



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE ESTRUTURAL DOS DADOS DE FUROS GEOTÉCNICOS PARA
ELABORAÇÃO DO MODELO GEOMECÂNICO DAS RAMPAS DE ACESSO (NORTE E
SUL) DO DEPÓSITO BONSUCESSO, PARACATU, MG**

Julianne Silva Frigo

MONOGRAFIA nº 356

Ouro Preto, dezembro de 2019

**ANÁLISE ESTRUTURAL DOS DADOS DE FUROS
GEOTÉCNICOS PARA ELABORAÇÃO DO MODELO
GEOMECÂNICO DAS RAMPAS DE ACESSO (NORTE E SUL)
DO DEPÓSITO BONSUCESSO, PARACATU, MG**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. Edison Tazava

MONOGRAFIA

Nº 356

ANÁLISE ESTRUTURAL DOS DADOS DE FUROS GEOTÉCNICOS PARA ELABORAÇÃO DO MODELO GEOMECÂNICO DAS RAMPAS DE ACESSO (NORTE E SUL) DO DEPÓSITO BONSUCESSO, PARACATU, MG

Julianne Silva Frigo

Orientador

Prof. Dr. Luís de Almeida Prado Bacellar

DEGEO/ Escola de Minas/ UFOP

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2019/2.

OURO PRETO

2019

Universidade Federal de Ouro Preto – <http://www.ufop.br>
Escola de Minas - <http://www.em.ufop.br>
Departamento de Geologia - <http://www.degeo.ufop.br/>
Campus Morro do Cruzeiro s/n – Bauxita
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Direitos de tradução e reprodução reservados.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

Revisão geral: Julianne Silva Frigo

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F899a Frigo, Julianne Silva.

Análise estrutural dos dados de furos geotécnicos para elaboração do modelo geomecânico das rampas de acesso (norte e sul) do depósito Bonsucesso, Paracatu, MG. [manuscrito] / Julianne Silva Frigo. - 2020.

84 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Luís de Almeida Prado Bacellar.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Mecânica de rochas. 2. Classificação geomecânica. 3. Mineração subterrânea. I. Bacellar, Luís de Almeida Prado. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.131

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: ANÁLISE ESTRUTURAL DOS DADOS DE FUROS GEOTÉCNICOS PARA ELABORAÇÃO DO MODELO GEOMECÂNICO DAS RAMPAS DE ACESSO (NORTE E SUL) DO DEPÓSITO BONSUCESSO, PARACATU, MG

AUTORA: Julianne Silva Frigo

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luís de Almeida Prado Bacellar

Aprovada em: 18 de fevereiro de 2020

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Luís de Almeida Prado Bacellar  DEGEO/UFOP

Dr. Lucas Pereira Leão  DEGEO/UFOP

Prof. Dr. Pedro Alameda Hernández  DEURB/UFOP

Ouro Preto, 18/02/2020

Agradecimentos

Agradeço a Deus por toda benção, proteção e por guiar meu caminho.

Agradeço aos meus pais, José Augusto e Maria Helena, essenciais na minha vida. Obrigado pelo amor incondicional e por sempre apoiarem minhas decisões. Ao meu irmão Felipe pelas palavras de apoio e carinho.

Agradeço ao Helder pelo amor, compreensão, incentivo e paciência. Obrigado por acreditar que sou capaz e por estar sempre ao meu lado!

Ao meu orientador Prof. Dr. Luís de Almeida Prado Bacellar, que aceitou prontamente o desafio de ajudar nessa caminhada, obrigado por todo conhecimento que me foi passado e pelas sugestões dadas para a melhoria deste trabalho.

À empresa Nexa Resources pela oportunidade, auxílio e por disponibilizar acesso aos dados.

Agradeço a todos os colegas e amigos de trabalho que me ajudaram e conviveram comigo durante o período, em especial Laura Rodrigues e Rafael Gritti, meus coordenadores, que a todo o momento estiveram sempre dispostos a me ajudar e transmitiram grande conhecimento. Ao eng. geólogo Rafael Ribeiro pela oportunidade. Aos geólogos Helber Thomazella, Edson Ricardo, Mariana Leite, Aline Carlin, Jéssica Alcântara e Augusto César pela amizade e conselhos. Aos técnicos e auxiliares. Muito obrigado!

Às amigas Thaís (Hakuna) e Karolina (Delux) que compartilharam comigo a rica convivência da vida acadêmica e os desafios da conclusão, e foram sempre um ponto de apoio. Aos amigos de Belo Horizonte, em especial Kelly pela amizade verdadeira e palavras certas nas horas necessárias. Aos amigos que conquistei em Paracatu, obrigado pelo acolhimento.

Agradeço ao Departamento de Geologia, à Escola de Minas, à Universidade Federal de Ouro Preto. A todos os professores da graduação, em especial, professor e amigo Edison Tazava pelos ensinamentos, auxílio e incentivo.

Muito obrigado a todos que acreditaram e torceram!

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	ix
SUMÁRIO	xi
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS.....	xvii
LISTA DE QUADROS	xix
RESUMO	xxi
ABSTRACT	xxiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 JUSTIFICATIVA.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 MACIÇOS ROCHOSOS.....	6
2.2 SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO	7
2.2.1 Sistema de Classificação RQD	9
2.2.2 Sistema de Classificação RMR	12
2.2.3 Sistema de classificação “Q” de Barton.....	14
2.3 SISTEMA CÁRSTICO	21
2.3.1 Alteração.	22
2.3.2 Dissolução	23
2.4 LEVANTAMENTO GEOFÍSICO DE ELETRORESISTIVIDADE.....	24
3 METODOLOGIA	27
3.1 LEVANTAMENTO GEOFÍSICO DE ELETRORESISTIVIDADE.....	27
3.2 DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA E CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA.....	29
3.2.1 Descrição geotécnica e caracterização geomecânica	31
3.3 COLETA DOS DADOS ESTRUTURAIS E IDENTIFICAÇÃO DAS FAMÍLIAS DE FRATURAS.....	36
3.4 MODELO GEOMECÂNICO	37
4 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL E LOCAL	39
4.1 PROVÍNCIA TOCANTINS.....	39
4.2 FAIXA BRASÍLIA	39
4.3 GRUPO VAZANTE.....	42
4.3.1 Estratigrafia do Grupo Vazante.....	44
4.4 GEOLOGIA LOCAL	47

5	RESULTADOS.....	49
5.1	CLASSIFICAÇÃO PARA O MACIÇO ROCHOSO DO DEPÓSITO BONSUCESO.....	49
5.1.1	Litologias e classes de maciços rochosos com base no RQD	49
5.1.1.1	Detalhamento da Classe IV.....	55
5.1.2	Classificação geomecânica segundo RMR de Bieniawski	57
5.1.2.1	Definição dos índices para a Mina de Morro Agudo.....	57
5.1.2.2	Resultados.....	57
5.1.3	Classificação geomecânica segundo o sistema Q de Barton	59
5.1.3.1	Definição dos índices para o Projeto Bonsucesso	59
5.1.3.2	Resultados.....	60
5.1.4	Correlação entre os sistemas de classificação RMR e Q.....	60
5.1.5	Detalhamento do carste e posicionamento das rampas de acesso	61
5.2	IDENTIFICAÇÃO DAS FAMÍLIAS DE FRATURAS.....	67
5.3	MODELO GEOMECÂNICO.....	72
5.4	MÉTODOS DE CONTENÇÃO E SUPORTE	73
5.4.1	Cálculo da dimensão equivalente (DE) e do comprimento dos tirantes.....	73
5.4.2	Categoria de sustentação	73
6	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Mapa de localização da área de estudo. (A) Localização do Estado de Minas Gerais no Brasil; (B) Localização do depósito Bonsucesso em relação à cidade de Paracatu e (C) área de estudo.....	2
Figura 2.1: Características das discontinuidades (traduzido de ISRM, 2007).	6
Figura 2.2: Procedimento utilizado para determinação do RQD a partir de testemunhos de sondagem (Deere e Deere, 1988).	9
Figura 2.3: Correlação entre RQD e J_v (Palmström, 1982).	11
Figura 2.4: Correlação entre o RQD e o espaçamento das discontinuidades (Bieniawski, 1989).	11
Figura 2.5: Gráficos de parâmetros e pontuações para o RMR. a) Pontuação em relação à compressão uniaxial, b) Pontuação em relação à variação do espaçamento, c) Pontuação em relação ao RQD e d) Correlação entre RQD e espaçamento (Aksoy, 2008).	14
Figura 2.6: Estimação da categoria de suportes baseado no sistema Q (traduzido de Grimstad e Barton, 1993).....	21
Figura 2.7: Feições do sistema cárstico (modificado de Goldscheider, 2005).	22
Figura 2.8: Representação da distribuição dos eletrodos no ensaio de caminhamento elétrico.	25
Figura 3.1: Diagrama esquemático para o levantamento de eletrorresistividade.	27
Figura 3.2: Malha de levantamento geofísico ao longo de toda a extensão do corpo.	28
Figura 3.3: Exemplo de seção modelo obtida e retrabalhada no Geosoft, resultado da inversão 2D da pseudo-seção de resistividade medida.	29
Figura 3.4: Posicionamento dos furos executados para a rampa sul, em planta.....	31
Figura 3.5: Posicionamento dos furos executados para a rampa norte, em planta.	31
Figura 3.6: Planilha de descrição geotécnica com itens e parâmetros necessários para subsidiar a elaboração da classificação geomecânica (NEXA).....	33
Figura 3.7: Perfis de rugosidade na superfície da discontinuidade (traduzido de Brown, 1981).	35

Figura 3.8: Metodologia do REFLEX ACCT-IQTM, mostrando o equipamento utilizado e a orientação do testemunho sendo feita a indicação de base ou topo.....	36
Figura 3.9: Ábaco com transferidor de ângulo alfa e beta (Holcombe Coughlin).....	36
Figura 4.1: Província Tocantins e suas faixas móveis associadas (simplificado de Almeida <i>et al.</i> , 1981).....	39
Figura 4.2: Unidades tectônicas da Faixa Brasília, em destaque Grupo Vazante (modificado de Dardenne, 2000).	41
Figura 4.3: Seção geológica esquemática mostrando as relações entre os Grupos Araxá, Ibiá, Canastra, Vazante e Bambuí (Dardenne, 2000).....	42
Figura 4.4: Mapa geológico do Grupo Vazante e localização dos depósitos de Vazante, Morro Agudo, Ambrósia, Bonsucesso e Fagundes (Cia. Mineira de Metais, Votorantim Metais; traduzido de Monteiro <i>et al.</i> 2006).	43
Figura 4.5: Perfil esquemático do Grupo Vazante (traduzido de Dardenne <i>et al.</i> 1998, retirado de Baia, 2013).....	44
Figura 4.6: Coluna estratigráfica do Grupo Vazante (modificado de Dardenne, 2000).	45
Figura 4.7: Seção geológica esquemática W-E do Grupo Vazante (Misi <i>et al.</i> , 2014).	47
Figura 4.8: Seção 150S, na porção sul do depósito Bonsucesso, mostrando as relações litológicas e a brecha hidrotermal, em perfil.	48
Figura 4.9: Seção 150S, na porção sul do depósito Bonsucesso, mostrando as relações litológicas e projeção das galerias da mina, em bloco.....	48
Figura 5.1: Dolomito sem alteração (A1) e pouco fraturado (F2), representando a classe I-A.	51
Figura 5.2: Dolomito sem alteração (A1), fraturado (F3), representando a classe I-B.....	52
Figura 5.3: Filito carbonoso, sem alteração (A1) e grau de fraturamento considerável (F3/F4), representando a classe II.....	53
Figura 5.4: Filito carbonoso muito fraturado, por ora fragmentado, com alto grau de fraturamento (F5), representando a classe III.	53
Figura 5.5: Domínio superficial apresentando alto grau de alteração (A4), presença de vazios (fendas) e baixa recuperação, sem quantificar o grau de fraturamento, representando a classe IV.	54
Figura 5.6: Solo que recobre a região, representando a classe V.	54

Figura 5.7: Detalhamento da classe IV.	56
Figura 5.8: Gráfico de correlação entre os sistemas RMR e Q para o depósito Bonsucesso. .	61
Figura 5.9: Perfil longitudinal (N-S) do depósito Bonsucesso mostrando zona de carste com base na descrição dos testemunhos de sondagem.	62
Figura 5.10: Malha sul e malha norte do levantamento eletorresistivo com indicação dos altos resistivos, destacados nos quadrados em vermelho, a 75 metros de profundidade.	63
Figura 5.11: Gráfico Carstificação x Profundidade mostrando os limites do carste geotécnico e do carste hidrogeológico.....	64
Figura 5.12: Posição da rampa sul, definida pelo cruzamento de informações do modelo geomecânico e do levantamento geofísico produzida no Leapfrog Geo.....	65
Figura 5.13: Posição da rampa norte, definida pelo cruzamento de informações do modelo geomecânico e do levantamento geofísico produzida no Leapfrog Geo.....	66
Figura 5.14: Estereograma representativo das descontinuidades da Família 1 (F1S) e dos planos de acamamento coincidentes (software OpenStereo).	67
Figura 5.15: Estereograma representativo das descontinuidades da Família 2 (F2S) (software OpenStereo).....	68
Figura 5.16: Estereograma representativo das descontinuidades da Família 3 (F3S) (software OpenStereo).....	68
Figura 5.17: Estereograma representativo das descontinuidades da Família 1 (F1N) e dos planos de acamamento coincidentes (software OpenStereo).	69
Figura 5.18: Estereograma representativo das descontinuidades da Família 2 (F2N) (software OpenStereo).....	70
Figura 5.19: Estereograma representativo das descontinuidades da Família 3 (F3N) (software OpenStereo).....	70
Figura 5.20: Distribuição das descontinuidades no maciço de acordo com a sua posição nos furos de sondagem na rampa sul.	71
Figura 5.21: Distribuição das descontinuidades no maciço de acordo com a sua posição nos furos de sondagem na rampa norte.....	72
Figura 5.22: Modelo geomecânico proposto para a rampa sul. (A) Localização do bloco-diagrama na região do depósito Bonsucesso, destacado no círculo vermelho; (B) Modelo geomecânico 3D com disposição das litologias e posicionamento dos furos executados.....	74

Figura 5.23: Modelo geomecânico proposto para a rampa norte. (A) Localização do bloco-diagrama na região do depósito Bonsucesso, destacado no círculo vermelho; (B) Modelo geomecânico 3D com disposição das litologias e posicionamento dos furos executados..... 75

Figura 5.24: Categoria de suportes estimados baseados no sistema Q (traduzido de Grimstad e Barton, 1993)..... 76

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Relação entre o índice RQD e a qualidade da rocha (Deere, 1989).	9
Tabela 2: Parâmetros do RMR (modificado de Bieniawski, 1989).....	12
Tabela 3: Condição das descontinuidades (modificado de Bieniawski, 1989).....	13
Tabela 4: Parâmetros do RMR (modificado de Bieniawski, 1989).....	13
Tabela 5: Classes do RMR (modificado de Bieniawski, 1989).....	13
Tabela 6: Classificação do maciço no sistema Q (Barton <i>et al.</i> , 1974).	19
Tabela 7: Valores da relação de suporte de escavação (adaptado de Barton <i>et al.</i> 1974).	20
Tabela 8: Descrição das classes de alteração (ISRM, 1981).	23
Tabela 9: Descrição das classes de alteração (IPT, 1984).	23
Tabela 10: Síntese dos valores encontrados para a os sistemas RMR, Q e sua correlação.	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Parâmetros utilizados na classificação Q (Barton <i>et al.</i> , 1974).....	16
Quadro 2: Relação dos furos utilizados para descrição geotécnica.	29
Quadro 3: Classificação do grau de alteração (NEXA).	34
Quadro 4: Classificação do grau de fraturamento (NEXA).	35
Quadro 5: Classificação geomecânica do maciço rochoso do depósito Bonsucesso.	55
Quadro 6: Síntese dos índices RMR para Compressão Uniaxial, RQD e espaçamento das descontinuidades para a Mina de Morro Agudo.	58
Quadro 7: Índices RMR para a condição das descontinuidades para a Mina de Morro Agudo.	58
Quadro 8: Índices do sistema Q para classificação do maciço rochoso do depósito Bonsucesso.	59

Resumo

A abertura de qualquer empreendimento mineiro envolve a realização de grandes obras que impõem diversas solicitações ao terreno onde serão implantadas, sendo necessária a sua caracterização a fim de permitir que se identifique o material e sua estrutura. Com o propósito de sistematizar um conjunto de elementos geotécnicos em classes que refletem um padrão de comportamento, os sistemas de classificação de maciços rochosos enfocam diversos parâmetros do terreno. Para que sejam feitas as escolhas corretas, é de suma importância compreender as relações entre as estruturas a serem construídas e as características geomecânicas do local de implantação, para que se possam definir as intervenções necessárias visando garantir a segurança, estabilidade e viabilidade executiva do projeto. Sendo assim, neste trabalho propõe-se a caracterização e classificação do maciço rochoso do Depósito Bonsucesso, através da descrição de testemunhos utilizando o índice RQD e as classificações geomecânicas RMR e Q. Juntamente, é proposto o modelo geomecânico para a área, indicando também os locais para as escavações das rampas de acesso da mina. A análise dos dados estruturais deve auxiliar na definição dos métodos de contenção e suporte a serem utilizados. Assim, espera-se que os resultados direcionem a definição do posicionamento das rampas de acesso bem como a elaboração do projeto de escavação, uma vez que a porção superficial do maciço, área de interesse para as escavações das rampas, se mostra bastante carstificada, caracterizando um maciço ruim e fraco, sendo necessário um maior esforço na escolha do local mais adequado e maior investimento em suporte durante a obra. A partir dos resultados da classificação foi possível obter o modelo geomecânico, onde há predomínio da classe I e II (maciço bom) na base do depósito, e classes IV e V na porção superficial.

Palavras chave: classificação de maciços, Faixa Vazante, modelo geomecânico, mineração subterrânea.

Abstract

The opening of any mining venture involves the execution of major works that impose several requests on the terrain where they will be implanted, being necessary its characterization in order to allow the identification of the material and its structure. With the purpose of systematizing a set of geotechnical elements in classes that reflect a pattern of behavior, the systems of classification of rock masses focus on various terrain parameters. In order to make the right choices, it is extremely important to understand the relationships between the structures to be built and the geomechanical characteristics of the implantation site, so that the necessary interventions can be defined in order to guarantee the safety, stability and executive viability of the project. Therefore, this work proposes the characterization and classification of the rock massif of the Bonsucesso Deposit, through the description of cores using the RQD index and the geomechanical classifications RMR and Q. Together, the geomechanical model for the area is proposed, also indicating the sites for excavating the mine access ramps. The analysis of structural data should assist in defining the methods of containment and support to be used. Thus, it is expected that the results will guide the definition of the positioning of the access ramps as well as the elaboration of the excavation project, since the surface of the massif, an area of interest for the excavation of the ramps, is quite characterized, characterizing a poor and weak massif, requiring greater effort in choosing the most suitable location and greater investment in support during the work. From the results of the classification it was possible to obtain the geomechanical model, where there is a predominance of class I and II (good massif) at the base of the deposit, and classes IV and V on the surface.

Key words: rock mass classification, Faixa Vazante, geomechanical model, underground mine.

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

A mecânica das rochas, em uma definição simplificada, estuda o comportamento e a natureza mecânica dos maciços rochosos em relação às obras de engenharia. Grandes obras impõem diversas solicitações ao terreno onde serão implantadas, fazendo-se necessário a caracterização geomecânica deste terreno, permitindo identificar o material e sua estrutura.

Abordados com base em relatos de casos de engenharia civil, a maioria dos sistemas de classificação multi-parâmetro (Wickham *et al.*, 1972; Bieniawski, 1973; Barton *et al.*, 1974) passaram a incluir também componentes de caráter geológico e, ao longo dos anos os diversos métodos de classificação foram aprimorados, adequando-se a empreendimentos mineiros subterrâneos e a céu aberto (Bieniawski, 1989). Diferentes sistemas de classificação enfocam aspectos diversificados dos vários parâmetros do maciço, como por exemplo, litologia, resistência, descontinuidades, alteração, com a finalidade de sistematizar um conjunto de elementos geotécnicos em classes, e a essas classes se associa um padrão de comportamento. Desta forma, recomenda-se que sejam utilizados pelo menos dois métodos de classificação durante a implantação de um projeto (Hoek *et al.*, 1995).

Os benefícios das classificações de maciços rochosos vão, desde o fornecimento de informações quantitativas pra fins de projeto, provendo parâmetros para o desenvolvimento de modelos geomecânicos, à melhoria da avaliação de engenharia tornando mais eficaz a comunicação em um projeto, bem como a velocidade com que essas obras serão executadas e economia gerada devido ao planejamento correto.

Sendo assim, o sucesso na implantação de um projeto mineiro, depois de provada a sua pré-viabilidade, está diretamente relacionado a excelência nas fases de projetos básicos, executivos e de construção. E para que sejam feitas as escolhas corretas, de forma segura e econômica, é de suma importância compreender as relações entre as estruturas a serem construídas e as características geomecânicas do local de implantação, a fim de definir os tipos de intervenções para garantir a segurança, estabilidade e viabilidade executiva do empreendimento.

O depósito Bonsucesso está localizado no município de Paracatu (Figura 1.1), região noroeste do Estado de Minas Gerais, inserido no contexto das rochas carbonáticas da Formação Morro do Calcário, pertencente ao Grupo Vazante, onde são encontrados minério sulfetado de zinco e chumbo, hospedados em rochas dolomíticas. A porção superficial do depósito se encontra altamente carstificada, sendo qualificada como de alta complexidade. Na realização deste trabalho, buscou-se

identificar a melhor localização, de acordo com critérios geotécnicos, para construção das rampas de acesso. Essa identificação foi pautada na utilização dos resultados do levantamento geofísico de eletrorresistividade para direcionar onde serão locados os furos geotécnicos, para que se possa caracterizar e classificar o maciço através da descrição geotécnica dos testemunhos, utilizando os índices RQD (*Rock Quality Designation*), RMR (*Rock Mass Rating*) e Q (*Rock Tunnel Quality*), em função do grande número de casos históricos analisados e da facilidade na obtenção das informações para planejamento de taludes, túneis, galerias e outras escavações relacionadas à pesquisa mineral e planejamento de lavra.

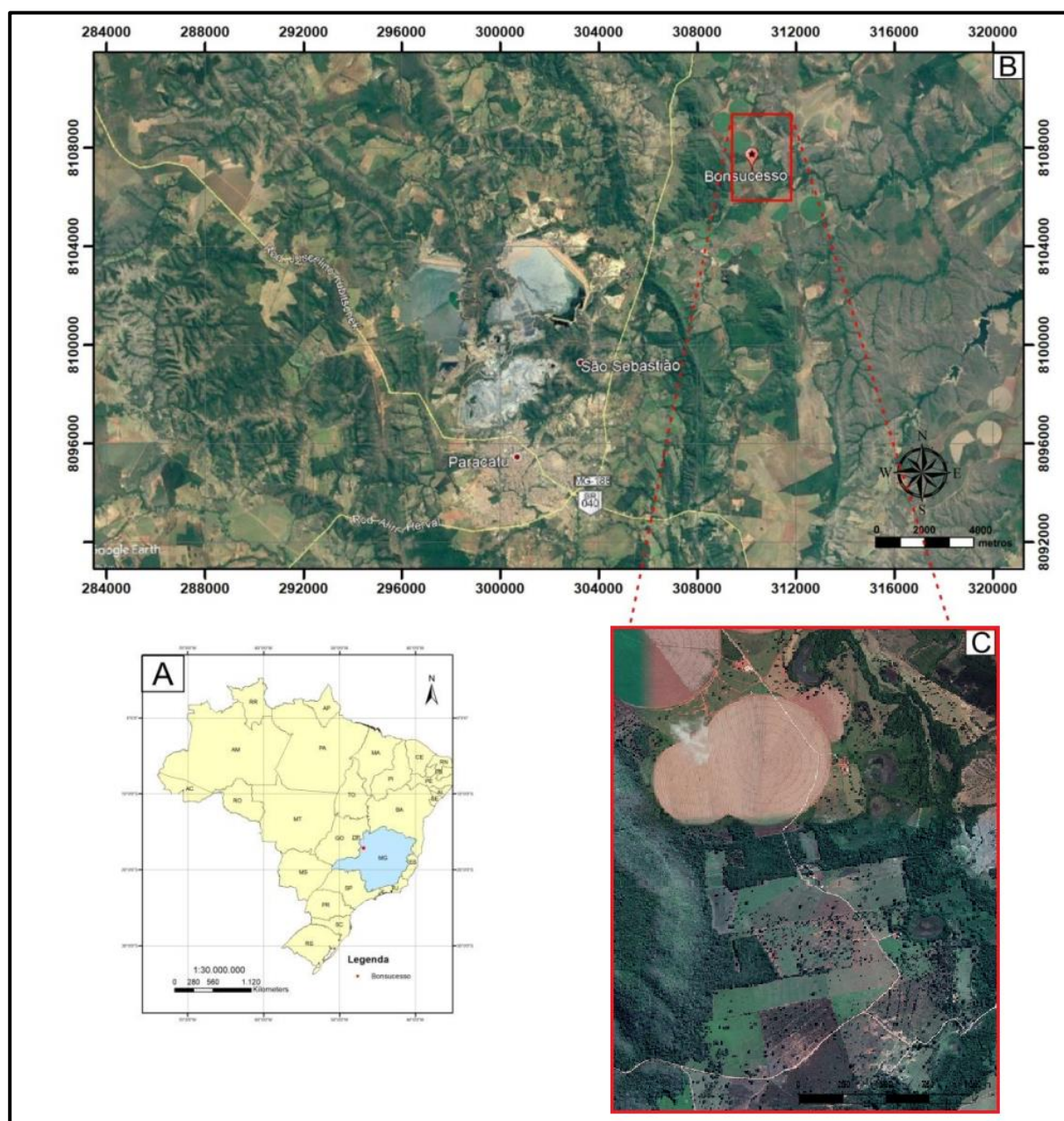


Figura 1.1: Mapa de localização da área de estudo. (A) Localização do Estado de Minas Gerais no Brasil; (B) Localização do depósito Bonsucesso em relação à cidade de Paracatu e (C) área de estudo.

Por se tratar de uma região carstificada, o grande desafio na construção das rampas de acesso está relacionado ao estado de intemperismo das rochas e a influência da água, que são parâmetros significativos e que merecem destaque, não devendo ser ignorados, como acontece em alguns casos de mineração de rocha em níveis mais profundos. O intemperismo provoca alterações no comportamento mecânico dos maciços tornando-o um sistema complexo quando somado a outros fatores, e essa complexidade é o principal desencadeador de problemas geotécnicos, como alto grau de fraturamento, percolação de água segundo as descontinuidades e consequente aceleração do processo de alteração.

Portanto, a geofísica em conjunto com as classificações de maciços rochosos permite, neste trabalho, avaliar a qualidade do maciço, traçando o dimensionamento apropriado para as escavações e a correta aplicação das contenções adequadas.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo definir a melhor localização para construção das rampas de acesso à mina cruzando informações obtidas do levantamento geofísico de eletrorresistividade e do modelo geomecânico do maciço rochoso do depósito Bonsucesso, proposto através da classificação geomecânica do maciço segundo os sistemas RQD, RMR e Q. O modelo irá auxiliar no conhecimento da distribuição espacial das características do pacote rochoso, possibilitando a estruturação das escavações da rampa.

Como objetivo específico, tem-se a análise dos dados estruturais coletados das fraturas dos testemunhos de sondagem, classificando-as em famílias para que se possa estimar o melhor sistema de suporte.

1.3 JUSTIFICATIVA

É de fundamental importância para um projeto mineiro que se faça na fase preliminar a investigação de reconhecimento estrutural e geomecânico das rochas que receberão as obras de engenharia. Essa investigação deve ser composta por uma série de etapas que englobam desde o reconhecimento inicial, passando pelo acompanhamento de toda a execução do projeto e indo até a manutenção em longo prazo. Esse planejamento inicial é essencial para que se possa redimensionar estruturas e, quando necessário, adotar soluções para a obra.

Muitos desses projetos possuem um custeio oneroso, fazendo com que a investigação prévia da viabilidade técnico-econômica para extração segura e rentável seja necessária. Sendo assim, a caracterização e classificação dos maciços rochosos contribuem positivamente de maneira a indicar um caminho a ser seguido, de forma a garantir a segurança e economicidade da obra de implantação.

Portanto, acredita-se que o detalhamento do estudo geotécnico do maciço do depósito Bonsucesso, com base na classificação geomecânica e na análise dos dados estruturais dos testemunhos de sondagem, possibilitará um melhor entendimento da região de maior complexidade, caracterizada pela zona de carste, auxiliando na tomada de decisões a respeito da utilização da contenção e suporte adequados às escavações das rampas de acesso.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MACIÇOS ROCHOSOS

Mesquita (2008) define maciços rochosos como um conjunto de blocos de rocha intacta, ou apenas a própria rocha intacta, e planos de fraqueza que os delimitam, ou seja, as discontinuidades. Geralmente são heterogêneos e anisotrópicos. Os diferentes tipos litológicos, presença de discontinuidades e o variado grau da alteração são reflexos dessa heterogeneidade e anisotropia dos maciços, devendo ser reconhecidos como um material descontínuo que pode ter propriedades diversas.

Segundo Santos (2015), além do conhecimento das características da matriz formadora do maciço rochoso, é fundamental conhecer as discontinuidades presentes devido a sua menor resistência e maior probabilidade de haver ruptura ao receber esforços. Entende-se por discontinuidades qualquer estrutura geológica que intercepte a continuidade física de um corpo, podendo ser falhas, juntas e outros (Silva, 2013).

A *International Society of Rock Mechanics* (ISRM) (1981) apresentou algumas características das discontinuidades que interferem o comportamento geotécnico dos maciços rochosos. São elas: espaçamento, rugosidade, orientação, preenchimento, persistência, abertura e percolação de água (Figura 2.1).

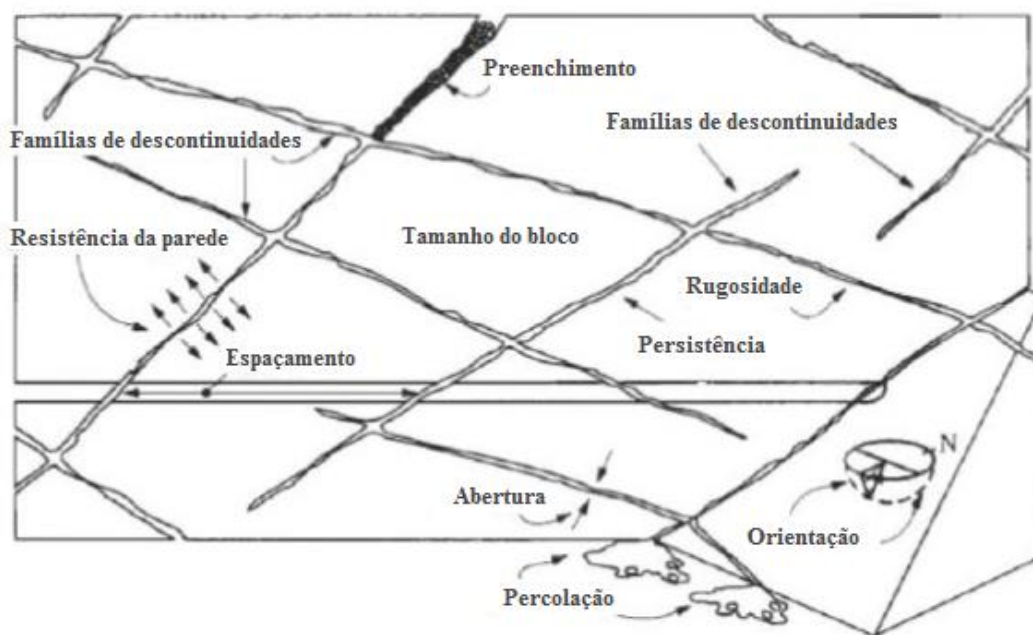


Figura 2.1: Características das discontinuidades (traduzido de ISRM, 2007).

Os maciços também podem ser classificados como competentes ou brandos. Os competentes possuem alta resistência mecânica e geralmente apresentam maior facilidade no levantamento das suas propriedades geomecânicas e estimação dos parâmetros. Já os maciços brandos exibem baixa resistência, podendo gerar dualidade rocha-solo, e conseqüentemente, dificuldade no levantamento de suas propriedades.

