maciços classe IV, III e II. As classes geomecânicas são controladas pelas dobras do terreno, assim como litologia e a profundidade.

A área modelada representa 18 km² e ocorreu somente onde existiram seções geomecânicas, resultando em um modelo geomecânico onde cada bloco gerado pelo modelo em determinada classe possuem o mesmo valor (Figura 48).

Figura 48 - Modelo Geomecânico blocos tridimensionais com os blocos carimbados por classe.



Considerando o método *Weak Rock* (Martin & Stacey, 2018), a classe *Extremely Weak* ocorre como lentes e camadas não contínuas, de até 50m de espessura, tanto na formação ferrífera friável como nas encaixantes estéreis, e é restrita a profundidades superiores a cota 1100m. A classe *Very Weak* é identificada como uma camada contínua nas encaixantes leste, limitada pelo contato com a formação ferrífera, ocorrendo subordinadamente como lentes na formação ferrífera friável e no encaixante oeste. As rochas classificadas como *Weak* são as mais frequentes descritas nas sondagens e ocorrem na forma de camadas contínuas nas encaixantes da porção oeste e em meio a formação ferrífera friável, tanto como lentes como em corpos espessos.

Considerando a classificação de Bieniawski (1993) a classe de maciço IV não é comum, pois ocorre sob forma de lentes, tanto na formação ferrífera quanto nas encaixantes (filito e rochas intrusivas). Apresenta resistência variando entre R2+ até R6 e grau de alteração W2 a W4. A classe de maciço III é predominante, quando consideramos Bieniawski (1993) e ocorre principalmente nas tipologias compactas (lentes de hematita e itabirito), no corpo principal de itabirito em profundidade e em rochas encaixantes profundas. As cotas de topo deste contato variam entre 1500m e 975m, já as cotas de base entre 1300m e 672m. A espessura

do maciço de classe III varia entre 75m e 288m. O grau de resistência encontrado é entre R2+ a R6, com alteração entre W1 e W4.

A classe de maciço II predomina em rochas encaixantes estéreis e formação ferrífera em profundidades, em média, abaixo da cota 1200 m. Raramente ocorre em lentes de hematita e itabirito compacto em meio a formação ferrífera friável, além da ocorrência pontual de uma grande lente na rocha intrusiva na porção sudoeste. Esta classe possui grau de resistência entre R3 e R6 e alteração entre W1 e W4. A classe de maciço I foi obtida em apenas uma sondagem, entretanto não foi representativa o suficiente para ser modelada devido a sondagens mais próximas exibirem outro comportamento geomecânico.

