

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

BEATRIZ MATIAS LUZ DOS SANTOS

**MODELAGEM GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA EM PROJETO *GREENFIELD* DE
MINA A CÉU ABERTO EM SANTANA DA BOA VISTA - RS**

**CAÇAPAVA DO SUL
2021**

BEATRIZ MATIAS LUZ DOS SANTOS

**MODELAGEM GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA EM PROJETO *GREENFIELD* DE
MINA A CÉU ABERTO EM SANTANA DA BOA VISTA - RS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geologia da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Geologia.

Orientador: Me. Diogo Peixoto Cordova

**CAÇAPAVA DO SUL
2021**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

S237m Santos, Beatriz Matias Luz dos

Modelagem geológico-geotécnica em projeto greenfield de
mina a céu aberto em Santana da Boa Vista - RS / Beatriz
Matias Luz dos Santos.

87 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2021.

"Orientação: Diogo Peixoto Cordova".

1. Mecânica de rochas. 2. Modelagem implícita. 3. Q-Slope.
4. Estabilidade de taludes. I. Título.

BEATRIZ MATIAS LUZ DOS SANTOS

**MODELAGEM GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA EM PROJETO GREENFIELD DE MINA A CÉU ABERTO
EM SANTANA DA BOA VISTA - RS**

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e
aprovado em: 01 de outubro de 2021.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em:

10 de dezembro e 2020.

Banca examinadora:

Prof. Msc. Diogo Peixoto Cordova
Orientador
UNIPAMPA

Geól. Bruno Nunes Machado

Msc. Fernando Alves Cantini Cardozo
UFRGS



Assinado eletronicamente por **DIOGO PEIXOTO CORDOVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/10/2021, às 11:31, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

Assinado eletronicamente por **Fernando Alves Cantini Cardozo, Usuário Externo**, em 08/10/2021,



às 09:00, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **BRUNO NUNES MACHADO, Usuário Externo**, em 08/10/2021, às 10:22, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0633028** e o código CRC **2B03031A**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul

Com muita satisfação, dedico este trabalho às mulheres da minha família e ao meu pai, que mesmo tendo partido, permanecerá sempre em meu coração. Essa vitória é de vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por todas as bênçãos e oportunidades que colocou em minha vida.

Agradeço às três mulheres que me criaram e serviram como exemplo de valentia, me ensinando a lutar pelos meus sonhos, sempre no caminho da verdade e da justiça. Obrigada por todo apoio e incentivo durante a minha graduação e por nunca me deixarem desistir.

Ao meu pai Ulisses, que mesmo com sua breve passagem em minha vida, me amou incondicionalmente e me ensinou a ser feliz com as pequenas coisas.

Ao meu irmão Davi, que ao nascer me trouxe grande felicidade, a quem espero sempre servir de exemplo.

Agradeço ao meu namorado Fabiano, por seu meu companheiro de caminhada, meu melhor amigo e por jamais soltar a minha mão. Que a vida continue nos surpreendendo e nos tornando mais fortes.

Aos meus sogros Isabel e Afonso, agradeço por terem me recebido e me tratado como filha, me apoiando e me dando forças nos momentos difíceis. Essa vitória também é de vocês.

À minha família gaúcha que me acolheu durante minha jornada em Caçapava, compartilhando comigo momentos de muita alegria e churrascos maravilhosos, a vocês todos, minha eterna gratidão.

Agradeço ao meu orientador Diogo, por todo auxílio e pela proposta de trabalho. Obrigada por acreditar e confiar no meu trabalho.

À Razzera, agradeço pela confiança e por disponibilizar os dados utilizados neste trabalho.

A todos os professores da UNIPAMPA que estiveram presentes em minha jornada, muitas das vezes, dividindo a maior parte de seu tempo com seus alunos, obrigada pelos ensinamentos.

E não posso deixar de agradecer ao LATRAM e ao LPM por ceder suas dependências, que foram imprescindíveis para a realização deste trabalho.

“Happiness can be found, even in the darkest of times, if one only remembers to turn on the light.”