2.2 SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO

O uso dos sistemas de classificação nas primeiras etapas de um estudo, onde o conhecimento sobre as características do maciço é limitado, traz grandes benefícios ao projeto, servindo como um *check-list*, assegurando que todas as informações geotécnicas relevantes sejam consideradas, porém não deve ser a única fonte de informação na elaboração de um projeto.

A natureza do maciço rochoso pode ser muito complexa necessitando de ferramentas teóricas que possibilitem analisar o seu comportamento. Sendo assim, os sistemas de classificação geomecânica permitem relacionar a situação presente com situações anteriormente encontradas, ou seja, funciona como uma forma sistemática de catalogar experiências obtidas em outros lugares relacionando-as com situações ora encontradas (Assis, 2001).

Para cada sistema de classificação são considerados diversos parâmetros físicos de caracterização como: litologia, resistência, coerência, descontinuidade, alteração, propriedades hidráulicas, mecânicas e propriedades índices.

Para Bieniawski (1989), a classificação do maciço rochoso tem por objetivo:

- Identificar os parâmetros mais importantes que influenciam o comportamento do maciço rochoso;
- Compartimentar o maciço rochoso em grupos de comportamento mecânico similar;
- Prover uma base sólida para a compreensão das características do maciço;
- Relacionar a experiência de condições da rocha em um local com as condições e experiências adquiridas em outros locais;
- Verificar os parâmetros quantitativos e as diretrizes para o projeto de engenharia;
- Viabilizar uma base comum para uma comunicação efetiva entre as pessoas envolvidas com a geomecânica.

Terzaghi (1946) fez a primeira referência ao uso de classificação do maciço rochoso. Ele considerou a estrutura de descontinuidade do maciço em seu sistema de classificação, ordenando-os qualitativamente em categorias por meio de definições claras e concisas. Porém, esse sistema de classificação não era provido de nenhuma informação quantitativa referente às propriedades do maciço

rochoso. Portanto, não era considerado adequado para métodos modernos de túneis. Apesar disso, quase todos os métodos posteriores utilizam ou fazem alguma referência ao método proposto por Terzaghi.

Lauffer (1958, apud Hoek *et al.*, 2000), então, propôs um sistema baseado no tempo de auto sustentação para um determinado vão de escavação livre relacionando-o com a qualidade do maciço rochoso no espaço escavado. Desta forma, obteve que o tempo de auto sustentação é o período de tempo que um túnel ficaria estabilizado sem suporte depois da escavação.

A classificação de Lauffer passou por diversas modificações que conduziu ao desenvolvimento do *New Austrian Tunneling Method* (NATM), que inclui uma série de técnicas para que o processo de abertura de túneis seja seguro, em condições de rocha onde o tempo de auto sustentação é limitado antes de ocorrer a falha.

O primeiro índice quantitativo para descrever a qualidade do maciço rochoso foi proposto por Deere (1964). Denominado *Rock Quality Designation* (RQD), foi inicialmente desenvolvido para ser um sistema de classificação para construção de túneis e estimar suportes em um momento em que as informações sobre a qualidade do maciço eram disponíveis somente pelas descrições geológicas e pelo percentual do testemunho recuperado (Deere e Deere, 1988). O método baseia-se em medir a porcentagem de rocha “íntacta” presente no testemunho de sondagem proveniente de um avanço em uma sondagem rotativa diamantada. O RQD passou a ser internacionalmente conhecido e utilizado a partir do ano de 1968, quando foi publicado o livro “*Rock Mechanics in Engineering Practice*”.

Wickham *et al.* (1972) desenvolveram um método quantitativo de descrever a qualidade de um maciço rochoso e para selecionar o suporte apropriado baseado na classificação *Rock Structure Rating* (RSR). Esse método permite classificar o maciço a partir de notas atribuídas a cada uma de suas características, determinando um valor numérico total (RSR) para cada classe. A geologia do maciço (tipo de rocha, dureza e estruturas), geometria das descontinuidades (espaçamento, orientação e relação com direção da escavação) e o efeito da ação de águas subterrâneas são parâmetros avaliados nessa classificação.

O Sistema *Rock Mass Rating* (RMR) foi desenvolvido por Bieniawski (1973), enquanto Barton *et al.* (1974) desenvolveram o *Rock Mass Quality* (Sistema Q). Esses sistemas utilizam a atribuição de notas na classificação do maciço e se baseiam também na experiência obtida em casos históricos. Atualmente, são os sistemas de classificação geomecânica mais utilizados.

O Sistema Q avalia numericamente a qualidade do maciço rochoso usando parâmetros como: RQD, número de família de fraturas, rugosidade das fraturas, grau de alteração e preenchimento das fraturas, além do fluxo de água subterrânea e condições de tensões objetivando determinar o tipo de

suporte necessário para um túnel partindo da relação entre a classificação do maciço, a dimensão do vão e sua finalidade.

2.2.1 Sistema de Classificação RQD

Proposto por Deere (1964), o sistema RQD foi o primeiro índice quantitativo para descrever a qualidade do maciço rochoso. Trata-se de um índice de fácil aplicabilidade e de grande aceitação, incorporado aos mais modernos sistemas de classificação.

O método consiste em medir a porcentagem de rocha “íntacta” presente no testemunho de sondagem procedente de um avanço em uma sondagem rotativa diamantada. O índice é calculado através da razão entre o somatório dos comprimentos das partes íntactas do testemunho maiores que 10 cm e o comprimento total do testemunho (Equação 1). O procedimento sugerido por Deere e Deere (1988) para se medir o comprimento dos fragmentos de testemunhos e para o cálculo do RQD é mostrado na figura 2.2. A relação entre o índice RQD obtido e a qualidade da rocha é mostrada na Tabela 1.

$$RQD = \frac{\sum \text{porções de rocha íntacta com mais de 10 cm}}{\text{comprimento total do testemunho}} \times 100 \quad (1)$$

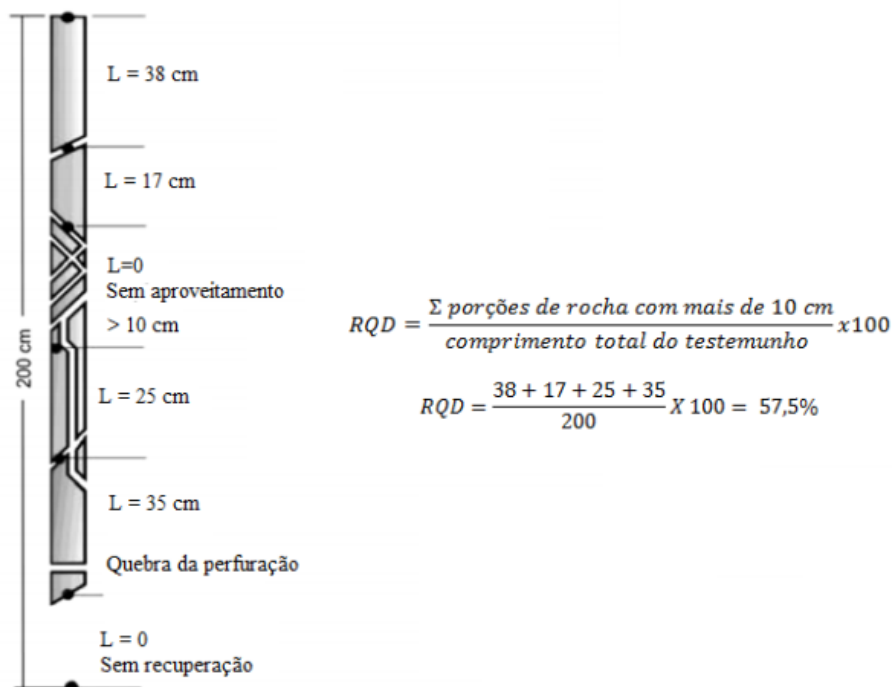


Figura 2.2: Procedimento utilizado para determinação do RQD a partir de testemunhos de sondagem (Deere e Deere, 1988).

Tabela 1: Relação entre o índice RQD e a qualidade da rocha (Deere, 1989).

RQD (%)	Qualidade da Rocha
0 - 25	A - Muito ruim
25 - 50	B - Ruim
50 - 75	C - Razoável
75 - 90	D - Bom
90 - 100	E - Excelente

Outra forma de se obter o índice RQD foi proposta por Palmström (1982) para casos em que não existem testemunhos de sondagem disponíveis. Ela consiste em calcular diretamente no maciço rochoso, onde existem traços de descontinuidade visíveis, podendo ser estimado pelo número de descontinuidades por unidade de volume (m³), através da Equação 2:

$$RQD = \begin{cases} 110 - 2,5.J_v, & \text{se } 4 < J_v < 44 \\ 115 - 3,3.J_v, & \text{em outro caso} \end{cases} \quad (2)$$

Onde J_v representa o contador volumétrico de juntas, ou seja, o somatório do número de descontinuidades por unidade de comprimento, e é definido pela Equação 3:

$$J_v = \sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i} \quad (3)$$

Onde S_i é o espaçamento das descontinuidades em metros para a referida família de descontinuidades e n é o número de famílias.

A utilização da contagem volumétrica de juntas reduz a dependência direcional, uma vez que o RQD é um parâmetro altamente dependente da direção e pretende representar a qualidade do maciço rochoso *in situ*. Dependendo da orientação do furo, pode ter seu valor alterado significativamente. A equação de Palmström (1982) foi alcançada empiricamente e pode ser ilustrada segundo ábaco de correlação entre J_v e RQD (Figura 2.3).

Outra correlação foi proposta por Bieniawski (1989), relacionando o espaçamento das descontinuidades e o valor de RQD. Para cada espaçamento é conferido um RQD máximo, mínimo e médio (Figura 2.4).

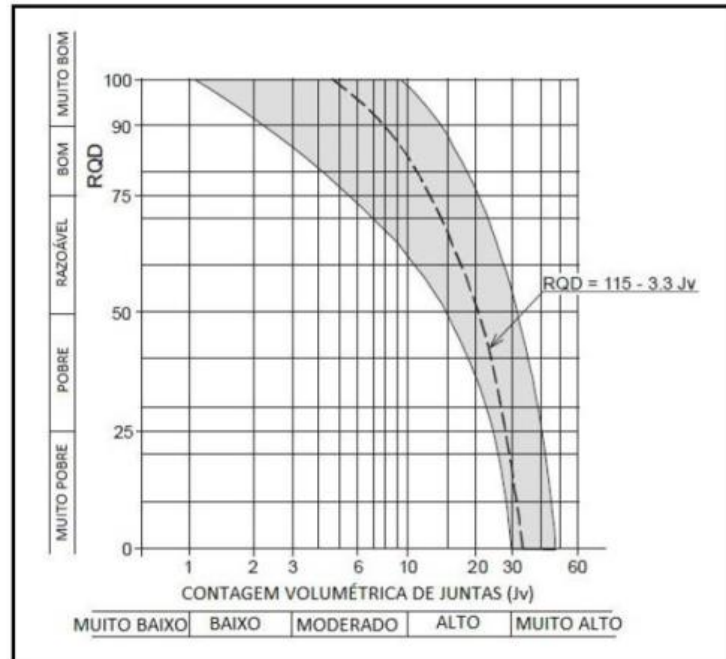


Figura 2.3: Correlação entre RQD e J_v (Palmström, 1982).

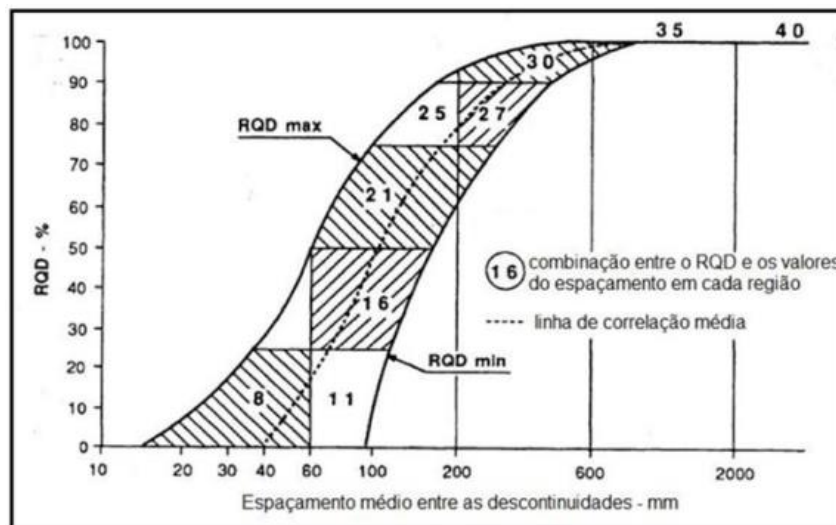


Figura 2.4: Correlação entre o RQD e o espaçamento das descontinuidades (Bieniawski, 1989).

Apesar de ser considerado um índice simples e barato, quando considerado sozinho não se mostra suficiente para apresentar uma descrição adequada do maciço rochoso em virtude de desconsiderar a orientação e o tipo de preenchimento das descontinuidades e a condição de tensão (Redondo, 2003).

2.2.2 Sistema de Classificação RMR

O sistema de classificação (RMR) publicado por Bieniawski (1973) foi inicialmente desenvolvido para dimensionamento e execução de obras subterrâneas, mas logo surgiram aplicações diversas na estabilidade de taludes (Castro, 2004). O método sofreu mudanças significativas ao longo dos anos com diversas revisões, mas que mantiveram os princípios básicos, sendo as versões apresentadas em 1976 e 1989 as mais utilizadas pela comunidade científica.

A classificação se baseia na atribuição de pesos aos seis parâmetros que o autor julgou contribuir mais significativamente para o comportamento dos maciços: resistência à compressão uniaxial da rocha intacta; índice RQD; espaçamento entre as descontinuidades; condição das descontinuidades; presença de água subterrânea e; orientação das descontinuidades em relação à direção do eixo da escavação.

A cada um destes parâmetros é correlacionado um peso. O RMR básico é determinado através da soma dos pesos atribuídos aos primeiros cinco parâmetros listados acima. A orientação das descontinuidades em relação à direção do eixo de escavação é um parâmetro que ajusta o valor de RMR. O somatório dos pesos de cada um destes parâmetros estabelece um índice, que corresponde a uma das cinco classes de qualidade de maciços consideradas pelo autor. Nas Tabelas 2, 3 e 4 encontram-se os parâmetros e seus respectivos pesos e na Tabela 5 estão as classes do RMR.

Tabela 2: Parâmetros do RMR (traduzido de Bieniawski, 1989).

Parâmetros			Coeficientes						
1	Resistência da rocha intacta	Point load	>10Mpa	4-10Mpa	2-4Mpa	1-2Mpa	Ver compressão		
		Compressão uniaxial	>250Mpa	100-250Mpa	50-100Mpa	25-50Mpa	5-25Mpa	1-5Mpa	<1Mpa
	Pesos		15	12	7	4	2	1	0
2	R.Q.D		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%		
	Pesos		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento médio		>2mm	2-0,6m	0,6-0,2m	0,2-0,06m	<0,06m		
	Pesos		20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades (Ver tab.2)		Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1mm, paredes ligeiramente alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou enchimento com espessura <5mm ou juntas contínuas com separação 1-5mm	Enchimento mole com espessura >5mm ou juntas contínuas com separação >5mm		
Pesos			30	25	20	10	0		

Tabela 3: Condição das descontinuidades (traduzido de Bieniawski, 1989).

Comprimento das descontinuidades	<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m
Pesos	6	4	2	1	0
Separação (abertura)	Nenhuma	<0,1mm	0,1-1,0mm	1-5mm	>5mm
Pesos	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Quase liso	Liso
Pesos	6	5	3	1	0
Preenchimento	Nenhum	Duro com espessura <5mm	Duro com espessura >5mm	Mole com espessura <5mm	Mole com espessura >5mm
Pesos	6	4	2	2	0
Grau de alteração	Não alterada	Ligeiramente alterada	Moderadamente alterada	Muito alterada	Em decomposição
Pesos	6	5	3	1	0

Tabela 4: Parâmetros do RMR (traduzido de Bieniawski, 1989).

5	Presença de água	Cauda por 10m de comprimento do túnel	Nenhum	<10L/min	10-25L/min	25-125L/min	>125L/min
		Relação pressão da água vs tensão principal máxima	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5
		Condições gerais	Completamente seco	Água intersticial	Húmido	Escorrimentos	Entrada de água
	Pesos		15	10	7	4	0
	Orientação das descontinuidades		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
6	Pesos	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
		Fundações	0	-2	-7	-15	-25
		Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Tabela 5: Classes do RMR (traduzido de Bieniawski, 1989).

Peso global	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	<21
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Maciço rochoso muito bom	Maciço rochoso bom	Maciço rochoso razoável	Maciço rochoso fraco	Maciço rochoso muito fraco

Para que se possa aplicar a classificação RMR é fundamental que se divida o maciço em domínios com propriedades geológicas e estruturais semelhantes, mesmo sabendo-se que maciços são naturalmente descontínuos. Mesmo dentro desses domínios, em zonas de mesma litologia, pode haver casos que seja preciso uma nova subdivisão devido a mudanças significativas no espalhamento das descontinuidades ou características das mesmas (Hoek *et al.*, 2000). Após a identificação das regiões estruturais, são determinados os parâmetros de classificação para cada região a partir de medições.

Bieniawski (1989) apresenta uma série de gráficos (Figura 2.5) que possibilita determinar com alta precisão o peso de alguns parâmetros e também a correlação entre RQD e o espaçamento entre as descontinuidades, a fim de não parecer que os pesos dados a cada parâmetro são determinísticos. O sistema RMR é de simples aplicabilidade e seus parâmetros são facilmente obtidos em furos de sondagem ou mapeamentos geológicos (Bieniawski, 1989).

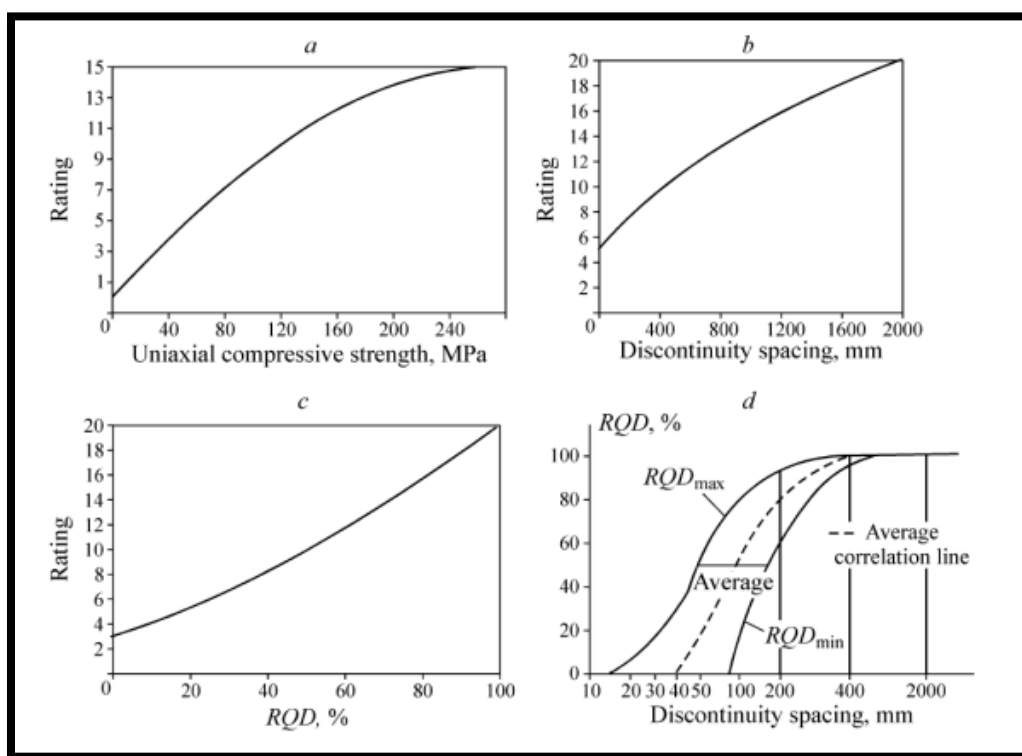


Figura 2.5: Gráficos de parâmetros e pontuações para o RMR. a) Pontuação em relação à compressão uniaxial, b) Pontuação em relação à variação do espaçamento, c) Pontuação em relação ao RQD e d) Correlação entre RQD e espaçamento (Aksoy, 2008).

2.2.3 Sistema de classificação “Q” de Barton

Desenvolvido para túneis e escavações de cavernas amplas, o sistema Q foi proposto por Barton *et al.* (1974) e visa não só classificar, mas também quantificar o comportamento geomecânico de maciços rochosos. Baseado em mais de 200 estudos de caso, o sistema Q sugere maior

confiabilidade da metodologia. Em relação aos outros sistemas, o sistema Q é o mais sensível à avaliação da influência da resistência das descontinuidades, considerando esse parâmetro como o de maior importância para estimar o suporte em escavações.

Bem como o sistema RMR, o sistema Q também considera o RQD, entretanto, não se faz necessária a determinação de parâmetros como a resistência da rocha ou espaçamento das descontinuidades. O sistema leva em consideração seis parâmetros (Quadro 1) entre propriedades físicas das rochas, parâmetros do maciço e propriedades das descontinuidades, e pode ser definida pela Equação 4:

$$Q = \left[\frac{RQD}{J_n} \right] \cdot \left[\frac{J_r}{J_a} \right] \cdot \left[\frac{J_w}{SRF} \right] \quad (4)$$

Onde:

RQD é o índice de qualidade da rocha.

J_n é o número de famílias de descontinuidade.

J_r é o tipo de rugosidade das paredes das descontinuidades.

J_a é a alteração das paredes das descontinuidades.

J_w é a influência da água na ação subterrânea.

SRF é o estado de tensão do maciço.

Cada termo entre colchetes demonstram efeitos individuais. O primeiro quociente (RQD/J_n) representa a estrutura média da massa rochosa podendo ser considerado uma aproximação para o tamanho do bloco; o quociente (J_r/J_a) representa a rugosidade e o grau de alteração das paredes das descontinuidades. A função $\text{tg}^{-1}(J_r/J_a)$ caracteriza uma aproximação do ângulo de atrito interblocos ao longo das descontinuidades. O último quociente (J_w/SRF) representa dois parâmetros referentes aos esforços ativos operantes no maciço. A pontuação varia para cada parâmetro e o resultado final é plotado em escala logarítmica de qualidade de massa rochosa, variando de 0,001 e 1000, sendo dividido em 10 classes (Tabela 6). Quanto mais alto o valor de Q encontrado, melhores serão as condições de escavabilidade do maciço rochoso.

O sistema Q pode ser correlacionado com o RMR de Bieniawski pela Equação 5 (Bieniawski, 1984):

$$RMR = 9 \cdot \ln Q + 44 \quad (5)$$

Quadro 1: Parâmetros utilizados na classificação Q (Barton *et al.*, 1974).

Descrição	Valor	Notas
1. Rock Quality Designation	RQD	
A. Muito pobre	0 - 25	1. Quando o valor de RQD obtido for ≤ 10 (incluindo 0), um valor nominal de 10 deve ser utilizado para se calcular o Q. 2. Intervalos de RQD de 5 em 5 são suficientemente precisos.
B. Pobre	25 - 50	
C. Média	50 - 75	
D. Boa	75 - 90	
E. Excelente	90 - 100	
2. Número de Famílias de Juntas	Jn	
A. Maciço, nenhuma ou poucas juntas	0,5 - 1,0	1. Para intersecções, utilizar (3 x Jn) 2. Para emboques, utilizar (2 x Jn)
B. Uma família de juntas	2	
C. Uma família de juntas mais juntas aleatórias	3	
D. Duas famílias de juntas	4	
E. Duas famílias de juntas mais juntas aleatórias	6	
F. Três famílias de juntas	9	
G. Três famílias de juntas mais juntas aleatórias	12	
H. Quatro ou mais famílias de juntas, juntas aleatórias, muito fraturado, poliedros irregulares	15	
I. Rocha fragmentada, “brita”	20	
3. Índice de Rugosidade	Jr	
a. paredes das juntas em contato		1. Somar 1,0 se o espaçamento médio das juntas principais for maior que 3 m. 2. Jr = 0,5 pode ser utilizado para juntas planares, estriadas e com lineações, sendo que as lineações orientam a direção de menor resistência.
b. paredes com menos de 10 cm de cisalhamento		
A. Juntas descontínuas	4	
B. Rugosa e irregular, ondulada	3	
C. Lisa e ondulada	2	
D. Estrias de fricção e onduladas	1,5	
E. Rugosa ou irregular, plana	1,5	
F. Lisa e plana	1,0	
G. Estrias de fricção e plana	0,5	
c. sem contato entre as paredes, zona cisalhada		
H. Zona contendo argilominerais com espessura suficiente para impedir contato entre as paredes	1,0 (nominal)	
J. Arenosa ou fragmentada com espessura suficiente para impedir contato entre as paredes	1,0 (nominal)	

4. Índice de Alteração	Ja	Ør(°)	
a. contato entre paredes			1. Valores de Ør, o ângulo de atrito residual, tem como objetivo um guia aproximado às propriedades mineralógicas dos produtos de alteração, se presentes.
A. Selada, duro, impermeável, preenchida por quartzo calcita, etc.	0,75		
B. Paredes sãs, superfície descolorida somente	1,0	25 - 35	
C. Paredes pouco alteradas, sem minerais brandos recobrindo, sem argila e rocha desintegrada	2,0	25 - 30	
D. Paredes com silte ou areno-argilosas, pouca argila	3,0	20 - 25	
E. Minerais brandos com baixo atrito, argilominerais. Também clorita, talco, gipsita, etc.	4,0	8 - 16	
b. paredes com menos de 10 cm de cisalhamento, preenchimento fino			
F. partículas arenosas, sem argilominerais, rocha decomposta, etc	4,0	25 - 30	
G. Argila rígida dura, contínua, porém com espessura ≤ 5 mm	6,0	16 - 24	
H. Argila pouco a medianamente consolidada, contínua, porém com espessura ≤ 5 mm	8,0	12 - 16	
J. Argilominerais expansivos, etc., contínua, porém ≤ 5 mm; valor de Ja dependerá da % de argila expansiva e acesso à água, etc.	8,0 - 12,0	6 - 12	
c. sem contato entre as paredes, zona cisalhada			1. Fatores C a F são estimados. Aumentar Jw se forem instalados drenos. 2. Problemas especiais causados pela formação de gelo não são considerados
K/L/M. Zonas brandas desintegradas, rocha fragmentada e argila, ver G, H, J	6,0/8,0/8,0 - 12,0	6 - 24	
N. zonas u bandas de silte ou argilo-arenosas e pouco argilominerais, dura	5,0		
O/P/Q. espessa, contínua, zona ou banda de argila, ver G, H, J, para descrição	10/13/13 - 20		
5. Fator de redução devido à presença de água	Jw	Pressão de água aproximada (kg/cm ²)	
A. Escavação seca ou gotejamento ≤ 5 l/min localmente	1,0	< 1,0	
B. Vazão média ou pressão, pode lavar o preenchimento	0,66	1,0 - 2,5	
C. Vazão alta ou alta pressão em rocha competente e juntas não preenchidas	0,5	2,5 - 10,0	
D. Vazão alta ou pressão alta	0,33	2,5 - 10	
E. Excepcionalmente alto fluxo ou pressão após detonação, diminuindo com o tempo	0,2 - 0,1	> 10	
F. Pressão ou fluxo excepcionalmente alto	0,1 - 0,05	>10	

6. Stress Reduction Factor	SRF	
a. zonas de fraqueza interceptando a escavação, as quais poderão causar queda de blocos de rocha quando o túnel é escavado		1. Reduzir os valores de SRF em 25 - 50% mas apenas se zonas de cisalhamento importantes influenciam mas não interceptam a escavação
A. Múltiplas ocorrências de zonas fracas contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada, muito material solto na asuperfície da rocha	10	
B. Única zona de fraqueza com argila ou rocha desintegrada (profundidade ≤ 50 m)	5	
C. Única zona de fraqueza com argila ou rocha desintegrada (profundidade ≥ 50 m)	2,5	2. Capa campos de esforços fortemente anisotrópicos (se medidos): quando $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$, reduzir σ_c para $0,8\sigma_c$ e σ_t para $0,8\sigma_t$. Quando $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, reduzir σ_c e σ_t para $0,6\sigma_c$ e $0,6\sigma_t$. Onde σ_c = resistência a compressão simples, σ_t = resistência a tração (carga pontual) e σ_1 e σ_3 são os esforços maior e menor, respectivamente.
D. Múltiplas zonas cisalhadas e rocha competente, sem argila; material solto na superfície da rocha; qualquer profundidade	7,5	
E. Única rocha cisalhada em rocha competente, sem argila (profundidade ≤ 50 m)	5	
F. Única rocha cisalhada em rocha competente, sem argila (profundidade ≥ 50 m)	2,5	
G. Fragmentada, juntas abertas, muito fraturada, "brita"	5,0	
b. rocha competente; problemas de tensão do maciço		σ_c/σ_1 σ_t/σ_1
H. Baixa tensão, próximo à superfície	2,5	> 200 > 13
J. Média tensão, condições favoráveis de tensão	1,0	200 - 10 13 - 0,66
K. Tensão alta	0,5 - 2	0,66 - 10 - 5 0,33
L. Moderado deslocamento em rocha maciça	5 - 10	0,33 - 5 - 2,5 0,16
M. Deslocamento e explosão de rocha em rocha maciça, após poucos minutos	10 - 20	< 2,5 < 0,16
c. Squeezing rock: fluxo plástico de rocha incompetente causado por altas pressões de rocha		3. Alguns casos históricos disponíveis onde a profundidade da abobada abaixo da superfície é menor do que a largura da escavação, sugere que o SRF seja incrementado de 2,5 para 5. (ver caso H)
N. Squeezing moderado devido a pressão de rocha	5 - 10	
O. Alta pressão de squeezing de rocha	10 - 20	
d. Expansibilidade de rochas: expansão química dependendo da presença de água		
P. Moderada expansibilidade e consequente pressão de rocha	5 - 10	
R. Intensa expansibilidade e consequente pressão de rocha	10 - 15	

Notas adicionais para o uso destas tabelas

Quando se faz estimativas de qualidade de massa rochosa (Q), os seguintes procedimentos devem ser seguidos além das notas listadas nas tabelas:

1. Quando o testemunho de sondagem não está disponível, o RQD pode ser estimado pelo número de juntas por unidade de volume, em qual o número de juntas por metro de cada junta é somado. Uma relação simples pode ser usada para converter este número para o RQD para o caso de massas rochosas sem material argiloso: $RQD = 115 - 3,3J_v$ (aprox.), onde J_v = número total de juntas por m³ ($0 < RQD < 100$ para $35 > J_v > 4,5$).
2. O parâmetro J_n que representa o número de famílias de fraturas será frequentemente afetado pela presença de foliação, xistosidade, clivagem ardósiana ou acamamento, e etc. Se fortemente desenvolvida, estas "juntas" paralelas devem obviamente ser contadas como uma família de juntas completa. Entretanto, se existirem poucas "juntas" visíveis, ou se apenas ocasionalmente ocorrem quebras no testemunho de rocha devido a essas feições, então será mais apropriado contá-las como "juntas aleatórias" quando estimar o J_n .
3. Os parâmetros J_r e J_a (representando a resistência ao cisalhamento) deve ser referente à família de fraturas mais fraca ou descontinuidade preenchida por argila na porção analisada. Entretanto se a família de juntas ou descontinuidades com valor mínimo de J_r/J_a possui orientação favorável para a estabilidade, então uma segunda família de juntas ou descontinuidades menos favoráveis pode algumas vezes serem mais significantes, e seu valor mais elevado de J_r/J_a deve ser utilizado para avaliar o Q. O valor de J_r/J_a deve se relacionar com a superfície mais provável a se gerar uma ruptura.
4. Quando uma massa rochosa contém argila, o fator SRF para alívio de carga deve ser avaliado. Em tais casos, a resistência da rocha intacta é de pouco interesse. Entretanto, quando as juntas são poucas e a argila completamente ausente, a resistência da massa rochosa pode se tornar o elo mais fraco, a estabilidade irá depender então da razão esforços da rocha/resistência da rocha. Um campo de esforços fortemente anisotrópico é desfavorável a estabilidade e é considerado na nota 2 da tabela sobre avaliação do fator de redução devido aos esforços.
5. As resistências a compressão e a tração da rocha intacta deve ser avaliada em condições saturadas se isto for apropriado para as condições presentes ou futuras. Uma estimativa muito conservadora deve ser feita para as rochas que deterioram quando expostas a umidade ou condições saturadas.