DISCUSSÃO

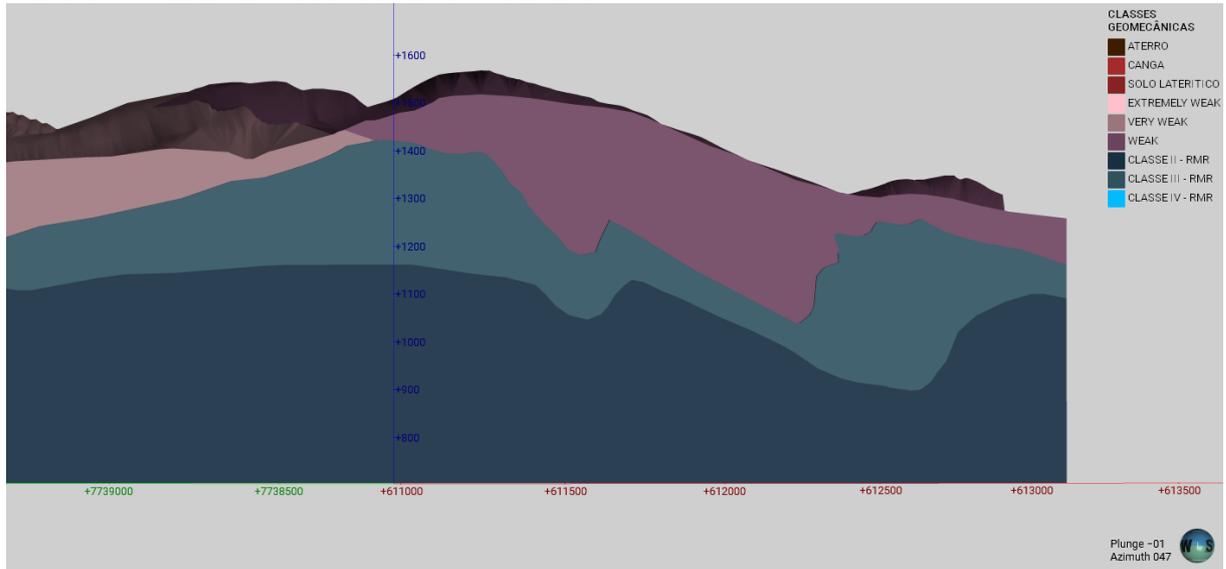
Após todas as análises realizadas nos intervalos amostrais dos furos de sondagem, a cava hipotética é composta pelas litologias predominantes: Itabiritos, Filitos e Hematitas, além de Quartzitos, Rochas Intrusivas e coberturas. As litologias que contêm formações ferríferas foram divididas entre friáveis, médias e compactas de acordo com os ensaios de peneiramento. Para todos os intervalos foi realizada a classificação geomecânica do trecho, através dos sistemas RMR e *Weak Rock*. As litologias são preferencialmente mais representativas no sistema *Weak rock*, com as classes *very weak/weak rock* associada aos litotipos friáveis das formações ferríferas. Filitos e Rochas Intrusivas com valores médios de resistência R2; a classe *extremely weak* restringe-se apenas no setor leste com corpos dispersos com valores médios de resistência R0.

O valor de resistência à compressão uniaxial foi estimado, sendo recomendada a execução de ensaios triaxiais em litologias que apresentem valores de resistência < 25 Mpa, restrito a classes geomecânicas regidas pelo universo de classificação *Weak Rocks*, sendo representativo na cava com maciço classe.

As litologias regidas pelo sistema RMR estão associadas as formações ferríferas médias e compactos em maior expressividade, e pequenas lentes associadas aos Filitos. A Classe III do sistema RMR é a com maior expressividade na cava, relacionado aos itabiritos médios com alto a muito alto grau de fraturamento e a Rocha intrusiva no setor oeste; a classe IV associado a Itabiritos médios com grau de fraturamento muito alto e Filito da porção nordeste da cava; a classe II ocorre majoritariamente nos litotipos compactos e médios com valores de resistências elevado (R4).

As classes de maciço RMR (Classes II, III e IV) ocorrem, em superfície, como lentes e corpos em meio de maciços classificados como *Weak Rock*. A partir da cota 1150 de acordo com o modelo, ocorrem apenas maciços Classe II (Figura 49).

Figura 49 – Seção tipo com as principais classes geomecânicas, indicando a ocorrência superficial das variedades Weak Rocks e Classes RMR não aflorantes.