Tabela 6: Classificação do maciço no sistema Q (Barton *et al.*, 1974).

Classe	Padrão geomecânico do maciço	Valores de Q
IX	Péssimo	0,0001 - 0,01
VIII	Extremamente ruim	0,01 - 0,1
VII	Muito ruim	0,1 - 1,0
VI	Ruim	1,0 - 4,0
V	Regular	4,0 - 10,0
IV	Bom	10,0 - 40,0
III	Muito bom	40,0 - 100,0
II	Ótimo	100,0 - 400,0
I	Excelente	> 400,0

A relação entre o valor calculado do Q e o tipo de contenção requerida é dada após definir a dimensão equivalente (DE) da escavação. Esse parâmetro é obtido pela razão entre o vão, diâmetro ou altura da parede da escavação e o fator “*excavation support ratio*” (ESR), como apresentado na Equação 6:

$$DE = \frac{\text{vão ou altura (m)}}{ESR} \quad (6)$$

O ESR está relacionado à finalidade da escavação e ao grau de segurança demandado, como mostrado na Tabela 7.

Tabela 7: Valores da relação de suporte de escavação (traduzido de Barton *et al.* 1974).

NATUREZA DA ESCAVAÇÃO	ESR
Galerias temporárias de minas.	3 - 5
Chaminés verticais:	
Seção circular	2,5
Seção retangular quadrada	2,0
Galerias permanentes de minas, túneis e galerias de adução, túneis piloto, câmaras e galerias para escavações de grande porte.	1,6
Escavações para estocagem, plantas de tratamento de água, túneis ferroviários e rodoviários, túneis de acesso.	1,3
Estação de força, túneis principais ferroviários e rodoviários, portais, interseções de túneis.	1,0
Escavação para centrais nucleares, túneis metroviários, instalações para desenvolvimento de atividade humana.	0,8

A relação entre o índice Q e a dimensão equivalente (DE) da escavação determina o tipo de suporte apropriado, como mostrado na figura 2.6.

O comprimento dos tirantes não está especificado no gráfico, mas pode ser determinado pela Equação 7:

$$L = \frac{(2 + 0,15B)}{ESR} \quad (7)$$

Onde B é a largura da escavação.

Pode-se ainda calcular o vão máximo de uma escavação sem a necessidade de contenção pela Equação 8:

$$\text{Vão máx. (sem suporte)} = 2(ESR)Q^{0,4} \quad (8)$$

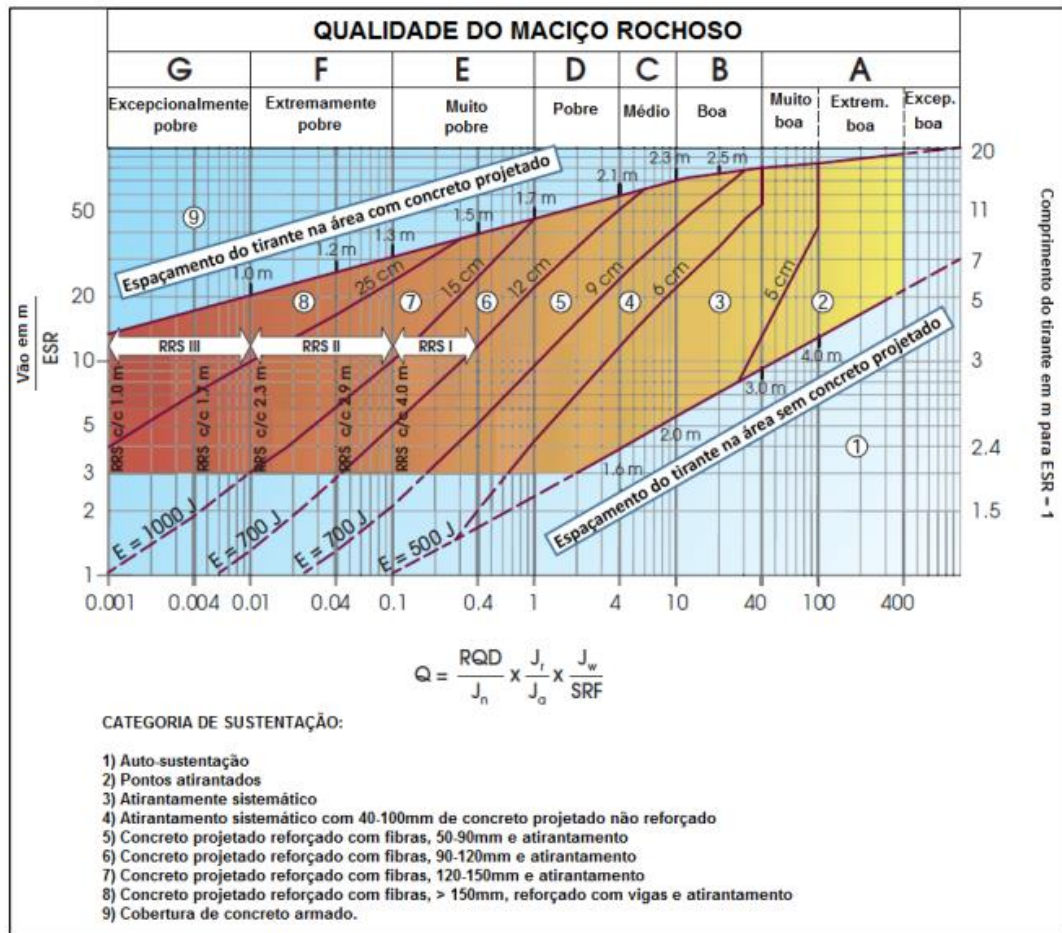


Figura 2.6: Estimativa da categoria de suportes baseado no sistema Q (traduzido de Grimstad e Barton, 1993).

2.3 SISTEMA CÁRSTICO

O carste é um tipo de paisagem na qual temos as formas de relevo determinadas pela dissolução da rocha encaixante, devido ao intemperismo químico. A paisagem cárstica pode variar muito de uma região para outra, mas as feições clássicas são caracterizadas por depressões de vários tamanhos, cavernas e sistemas de drenagens subterrâneas.

De acordo com Ford e Williams (1989) e Klimchouck e Ford (2000), toda rocha, independente do tipo de mineral componente, pode sofrer dissolução em algum tipo de condição ou ambiente específico. Entretanto, as ocorrências mais comuns se dão em rochas carbonáticas, como por exemplo, calcários, dolomitos, mármore.

Ford e Williams (1989) e Jones *et al.* (2003) definiram o carste em três zonas: a zona externa ou exocarste, a zona de contato da rocha com o solo, ou epicarste, e a zona subterrânea, chamada de endocarste (Figura 2.7).

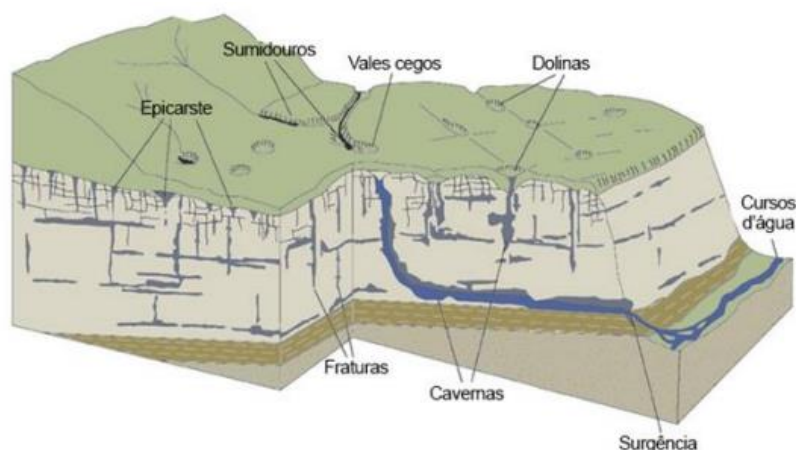


Figura 2.7: Feições do sistema cárstico (modificado de Goldscheider, 2005).

Ainda relacionado ao conceito de carste, são considerados dois modelos genéricos de zonas cársticas, denominados hipogênico e epigênico. Nos sistemas hipogênicos as águas dissolvem por fluxo ascendente, conduzido pela pressão hidrostática ou até mesmo outra fonte de energia (Klimchouk, 2007), podendo ser formados por águas hidrotermais ou águas que contêm ácido sulfídrico (Ford e Williams, 1989; Worthington e Ford, 1995). Já nos sistemas epigênicos, a dissolução acontece pela circulação gravitacional da água, tanto na zona vadosa quanto na zona saturada.

2.3.1 Alteração

Segundo a *International Association of Engineering Geology* (IAEG, 1981), o intemperismo químico se caracteriza pela alteração da composição química e mineralógica da rocha sã, gerando minerais secundários como produtos da decomposição.

Esse processo de alteração dos materiais se dá de maneira gradacional e pode ser caracterizado visualmente através da descoloração e formação de minerais secundários. Nonato (2002) afirma que quanto maior a intensidade do processo intempérico, maior será o enfraquecimento da matriz rochosa intacta. A presença de descontinuidades, argilominerais e composição mineralógica rica em minerais de ferro e magnésio (são mais susceptíveis ao intemperismo químico) são alguns fatores que aceleram o processo de alteração das rochas.

Por ser de difícil mensuração, a ISRM (1981) expressou as possíveis interpretações qualitativas em classes quantitativas, exibidas na Tabela 8. Já a Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), utilizando a divisão elaborada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) (1984), interpretou e descreveu as classes de alteração conforme observado na Tabela 9, possibilitando quantificar o parâmetro de alteração.

Tabela 8: Descrição das classes de alteração (ISRM, 1981).

Sigla	Denominação	Descrição
W1	Rocha sã	Alteração mineralógica nula ou incipiente. Minerais preservam brilho original e cor. Resistência original da rocha não afetada pela alteração.
W2	Rocha pouco alterada	Descoloração na matriz rochosa e nas descontinuidades. Alteração mineralógica perceptível e perda de brilho. Resistência original da rocha parcialmente afetada pela alteração.
W3	Rocha moderadamente alterada	Matriz descolorida, podendo ocorrer material mais alterado das descontinuidades. Resistência afetada pelo intemperismo.
W4	Rocha muito alterada	Matriz totalmente oxidada e cores muito descoloridas. Foliação ressaltada pelo intemperismo. Resistência muito afetada pela alteração.
W5	Rocha completamente alterada	Material rochoso é decomposto em solo com estruturas reliquias. A estrutura do solo ainda é intacta.
W6	Solo residual	Material totalmente transformado em solo. Estruturação da rocha matriz totalmente destruída.

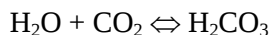
Tabela 9: Descrição das classes de alteração (IPT, 1984).

Grau	Denominações	Características da rocha
A1	Rocha sã ou Parcialmente sã	Minerais primários sem vestígios de alteração ou com alterações físicas e químicas incipientes. A rocha é ligeiramente descolorida.
A2	Rocha medianamente alterada	Minerais medianamente alterados. A rocha pode ser bastante descolorida.
A3	Rocha muito alterada	Minerais muito alterados, por vezes pulverulentos e friáveis.
A4	Rocha extremamente alterada	Minerais totalmente alterados. A rocha é intensamente descolorida, graduando para cores de solo.

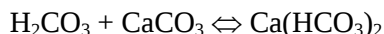
Para a geomecânica, é fundamental avaliar a influência do intemperismo químico a curto e longo prazo, para que se possa investigar a influência da modificação do estado inicial ao longo do período de vida do empreendimento.

2.3.2 Dissolução

Uma importante característica do sistema cárstico é o controle das formas pela dissolução. A química da dissolução em ambiente cárstico é dependente de alguns fatores, como os tipos de ácido disponíveis e a litologia que receberá a ação desses ácidos. Em rochas carbonáticas, ou seja, no carste clássico, a água da chuva absorve o gás carbônico presente na atmosfera e se torna levemente ácida em consequência da reação da água com o gás carbônico, expressa pela reação:



O ácido carbônico, que também se apresenta dissociado em íons, quando entra em contato com o carbonato de cálcio reage formando bicarbonato de cálcio, de acordo com a reação a seguir:



O bicarbonato de cálcio formado é solúvel na água e é facilmente carregado para fora do sistema. Eventualmente o sistema entre em equilíbrio, uma vez que ambas as reações são reversíveis (Jennings, 1985).

Dessa forma, quando ocorre a dissolução das rochas formam-se espaços vazios (cavidades), que devem ser tratados com maior atenção durante as obras do projeto, definindo o método de contenção mais adequado.

2.4 LEVANTAMENTO GEOFÍSICO DE ELETRORESISTIVIDADE

A dificuldade encontrada pela corrente elétrica em se propagar em um meio é caracterizada como resistividade elétrica (Brooks *et al.*, 2009).

O método compreende basicamente na aplicação de corrente elétrica artificial no terreno por dois eletrodos de corrente, objetivando medir o potencial gerado em outros pares de eletrodos, fixados em diferentes distâncias. Nesses pontos, a resistividade elétrica (ρ^e) é calculada pela Equação 9:

$$\rho^e = K \frac{\Delta V}{I} \quad (9)$$

Onde K é a constante geométrica que depende do espaçamento e da quantidade de pares de dipolos, ΔV é a diferença de potencial de um dipolo específico e I é a corrente induzida.

O caminhamento elétrico é realizado quando é necessário o levantamento de seções 2D de resistividade elétrica e consiste na obtenção da resistividade a partir de medidas realizadas na superfície do terreno ao longo de uma seção, investigando a variação horizontal de resistividade em diversas profundidades (Elis *et al.*, 2003).

Em um caminhamento, os eletrodos são distribuídos em uma linha, com um par de eletrodos emissores de corrente (AB), e diversos pares de eletrodos receptores de corrente (MN) (Gallas, 2000). Cada vez que esse conjunto é posicionado, a resistividade é amostrada em diversas profundidades (Figura 2.8).

A cada posição em que o conjunto é instalado se obtém um dado de resistividade para cada dipolo (MN), representando cada nível de profundidade. À medida que se desloca no caminhamento, amostragens paralelas são realizadas, sucedendo em uma seção com uma malha de valores medidos.

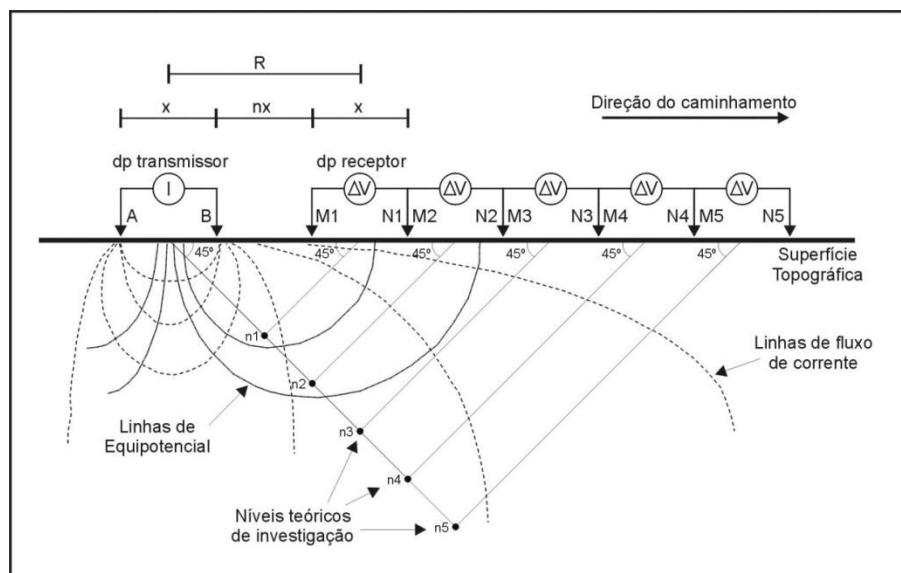


Figura 2.8: Representação da distribuição dos eletrodos no ensaio de caminhamento elétrico.

O principal fator de alteração dos valores de resistividade elétrica nos solos e nas rochas é a presença de água. Sendo assim, estruturas como fraturas, falhas e a interface solo/rocha irão apresentar valores anômalos de resistividade por concentrarem maior umidade. A diferença de densidade entre materiais, como por exemplo, na interface solo/rocha ou contatos litológicos, também interfere na propagação da corrente elétrica, possibilitando a separação em zonas mais e menos eletrorresistivas.

A condução elétrica em sedimentos e rochas próximas à superfície é basicamente eletrolítica, ao longo de poros interconectados. Os íons que conduzem a corrente resultam da dissociação de sais na água fazendo com que a salinidade das águas de percolação seja um fator importante na determinação da condutividade elétrica de uma rocha. Espera-se queda na resistividade em resposta às zonas percoladas pela água. Coberturas sedimentares podem se comportar como condutoras quando saturadas ou podem apresentar alta resistividade quando o nível d'água é profundo, resultando em coberturas secas. Da mesma forma, vazios secos comportam-se como zonas resistivas, sendo mais difícil de serem detectados.

Quanto maior a porosidade, maior a quantidade de água que pode percolar o meio e maior a quantidade de íons livres para se movimentar na água que preenche os poros. Porém, se existem poros, mas não existe conectividade entre eles, o fluxo de íons é bloqueado e a condutividade pode ser baixa, mesmo na presença considerável de porosidade. Outro fator importante é o efeito dos minerais de argila sobre a resistividade. Partículas de argila constituem um caminho adicional de condução de

Frigo, J. S. 2020, Análise estrutural dos dados de furos geotécnicos para elaboração do modelo geomecânico...

corrente elétrica, possuindo resistência muito baixa. A razão para a alta condutividade das argilas está na dupla camada de cátions dos minerais de argila.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

A área de estudo compreende um depósito de zinco e chumbo localizado na região noroeste de Minas Gerais. O presente trabalho foi sistematizado em etapas conexas: levantamento bibliográfico, levantamento geofísico de eletrorresistividade, descrição geotécnica seguida da classificação geomecânica, coleta e análise dos dados estruturais e, finalmente, confecção do modelo geomecânico.

3.1 LEVANTAMENTO GEOFÍSICO DE ELETRORESISTIVIDADE

O método da eletrorresistividade foi utilizado para caracterizar os contatos solo rocha, evidenciando as possíveis regiões alteradas e verificando a presença de água pelas variações resistivas nas seções de caminhamento elétrico, auxiliando na definição do posicionamento das rampas de acesso. Ele mede as resistividades do meio através da passagem de uma corrente elétrica pelo solo, transmitida por um par de eletrodos, conectado a uma fonte de corrente. Se o perfil a ser medido for maior que o comprimento da linha, a técnica “roll along” pode ser aplicada, na qual após a leitura do primeiro conjunto (a,b,c,d) o segmento a é colocado após o segmento d para formar uma nova combinação (Figura 3.1). A diferença de potencial é mensurada por dois eletrodos de recepção. Os dados adquiridos se relacionam com as propriedades elétricas da estrutura geológica em subsuperfície e com a resposta de cada material ao fluxo da corrente elétrica.

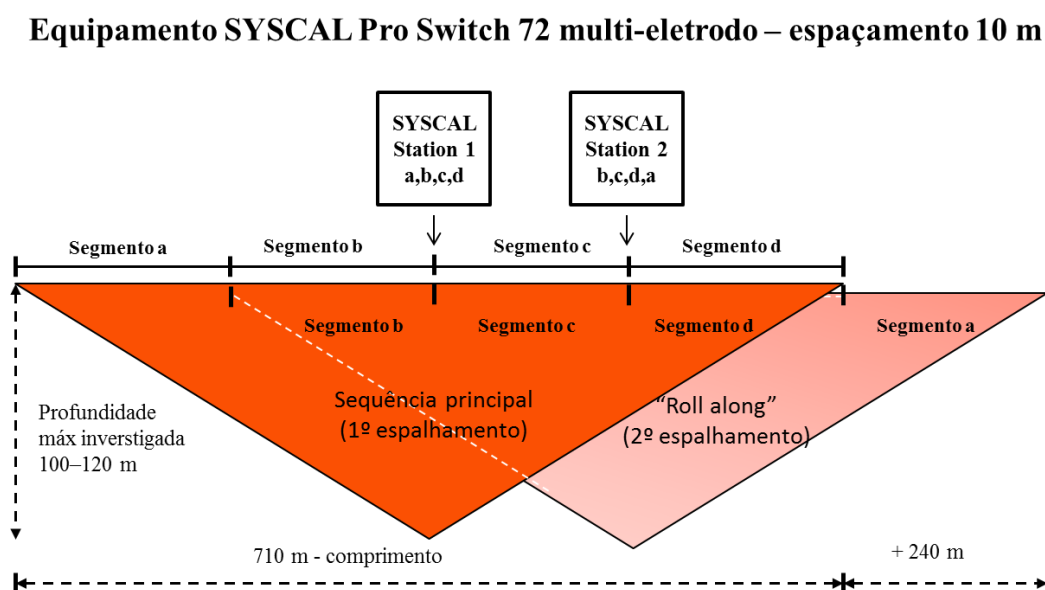


Figura 3.1: Diagrama esquemático para o levantamento de eletrorresistividade.

Foram realizados pela empresa GEODECOM 23,8 km de levantamento geofísico divididos em perfis longitudinais e transversais em relação ao depósito (Figura 3.2), separados em malha sul e malha norte, que serviram como guia para o zoneamento da região cárstica e da rocha sã ou relativamente sã. O objetivo principal do levantamento geofísico foi a caracterização e zoneamento do maciço rochoso até 120 m de profundidade. A aquisição dos dados foi feita através da técnica de caminhamento elétrico com arranjo de eletrodos dipolo-dipolo, com espaçamento entre eletrodos de 10 m. Os relatórios foram disponibilizados pela empresa contendo os quadros de resultados da inversão 2D de cada linha das malhas sul e norte, apresentando a pseudo-seção medida, a calculada e a seção invertida de melhor ajuste e esta mesma seção retrabalhada no Geosoft, que contém elementos de interpretação para auxiliar no uso das bases para o zoneamento geológico.



Figura 3.2: Malha de levantamento geofísico ao longo de toda a extensão do corpo.

Na seção modelo, guia para o zoneamento das zonas cársticas, além das cores, foram utilizadas três curvas de contorno: a curva de 450 Ωm limita a zona de carste com bastante umidade; a curva de 200 Ωm limita a zona de saturação de água e a de 60 Ωm limita zonas que, além da saturação, possuem um conteúdo considerável de argila e silte. As maiores resistividades foram associadas à cobertura (solo e rocha alterada) seca (aerada) ou, quando em profundidade, a rocha sã, que deve ser tão mais sã e maciça quanto maior a resistividade (Figura 3.3).

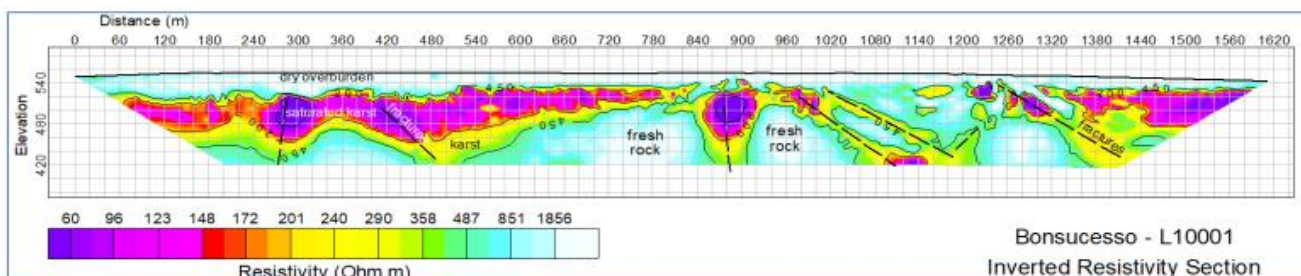


Figura 3.3: Exemplo de seção modelo obtida e retrabalhada no Geosoft, resultado da inversão 2D da pseudo-seção de resistividade medida.

3.2 DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA E CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA

As áreas de maior interesse no estudo consistem nas regiões onde serão escavadas as rampas de acesso da mina. A investigação dessas áreas foi realizada através de 47 furos de sondagem, realizados no *footwall* do depósito, de diâmetro HQ (63,5 mm) e NQ2 (50,6 mm), totalizando 6.642,95 metros testemunhados, descritos e classificados com base nos sistemas RQD, RMR e Q. A relação dos furos encontra-se no Quadro 2 e a disposição dos furos para as rampas sul e norte, respectivamente, é mostrada nas figuras 3.4 e 3.5.

Quadro 2: Relação dos furos utilizados para descrição geotécnica.

Furo	Zona UTM:		Cota (m)	Profundidade (m)	Rampa
	Coord. N	Coord. E			
BRMAMBSCD000059	8106517.291	310799.983	547,18	178,51	Sul
BRMAMBSCD000065	8106502.354	310758.989	549,56	151,05	Sul
BRMAMBSCD000067	8106544.024	310731.036	550,54	151,50	Sul
BRMAMBSCD000068	8106613.460	310698.758	551,69	151,30	Sul
BRMAMBSCD000069	8106650	310729	550,92	151,38	Sul
BRMAMBSCD000070	8106750.812	310646.715	549,34	180,75	Sul
BRMAMBSCD000071	8106697.402	310720.652	551,00	180,92	Sul
BRMAMBSCD000073	8106817.787	310603.090	551,00	181,19	Sul
BRMAMBSCD000075	8106582.106	310719.856	550,93	150,42	Sul
BRMAMBSCD000076	8106545.314	310718.273	551,05	152,06	Sul
BRMAMBSCD000077	8108042.136	310255.557	549,17	181,34	Norte
BRMAMBSCD000078	8107998.207	310234.236	548,51	180,99	Norte
BRMAMBSCD000079	8108029.964	310222.155	549,20	151,15	Norte
BRMAMBSCD000080	8106559.327	310753.858	549,97	151,34	Sul
BRMAMBSCD000085	8106683.764	310690.965	550,85	161,66	Sul
BRMAMBSCD000087	8106589.149	310740.258	550,57	151,11	Sul
BRMAMBSCD000088	8108074.202	310239.990	549,77	154,39	Norte
BRMAMBSCD000090	8106684.131	310689.799	550,91	152,29	Sul
BRMAMBSCD000092	8106683.425	310689.513	550,97	122,01	Sul

BRMAMBSCD000093	8106660.304	310727.758	550,58	150,87	Sul
BRMAMBSCD000094	8106703.572	310758.688	549,53	115,11	Sul
BRMAMBSCD000095	8106625.658	310733.968	550,63	150,85	Sul
BRMAMBSCD000096	8106661.618	310726.122	550,57	150,90	Sul
BRMAMBSCD000097	8106703.382	310759.352	549,59	120,20	Sul
BRMAMBSCD000099	8106717.106	310685.959	550,34	169,89	Sul
BRMAMBSCD000100	8106766.615	310637.274	550,20	151,25	Sul
BRMAMBSCD000101	8108372.023	310328.311	547,11	180,30	Sul
BRMAMBSCD000103	8106744.733	310704.173	549,71	151,32	Sul
BRMAMBSCD000104	8106765.663	310637.510	550,00	81,96	Sul
BRMAMBSCD000106	8108371.751	310330.766	547,10	151,08	Norte
BRMAMBSCD000110	8106744.733	310704.173	550,00	151,32	Sul
BRMAMBSCD000111	8108372.750	310328.574	547,21	122,39	Norte
BRMAMBSCD000112	8106751.921	310736.635	549,00	151,35	Sul
BRMAMBSCD000116	8108373.791	310327.217	547,13	134,24	Norte
BRMAMBSCD000117	8108373.791	310734.893	549,00	152,78	Sul
BRMAMBSCD000119	8108280.143	310366.657	546,68	150,90	Norte
BRMAMBSCD000125	8108280.870	310366.685	546,68	101,49	Norte
BRMAMBSCD000127	8108280.297	310364.783	546,68	153,74	Norte
BRMAMBSCD000130	8108329.474	310222.895	548,97	150,73	Norte
BRMAMBSCD000135	8108211.700	310174.320	550,00	110,60	Norte
BRMAMBSCD000136	8108306.670	310294.164	548,00	100,37	Norte
BRMAMBSCD000138	8108243.895	310272.895	549,15	110,82	Norte
BRMAMBSCD000139	8108212.060	310174.880	550,37	120,46	Norte
BRMAMBSCD000140	8108306.262	310293.349	548,28	80,58	Norte
BRMAMBSCD000141	8108245.183	310275.944	549,15	90,85	Norte
BRMAMBSCD000142	8108210.280	310177.087	550,00	80,26	Norte
BRMAMBSCD000143	8108244.680	310274.944	549,15	70,98	Norte

Para a classificação do maciço segundo o índice RMR, foram utilizados dados de ensaios laboratoriais pertencentes ao maciço da Mina de Morro Agudo, inserida em contexto geológico e geotécnico semelhante. Esses ensaios foram realizados pela empresa Couto Geotecnia e os resultados disponibilizados via relatório.

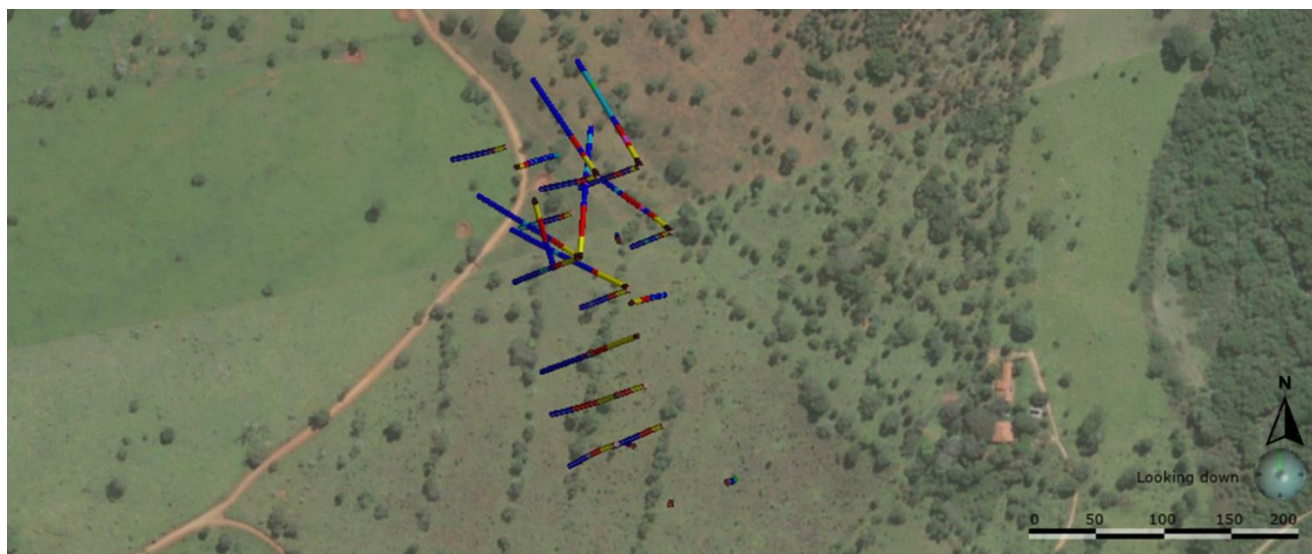


Figura 3.4: Posicionamento dos furos executados para a rampa sul, em planta.

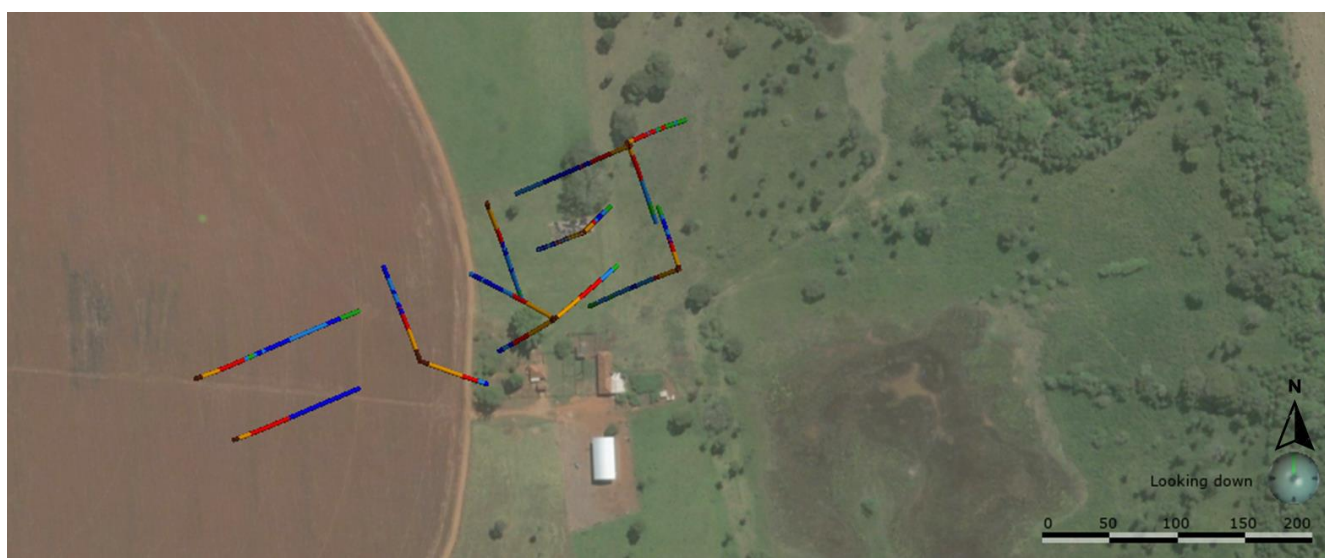


Figura 3.5: Posicionamento dos furos executados para a rampa norte, em planta.

3.2.1 Descrição geotécnica e caracterização geomecânica

Os parâmetros definidos para a elaboração da classificação geomecânica da mina subterrânea do projeto Bonsucesso foram: litologia; resistência à compressão uniaxial; condição das descontinuidades; grau de alteração; grau de fraturamento (que está diretamente relacionado ao RQD); família de descontinuidades; e presença de água.

Para a obtenção do RQD, a ISRM (1978) recomenda que sejam utilizados testemunhos de sondagem rotativa diamantada, obtidos com a utilização de barriletes duplos livres de diâmetro mínimo NX (54,7 mm).

Segundo a ABGE (1998), embora não tão comum, no Brasil pode-se utilizar a aplicação do IQR (Índice de Qualidade da Rocha), que emprega o mesmo critério utilizado para a determinação do RQD, porém considera ao invés da manobra, trechos em que o espaçamento das descontinuidades é homogêneo e o comprimento mínimo é 0,5 m. Após análise pela Gerência de Geotecnia da *Nexa Resources*, foi adotada para as novas descrições geotécnicas a aplicação do IQR, e este foi o método empregado nas descrições dos furos selecionados para este estudo. Deve-se atentar para que seja assegurado que as fraturas que tenham sido geradas pelo manuseio e processo de perfuração sejam ignoradas na determinação do valor do índice.

Na caracterização geomecânica e cálculo do RQD são utilizados uma planilha específica (Figura 3.6) onde são inseridos dados de entrada e outros são calculados automaticamente pelo programa Excel que utiliza algumas fórmulas inseridas pré-definidas pela empresa. Essas planilhas irão compor um banco de dados que será utilizado posteriormente na construção do modelo geomecânico.

Os primeiros dados inseridos são referentes ao intervalo, com a metragem inicial e final do intervalo analisado. O comprimento do trecho é dado pela diferença entre o intervalo final e inicial. Insere-se a litologia para identificação da rocha presente no intervalo. Nesse ponto é importante atentar para mudanças de litologias que possuem comportamentos geomecânicos muito discrepantes, como por exemplo, dolomito e filito, que não devem ser agrupadas em um mesmo intervalo.

A recuperação, importante parâmetro para o RQD, é calculada como a diferença entre o comprimento do trecho e as perdas, exibindo resultado em metros, e também é dada em termos de porcentagem, e nesse caso, faz-se a razão entre o valor da recuperação em metros e o comprimento do trecho.

O grau de alteração é outro parâmetro importante e deve ser inserido com base na caracterização visual através da descoloração e formação de minerais secundários. A presença de alteração enfraquece a matriz rochosa, comprometendo sua resistência, além de se tratar de um grande indicativo de presença de água no maciço. O Quadro 3 apresenta os critérios utilizados para definição do grau de alteração.

O campo seguinte refere-se ao somatório do comprimento das peças menores que 10 cm. Essa medida é obtida utilizando o auxílio de uma fita métrica, medindo o comprimento das peças menores que 10 cm do intervalo analisado.

																				
PLANILHA DE DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA DE FUROS DE SONDAGEM - BONSUCESSO																				
Nº DO FURO:									COORDENADAS:					DESCRITO POR:						
PERFIL:									DIREÇÃO:					DATA: / /						
LOCAL: BONSUCESSO									INCLINAÇÃO:											
INTERVALO		COMPRIMENTO DO TRECHO	LITOLOGIA	RECUPERAÇÃO (m)	RECUPERAÇÃO (%)	GRAU DE ALTERAÇÃO	Comp. peças < 10cm	PERDAS	RQD (%)	nº de fraturas	FRAATURAS/m	GRAU DE FRAATURAMENTO	COND. DESCONTINUIDADE	TIPO DE PREENCHIMENTO	DISSOLUÇÃO		FENDAS		CLASSE	OBS.
Início	Final														início	final	início	final		
0		0,00		-	-															
0,00		0,00		0,00	#DIV/0!				#DIV/0!		#DIV/0!									
0,00		0,00		0,00	#DIV/0!				#DIV/0!		#DIV/0!									
0,00		0,00		0,00	#DIV/0!				#DIV/0!		#DIV/0!									
0,00		0,00		0,00	#DIV/0!				#DIV/0!		#DIV/0!									
0,00		0,00		0,00	#DIV/0!				#DIV/0!		#DIV/0!									
0,00		0,00		0,00	#DIV/0!				#DIV/0!		#DIV/0!									
0,00		0,00		0,00	#DIV/0!				#DIV/0!		#DIV/0!									
0,00		0,00		0,00	#DIV/0!				#DIV/0!		#DIV/0!									
0,00		0,00		0,00	#DIV/0!				#DIV/0!		#DIV/0!									
0,00		0,00		0,00	#DIV/0!				#DIV/0!		#DIV/0!									
0,00		0,00		0,00	#DIV/0!				#DIV/0!		#DIV/0!									
0,00		0,00		0,00	#DIV/0!				#DIV/0!		#DIV/0!									
0,00		0,00		0,00	#DIV/0!				#DIV/0!		#DIV/0!									
0,00		0,00		0,00	#DIV/0!				#DIV/0!		#DIV/0!									
0,00		0,00		0,00	#DIV/0!				#DIV/0!		#DIV/0!									

Figura 3.6: Planilha de descrição geotécnica com itens e parâmetros necessários para subsidiar a elaboração da classificação geomecânica (NEXA).

Quadro 3: Classificação do grau de alteração (NEXA).

GRAU DE ALTERAÇÃO		
A1	Rocha Sã	Não apresenta alteração visível dos minerais. Alta resistência ao impacto do martelo.
A2	Rocha Pouco Alterada	Alteração pouco penetrante, restrita aos planos de falhas e fraturas, com alguma descoloração dos minerais. A rocha perde pouca resistência ao impacto do martelo. Não é friável.
A3	Rocha Alterada	Alteração penetrante na matriz rochosa, assumido colorações alaranjadas e avermelhadas. Resistência moderada ao impacto do martelo. Não é friável (exceto nos planos das descontinuidades).
A4	Rocha Muito Alterada/Rocha Friável em Zonas de Cisalhamento	Alteração bastante acentuada com porções de argila bem desenvolvidas e formações de vazios/fendas. Baixa resistência ao martelo. Fragmentos friáveis preservam a estrutura original. Rochas friáveis em zonas de cisalhamento.
A5	Solo/Saprólito	Alteração completa. Estrutura original da rocha restrita aos saprólitos.

No campo das perdas insere-se o total de perdas existentes nos avanços de cada manobra presente no intervalo. A perda é a diferença entre a metragem total avançada e a metragem do testemunho recuperado. Essa perda pode indicar tanto locais onde existam vazios, indicando dissolução da rocha, quanto perdas durante a recuperação do testemunho em trechos muito fraturados ou porções inconsolidadas.

O RQD é dado em porcentagem e calculado automaticamente utilizando os dados já inseridos na tabela. Primeiramente subtrai-se do comprimento do trecho o comprimento das peças menores que 10 cm e as perdas, assim, teremos o valor da soma dos comprimentos maiores que 10 cm, como é especificado por Deere (1988) para o cálculo do RQD. Em seguida, divide-se esse resultado pelo comprimento do trecho. O resultado é expresso em porcentagem.

O NÚMERO DE FRATURAS é obtido pela contagem das fraturas do intervalo, atentando para aquelas que foram causadas pelo manuseio e processo de perfuração, que devem ser desconsideradas. O reconhecimento dessas fraturas é visual e tátil, pois, geralmente, fraturas que possuem encaixe perfeito são provocadas pelo ato da sondagem. A partir do número de fraturas, é calculado o número de FRATURAS POR METRO (FRATURAS/m) dividindo-se o número de fraturas pelo comprimento do trecho.

O GRAU DE FRATURAMENTO é determinado com base no número de fraturas por metro. Para classificar o grau de fraturamento, utiliza-se o Quadro 4.

Quadro 4: Classificação do grau de fraturamento (NEXA).

GRAU DE FRATURAMENTO	
F1	Rocha pouco fraturada: espaçamento médio das fraturas >2 m, formando blocos na ordem de m ³ .
F2	Rocha medianamente fraturada: espaçamento médio das fraturas de 0,6 m a 2 m, formando blocos da ordem de m ³ .
F3	Rocha fraturada: espaçamento médio das fraturas de 0,2 m a 0,6 m, formando blocos da ordem de dm ³ a m ³ .
F4	Rocha muito fraturada: espaçamento médio das fraturas de 0,06 m a 0,2 m, formando blocos da ordem de cm ³ a dm ³ .
F5	Rocha extremamente fraturada: espaçamento médio das fraturas inferior a 0,06 m, formando blocos da ordem de mm ³ a cm ³ .

O campo condição da descontinuidade refere-se ao tipo de rugosidade presente nas descontinuidades do intervalo. Os perfis de rugosidades são mostrados na Figura 3.7.

Forma	Rugosidade	Perfil típico de rugosidade da descontinuidade
Recortada	Rugosa	
	Lisa	
	Polida	
Ondulada	Rugosa	
	Lisa	
	Polida	
Plana	Rugosa	
	Lisa	
	Polida	

Figura 3.7: Perfis de rugosidade na superfície da descontinuidade (traduzido de Brown, 1981).

No campo tipo de preenchimento é informado qual o material de preenchimento presente nas descontinuidades.

Em caso de presença de oxidações, trechos alterados ou com dissolução, ou qualquer outra informação relevante para a classificação geomecânica deve ser inserida no campo observação.

Pela análise dos atributos do meio rochoso foi definida a caracterização geomecânica do maciço, onde foram considerados os valores de RQD somados às informações dos índices RMR e Q fornecidos, para que se chegassem à classificação geomecânica do maciço e estabelecer os melhores métodos de contenção e suporte.

3.3 COLETA DOS DADOS ESTRUTURAIS E IDENTIFICAÇÃO DAS FAMÍLIAS DE FRATURAS

A orientação dos testemunhos é feita pela própria empresa de sondagem, utilizando o REFLEX ACT-IQ™ (Figura 3.8), que é um sistema digital que registra a orientação do testemunho com alto nível de precisão e que leva a uma melhor compreensão da geologia estrutural, resultando em um melhor planejamento geotécnico. Os testemunhos são riscados com a marca de orientação na base ou topo com referência a um azimuth pré-definido.

Utilizando um ábaco com transferidor de ângulo alfa e beta (Figura 3.9), foram coletadas as orientações das fraturas presentes nos testemunhos. Essas orientações foram inseridas no banco de dados e posteriormente tratadas para análises cinemáticas. O ângulo alfa (α) mede o mergulho (*dip*) e fornece o maior ângulo de um plano inclinado em relação a um plano horizontal. O ângulo beta (β) mede a direção do mergulho (*dip direction*), que é o azimuth da reta de maior declive desse plano.

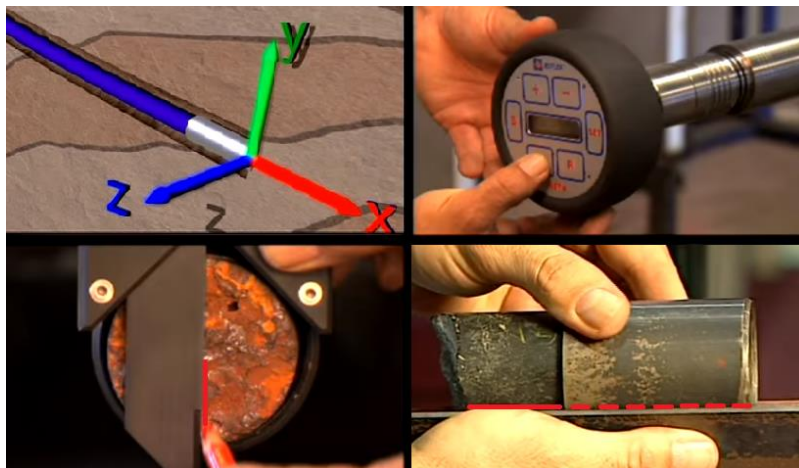


Figura 3.8: Metodologia do REFLEX ACCT-IQ™, mostrando o equipamento utilizado e a orientação do testemunho sendo feita a indicação de base ou topo.

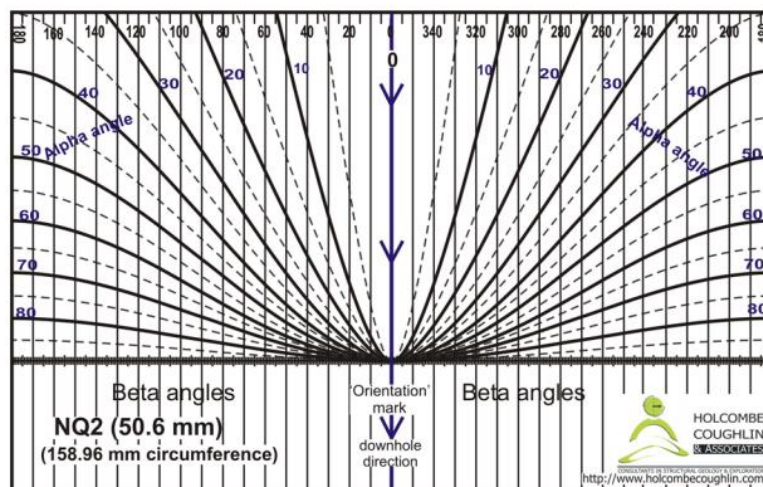


Figura 3.9: Ábaco com transferidor de ângulo alfa e beta (Holcombe Coughlin).

De posse dos dados estruturais, prosseguiu-se com o tratamento e as análises desses dados, a fim de que se possa identificar e classificar as famílias de fraturas do maciço. Para esta etapa foi utilizado o OpenStereo 0.1.2, que mostra a distribuição das fraturas, permitindo agrupá-las em famílias de acordo com sua orientação. Por se tratar de furos rasos, que atravessam uma zona de carste onde as rochas estão alteradas e muito fragmentadas, nem todos os furos puderam ser orientados durante a perfuração, não sendo possível coletar dados estruturais de todos. Por isso, foram utilizados os dados de 30 furos, sendo 16 furos da rampa sul e 14 furos da rampa norte. Os dados estruturais também foram inseridos no Leapfrog Geo 5.0 para observar a distribuição espacial dessas estruturas.

3.4 MODELO GEOMECÂNICO

Após a interpretação das classificações geomecânicas e análise dos dados estruturais, estas informações foram integradas com as informações da geologia local buscando correlacioná-las, interligando informações sobre as litologias e estruturas associadas. Desta forma, foi possível definir o modelo geomecânico, produzido no software Leapfrog Geo 5.0, que será utilizado para definir a melhor localização para posicionamento das rampas de acesso de modo a atravessar a menor área de carste possível e também direcionar trabalhos para monitoramento e garantia da segurança do talude e escavações subterrâneas. O modelo possibilita compreender também a influência da água subterrânea, contribuindo para a caracterização hidrogeológica.

Frigo, J. S. 2020, Análise estrutural dos dados de furos geotécnicos para elaboração do modelo geomecânico...

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL E LOCAL

4.1 PROVÍNCIA TOCANTINS

A Província Tocantins (Almeida *et al.*, 1981) é representada por um orógeno de grandes dimensões desenvolvido durante o Neoproterozoico como resultado da aglutinação de três áreas cratônicas: o Cráton Amazônico, o Cráton São Francisco-Congo e o Cráton Paranapanema (hoje encoberto pela Bacia do Paraná) (Dardenne, 2000), durante a amalgamação do supercontinente Gondwana. Constituem a Província Tocantins a Faixa Araguaia, a Faixa Paraguaia, ambas com vergência para o Cráton Amazônico, e a Faixa Brasília (Fuck *et al.*, 1993) (Figura 4.1).

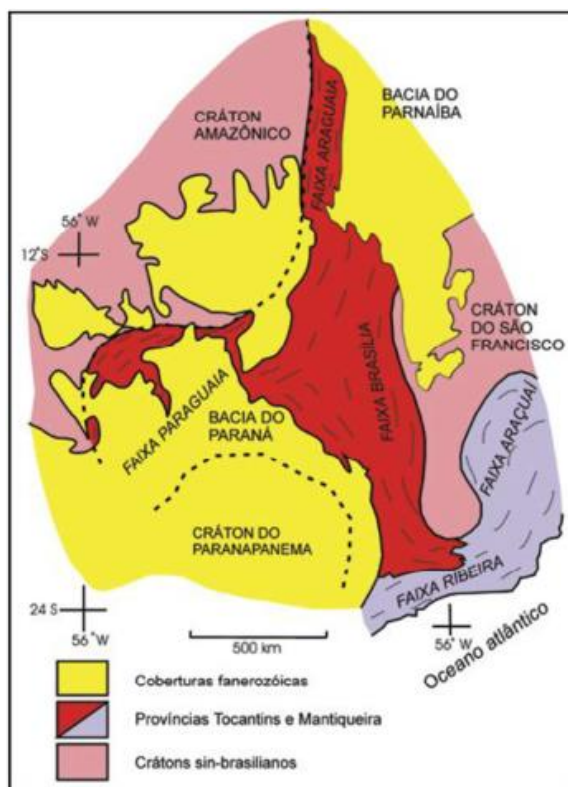


Figura 4.1: Província Tocantins e suas faixas móveis associadas (simplificado de Almeida *et al.*, 1981).

4.2 FAIXA BRASÍLIA

A Faixa Brasília (Almeida, 1977; Marini *et al.*, 1981; Fuck *et al.*, 1993; Dardenne, 2000; Valeriano *et al.*, 2004) é representada por um orógeno formado por terrenos em sistemas de nappes e empurrões com extensão aproximada em 1000 km e 300 km de largura e vergência de oeste para leste

contra o Cráton São Francisco. Dardenne (2000) definiu a Faixa Brasília como sendo constituída pelas seguintes unidades tectônicas (Figura 4.2):

- Sequências sedimentares e metassedimentares espessas inseridas nos Grupos Serra da Mesa (Paleo a Mesoproterozoico), Paranoá, Canastra, Araxá, Ibiá e Vazante (Meso a Neoproterozoico), Bambuí (Neoproterozoico);
- Intrusões ígneas e sequências vulcanossedimentares de idade paleo a mesoproterozoica, mesoproterozoica e neoproterozoica, correspondendo, respectivamente, aos complexos máfico-ultramáficos de Barro Alto, Cana Brava e Niquelândia, assim como aos granitos anorogênicos da sub província do Rio Paranã e Rio Tocantins, as sequências vulcanossedimentares de Indianópolis, Juscelândia e Palmeirópolis, e, finalmente, aos granitos orogênicos e magmatismo máfico-ultramáfico, ambos neoproterozoicos;
- Arco Magmático de Goiás caracterizado pelas sequências vulcanossedimentares de Mara Rosa e Chapada, de idade neoproterozoica, e pelas rochas tonalítica/granodioríticas encontradas na porção oeste da Faixa;
- Terrenos granito-greenstone de Goiás Velho, Crixás, Guarinos e Pilar de Goiás, além das sequências gnáissicas (Cavalcante) e supracrustais paleoproterozoicas (Santa Terezinha, Almas-Dianópolis, São Domingos e Ticunzal) constituindo o Maciço de Goiás.

O grau metamórfico e a deformação da Faixa Brasília aumentam de leste para oeste, conforme subdivisão proposta por Fuck (1994):

- Zona interna, a oeste, com intensa deformação e metamorfismo de fácies anfibolito, englobando o Arco Magmático e Maciço de Goiás, ou seja, os terrenos de idade arqueana, mesoproterozoica e paleoproterozoica.
- Zona externa representada pelo cinturão de dobras e empurrões próximos a borda do Cráton São Francisco, compreendendo os Grupos Canastra, Ibiá, Serra da Mesa e Vazante.
- Zona cratônica constituída por metassedimentos neoproterozóicos do Grupo Bambuí e Paranoá sobre o embasamento cristalino do Cráton São Francisco.

Costa e Angeiras (1971) divide a Faixa Brasília em dois conjuntos tectônicos distintos, separados pela sintaxe dos Pirineus. A Faixa Brasília Setentrional indica um *trend* compressivo de NW para SE evidenciado pela preservação, em partes, das relações estruturais estratigráficas deposicionais e *strike* SW-NE, devido ao metamorfismo ausente ou em fácies xisto verde. Já a Faixa

Brasília Meridional apresenta grau metamórfico mais elevado, que suprimiu as relações estratigráficas originais.

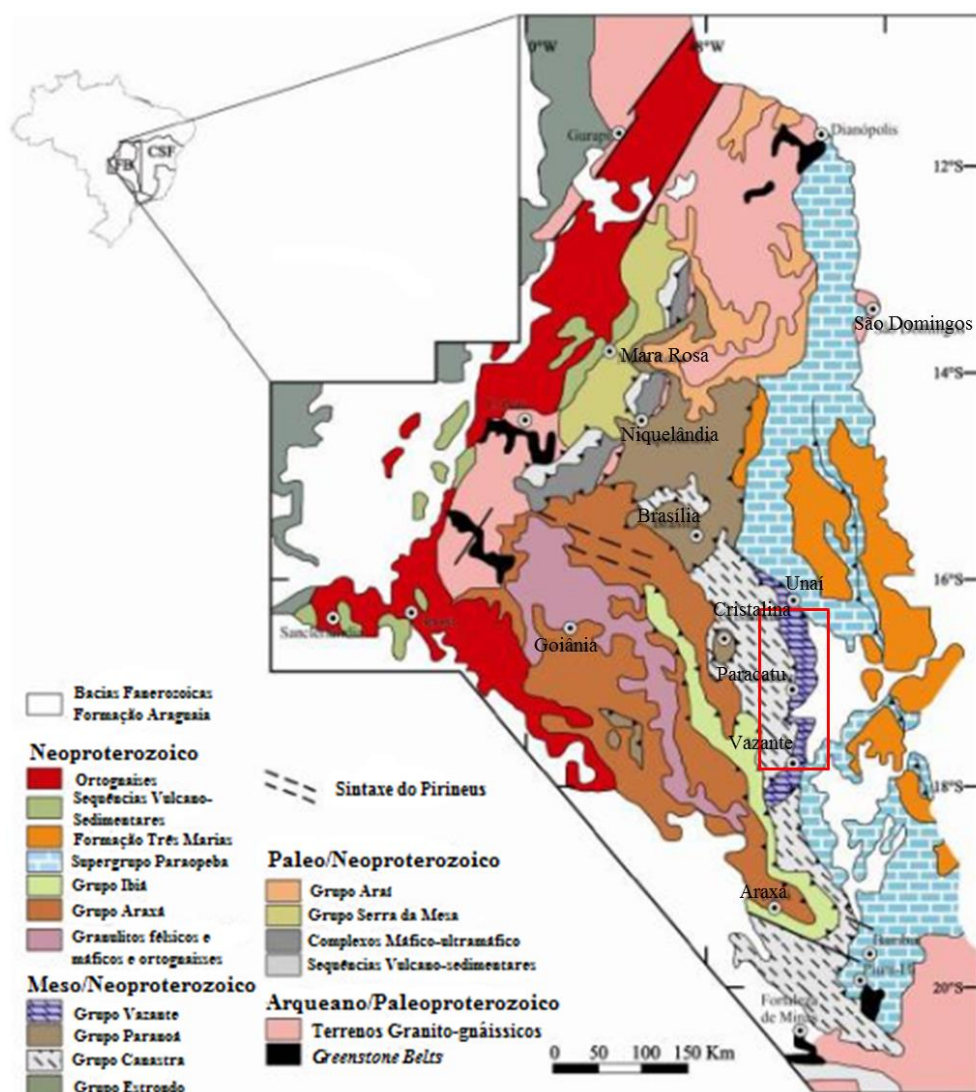


Figura 4.2: Unidades tectônicas da Faixa Brasília, em destaque Grupo Vazante (modificado de Dardenne, 2000).

A evolução da Faixa ocorreu em três estágios durante o período de 1.0 a 0.6 Ga (Valeriano *et al.*, 2008). O início é marcado por uma fase extensional de rifteamento que culminou na formação de uma margem passiva na porção ocidental do paleocontinente São Francisco-Congo e a deposição de sedimentos platformais neoproterozoicos. Na sequência, com o gradativo aumento da bacia oceânica, formou-se uma zona de subducção, relativa ao Arco Magmático de Goiás. Com o progresso dessa subducção, deu-se início ao estágio final que sucedeu na colisão do paleocontinente Paranapanema e dos blocos do Maciço de Goiás e do Arco Magmático de Goiás, formando a configuração atual da Faixa Brasília.

A Faixa Brasília Meridional é formada pelos Grupos Vazante e Canastra, de idade Meso/Neoproterozoica, Ibiá e Araxá, de idade Neoproterozoica, e Andrelândia, ao sul da Faixa de

idade também Neoproterozoica. O fechamento da bacia no setor meridional provocou inversões estratigráficas e transporte tectônico de centenas de quilômetros, formando um complexo sistema de *nappes* e grandes zonas de falhas regionais (Figura 4.3), principalmente entre os Grupos Vazante, Ibiá e Canastra (Dardenne, 2000).

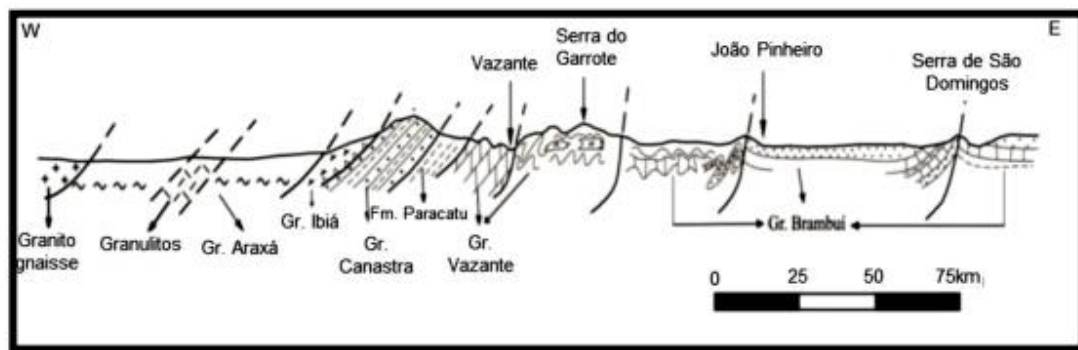


Figura 4.3: Seção geológica esquemática mostrando as relações entre os Grupos Araxá, Ibiá, Canastra, Vazante e Bambuí (Dardenne, 2000).

4.3 GRUPO VAZANTE

O Grupo Vazante (Dardenne *et al.*, 1998) é formado por uma espessa sequência marinha pelito-carbonática metamorfizada em fácies xisto-verde, que aflora em uma faixa de direção N-S e aproximadamente 250 km de extensão e 25 km de largura, em contato com os Grupos Canastra, a oeste, e Bambuí, a leste, tomando forma de um arco com concavidade voltada para oeste. Os depósitos de zinco e chumbo sulfetados de Morro Agudo, Ambrósia, Bonsucesso e Fagundes ocorrem na porção norte, e no setor sul é encontrada a mineralização de zinco representada majoritariamente por minério willemítico (Zn_2SiO_4) (Figura 4.4).

Diferentes contextos geotectônicos são relacionados à deposição dos sedimentos do Grupo Vazante. Alguns autores, nomeadamente Campos Neto (1984), Almeida (1993) e Fuck (1994), consideram como típica de margem continental passiva devido à grande espessura dos sedimentos da Faixa, que chegam a 5 km, quando comparadas às demais unidades proterozoicas. Esta grande espessura pode estar relacionada com deposição em condições de elevada subsidência (Dardenne, 1981; Mariri *et al.*, 1981). Ainda nesse contexto, a deposição do Grupo Vazante pode estar associada a um paleoalto estrutural gerado em consequência da intensificação de esforços extensivos (Dardenne, 1978; 1979; Campos Neto 1984; Fuck *et al.*, 1993).

Já a presença de clastos de rochas metamórficas em conglomerados da sequência de topo do Grupo Vazante, na região de Unaí (Laranjeira, 1992; Dardenne *et al.*, 1998), podem indicar proveniência a partir de sequências da Faixa Brasília, o que pode ser compatível com a deposição do

Grupo Vazante em uma bacia afetada por rápida subsidência e elevada taxa de sedimentação que se instalou nos primeiros *fronts* de cavalgamento da Faixa Brasília (Dardenne *et al.*, 1998), o que a caracterizaria como uma bacia de antepaís (*foreland*). Desta forma, esta sequência representaria um espesso pacote depositado na porção mais profunda de uma bacia de antepaís assimétrica, limitada a oeste pela faixa de dobramentos e pelos *fronts* de empurrão (Thomaz Filho *et al.*, 1998).

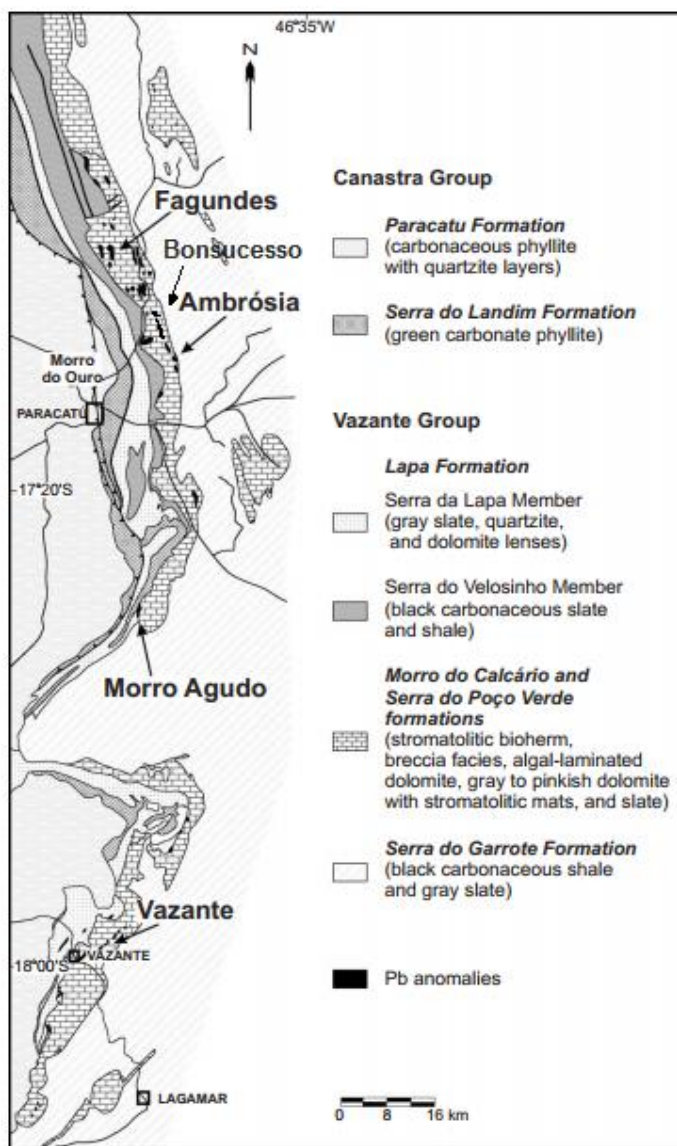


Figura 4.4: Mapa geológico do Grupo Vazante e localização dos depósitos de Vazante, Morro Agudo, Ambrósia, Bonsucesso e Fagundes (Cia. Mineira de Metais, Votorantim Metais; traduzido de Monteiro *et al.* 2006).