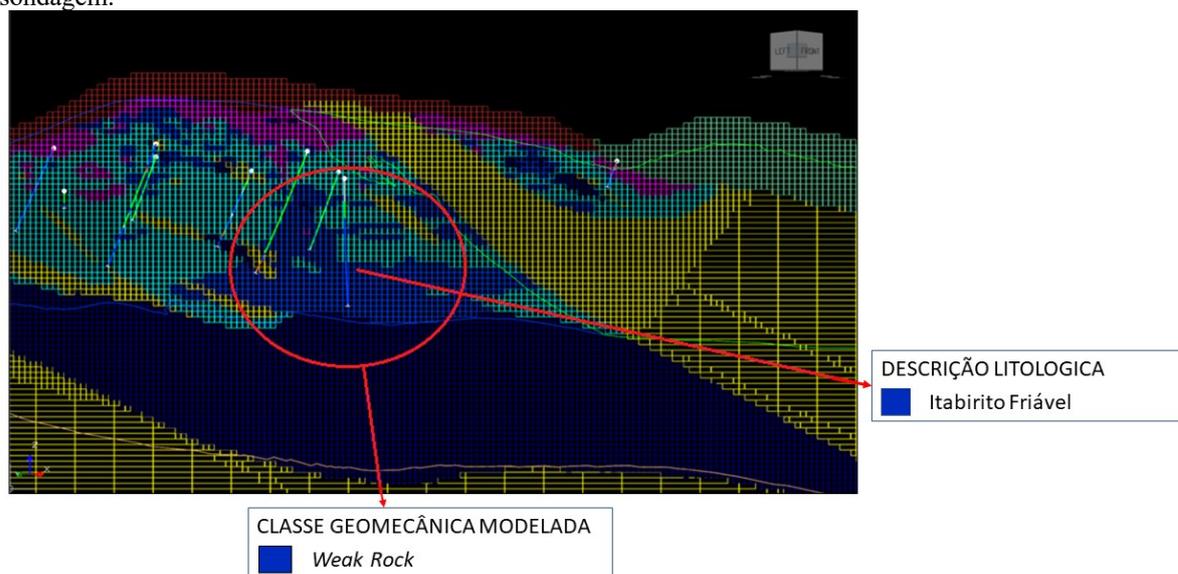


Apesar de haver diversos intervalos com parâmetros de classificação faltantes, não houve implicações para a determinação da classe geomecânica na área. Este fato pode ser atribuído a escolha de parâmetros de classificação conservadores, quando há disponibilidade de variáveis diretamente correlacionáveis, sempre preconizando a segurança nesta associação. A qualidade do modelo proposto mais está associada à quantidade e qualidade dos dados de entrada que dos métodos utilizados para a classificação.

Na validação do método de interpolação estatístico mais adequado para a elaboração do modelo geomecânico da cava proposta, o método do Vizinho Mais Próximo é o mais adequado, pois este método estima uma quantidade maior de valores para blocos vizinhos, atribuindo valores apenas no alcance do raio de busca determinado, tendendo a diminuir com o aumento da distância.

Durante o processo de revisão e validação do modelo geomecânico elaborado, algumas divergências foram encontradas, quanto a descrição litológica do trecho quando comparada com a classe geomecânica. A exemplo a Figura 7, onde a litologia é descrita como Itabirito Compacto, porém a classe geomecânica produto da modelagem é dita como *Weak* (Figura 50). Essa divergência pode ser explicada pela quantidade de investigações utilizadas na construção do modelo, que apesar de numerosas (180 furos) espaçadas em 18 km² acabam não sendo o suficiente para um modelo idêntico a realidade.

Figura 50 - Inconsistências encontradas entre o Modelo Geomecânico elaborado e descrição litológica no furo de sondagem.



Fonte: Autor, 2023.

CONCLUSÕES

A validação dos parâmetros de descrições geomecânica correlacionáveis de grau de resistência e granulometria apresentaram uma correlação positiva valor de $R^2 = 0,98$, indicando que as litologias descritas como friáveis apresentam valores passantes na peneira 200 milímetros $< 30\%$; a correlação entre os parâmetros de classificação de grau de fraturamento e RQD apresentou uma boa correlação entre os dados com valores de $R^2 = 0,87$, maciço com valores de baixo RQD = 40% estão restritos a grau de fraturamento F4 e F5.

Apesar de que a ausência de alguns parâmetros de descrição das sondagens não influenciam na qualidade dos dados de entrada e posterior classificação geomecânica do maciço, impossível não mencionar que no mercado de investigações brasileiros voltados para projeto geotécnicos à uma carência notável em padronização e controle de qualidade, não utilizando metodologias de sucesso na exploração mineral como o QAQC (*quality assurance and quality control*), sendo imprescindível a definição e aplicação de protocolos e procedimentos, boas práticas, controle nas atividades de campo e na aquisição de dados geológicos.

O modelo geomecânico elaborado é satisfatório, sendo mais representativo e preciso nas cotas próximas a superfície e em regiões que concentrem ao menos um furo de sondagem a cada 80 metros para o modelo como um todo (18 km²), sendo concentrado na região de interesse mineral.