Dardenne (2000) ainda considera que o Grupo Vazante configura uma barreira orgânica desenvolvida na margem plataformal do continente entre os sedimentos profundos dos Grupos Ibiá e Araxá e os sedimentos glacio-marinhos dos Grupos Macaúbas e Jequitai, em aproximadamente 950-850 Ma. Caracterizadas por grandes espessuras de sedimentos marinhos pelito-carbonáticos, as

seqüências de metassedimentos do Grupo Vazante (Dardenne *et al.*, 1998; Dardenne, 2000) estão em contato tectônico a leste com o Grupo Bambuí e a oeste com o Grupo Canastra (Figura 4.5).

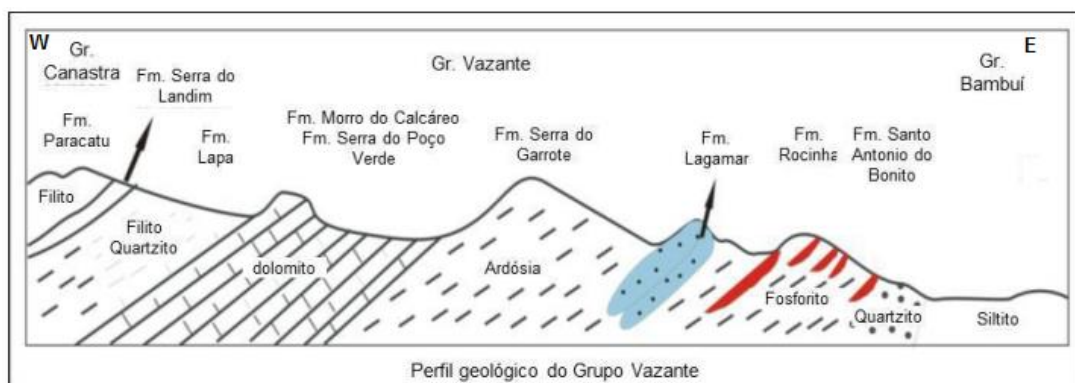


Figura 4.5: Perfil esquemático do Grupo Vazante (traduzido de Dardenne *et al.* 1998, retirado de Baia, 2013).

4.3.1 Estratigrafia do Grupo Vazante

Dardenne *et al.* (1998) e Dardenne (2000) definiram o Grupo Vazante em sete formações, da base para o topo. São elas: Santo Antônio do Bonito (também conhecida como Formação Retiro, Dardenne, 2000), Rocinha, Lagamar, Serra do Garrote, Serra do Poço Verde, Morro do Calcário e Serra da Lapa (Figura 4.6).

A Formação Santo Antônio do Bonito é formada por pacotes de quartzito branco, localmente conglomerático, intercalado com níveis ardósianos e corpos de diamictito com clastos de quartzito, dolomito, metassiltito e granitoide de matriz pelítica, com níveis pelíticos fosfatados (Fosforito 1) interpretados como fluxo de turbiditos correlacionados a um ambiente glacio-marinho (Souza, 1997) na região de Coromandel.

A Formação Rocinha (Dardenne *et al.*, 1997; 1998) é composta por uma seqüência de arenitos rítmicos e pelitos na base, seguido por um pacote de pelitos e siltitos intercalados que gradam para pelitos cinza escuro, carbonáticos e piritosos, com níveis fosfáticos (Fosforito 2). No topo desta formação, ritmitos hospedam o depósito fosfático de Lagamar constituído essencialmente por fosfarenitos (Fosforito 3).

A Formação Lagamar (Dardenne *et al.*, 1997) é constituída por uma unidade psamo-pelítica formada por alternância de metaconglomerados, quartzito, metassiltito e ardósia na sua porção basal. Brechas dolomíticas, calcários cinza-escuros com intercalações de brechas lamelares e dolomitos estromatolíticos. Esses dolomitos estromatolíticos são compostos por dolomitos com esteiras algais, dolarenitos e doloruditos oncolíticos, e estromatólitos colunares do tipo *Conophyton metula* e *Jacutophyton* (Cloud e Dardenne, 1973; Moeri, 1972; Dardenne e Campos Neto, 1976).

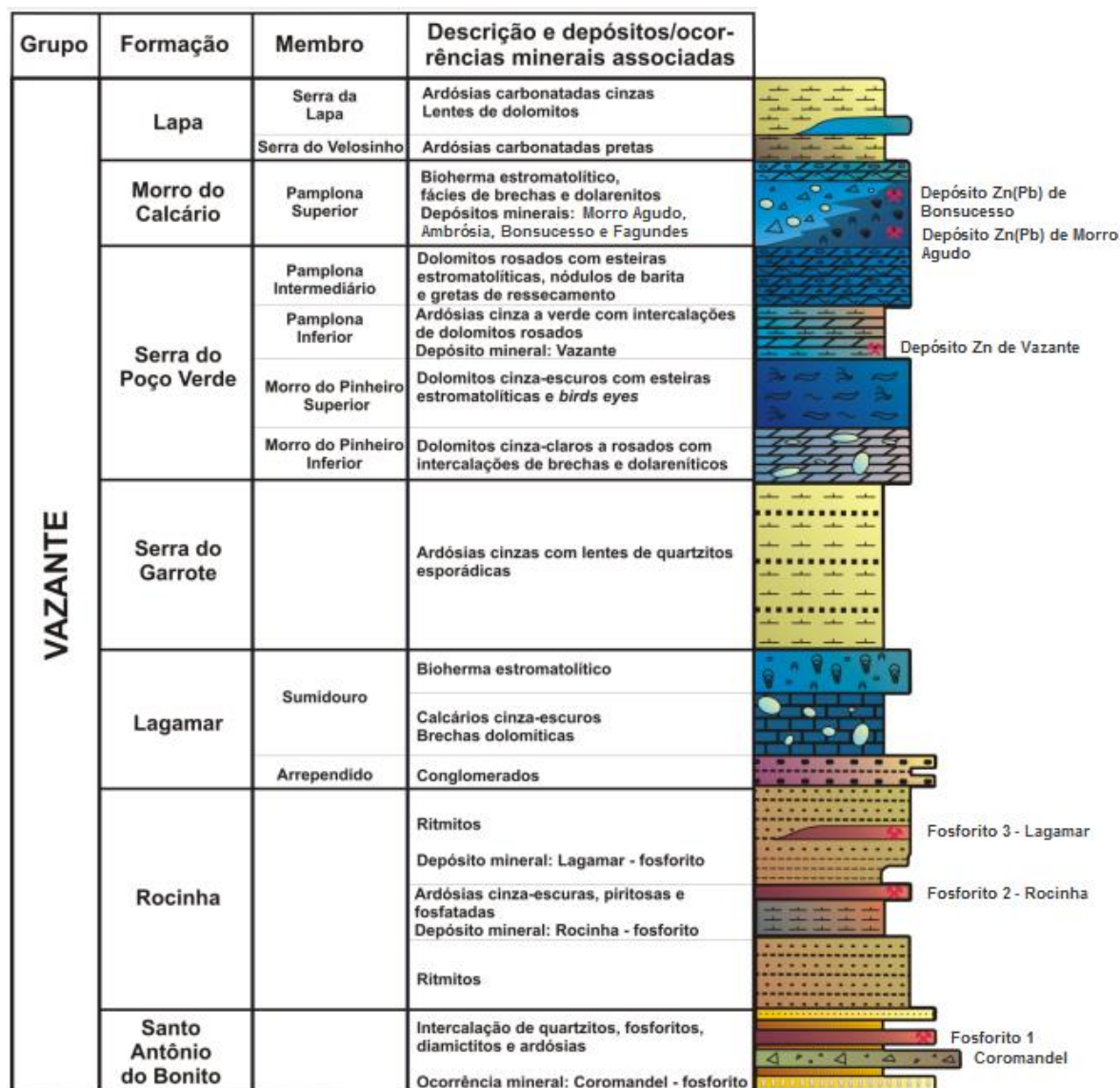


Figura 4.6: Coluna estratigráfica do Grupo Vazante (modificado de Dardenne, 2000).

A Formação Serra do Garrote (Madalosso e Vale, 1978) é formada por um espesso pacote de pelitos cinza escuros a cinza esverdeados, localmente rítmicos, carbonosos com pirita disseminada e finas intercalações de quartzito, metassiltito e de microconglomerados. De acordo com Dias *et al.* (2018), a Formação encontra-se altamente dobrada, falhada e localmente transposta.

A Formação Serra do Poço Verde é uma unidade predominantemente dolomítica e possui subdivisões propostas por Rigobello *et al.* (1988), que utilizaram as denominações de Morro do Pinheiro (Fácies Superior e Inferior) e Membro Pamplona (Fácies Média e Inferior), correspondendo a quatro membros, da base para o topo:

- Membro Morro do Pinheiro Inferior: representado por dolomitos cinza claro e rosados, maciços ou com laminações algais, e leitos subordinados de dolarenitos, por vezes oncolíticos, brechas lamelares e lentes de estromatólitos colunares.

- Membro Morro do Pinheiro Superior: compreende dolomitos cinza médio a escuros com *bird's eyes* e esteiras algais. Ocorrem leitos subordinados de dolarenitos, brechas lamelares, folhelhos carbonosos com pirita e margas.
- Membro Pamplona Inferior: é constituído por filitos carbonáticos, ardósia carbonosa cinza claro, lilás a esverdeada com intercalações de finos leitos dolomíticos.
- Membro Pamplona Médio: apresenta dolomitos cinza claro a rosados com laminações algais, alternados com níveis de dolarenitos, brechas lamelares e estromatólitos colunares e raras lentes de folhelho preto.

A Formação Morro do Calcário representa, de acordo com Dardenne (2000), a Fácies Superior do Membro Pamplona e corresponde a um complexo de recife, com fácies *back-reef* e *fore-reef*. É formada por dolomitos estromatolíticos róseos a cinza claros, associados a dolarenitos oolíticos e oncolíticos e doloruditos. Na região de Paracatu a espessura da Formação Morro do Calcário chega a 900 m (Baia, 2013), sendo formada principalmente por doloruditos indicando provável retrabalhamento de biohermas estromatolíticas parcialmente preservadas associadas à fácies de dolarenitos oolíticos e oncolíticos. Nessas sequências estão hospedadas as mineralizações de zinco e chumbo dos depósitos de Morro Agudo, Ambrósia, Bonsucesso e Fagundes.

A Formação Serra da Lapa apresenta uma unidade basal formada por filitos carbonosos e ardósias carbonáticas e carbonosas cinzas, contendo também lentes de dolomitos laminados cinza escuros, maciços e, por vezes, dolareníticos (Dardenne, 2000; Baia, 2013).

A idade do Grupo Vazante ainda é incerta apesar de ser bem compreendido em termos estratigráficos. A existência de *Conophyton metula* na base do Grupo aponta para um intervalo entre 1,35 e 0,95 Ma para a sedimentação da sequência (Cloud e Dardenne, 1973), colocando-a entre o Meso e o Neoproterozoico. Pimentel *et al.* (2001) sugerem, baseados nos isótopos de neodímio, sedimentação neoproterozoica em margem passiva para o Grupo Vazante, entre 0,9 e 0,8 Ga. Azmy *et al.* (2008) usam as idades U-Pb e Re-Os para sugerir que a sedimentação do Grupo Vazante ocorreu no final do Mesoproterozoico, e, juntamente, foi sugerido por Misi *et al.* (2014) a existência de uma diferença de idade entre base e topo do Grupo Vazante, em que o topo dataria do Mesoproterozoico, e a base, do Neoproterozoico, e as formações Lagamar a Serra da Lapa teriam sido empurradas sobre as formações Retiro e Rocinha (Figura 4.7).

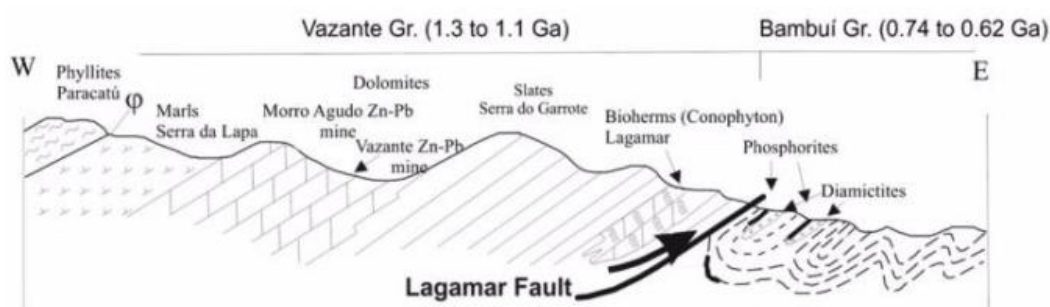


Figura 4.7: Seção geológica esquemática W-E do Grupo Vazante (Misi *et al.*, 2014).

4.4 GEOLOGIA LOCAL

O depósito Bonsucesso se insere geologicamente na sequência de rochas pelito-carbonáticas do Grupo Vazante, pertencendo mais precisamente à Formação Morro do Calcário (Dardenne *et al.*, 1998). No depósito a mineralização de zinco e chumbo ocorre na forma sulfetada (esfalerita e galena), sendo controlada por uma zona de falha de alto ângulo de direção aproximada N-NW. Falhas transversais de direção N-NE cortam a zona de falha principal (Figuras 4.8 e 4.9).

Com a investigação em subsuperfície por sondagem, aparecem na região dolomitos cinza escuros com estruturas estromatolíticas planares apresentando evidências de processos de alteração hidrotermal e recristalização. Dolomita fibrosa seguida pela cristalização de dolomita e quartzo preenchem cavidades. Pode ocorrer pirita disseminada no dolomito em venulações posteriores à cimentação e também superfícies estilolíticas.

São presentes também filitos e margas, ambos carbonosos e rítmicos, que gradam para dolomitos margosos. O filito apresenta fina laminação e alternância de níveis argilo-carbonosos e terrígenos. Material carbonoso pode ser notado concentrado em planos paralelos à laminação. Pode ocorrer pirita disseminada e alguns leitos, e também microfalhas e microfraturas preenchidas por quartzo, carbonatos e pirita.

Corpos de brecha intraformacional com fragmentos de dolomito e quartzo são comuns no contato do dolomito com os filitos e margas. Nessas brechas a matriz pode ser argilosa ou apresentar contribuição terrígena.

As rochas hospedeiras da mineralização são dolomíticas e, na maioria das vezes, fortemente brechadas. Estão presentes na zona de falha e estão tectonicamente imbricadas aos filitos carbonoso e margas. Apesar de o dolomito estar muito recristalizado e brechado, é possível observar texturas sedimentares como laminações algais e estruturas estromatolíticas.

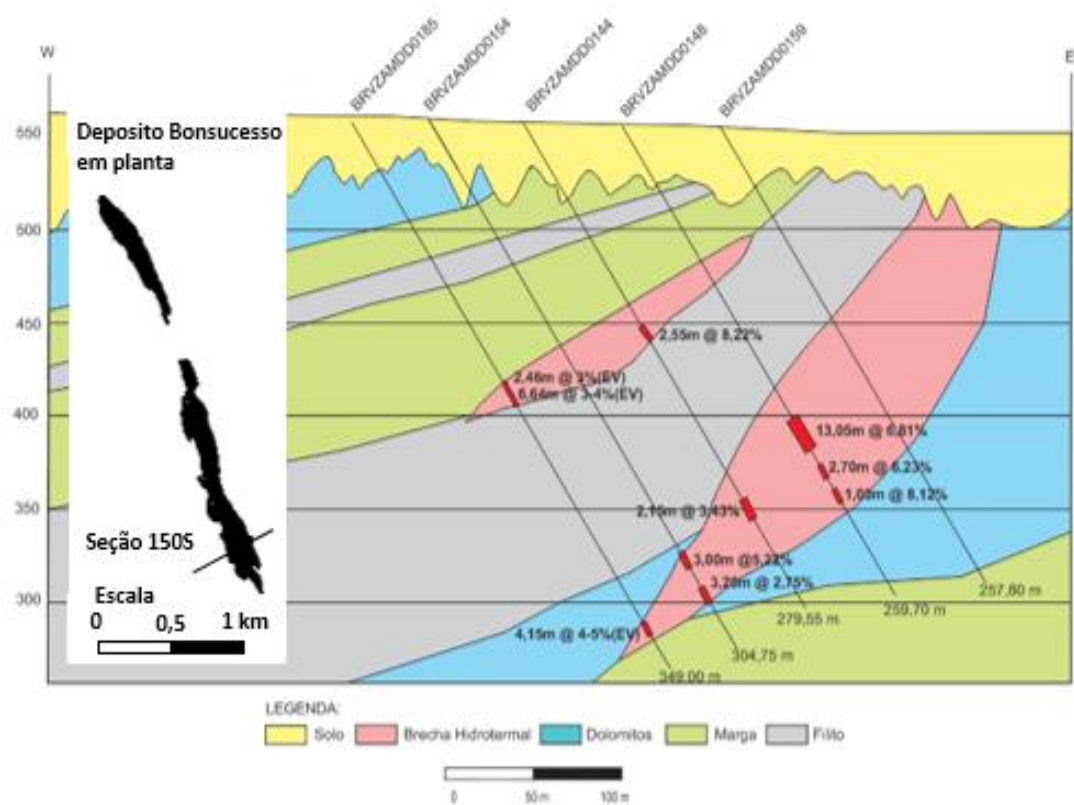


Figura 4.8: Seção 150S, na porção sul do depósito Bonsucesso, mostrando as relações litológicas e a brecha hidrotermal, em perfil.

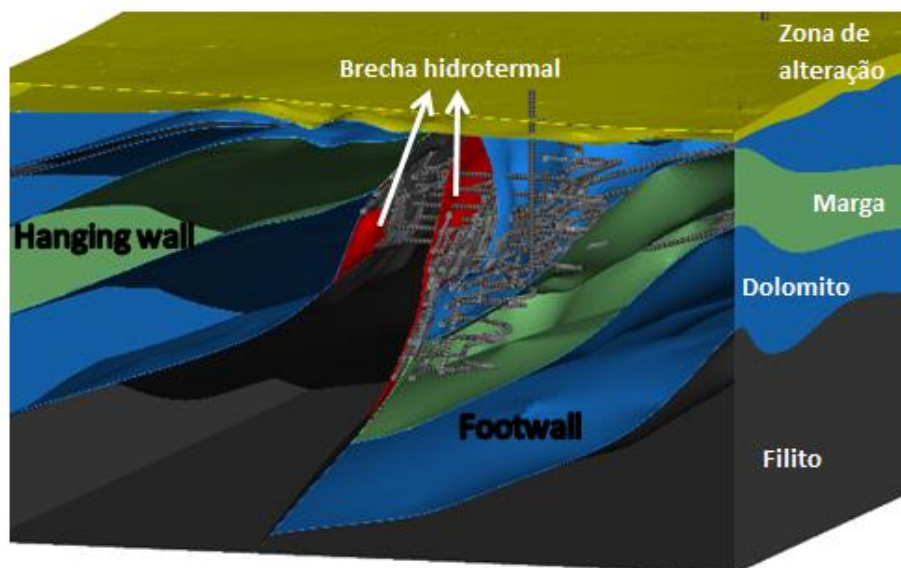


Figura 4.9: Seção 150S, na porção sul do depósito Bonsucesso, mostrando as relações litológicas e projeção das galerias da mina, em bloco.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

5.1 CLASSIFICAÇÃO PARA O MACIÇO ROCHOSO DO DEPÓSITO BONSUCESSO

5.1.1 Litologias e classes de maciços rochosos com base no RQD

Com as descrições litológicas realizadas, tomando por base os parâmetros pré-definidos, foram definidas as seguintes litologias:

- Dolomito, brecha dolomítica, minério: trata-se da mineralização propriamente dita e da rocha predominante no depósito. A principal característica é ser muito competente, de alta resistência e pouco fraturada resultando em um maciço rochoso de boa qualidade. Descontinuidades com mergulho próximo a 30° são as mais relevantes, principalmente quando truncadas por descontinuidades com mergulho médio de 50°.
- Dolomito, brecha dolomítica, minério fraturados: correspondem às mesmas litologias descritas acima, porém com grau de fraturamento mais intenso. Contudo, apenas o maior grau de fraturamento não é suficiente para reduzir drasticamente a boa qualidade do maciço.
- Filito carbonoso e margas intercaladas: principal litologia responsável pelas áreas de instabilidade no teto das galerias (desplacamento de “lajes”), principalmente quando interceptado pelas descontinuidades de mais alto mergulho. Apresenta acamamento próximo de 30°.
- Carste: representa o maciço rochoso na sua porção mais superficial, podendo existir também até os 200 m de profundidade. Trata-se de um saprólito com presença de cavidades e também de blocos de rocha sã. Devido a essas características, assume-se como um maciço rochoso de baixa qualidade.
- Solo: representa a porção inconsolidadas do depósito, sendo caracterizado como um solo transportado, sem relação genética com o depósito em subsuperfície.

Os critérios utilizados para a classificação foram respaldados em uma série de observações durante a descrição dos testemunhos e ensaios laboratoriais. São eles:

- Litologias: existem grupos litológicos bastante distintos. O primeiro refere-se ao solo/saprólito e carste, situado na parte superficial, podendo este atingir grandes

profundidades. O segundo grupo é representado pelos dolomitos, brecha dolomítica e minério. Já o terceiro grupo é formado pelos pacotes de filitos carbonosos e margas.

- Ensaio laboratoriais: os ensaios em laboratório foram realizados pela empresa Couto Geotecnia e os resultados disponibilizados em relatório preliminar mostram que as resistências à compressão uniaxial é de 180 MPa para os dolomitos, brechas dolomíticas e minério e 50 MPa para os filitos carbonosos. Em relação às margas, apesar de os resultados de resistência apresentarem valores muito altos (acima de 150 Mpa), deve ser levado em consideração a ortogonalidade entre a força aplicada nos ensaios e as descontinuidades polidas existentes nas margas, que são de baixa resistência. Vale ressaltar que experiências adquiridas em minas inseridas em domínios geotécnicos semelhantes ratificam a baixa resistência das margas quando os esforços compressivos em relação a essas descontinuidades são aplicados de maneira paralela ou oblíqua. Sendo assim, para a classificação dessa litologia como maciço rochoso, adotou-se a resistência à compressão entre 50 e 100 MPa.
- Condição das paredes das descontinuidades: as descontinuidades que atravessam o maciço rochoso representado pelo dolomito e brecha são geralmente rugosas, com superfícies oxidadas e levemente alteradas. Já as descontinuidades dos filitos carbonosos e margas são planas, polidas e estriadas, com presença de material carbonoso.
- Grau de alteração: predomina-se o grau A1, localmente ocorrendo A2, ou seja, ausência de alteração ou muito pouco alterado. Nas porções superiores, que abrange a região de interesse desse estudo, predomina o grau de alteração A4 e até A5 nas porções superficiais (solo).
- Grau de fraturamento: de maneira geral o fraturamento é baixo a médio para o maciço rochoso, representado pelo dolomito e minério, predominando F2 e F3. No caso das margas e filitos carbonosos, há predominância de grau F3 e F4, podendo ocorrer até F5, caracterizando assim fraturamento médio a alto.
- Famílias de descontinuidades: apesar da limitação inerente à descrição dos testemunhos de sondagem, foi observada três famílias de descontinuidades nos dolomitos, brecha dolomítica, marga e filito, sendo a primeira representada pelo acamamento, a segunda representada por falhamentos com mergulhos próximos a 50°, truncando o acamamento e uma terceira, também com mergulhos entre 50° e 60°, porém mergulhando no sentido oposto à segunda família.
- Presença de água: apesar do baixo grau de fraturamento em algumas litologias, assim como o caráter impermeável das margas e filitos carbonosos, foi assumido que podem

ocorrer grandes surgências de maneira localizada ou em maiores profundidades, principalmente baseando-se em experiência adquirida em minas desenvolvidas em domínios geotécnicos semelhantes, como a Mina de Vazante.

Não se percebeu nesses estudos nenhum indício de eventos indicativos de concentração/alívio de tensões.

Como resultado, foram definidas as seguintes classes de maciços rochosos:

- Classe I-A: maciço rochoso representado pelos dolomitos, brecha dolomítica e minério. Apresenta-se sem alteração (A1), pouco fraturado (F2), formando blocos de ordem de m^3 a dm^3 . É um maciço de boa qualidade, muito competente, apresentando também discontinuidades com características de alta resistência, no que se refere às condições de suas paredes. RQD >90% (Figura 5.1).



Figura 5.1: Dolomito sem alteração (A1) e pouco fraturado (F2), representando a classe I-A.

- Classe I-B: maciço rochoso representado pelas mesmas litologias da classe A, diferindo apenas por apresentar um incremento no grau de fraturamento, passando a F3, e com possibilidade de apresentar pontualmente pequenas alterações (A1/A2), reduzindo um pouco a sua qualidade. RQD 60-90% (Figura 5.2).

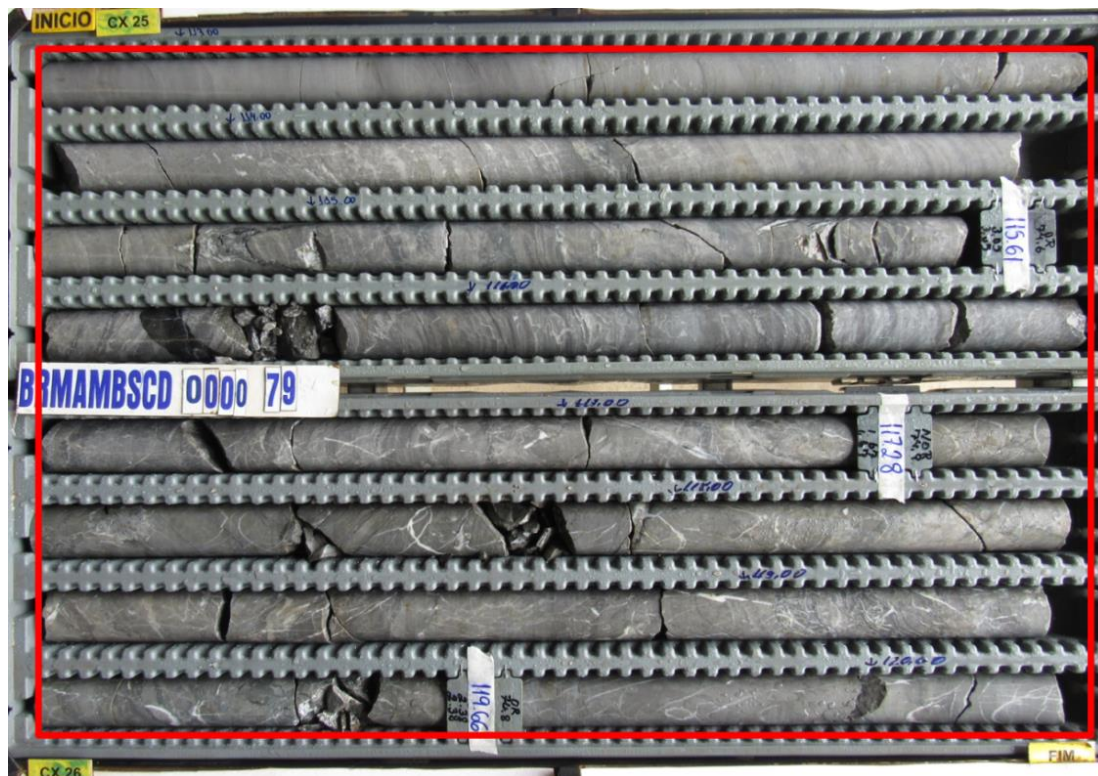


Figura 5.2: Dolomito sem alteração (A1), fraturado (F3), representando a classe I-B.

- Classe II: maciço rochoso representado pelas intercalações de dolomito margoso, marga e filito carbonoso da base. A principal característica geotécnica diz respeito à sua relativa baixa resistência em função dos planos lisos e polidos das descontinuidades existentes nas margas e filitos. O grau de fraturamento pode variar de F2 a F4 com espaçamento decimétrico entre as descontinuidades, não apresentando alterações (A1). RQD 40-60% (Figura 5.3).
- Classe III: maciço rochoso representado pelos filitos carbonosos e margas de qualidade inferior. A diferença básica para o maciço da classe II refere-se ao espaçamento entre as descontinuidades, que no caso da classe III, é predominantemente, centimétrico a milimétrico. Geralmente não apresenta alterações (A1) podendo apresentar de forma pontual (A1/A2), com grau de fraturamento F4 e F5, apresentando planos lisos e polidos nas descontinuidades e acamamento bem desenvolvido, portanto de baixa resistência. RQD <40% (Figura 5.4).
- Classe IV: maciço rochoso representado, de maneira global, pelo domínio superficial da área (colúvio, saprólito e carste), caracterizado pelo alto grau de alteração (A4) associado à presença de cavidades, podendo ocorrer de forma localizada nos domínios mais profundos. Geralmente apresentam baixa recuperação e não se quantifica o grau de fraturamento. RQD <20% (Figura 5.5).

- Classe V: caracteriza o solo que recobre o depósito, com grau de alteração A5, onde não se observam fragmentos de rocha e nem estruturas reliquias (Figura 5.6).

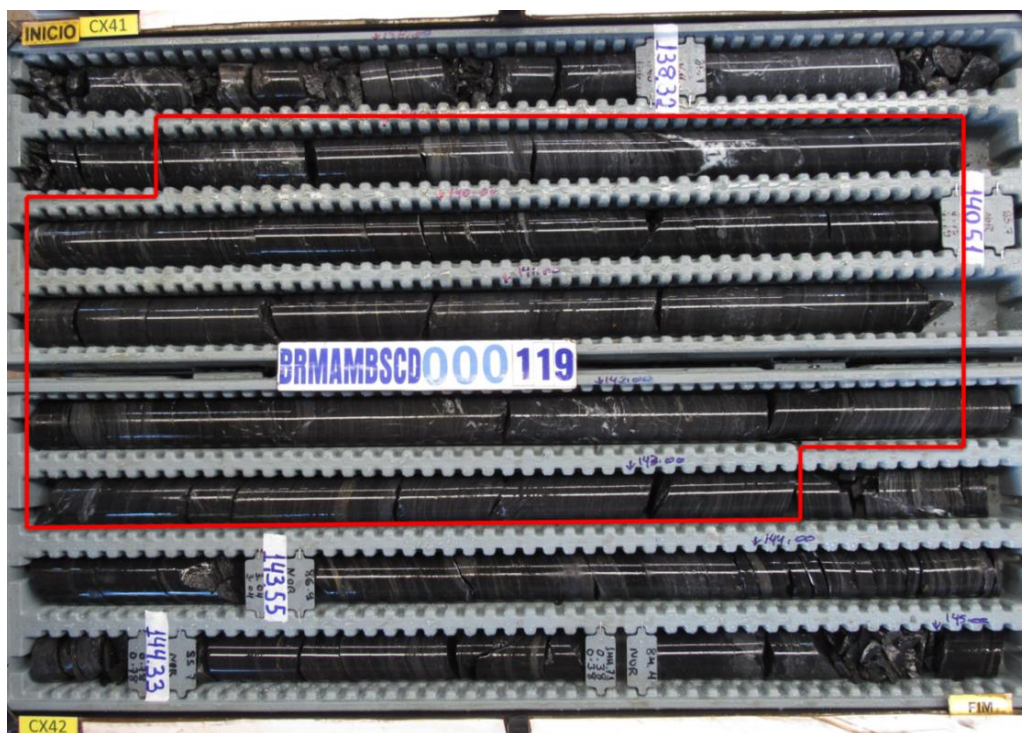


Figura 5.3: Filito carbonoso, sem alteração (A1) e grau de fraturamento considerável (F3/F4), representando a classe II.

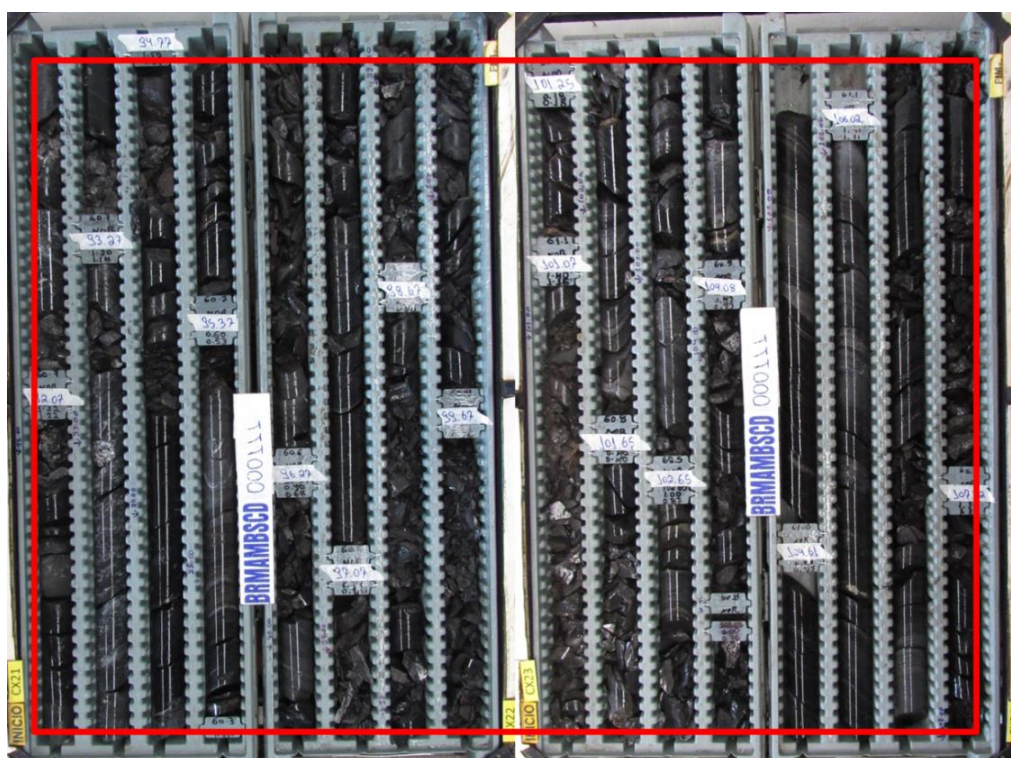


Figura 5.4: Filito carbonoso muito fraturado, por ora fragmentado, com alto grau de fraturamento (F5), representando a classe III.

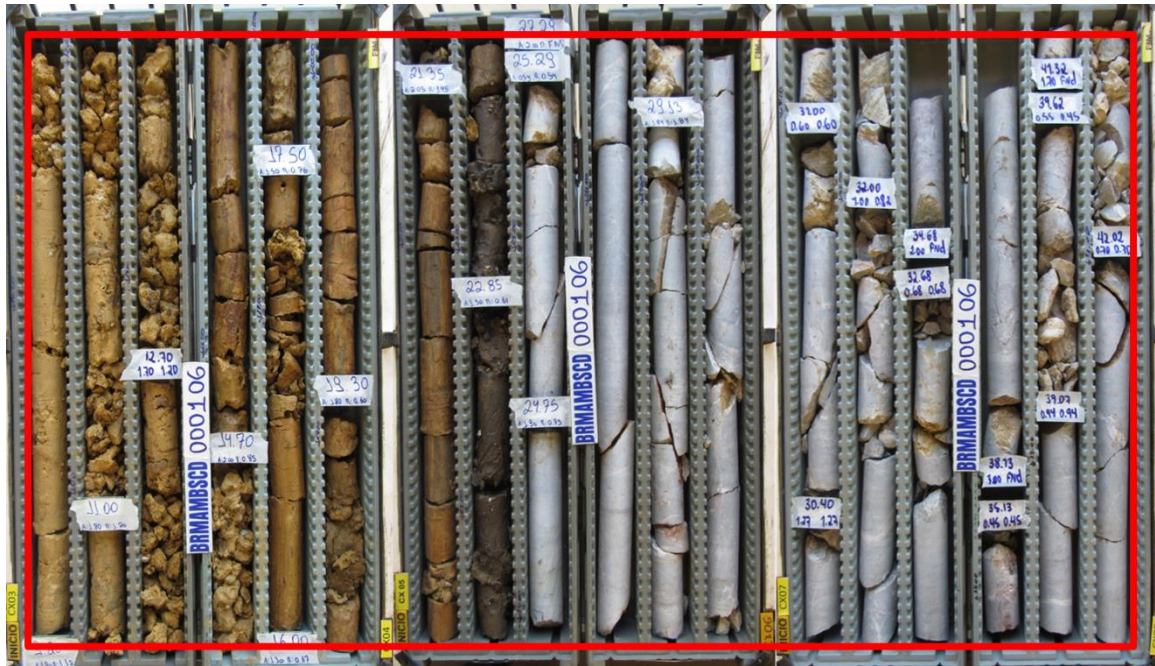


Figura 5.5: Domínio superficial apresentando alto grau de alteração (A4), presença de vazios (fendas) e baixa recuperação, sem quantificar o grau de fraturamento, representando a classe IV.

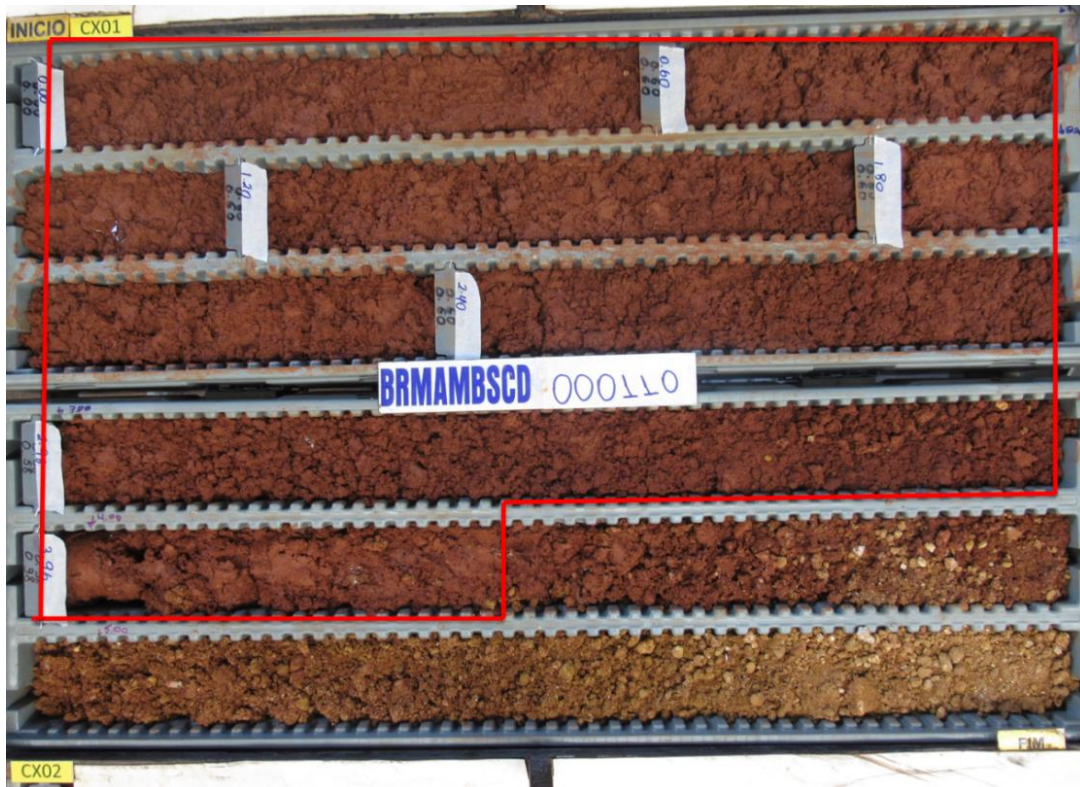


Figura 5.6: Solo que recobre a região, representando a classe V.

O Quadro 5 apresenta a síntese das classes de maciços definidas de acordo com as combinações dos parâmetros relevantes, citados acima.

Quadro 5: Classificação geomecânica do maciço rochoso do depósito Bonsucesso.

CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA - PROJETO BONSUCESSO									
LEGENDA	CLASSE	GRAU DE ALTERAÇÃO	GRAU DE FRATURAMENTO	LITOLOGIA	RESIST. COMP. UNIAXIAL (Mpa)	Nº FAMÍLIA DESCONTINUIDADES	CONDIÇÃO DESCONTINUIDADES	RECUPERAÇÃO (%)	RQD (%)
	I-A	A1	F2	DOLOMITO, BRECHA DOLOMÍTICA, MINÉRIO	180	2 mais aleatórias	Levemente rugosa, somente oxidação	>90	>90
	I-B	A1 - A1/A2	F3	DOLOMITO, BRECHA DOLOMÍTICA, MINÉRIO	180	3 mais aleatórias	Levemente rugosa, somente oxidação	>80	60 a 90
	II	A1	F2 a F4	DOLOMITO MARGOSO, MARGA, FILITO CARBONOSO DA BASE	100	3 mais aleatórias	Plana e polida	>90	40 a 60
	III	A1 - A1/A2	F4/F5	FILITO CARBONOSO, MARGA	50	3 mais aleatórias	Plana e polida	75 a 90	<40
	IV	A4	-	SAPRÓLITO, CARSTE, FENDA	-	-	-	<75	<20
	V	A5	-	SOLO	-	-	-	-	-

5.1.1.1 Detalhamento da Classe IV

Durante a descrição dos testemunhos e na posterior elaboração da classificação geomecânica baseada no RQD, foi notada a necessidade de se detalhar ainda mais a região do carste na região das rampas de acesso, uma vez que, embora muito alterada e com dissoluções, existem trechos de rocha sã que podem ser considerados no planejamento da obra. O maior detalhamento possibilitou escolher o melhor traçado para as rampas além de permitir maior precisão na escolha dos suportes para taludes e galerias.

Portanto, o domínio superficial, representado pela classe IV e caracterizada como uma zona de carste, foi dividida em 5 subclasses (Figura 5.7). São elas:

- Classe IV-A: constituída por blocos de dolomito com espessura menor que 6 m e recuperação maior que 75%.
- Classe IV-B: constituída por blocos de dolomito alterado/fragmentado com recuperação menor que 75%.
- Classe IV-C: representada pelas fendas isoladas.
- Classe IV-D: constitui o carste “típico”, com blocos pequenos de dolomito alterado/fragmentado, porções de argila e fendas.
- Classe IV-E: é representada pelo saprólito, ou seja, material argiloso que contém pequenos fragmentos de rocha alterada.

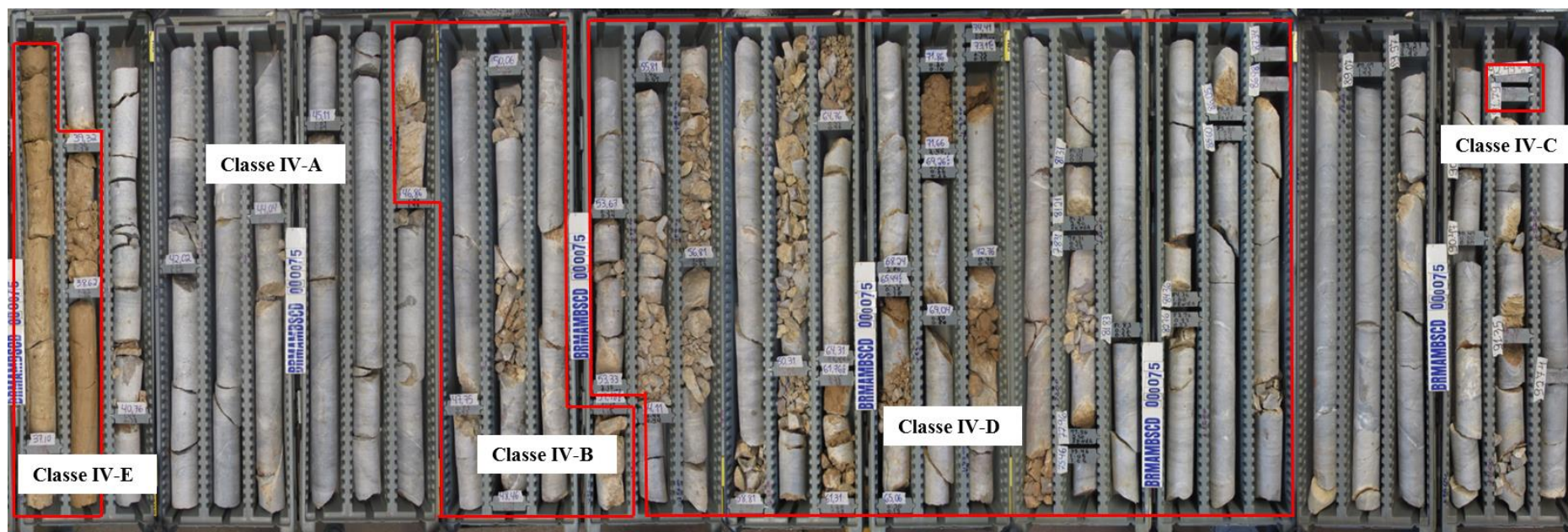


Figura 5.7: Detalhamento da classe IV.

5.1.2 Classificação geomecânica segundo RMR de Bieniawski

Na aplicação desse sistema de classificação, o maciço rochoso foi dividido em regiões estruturais distintas e cada região foi classificada separadamente. As fronteiras dessas regiões estruturais normalmente coincidem com uma feição estrutural principal, tipo de falha ou mudança de litologia. Em alguns casos, mudanças significativas no espaçamento entre as descontinuidades ou outras características, dentro de uma mesma litologia, podem requerer uma subdivisão. Para essa classificação foram utilizados ensaios de resistência à compressão uniaxial realizados em “sites” adjacentes em função da similaridade entre os maciços rochosos. Nesse caso foram utilizados dados dos maciços da Mina de Morro Agudo.

5.1.2.1 Definição dos índices para a Mina de Morro Agudo

Os resultados para o ensaio de resistência a compressão uniaxial, RQD e espaçamento das descontinuidades são apresentados no Quadro 6. Foram obtidos também os índices relacionados às condições das descontinuidades apresentados no Quadro 7.

Em relação às condições de água no maciço, foi considerado como maciço rochoso seco, com umidade localizada, indicando peso = 15, de acordo com a Tabela 4.

Já para o parâmetro orientação das descontinuidades, considerando que a maioria das escavações acontecerá com direção paralela à direção principal das descontinuidades, as quais possuem mergulhos compreendidos entre 45° e 90°, o que imprime uma condição muito favorável, o fator de correção indicado na classificação RMR é igual a 0.

5.1.2.2 Resultados

Em função dos parâmetros obtidos acima e de acordo com a Tabela 5, tem-se:

- Dolomito, brecha dolomítica, minério: RMR = 74 (Classe II, maciço rochoso bom).
- Dolomito, brecha dolomítica, minério fraturados: RMR = 72 (Classe II, maciço rochoso bom).
- Dolomito margoso, marga e filito carbonoso da base: RMR = 56 (Classe III, maciço rochoso razoável).
- Filito carbonoso e margas intercaladas: RMR = 48 (Classe III, maciço rochoso razoável).
- Carste e alterações: RMR = 27 (Classe IV, maciço rochoso fraco).

Quadro 6: Síntese dos índices RMR para Compressão Uniaxial, RQD e espaçamento das descontinuidades para a Mina de Morro Agudo.

Litologias	Resistência Compressão Uniaxial		RQD		Espaçamento das descontinuidades	
	UCS	Peso RMR	%	Peso RMR	(m)	Peso RMR
Dolomito, brecha dolomítica, minério	100 – 250 MPa	12	90	20	0,2 m a 0,6 m	10
Dolomito, brecha dolomítica, minério fraturados	100 – 250 MPa	12	60	13	0,2 m a 0,6 m	10
Dolomito margoso, marga, filito carbonoso da base	50 – 100 MPa	7	50	13	0,06 m a 0,2 m	8
Filito carbonoso e marga	25 – 50 MPa	4	25	8	0,06 m a 0,2 m	8
Saprólito, carste, zonas com dissolução	25 – 50 MPa	4	10	3	-	5

Quadro 7: Índices RMR para a condição das descontinuidades para a Mina de Morro Agudo.

Litologias	Condição das descontinuidades										Peso geral
	Persistência		Separação		Rugosidade		Preenchimento		Alteração		
	(m)	Peso RMR	(m)	Peso RMR		Peso RMR		Peso RMR		Peso RMR	
Dolomito, brecha dolomítica, minério	3 a 10 m	2	entre 0,1 mm e 1 mm	4	rugosa a levemente rugosa	5	não há	6	levemente alterada	5	22
Dolomito, brecha dolomítica, minério fraturados	3 a 10 m	2	entre 0,1 mm e 1 mm	4	rugosa a levemente rugosa	5	não há	6	levemente alterada	5	22
Dolomito margoso, marga, filito carbonoso da base	3 a 10 m	2	entre 0,1 mm e 4 mm	4	plana, lisa e estriada	0	Carbonáticos mole <5 mm	2	levemente alterada	5	13
Filito carbonoso e marga	3 a 10 m	2	entre 0,1 mm e 4 mm	4	plana, lisa e estriada	0	mole < 5mm	2	levemente alterada	5	13
Saprólito, carste, zonas com dissolução	-	-	contínua > 5mm	-	-	-	mole > 5mm	-	-	-	0

5.1.3 Classificação geomecânica segundo o sistema Q de Barton

Para um melhor entendimento, cada litologia foi tratada como uma classe distinta. Com base na avaliação numérica da qualidade do maciço rochoso utilizando os parâmetros definidos pelo método e com os índices obtidos através da tabela específica elaborada para o sistema Q (Quadro 1), foi estabelecida a classificação geomecânica para o maciço rochoso do depósito de Bonsucesso.

5.1.3.1 Definição dos índices para o Projeto Bonsucesso

Apesar de cada litologia ter sido tratada como uma classe diferente, parâmetros, como o grau de fraturamento, sofreram variações dentro da mesma litologia, afetando diretamente o RQD. Por este motivo, foram criadas subdivisões de maciços dentro de uma mesma litologia.

Os índices do sistema Q com estas subdivisões são apresentados no Quadro 8.

Quadro 8: Índices do sistema Q para classificação do maciço rochoso do depósito Bonsucesso.

Parâmetros	RQD	Litologias									
		Dolomito, brecha dolomítica, minério		Dolomito, brecha dolomítica, minério fraturados		Dolomito margoso, marga, filito carbonoso da base		Filito carbonoso e marga		Saprólito, carste, zonas com dissolução	
		90%		60%		50%		20%		10%	
	Nº famílias descontinuidades (Jn)	2 famílias, mais aleatórias	Jn 9	3 famílias, mais aleatórias	Jn 12	3 famílias, mais aleatórias	Jn 12	3 famílias, mais aleatórias	Jn 12	3 famílias, mais aleatórias	Jn 12
	Rugosidade das juntas (Jr)	onduladas, rugosas e irregulares	Jr 3	onduladas, rugosas e irregulares	Jr 3	planas e polidas	Jr 0,5	planas e polidas	Jr 0,5	sem contato com a rocha	Jr 1
	Alteração das juntas (Já)	pouco alteradas, oxidação	Ja 1	pouco alteradas, oxidação	Ja 1	pouco alteradas, oxidação	Ja 1	pouco alteradas	Ja 1	preech. Argiloso sem contato com a rocha	Ja 8
	Presença de água no maciço (Jw)	Fluxo de água menor que 5 litros/minuto para todas as litologias. Localmente pode ocorrer incremento na umidade do maciço rochoso, porém sem afetar a estabilidade global das escavações									Jw 1
	Tensões atuantes no Maciço (SRF)	$\sigma C/\sigma_i$ 10 – 200 MPa	SRF 1	$\sigma C/\sigma_i$ 10 – 200 MPa	SRF 1	$\sigma C/\sigma_i$ 10 – 200 MPa	SRF 1	$\sigma C/\sigma_i$ 10 – 200 MPa	SRF 1	material argiloso/ rocha decomposta em qualquer profundidade	SRF 10

5.1.3.2 Resultados

Em função dos parâmetros obtidos acima e de acordo com a Tabela 6, tem-se:

- Dolomito, brecha dolomítica, minério: $Q = 30$ (Classe IV, maciço rochoso bom).
- Dolomito, brecha dolomítica, minério fraturado: $Q = 15$ (Classe IV, maciço rochoso bom).
- Dolomito margoso, marga e filito carbonoso da base: $Q = 2,08$ (Classe VI, maciço rochoso ruim).
- Filito carbonoso e margas intercaladas: $Q = 0,83$ (Classe VII, maciço rochoso muito ruim).
- Carste e alterações: $Q = 0,01$ (Classe VIII, maciço rochoso extremamente ruim).

5.1.4 Correlação entre os sistemas de classificação RMR e Q

Os sistemas RMR e Q levam em consideração parâmetros semelhantes entre si, mas cada um segue uma metodologia distinta. A classificação de um maciço por ambos os métodos auxilia nas decisões de tratamento das escavações. A Tabela 10 apresenta uma síntese dos valores encontrados para os sistemas RMR e Q e dos valores encontrados para a correlação entre os dois métodos.

A correlação entre as classificações RMR e Q foi realizada por meio de comparação numérica, utilizando a Equação 5. Os índices obtidos foram sobrepostos no gráfico abaixo (Figura 5.8). Desta forma, observou-se que houve um desvio mínimo dos valores obtidos, concluindo que existe uma boa aderência de ambos os métodos utilizados, embora tenham sido utilizados dados da mina de Morro Agudo para obtenção do índice RMR.

Tabela 10: Síntese dos valores encontrados para a os sistemas RMR, Q e sua correlação.

Classe	RMR	Q	$RMR = 9\ln Q + 44$
I-A	74	30	74,61
I-B	72	15	68,37
II	56	2,08	50,59
III	48	0,83	42,32
IV	27	0,01	2,55

Figura 5.8: Gráfico de correlação entre os sistemas RMR e Q para o depósito Bonsucesso.

5.1.5 Detalhamento do carste e posicionamento das rampas de acesso

O desafio geotécnico do projeto é focado neste estudo diz respeito à zona de epicarste e carste profundo, uma vez que as obras das rampas de acesso atravessam essa região. Dessa forma, houve a necessidade de se detalhar ainda mais essa zona. A presença de alteração e dissolução das rochas formam cavidades, que podem resultar em colapso das escavações, dolinamentos e fluxo de água acima da capacidade de bombeamento.

Em toda a extensão do depósito foram mapeadas áreas onde o carste se encontra mais profundo e áreas onde é mais superficial. Esse mapeamento foi feito com base na descrição dos testemunhos de sondagem realizados ao longo de todo o depósito (Figura 5.9) e cruzado com dados do levantamento geofísico de eletrorresistividade (ERT).

Com o resultado das malhas do ERT foi possível identificar as regiões de alta resistividade que indicam zonas onde o carste não se encontra tão profundo (Figura 5.10).

A identificação desses altos resistivos direcionou o posicionamento dos furos específicos para as rampas projetadas, com objetivo de detalhar a zona de carste e verificar se realmente, naquela região, o carste não era profundo. Esse detalhamento foi necessário uma vez que as escavações em porções de rocha alterada e com dissolução exigem maiores custos com contenções e suportes, além do maior risco operacional para o projeto. Após comprovada a menor espessura do carste na área identificada pelo levantamento geofísico e elaboração do modelo geomecânico foi possível definir a posição das rampas de acesso (Figuras 5.11 e 5.12).

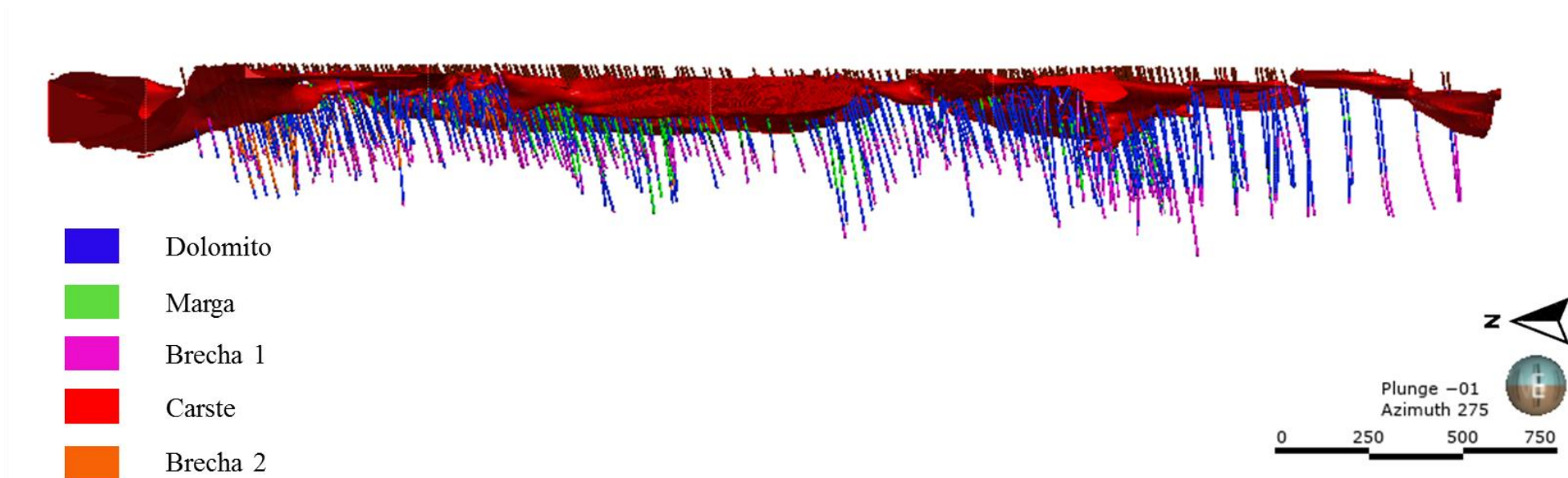


Figura 5.9: Perfil longitudinal (N-S) do depósito Bonsucesso mostrando zona de carste com base na descrição dos testemunhos de sondagem.

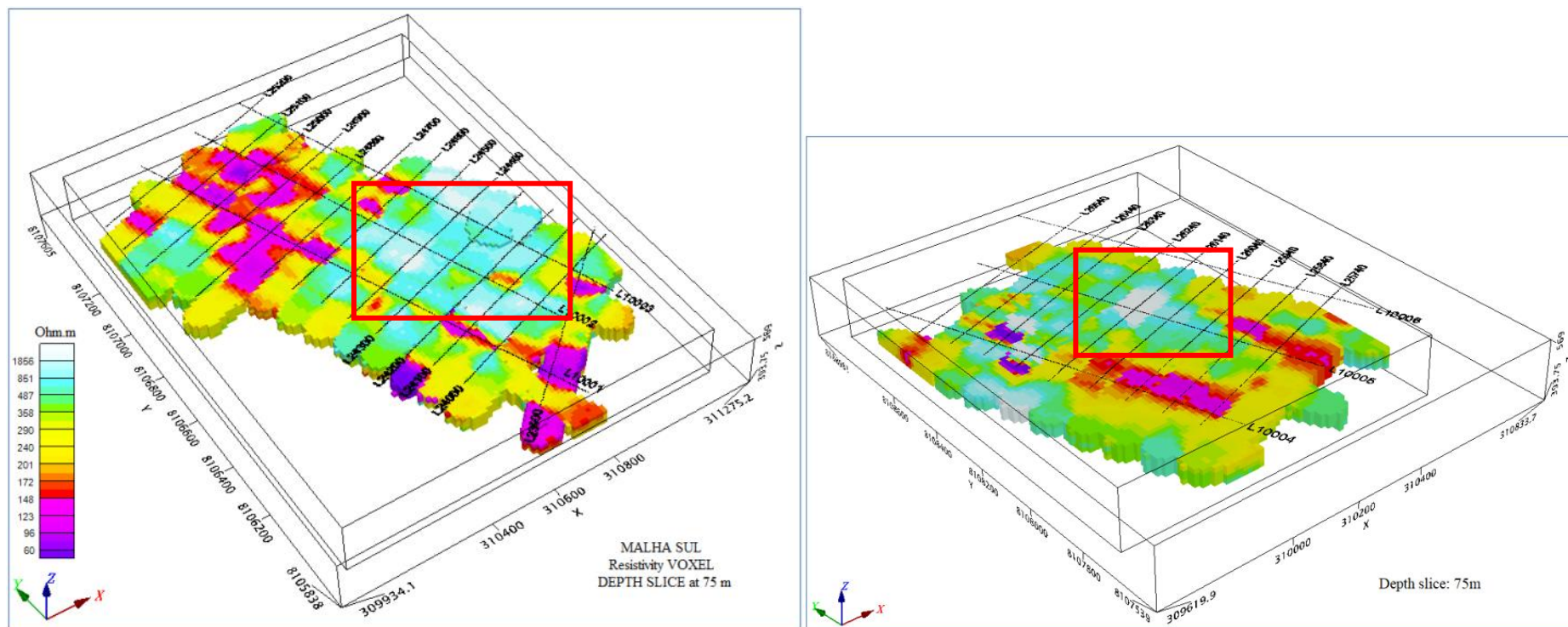


Figura 5.10: Malha sul e malha norte do levantamento eletrorresistivo com indicação dos altos resistivos, destacados nos quadrados em vermelho, a 75 metros de profundidade.

Com a descrição também foi possível mapear a área de influência do carste hidrogeológico, observando uma diferenciação no nível de intemperismo, variando principalmente a intensidade das alterações e dissoluções. A figura 5.13 mostra um gráfico relacionando a carstificação e profundidade, possibilitando a delimitação do carste geotécnico e do carste hidrogeológico.

O carste geotécnico corresponde à região onde a intensidade da alteração e dissolução é expressiva, ocorrendo vazios e fendas, preenchidas por material argiloso ou não, que podem ocasionar colapso das escavações e gerar maiores custos na execução da obra e na instalação dos suportes. Já para a hidrogeologia, o carste corresponde a toda região que possui descontinuidades com evidência de percolação de água, como superfícies oxidadas, por exemplo. Essa diferença é mostrada no gráfico em função da profundidade. É possível encontrar fraturas com a superfície oxidada, evidenciando percolação de água, em porções de rocha sã, classificada como classe I-A ou I-B para o depósito Bonsucesso, o que é relevante para a hidrogeologia. O estudo da presença, ou não, de água no maciço é fundamental para o planejamento da capacidade de bombeamento e evitar problemas futuros com inundação nas galerias da mina.

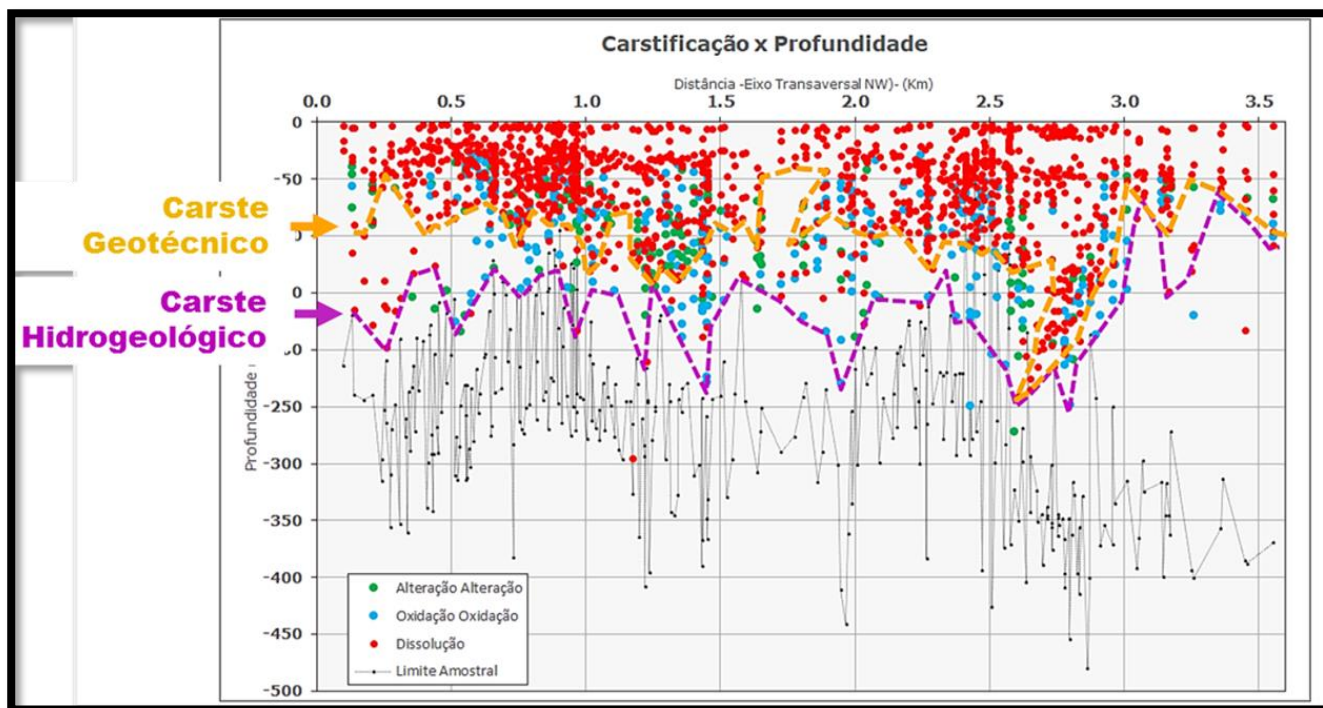


Figura 5.13: Gráfico Carstificação x Profundidade mostrando os limites do carste geotécnico e do carste hidrogeológico.