Para a elaboração de projetos geotécnicos em áreas minerárias a utilização de modelos geomecânicos com o *input* de dados e calibrações das variáveis presentes nos intervalos de descrição aqui utilizados atende satisfatoriamente, prevendo mecanicamente o comportamento do maciço de interesse. Durante a execução de projetos referenciados por modelos assim propostos, é indispensável a realização de mapeamentos geológicos-geotécnicos e a obtenção de parâmetros geomecânicos, bem como o entendimento do comportamento estrutural das litologias em superfície, para refinar o modelo utilizado e executado na atividade proposta, de forma segura e eficiente.

Até a data de elaboração deste artigo, não pudemos encontrar nenhum tipo de norma ou protocolo que padronize a obtenção de dados geomecânicos de sondagens e espaçamento de investigação em projetos de cavas a céu aberto. Sugerimos a utilização para o espaçamento mínimo de investigação diretas os preconizados em (DNIT6b) com no mínimo uma sondagem a cada 120 metros de corte. Para os critérios de descrição de trechos geomecânicos, recomenda-se a utilização dos critérios metodológicos aqui utilizados.

REFERÊNCIAS

ABGE, OLIVEIRA; BRITO, AME; EDITORES, S. N. Geologia de Engenharia. ABGE, São Paulo, Brasil, 1998.

AQUINO, Iure B. M., ROLO, Roberto M., Zingano, André C., LIMA, Hernani M. Classificação geomecânica prévia do maciço rochoso do entorno de escavações subterrâneas usando modelos de blocos estimados por krigagem dos indicadores. Estudo de caso: mineração fazenda brasileiro–Bahia/Brasil. *Holos*, 4, 1-23, 2021

BIENIAWSKI Z.T. 1973. Engineering classification of *rock* masses. *Trans S. Afr. Inst. Civ. Eng.*, 15:335- 44. Bieniawski, Z. T. 1993. Classification of *rock* masses for engineering: the RMR system and future trends. In:

BRAGA NETO, José Assunção. Classificação geomecânica de taludes de mineração a céu aberto. 2020. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. 174 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA. COORDENAÇÃO GERAL DE ESTUDOS E PESQUISA. INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. Diretrizes básicas para estudos e projetos rodoviários: escopos básicos / instruções de serviço. - 3. ed. - Rio de Janeiro, 2006

GUIDICINI, G. *et. al.* Um método de classificação geotécnica preliminar de maciços rochosos. *Semana Paulista de Geologia Aplicada*, v. 4, p. 285-331, 1972.

HAMMAH, R. E.; CURRAN, J. H. Geostatistics in geotechnical engineering: Fad or empowering? In: *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006. p. 1-5.

ISRM. *Rock* characterization, testing and monitoring. ISRM suggested methods, p. 211, 1981.

KRIGE, D. G. A practical analysis of the effects of spatial structure and of data available and accessed, on conditional biases in ordinary kriging. In: *Geostatistics Wollongong '96. Proceedings of the 5th International Geostatistical Congress*, Wollongong, NSW, Australia. 1996. p. 799-810.

LIU, Feiyue *et. al.* Geostatistics-block-based characterization of heterogeneous *rock* mass and its application on ultimate pit limit optimization: a case study. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 80, n. 2, p. 1683-1700, 2021.

MARTIN, Derek; STACEY, Peter (Ed.). *Guidelines for open pit slope design in weak rocks*. CSIRO PUBLISHING, 2018.

VATCHER, Jessica; MCKINNON, Stephen D.; SJÖBERG, Jonny. *Developing 3-D mine-scale geomechanical models in complex geological environments, as applied to the Kiirunavaara Mine*. *Engineering geology*, v. 203, p. 140-150, 2016.

**DECLARAÇÃO DE SUBMISSÃO DE ARTIGO TÉCNICO PARA A REVISTA
BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL (RBGEA)**

Declaramos para os devidos fins que foi submetido o artigo “Elaboração e validação de banco de dados de sondagem e construção de um modelo geomecânico de uma cava do quadrilátero ferrífero”, de autoria de Orlando Faria Prado, Murilo da Silva Espíndola e Cristian Nunes Estevam, para publicação na Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA).

Outrossim, informamos que o artigo se encontra em análise pelos revisores da RBGEA.

São Paulo, 27 de setembro de 2023.

Atenciosamente,

Eduardo D. Soares de Macedo

Dr. Eduardo D. Soares de Macedo
Editor da RBGEA