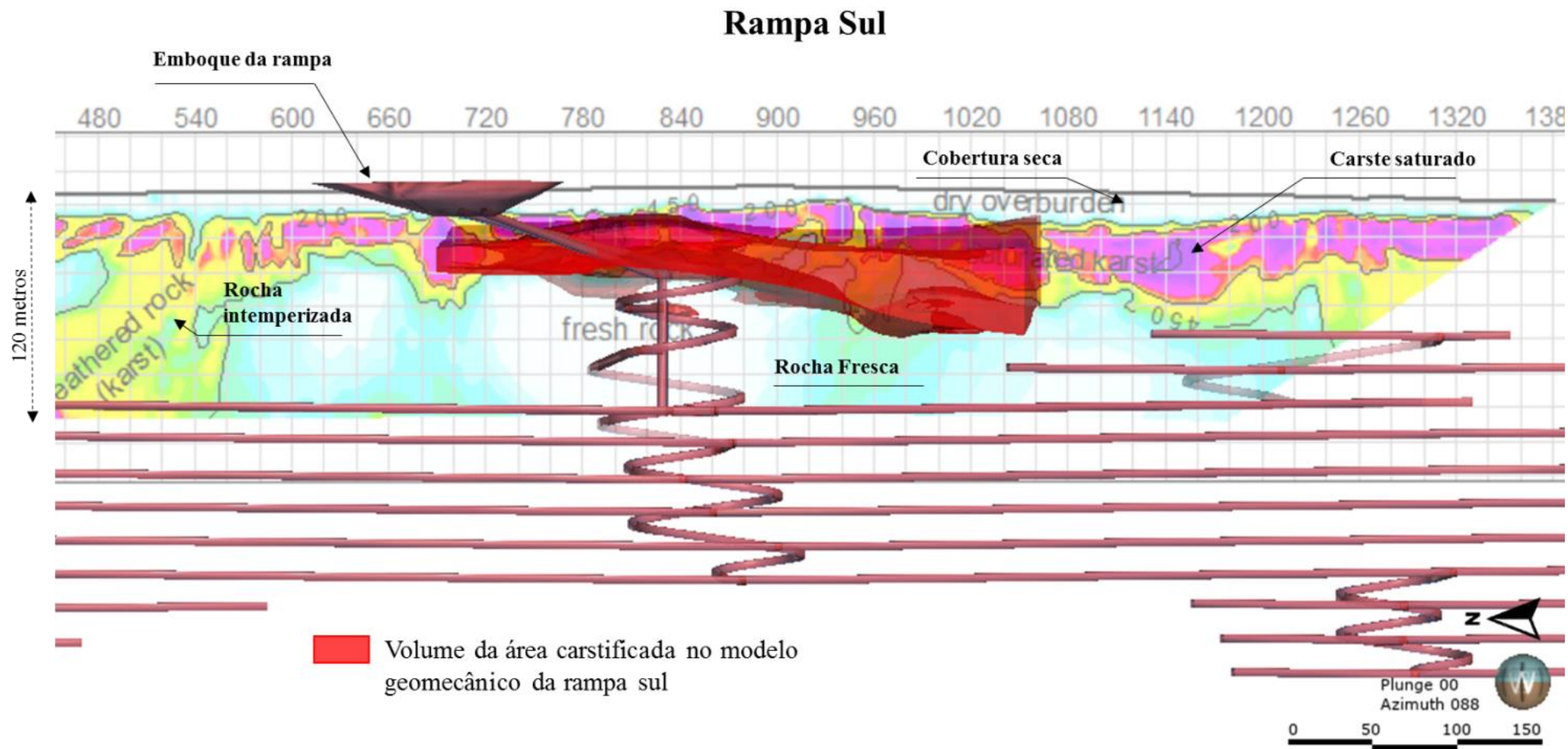


Figura 5.11: Posição da rampa sul, definida pelo cruzamento de informações do modelo geomecânico e do levantamento geofísico produzida no Leapfrog Geo.

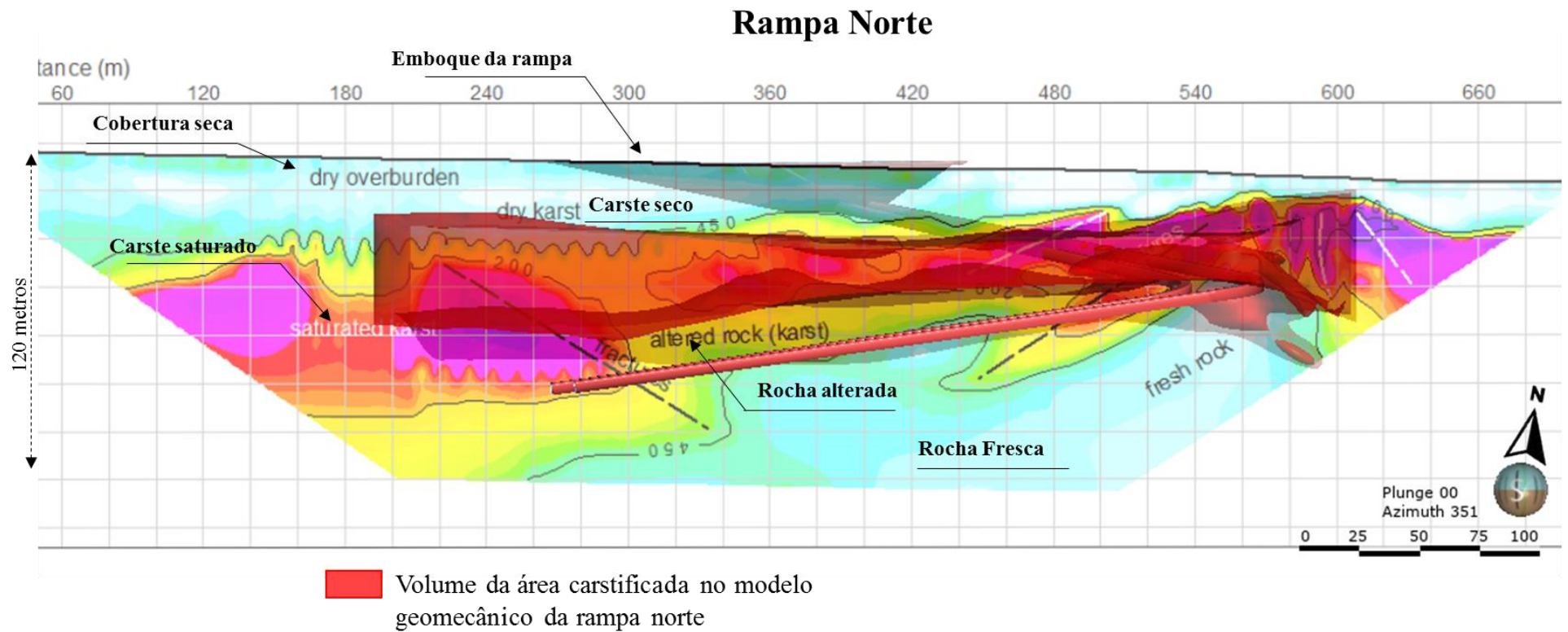


Figura 5.12: Posição da rampa norte, definida pelo cruzamento de informações do modelo geomecânico e do levantamento geofísico produzida no Leapfrog Geo.

5.2 IDENTIFICAÇÃO DAS FAMÍLIAS DE FRATURAS

Ao longo de todo o maciço foi possível reconhecer três famílias principais de fraturas. Para os furos analisados, as fraturas medidas concentravam-se nas classes I-A e I-B, já que não foi possível a orientação dos furos na área carstificada devido ao seu elevado estado de alteração e dissolução.

Para a rampa sul, a Família 1 (F1S) constitui planos com direção NW-SE e mergulho médio de 22° para sudoeste (SW), coincidente com a direção de acamamento (Figura 5.14). No geral, a atitude do plano médio, para as medidas coletadas dessa família é 240/22.

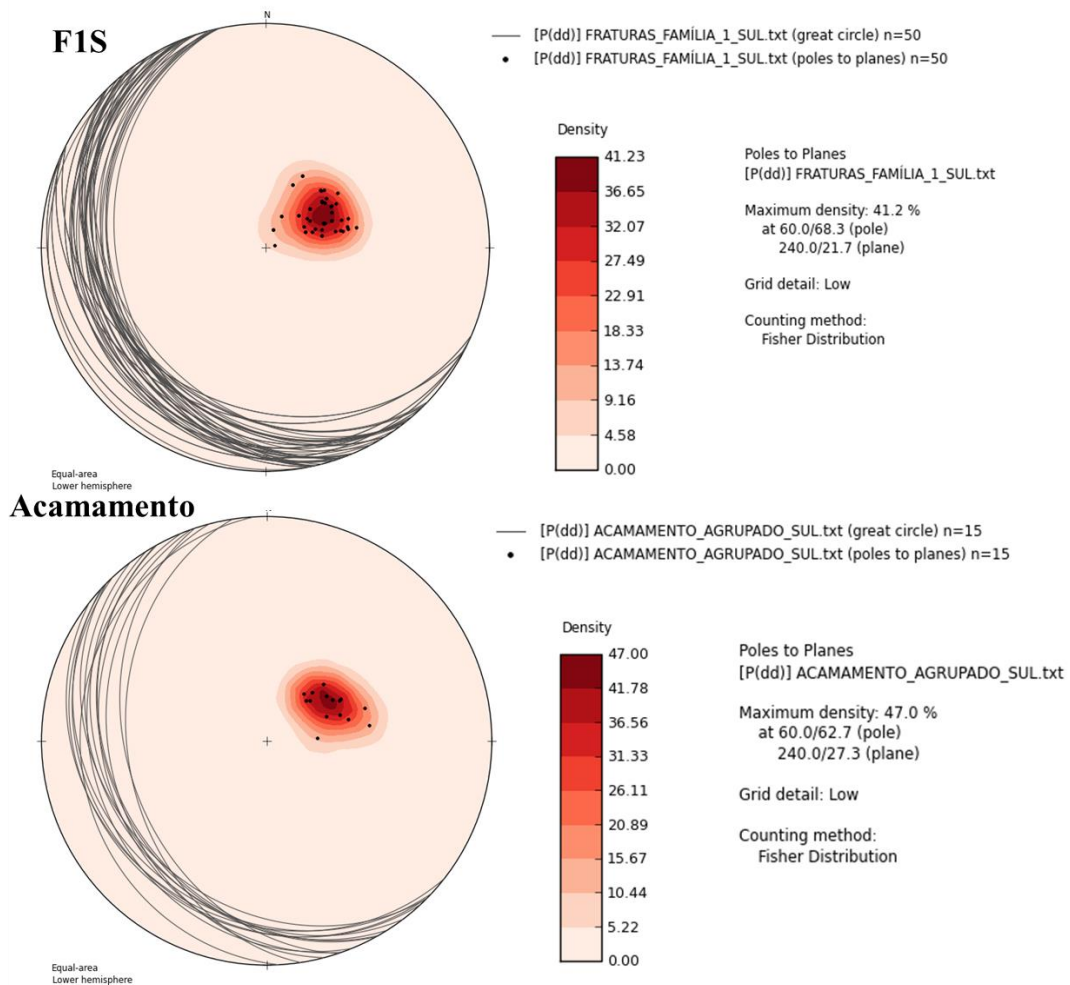


Figura 5.14: Estereograma representativo das discontinuidades da Família 1 (F1S) e dos planos de acamamento coincidentes (software OpenStereo).

A Família 2 (F2S) é caracterizada por possuir planos com mergulho médio de 50° para sudeste (SE) e direção NE-SW (atitude média do plano é de 133/50) (Figura 5.15). Já a Família 3 (F3S) apresenta mergulho para nordeste (NE), também próximo a 50° e para as medidas coletadas, o plano médio é 73/50 (Figura 5.16). Os planos de discontinuidades que compõem todas as famílias apresentam superfícies planas e levemente rugosas a lisas, possuindo ocasionalmente algumas irregularidades devido à quebra durante as manobras de sondagem.

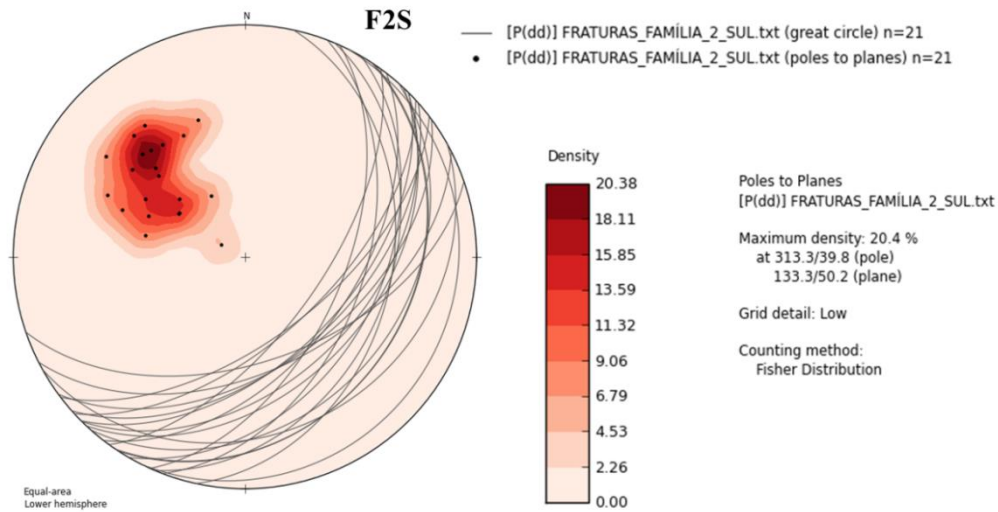


Figura 5.15: Estereograma representativo das discontinuidades da Família 2 (F2S) (software OpenStereo).

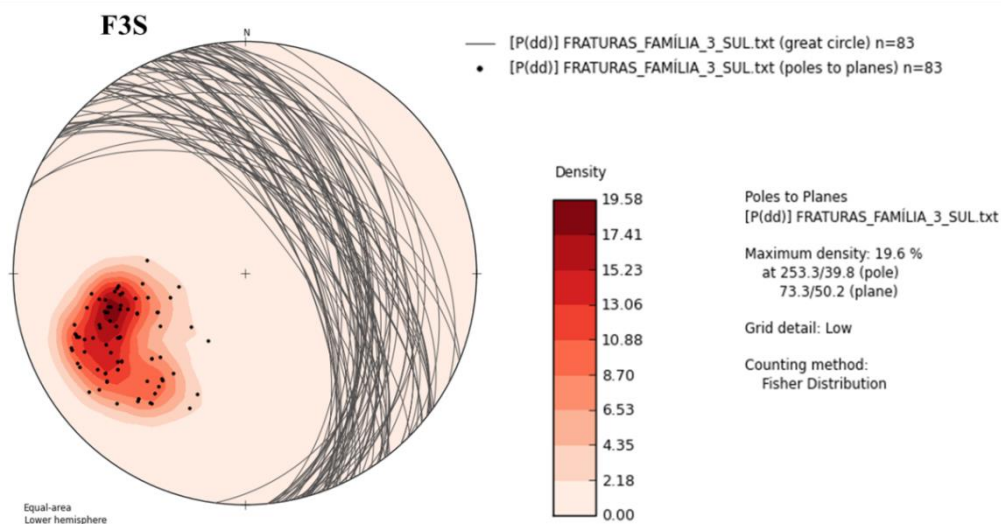


Figura 5.16: Estereograma representativo das discontinuidades da Família 3 (F3S) (software OpenStereo).

Na região da rampa norte, a Família 1 (F1N) é caracterizada por planos também coincidentes com o acamamento, mergulhando para oeste-noroeste (W-NW) e com plano médio-geral 300/17 para as discontinuidades e 300/27 para o acamamento (Figura 5.17).

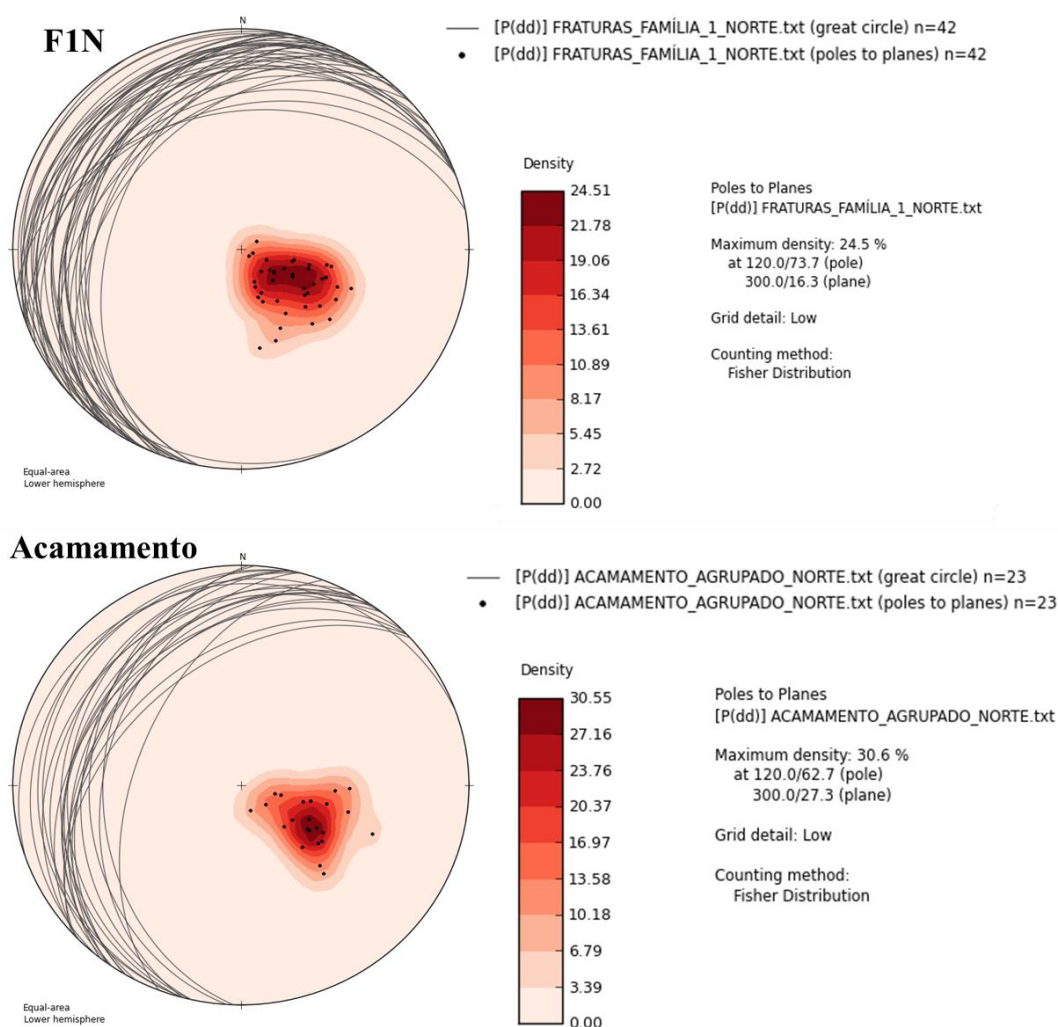


Figura 5.17: Estereograma representativo das descontinuidades da Família 1 (F1N) e dos planos de acamamento coincidentes (software OpenStereo).

A Família 2 (F2N) apresenta planos com direção NE-SW com mergulho próximo a 57° para sudeste (SE) com atitude do plano médio 144/57 (Figura 5.18). A Família 3 (F3S), assim como a Família 2, têm mergulho entre 55° e 60°, porém mergulhando para nordeste (NE) (atitude do plano médio 60/62) (Figura 5.19). Da mesma forma que ocorre a rampa sul, as descontinuidades possuem superfície planar lisa a rugosa, com pequenas irregularidades.

Em ambas as rampas foram verificadas a existência de oxidação na superfície de algumas descontinuidades, podendo apresentar leve dissolução ou alteração, evidenciando percolação de água.

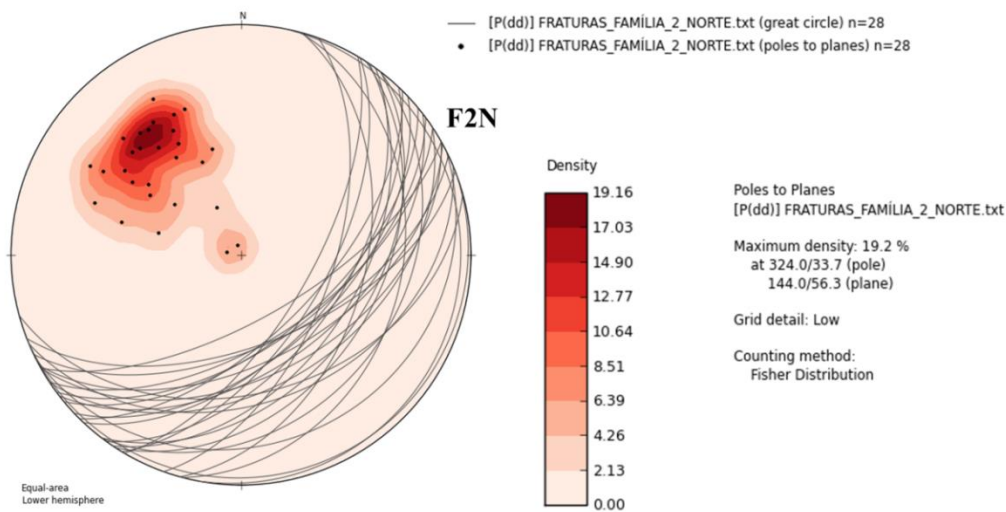


Figura 5.18 Estereograma representativo das descontinuidades da Família 2 (F2N) (software OpenStereo).

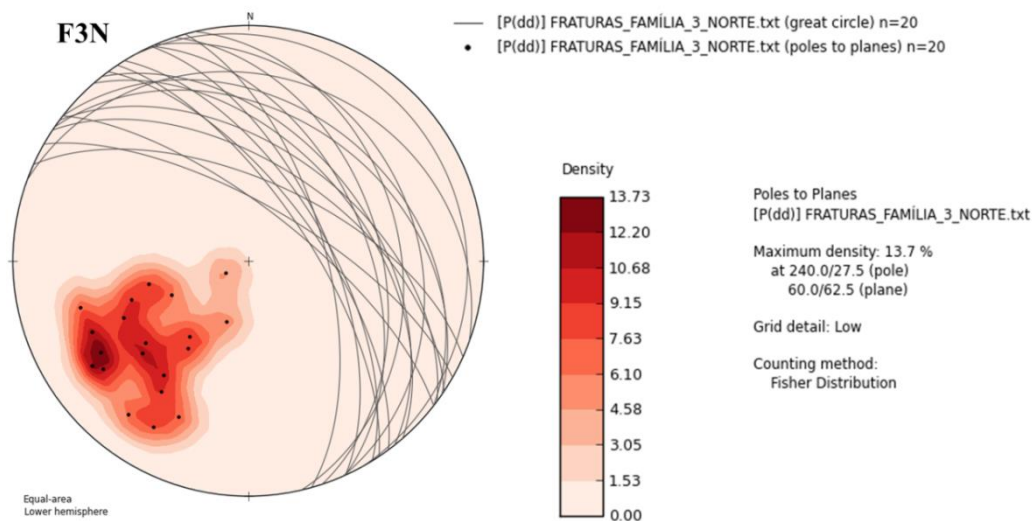


Figura 5.19: Estereograma representativo das descontinuidades da Família 3 (F3N) (software OpenStereo).

Nas figuras 5.20 e 5.21 são apresentadas a distribuição e posição das descontinuidades no maciço, tomando por base o posicionamento dos furos e o modelo geomecânico. Em um próximo estudo, essa análise das famílias de fraturas permitirá verificar a relação entre a direção de abertura das galerias e a direção de mergulho dessas descontinuidades, bem como a posição para se fixar os tirantes para suporte das galerias.

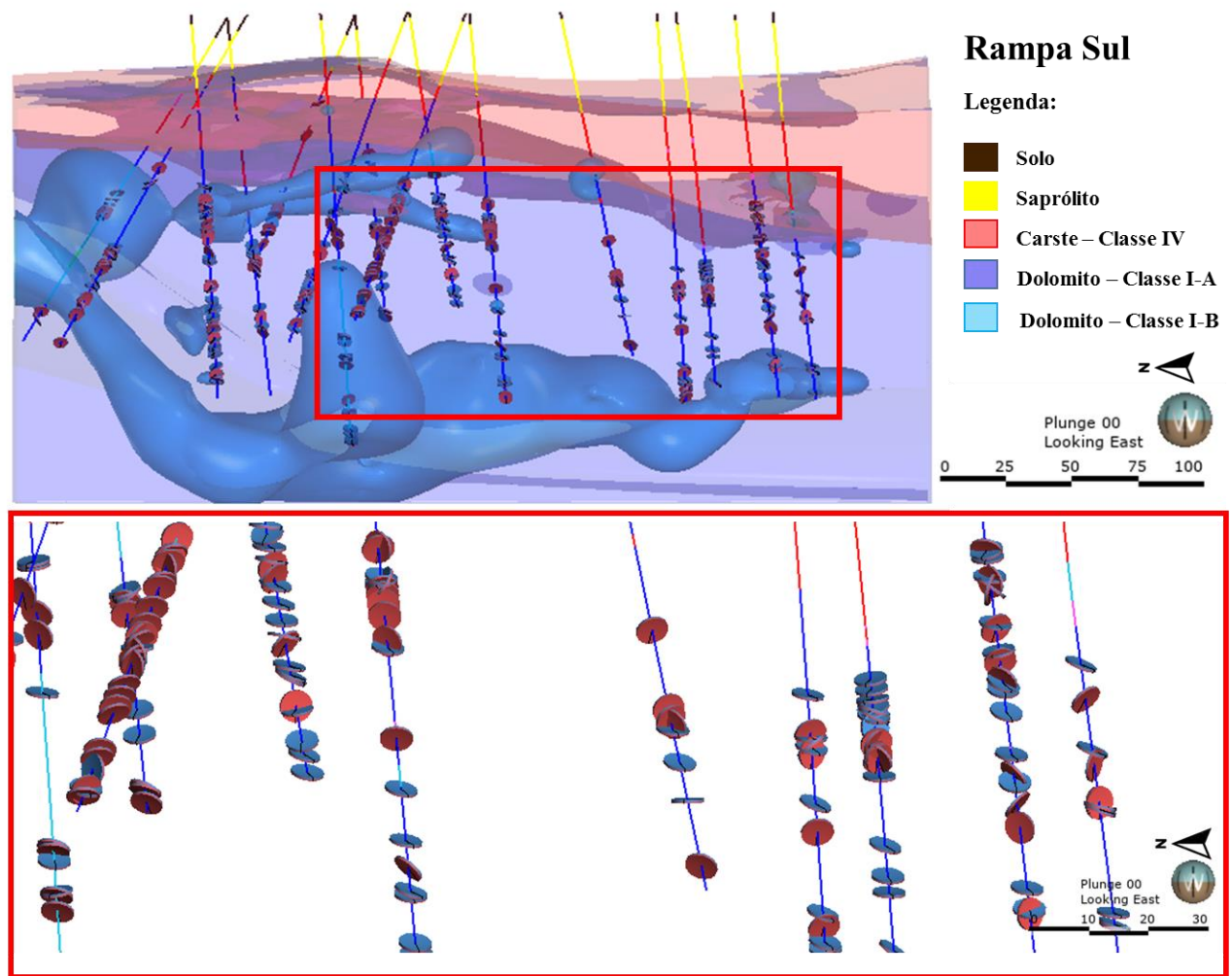


Figura 5.20: Distribuição das descontinuidades no maciço de acordo com a sua posição nos furos de sondagem na rampa sul.

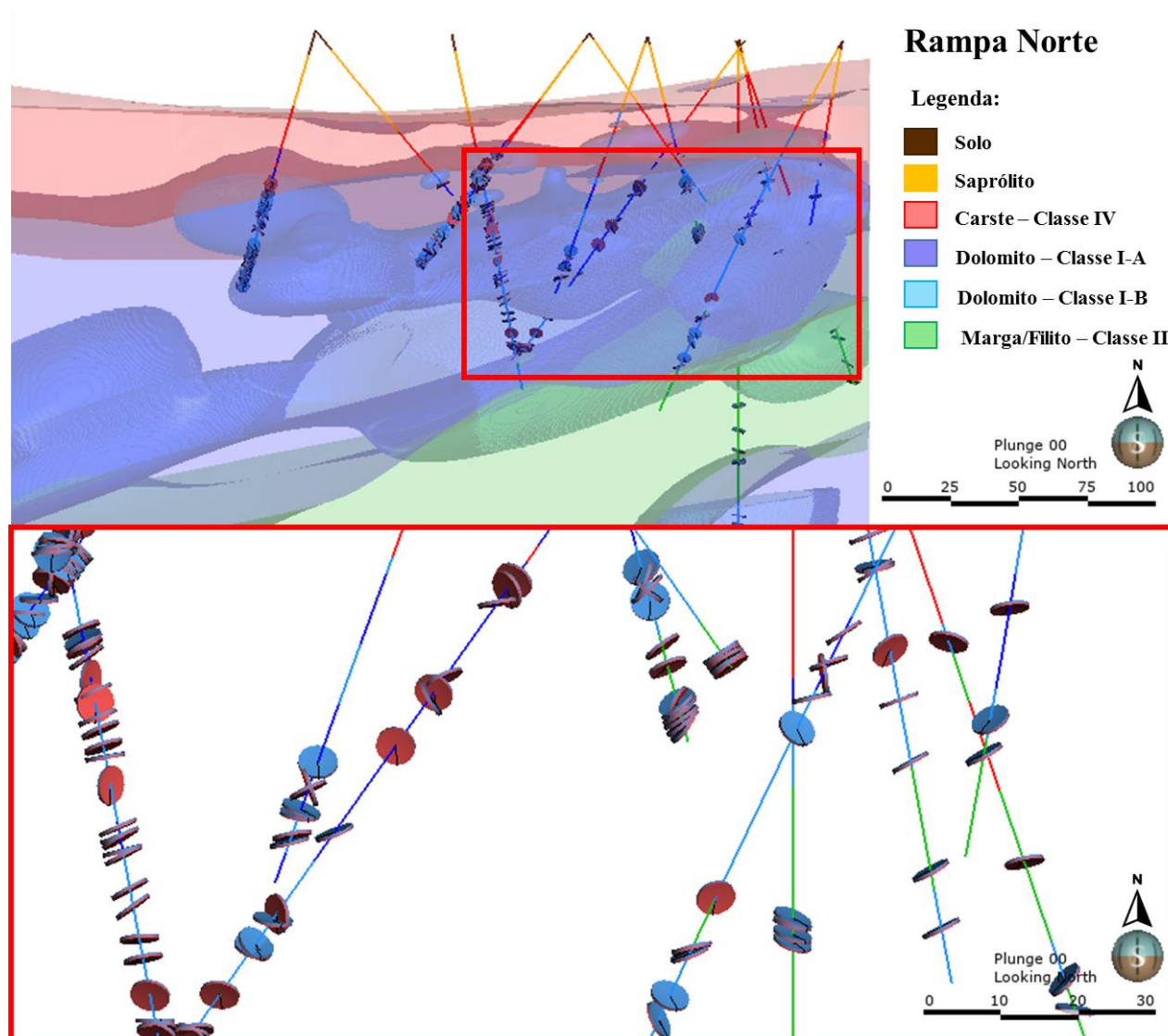


Figura 5.21: Distribuição das descontinuidades no maciço de acordo com a sua posição nos furos de sondagem na rampa norte.

5.3 MODELO GEOMECÂNICO

O modelo geomecânico é a representação gráfica da região onde será implementado o empreendimento, abrangendo as informações geológicas e geotécnicas necessárias para a previsão do comportamento do maciço quando solicitado.

No modelo para o depósito Bonsucesso houve predominância do maciço de classe I-A, ou seja, o maciço de boa qualidade e competente representado pelos dolomitos, brecha dolomítica e minério não alterados e pouco fraturados (Figuras 5.22 e 5.23). A classe de interesse – classe IV – representa a porção superficial do depósito e está mais susceptível às ações intempéricas,

influenciando na estrutura da rocha, tornando-a menos competente. A camada de solo (classe V) possui aproximadamente 4 m de espessura, seguida por um saprólito (classe IV-E) de espessura variável. Observou-se também uma variação na profundidade da zona de carste (classe IV).

A confecção do modelo geomecânico foi fundamental na definição da localização das rampas de acesso, já que possibilitou visualizar a região onde o carste se encontra menos profundo.

5.4 MÉTODOS DE CONTENÇÃO E SUPORTE

Uma vez definida a classificação geomecânica para o projeto Bonsucesso, embasadas pelos sistemas RQD, RMR e Q, é possível definir o tipo de suporte necessário para a abertura do empreendimento mineiro. O planejamento do tipo de suporte a ser utilizado visa a segurança de pessoas, e também a proteção de equipamentos e das estruturas da mina, a fim de se evitar colapsos.

5.4.1 Cálculo da dimensão equivalente (DE) e do comprimento dos tirantes

Considerando galerias com larguras médias de 5 m e generalizando o conceito de escavações permanentes para todas, obtém-se, pela Equação 6, um $DE = 3,15$. Se for mantido o mesmo conceito para a escavação e aumentar a largura para 10 m, o DE obtido será de 6,25.

Utilizando a Equação 7, obtém-se tirantes com 1,7 m de comprimento, para galerias com vão de 5 m e tirantes com 2,2 m de comprimento para galerias com vão de 10m.

5.4.2 Categoria de sustentação

Para dimensionar o suporte foi utilizado o ábaco da figura 2.6, proposto por Barton (1974), que mostra a relação entre o índice Q e a dimensão equivalente (DE - obtida pela Equação 6). O termo ESR está relacionado ao tipo de uso que será dado à escavação (Tabela 7), sendo utilizado o valor referente a galerias permanentes de mina (1,6). O comprimento dos tirantes, por sua vez, foi calculado pela Equação 7. Para chegar ao tipo de suporte adequado, foram considerados os cálculos para galerias com vão de 5 m. Pela projeção destes valores no ábaco foi possível estimar, de forma teórica, a categoria de sustentação mais indicada (Figura 5.24).

Como pode ser observado, os resultados indicam que para as classes I-A e I-B, representadas pelos dolomitos, brechas dolomíticas e minério, não será necessário o uso de suporte nas galerias.

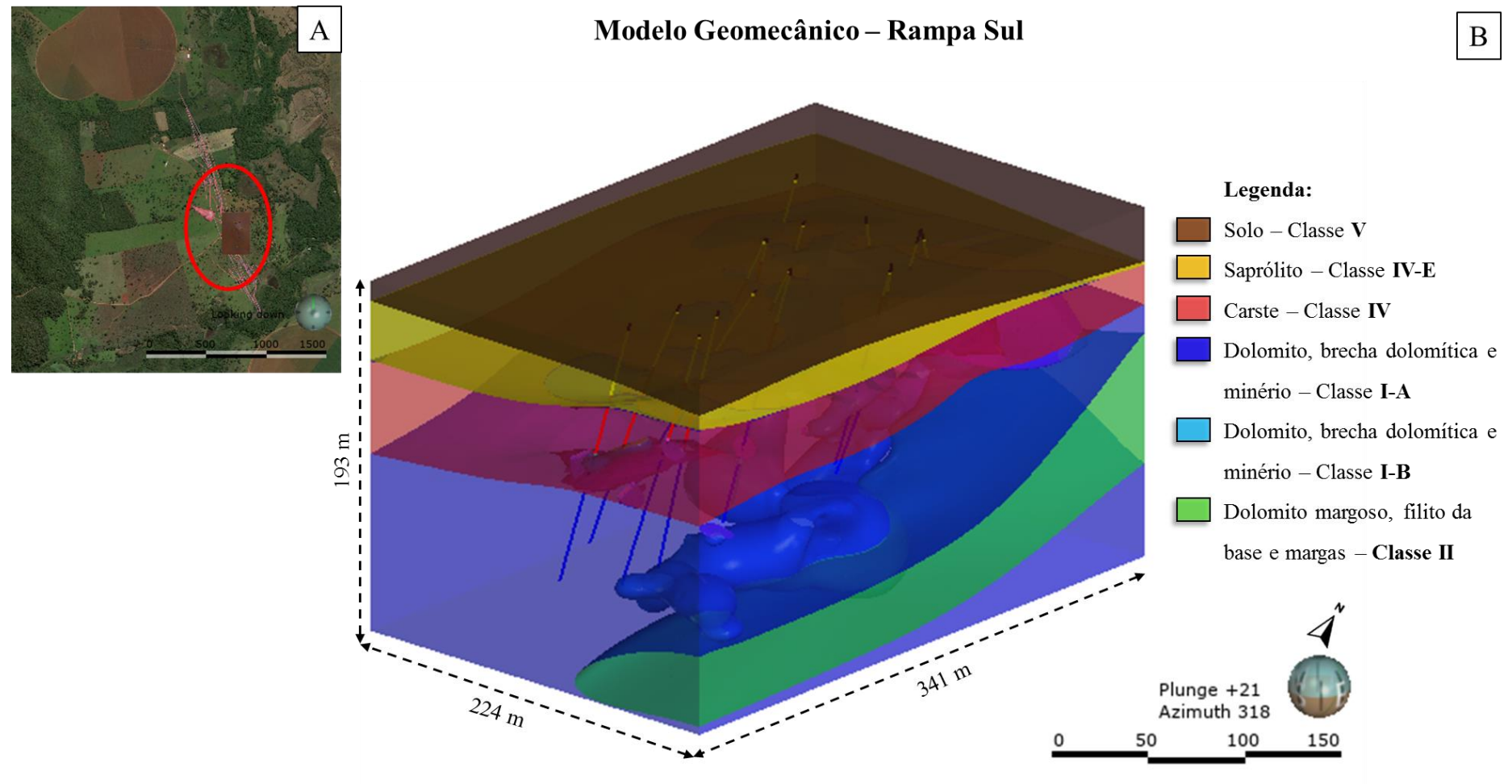


Figura 5.22: Modelo geomecânico proposto para a rampa sul. (A) Localização do bloco-diagrama na região do depósito Bonsucesso, destacado no círculo vermelho; (B) Modelo geomecânico 3D com disposição das litologias e posicionamento dos furos executados.

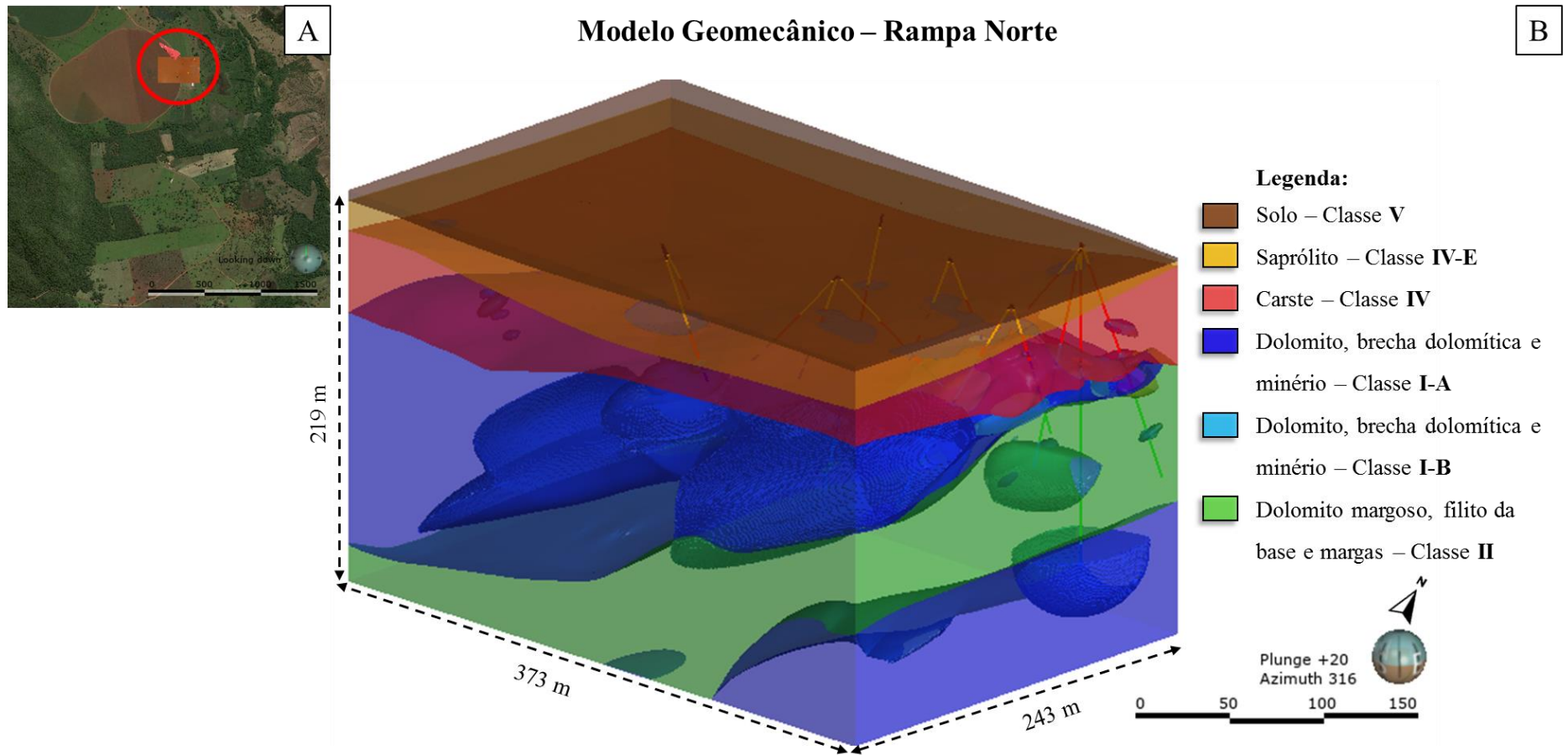


Figura 5.23: Modelo geomecânico proposto para a rampa norte. (A) Localização do bloco-diagrama na região do depósito Bonsucesso, destacado no círculo vermelho; (B) Modelo geomecânico 3D com disposição das litologias e posicionamento dos furos executados.

Para os maciços de classes II e III recomenda-se a utilização de tirantes com 1,7 m de comprimento, aplicados sistematicamente em malha 1,6 m x 1,6 m, devido à (alto fraturamento e baixo RQD) condição plana e polida das descontinuidades das margas e dos filitos.

Considerando o maciço rochoso de classe IV, representado pela zona de material alterado e de carstificação, é recomendado que se utilize tirantes com 2.3 m em malha 1,0 m x 1,0 m, com 9 cm a 12 cm de concreto projetado com fibras.

Apesar das classes I-A e I-B serem consideradas autoportantes, de acordo com a metodologia proposta por Barton (1974), será adotado o atirantamento sistemático para essas classes em função da possibilidade de ocorrência de descontinuidades que não foram mapeadas nas descrições de testemunhos de sondagem e que possam discretizar blocos durante as escavações, e também pelo fato da existência de galerias paralelas que resulta na alteração do campo de tensões do maciço, gerando tensões induzidas nas paredes das galerias, podendo causar instabilidade. Esses pontos não foram levados em consideração na metodologia de Barton (1974). Não se pode desconsiderar também as tensões induzidas geradas por detonações no interior da mina.

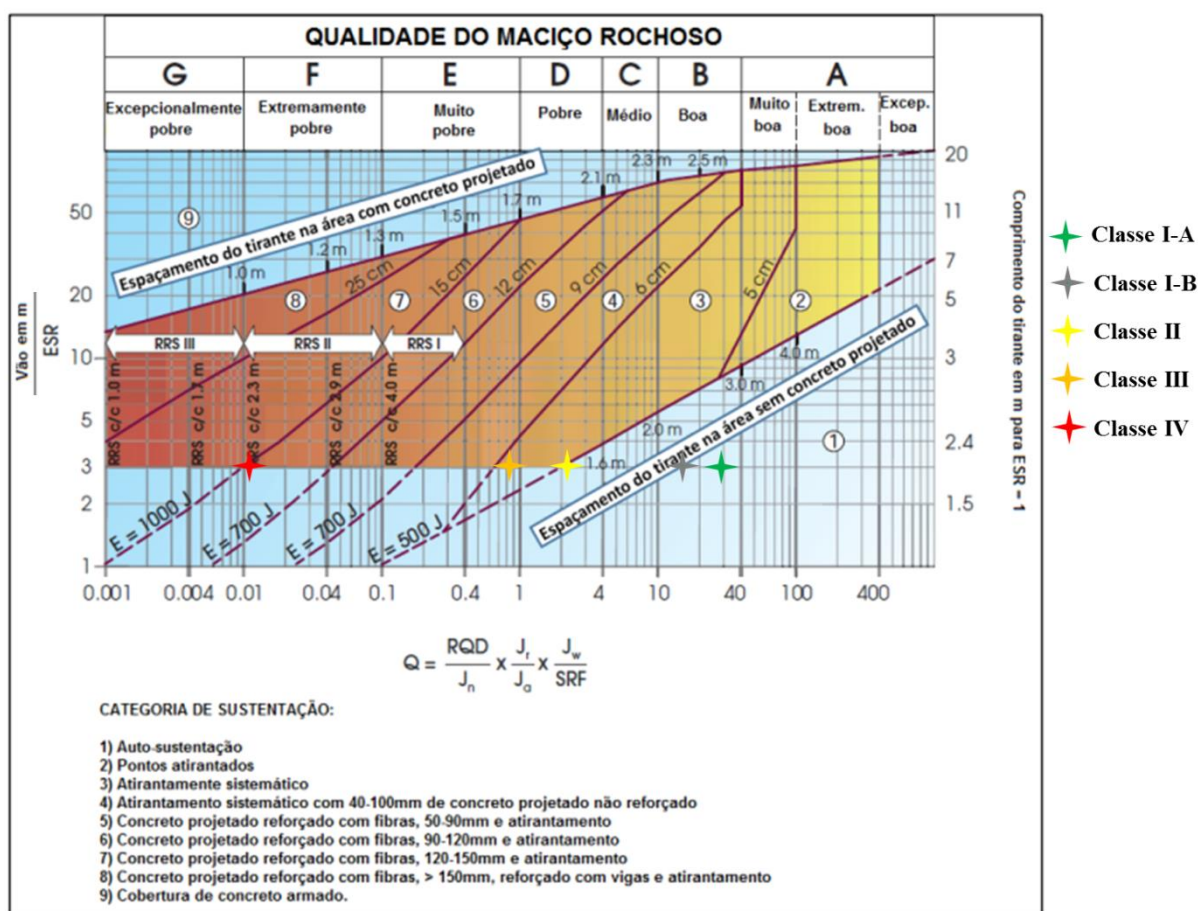


Figura 5.24: Categoria de suportes estimados baseados no sistema Q (traduzido de Grimstad e Barton, 1993).

Para as classes II e III, devido ao alto grau de fraturamento e baixo RQD constatado durante a classificação do maciço, além de tirantes em malha será utilizado também tela eletrosoldada para conter pequenos blocos que possam desprender das paredes das galerias.

Já para a classe IV, presente na região da escavação das rampas de acesso, serão utilizadas enfilagens e cambotas intertravadas, com espaçamento de 1 a 2 m, preenchidas com tela eletrosoldada e 20 cm de concreto projetado.

A empresa optou por adotar esses sistemas de contenção em vista da vasta experiência ao longo do tempo no desenvolvimento de galerias e escavações neste tipo de ambiente geotécnico.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

O uso das classificações geomecânicas para fins de classificação de maciços rochosos e seu tratamento apropriado para atestar segurança e estabilidade de obras de engenharia tem sido frequente. Neste trabalho, as classificações geomecânicas foram utilizadas para averiguar a qualidade e o comportamento de um maciço rochoso frente às obras de escavação para instalação das rampas de acesso.

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que os objetivos do trabalho de classificar, propor um modelo geomecânico e identificar as famílias de fraturas foram alcançados de maneira satisfatória. Mesmo ocorrendo de maneira interpretativa e realizada por meio de amostras do maciço, as classificações representam bem a geologia e fornecem uma boa aproximação das condições de qualidade do maciço, permitindo que seja previsto o tipo de tratamento necessário para cada setor das escavações. Podemos observar que mesmo utilizando parâmetros de classificação diferentes, as classificações utilizadas neste trabalho obtiveram classes de maciços equivalentes.

No geral, o maciço apresenta boa qualidade nas porções mais profundas (classes I-A, I-B e II) onde serão desenvolvidas as galerias da mina, e para a porção mais superficial (região do emboque das rampas), caracterizada como o carste, é classificado como extremamente ruim apresentando valores de RQR, RMR e Q muito baixos (classe IV). A definição das classes para o maciço permitirá que seja adotado o método de suporte adequado.

As análises cinemáticas permitiram identificar três famílias de fratura, sendo uma com mergulho próximo a 30° e concordante com o acamamento de direção aproximada NW-SE, e duas com mergulhos entre 50° e 65° e direções opostas. Deslocamentos podem ser mais comuns de ocorrer nas classes II e III, que apresentam maior grau de fraturamento e por apresentarem planos lisos e polidos nas descontinuidades e acamamento bem desenvolvido.

A construção de um modelo geomecânico, inserindo os dados obtidos nas descrições de testemunho de sondagem, classificação do maciço e também dados do levantamento eletrorresistivo, foi fundamental na decisão do posicionamento das rampas. A classificação do maciço também permitiu estimar os suportes necessários, como atirantamento sistemático para as classes I-A e I-B, tirantes em malha e tela eletro soldada para as classes II e III e enfilagens e cambotas intertravadas preenchidas com tela eletro soldada e concreto projetado para a classe IV.

Por fim, verifica-se a oportunidade de próximos estudos com objetivo de analisar a fundo como a direção das fraturas pode afetar as escavações das galerias.

Frigo, J. S. 2020, Análise estrutural dos dados de furos geotécnicos para elaboração do modelo geomecânico...

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aksoy C.O. 2008. Review of rock mass rating classification: Historical developments, applications and restrictions. *Journal of Mining Science*, **44**(1):51-63.
- Almeida F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, **7**(4):349-364.
- Almeida F.F.M. 1993. Limites do cráton do São Francisco em Minas Gerais – Síntese dos conhecimentos. In: SBG, 2º Simpósio do Cráton do São Francisco. Salvador, Anais Salvador, p.256-259.
- Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck R.A. 1981. Brazilian Structural Provinces: an introduction. *Earth-Sci. Rev.*, **17**:1-29.
- Assis A.P. 2001. Apostila de Geotecnia aplicada à mineração. Universidade de Brasília – UNB, 94 p.
- Associação Brasileira de Geologia de Engenharia – ABGE. 1998. *Geologia de Engenharia*. ABGE/FAPESP/CNPq, São Paulo, 576 p.
- Azmy K., Kendall B., Creaser R.A., Heaman L., Oliveira T.F. 2008. Global correlation of the Vazante Group, São Francisco Basin, Brazil: Re-Os an U-Pb radiometric age constraints. *Precambrian Research*, **164**:160-172.
- Baia F.H. 2013. *Brechas hidrotermais da mina de Cercado e das ocorrências de Olhos d'água, Mata II e Pamplona: implicações metalogenéticas e prospectivas para o zinco na região de Vazante, MG*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas, 230 p.
- Barton N., R Lien, Lunde J. 1974. Engineering Classification of Rock Masses for Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics*, **6**:189-236.
- Bieniawski Z.T. 1973. Engineering classification of jointed rock masses. *Trans. S. African Instn. Civ. Engrs.*, **15**(12):335-344.
- Bieniawski Z.T. 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*. John Wiley & Sons, 251 p.
- Brooks M., Kearey P., Hill I.A.N (eds.). 2009. *Geofísica de exploração*. Oficina de textos. Brasil.
- Brown E.T. 1981. *Rock characterization testing and monitoring – ISRM Suggested methods*. Pergamon Press, Oxford.
- Campos Neto M.C. 1984. Geometria e fases de dobramentos brasileiros superpostos no oeste de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, **14**(1):60-68.
- Castro W.J. 2004. *Síntese de estudos de estabilidade de taludes de minas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero-MG*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas, Ouro Preto, 202 p.
- Costa L.A.M., Angeiras A.G. 1971. Geosynclinal evolution of the epiBaykalian plataforma of Central Brazil. *Geol. Runds*, **60**(3):1024-1050.
- Cloud P.E., Dardenne M.A. 1973. Proterozoic age of the Bambuí Group in Brazil. *Geological Society of America Bulletin*, **84**:1673-1676.
- Dardenne M.A. 1978. Geologia na região de Morro Agudo (Minas Gerais). In: SBG, Centro-Oeste, Bol. Inform., **7**:68-84.
- Dardenne M.A. 1979. Lês mineralisations plomb, zime, fluor du proterozoique superieur dans Le Bresil Central. These do Doctorat D'Etat, Univ. Pierreer Marrie Curie.
- Dardenne M.A. 1981. Os grupos Paranoá e Bambuí na Faixa dobrada Brasília. In: Simpósio sobre o Cráton do São Francisco e suas Faixas Marginais I. Salvador, Anais Salvador.
- Dardenne M.A. 2000. The Brasília Fold Belt. In: Cordani U.G., Milani E.J., Thomaz Filho A., Campos D.A. (eds.), Tectonic Evolution of South America. *International Geological*.
- Dardenne M.A., Campos Neto M.C. 1976. Geologia da região de Lagamar, Minas Gerais. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 29, Anais, p. 17.
- Dardenne M.A., Campos E.G., Martins F.L., Alvarenga C.J.S. 1997. Geologia da região de Alto Paraíso de Goiás/ Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, GO. FAPDF (Geologia do Distrito Federal e Entorno Próximo), relatório interno não publicado.

Frigo, J. S. 2020, Análise estrutural dos dados de furos geotécnicos para elaboração do modelo geomecânico...

Dardenne M.A., Freita-Silva F.H., Souza J.C.F., Campos J.E.G. 1998. Evolução tectono-sedimentar do Grupo Vazante no contexto da Faixa de Dobramentos Brasília. *In: SBG, XXXX Congresso Brasileiro de Geologia*, Belo Horizonte, Resumos, p. 26.

Deere D.U. 1964. Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 1:17-22.

Deere D.U. 1989. Rock Quality Designation (RQD) after twenty years. *National Technical Information Service*, Gainesville, Florida, 22 p.

Deere D.U., Deere W. 1988. The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice. Rock Classification Systems for Engineering Purposes. *In: American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, p. 91-101.

Dias P.H.A., Sotero M.P., Matos C.A., Marques E.D., Marinho M.D.S., Couto Junior M.A. 2018. Área de relevante interesse mineral – ARIM: distrito mineral de Paracatu-Unai (Zn-Pb-Cu), MG.

Elis V.R., Hiodo F.Y., Porsani J.L., Dalpozzo H.A.P., Gallas J.D.F. 2003. Eletroresistividade e magneto resistividade no estudo de zonas de fratura: metodologia e aplicação. *In: VIII Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica*, Rio de Janeiro.

Ford D., Williams P. 1989. Karst geomorphology and hidrology. London: Unwin Hyman.

Fuck R.A. 1994. A Faixa Brasília e a compartimentação tectônica na Província Tocantins. *In: SBG, 4º Simpósio de Geologia do Centro-Oeste*, Brasília, 4:184-187.

Fuck R.A., Jardim de Sá E.F., Pimentel M.M., Dardenne M.A., Pedrosa Soares A.C. 1993. As faixas de dobramentos marginais do Cráton do São Francisco: síntese dos conhecimentos. *In: Dominguez J.M.L., Misi A. (eds.). O Cráton do São Francisco. SBG/SMG/CNPq*, Salvador, p. 161-185.

Gallas J.D.F. 2000. *Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 174 p.

Goldscheider N. 2005. Karst groundwater vulnerability mapping: Application of a new method in Swabian Alb, Germany. *Hydrogeology Journal*, 13:555-564.

Grimstad E., Barton N. 1993. Updating the Q-system for NMT. Proc. Int. Symp. on Sprayed Concrete, Fagernes, Norway. *Norwegian Concrete Association*, Oslo, 22 p.

Hoek E. 1998. Rock Engineering – Course Notes – ABGE, São Paulo, 313 p.

Hoek E., Brown E.T. 1980. Empirical Strength Criterion for Rock Masses. *J. Geotech. Eng. ASCE*, 106(GT9):1013-1035.

Hoek E., Kaiser P.K., Bawden W.F. 1995. *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam, Balkema, 215 p.

Hoek E., Read J., Karzulovic A., Chen Z.Y. 2000. Rock slopes in civil and Mining Engineering. *In: International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*, p. 1-16 .

Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. 1984. *Estudos geológicos-geotécnicos para caracterização e classificação de maciços rochosos para projetos de engenharia (túneis, lavra a céu aberto e barragens)*. São Paulo, IPT – Relatório 19569.

International Association of Engineering Geology – IAEG. 1981. Rock and soil description and classification for engineering geological mapping report. *IAEG commission on engineering mapping*, 24:235-274.

International Society For Rock Mechanics – ISRM. 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock mechanics. *International Journal of Rock Mechanics and Geomechanics*, 15:319-368.

International Society For Rock Mechanics – ISRM. 1981. *Rock characterization, testing and monitoring – ISRM suggested methods*. E.T.Brown, 211 p.

International Society For Rock Mechanics – ISRM. 2004. Suggested methods for land geophysics in rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(6).

Jennings J.N. 1985. *Karst geomorphology*. Oxford: Basil Blackwell.

- Jones W.K., Hobbs H.H. III, Wicks C.M., Currie R.R., Hose L.D., Kerbo R.C., Goodbar J.R., Trout J. 2003. *Recommendations and guidelines for managing caves on protected lands*. Charles Town: Karst Waters Institute. Special Publication 8.
- Klimchouk A.B., Ford D.C. 2000. Types of karst and evolution of hydrogeologic settings. In: Klimchouk B.A., Ford D.C., Palmer A.N.; Dreybrodt W. (eds.). *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers*. Huntsville: National Speleological Society.
- Klimchouk A.B. 2007. *Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and morphogenetic perspective*. Carlsbad, National Cave and Karst Research Institute, 106 p.
- Lauffer H. 1958. Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau. *Geol. Bauwesen*, **24**(1):46-51.
- Madalosso A., Valle C.R. 1978. Considerações sobre a estratigrafia e Sedimentologia do Grupo Bambuí na Região de Paracatu – Morro Agudo (MG). In: SBG, XXX Congresso Brasileiro de Geologia, Recife, Anais, 2:622-634.
- Marini O.J., Fuck R.A., Danni J.C., Dardenne M.A. 1981. A evolução geotectônica da Faixa Brasília e de seu embasamento. In: CPM/SBG, Simpósio sobre o Cráton do São Francisco e suas Faixas Marginais, Salvador, Anais, p. 100-115.
- Mesquita J.B. 2008. *Maciços rochosos em projetos hidroelétricos: proposta de classificação geomecânica*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 269 p.
- Misi A., Azmy K., Kaufman A.J., Oliveira T.F., Sanches A.L., Oliveira G.D. 2014. Review of the geological and geochronological framework of the Vazante sequence, Minas Gerais, Brazil: Implications to metallogenic and phosphogenic models. *Ore Geology Review*, **63**:76-90.
- Moeri E. 1972. On a columnar stromatolite in the Precambrian Bambuí Group of Central Brazil, *Ecl. Geol. Helv*, **65**:185-195.
- Monteiro L.V.S. 1997. *Contribuição à gênese das mineralizações de zinco da Mina de Vazante, MG*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, São Paulo, 159 p.
- Monteiro L.V.S. 2002. *Modelamento metalogenético dos depósitos de zinco de Vazante, Fagundes e Ambrósia, associados ao Grupo Vazante, Minas Gerais*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, São Paulo, 317 p.
- Monteiro L.V.S., Bettencourt J.S., Juliani C., Oliveira T.F. 2006. Geology, petrography and mineral chemistry of the Vazante non-sulfide and Ambrósia and Fagundes sulfide-rich carbonate-hosted Zn-(Pb) deposits, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, **28**:201-234.
- Nonato C.A. 2002. *Contribuição à caracterização geológico-geomecânica no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 186 p.
- Palmström A. 1982. The volumetric joint count – a useful and simple measure of the degree of jointing. In: *Proceeding of the Fourth International Congress IAEG*, New Delhi, p. 221-228.
- Pimentel M.M., Dardenne M.A., Fuck R.A., Viana M.G., Junges S.L., Fischel D.P., Seer H., Dantas E.L. 2001. Nd Isotopes and the provenance of detrital sediments of the Neoproterozoic Brasília Belt, Central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **14**(6):571-585.
- Redondo F. 2003. *Classificação probabilística do padrão geomecânico de um maciço rochoso mineralizado com base no índice RQD*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 80 p.
- Rigobello A.E., Branquinho J.A., Dantas M.G. da S., Oliveira T.F., Neves Filho W. 1988. Mina de zinco de Vazante. In: Shobbenhaus C., Coelho C.E.S. (eds.). *Principais depósitos minerais do Brasil*, DNPM, **3**:101-110.
- Ritter W. 1879. *Die Statik der Tunnelgewölbe*. Berlin: Springer.
- Santos T.B. 2015. *Aplicabilidade das classificações geomecânicas e retroanálise para estimação das propriedades dos maciços rochosos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia de Minas, Ouro Preto, 149 p.

Frigo, J. S. 2020, Análise estrutural dos dados de furos geotécnicos para elaboração do modelo geomecânico...

Silva M.D. 2013. *Caracterização geotécnica do maciço rochoso e fundações em estacas embutidas em rocha*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Recife, 169 p.

Souza C.F. 1997. *Litoestratigrafia e sedimentologia da Formação Vazante na região de Coromandel – MG*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, 76 p.

Terzaghi K. 1946. Rock defects and loads on tunnel support. In: R.V. Practor, T. White (eds.). Rock tunneling with steel supports. Commercial Shearing and Stamping Co. Youngstown, p. 15-99.

Thomaz Filho A., Kawashita K., Cordani U.G. 1998. A origem do grupo Bambuí no contexto da evolução geotectônica e de idades radiométrias. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* **70**:527-548.

Valeriano C.M., Dardenne M.A., Fonseca M.A., Simões L.S.A., Seer H.J. 2004. Evolução tectônica da Faixa Brasília. In: Mantesso Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito Neves B.B. (eds.). *Geologia do Continente Sul-Americano – Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, São Paulo, p. 575-592.

Valeriano C.M., Pimentel M.M., Heilbron M., Almeida J.C.H., Trouw R.A.J. 2008. Tectonic evolution of the Brasília Belt, Central Brazil, and early assembly of Gondwana. *Geological Society, London, Special Publications* **284**:197 – 210.

Wickham G.E., Tiedemann H.R., Skinner E.H. 1972. Support determination based on geologic predictions. In: Lane K.S., Garfield L.A. (eds.). *Proc. North American rapid excav. Tunneling conf.*, Chicago. New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs, p. 43-64.

Worthington S.R.H., Ford D.C. 1995. High sulfate concentrations in limestone springs: an important factor in conduit initiation?. *Environmental Geology*, **25**:9-15.