Albus Dumbledore

RESUMO

Um projeto *greenfield* consiste em um empreendimento que está sendo concebido em um local onde não há nenhuma infraestrutura pré-existente. Neste contexto, encontra-se o projeto de pesquisa requerido por uma empresa de mineração na região norte do município de Santana da Boa Vista/RS. O projeto sugere a implantação de um empreendimento mineiro de extração de mármore, que é conhecido popularmente na região como calcário, produto essencial para a economia da região centro-sul do estado. O principal objetivo deste trabalho é a modelagem geológico-geotécnica deste estudo de caso. Como objetivo secundário, está a definição dos intervalos adequados para os ângulos dos taludes com base no sistema de classificação *Q-Slope*. Os dados referentes ao maciço rochoso utilizados na construção dos modelos foram obtidos através da coleta de integração de dados já existentes, descrição geotécnica de testemunhos de sondagem, interpretação de descontinuidades do maciço rochoso e suas características, além da classificação geomecânica pelos sistemas *Rock Mass Rating* (RMR) e *Q-Slope*. Posteriormente, os dados colhidos foram georreferenciados e representados de forma tridimensional, a fim de compreender as particularidades das informações adquiridas. De modo a obter um modelo geológico, foi realizada uma modelagem implícita com base nos dados de sondagem. A partir do modelo geológico foi criado um modelo de blocos, sendo estes blocos interpolados pelo método do inverso do quadrado da distância, para obtenção dos parâmetros geotécnicos, RMR, *Q-Slope* e ângulo β ao longo de toda a região do modelo. A partir da modelagem é possível visualizar globalmente a área de estudo, de modo a contribuir para definição do posicionamento e planejamento da futura cava. A classificação RMR, definiu o maciço como Classe I e II (muito bom e bom) dentro dos limites da cava proposta. Por fim, o método *Q-Slope*, indicou taludes estáveis quando utilizados valores de ângulo de face que variam de 64° a 68° . Estes valores obtidos são bastante conservadores, dado o conhecimento de outras minas que operam em maciços rochosos de condições semelhantes com ângulos maiores. É importante salientar que o valor obtido para o RQD, um dos parâmetros utilizados no cálculo do RMR e do *Q-Slope*, pode ter sofrido influência pela qualidade da sondagem.

Palavras-Chave: Mecânica de rochas, Modelagem implícita, *Q-Slope*, Estabilidade de taludes.

ABSTRACT

A greenfield project consists of an enterprise that is being installed in a location where there is currently no pre-existing infrastructure. In this context, there is the research project required by a mining company in the northern region of the municipality of Santana da Boa Vista/RS. The project suggests the implementation of a mining enterprise to extract marble, which is popularly known in the region as limestone, an essential product for the economy of the center-south region of the state. The main objective of this work is the geological-geotechnical modeling of this case study. A secondary objective is to define suitable ranges for slope angles based on the Q-Slope classification system. The data referring to the rock mass used in the construction of the models were obtained by collecting the integration of existing data, geotechnical description of drilling holes, interpretation of the rock mass discontinuities and its characteristics, in addition to the geomechanical classification by Rock Mass Rating systems (RMR) and Q-Slope. Subsequently, the collected data were georeferenced and represented in a three-dimensional way, in order to understand the particularities of the acquired information. In order to obtain a geological model, an implicit modeling was performed based on the drillhole data. From the geological model, a block model was created, and these blocks were interpolated by the inverse distance weighting method, to obtain the geotechnical parameters, RMR, Q-Slope and angle β along the entire region of the model. From the modeling, it is possible to globally visualize the study area, in order to contribute to the definition of the positioning and planning of the future pit. The RMR classification defined the rock mass as Class I and II (very good and good) within the limits of the proposed pit. Finally, the Q-Slope method indicated stable slopes when using face angle values ranging from 64° to 68°. These values obtained are quite conservative, given the knowledge of other mines operating in rock masses of similar conditions with larger angles. However, it is important to note that the value obtained for RQD, one of the parameters used in the calculation of RMR and Q-Slope, may have been influenced by the quality of the drilling.

Key words: Rock mechanics, Implicit Modeling, Q-Slope, Slope Stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de situação, localização e detalhe da área de estudo.....	18
Figura 2 – Unidades tectôno-estratigráficas do sul do Brasil e do Uruguai	20
Figura 3 – Mapa geológico do Terreno Tijuca.	21
Figura 4 – Mapa geológico da área de interesse na escala 1:100.000.	23
Figura 5 – Divisão da área de estudo em área norte e sul.....	24
Figura 6 – Mapa geológico, estrutural e composicional da área quanto aos teores de óxidos de cálcio e magnésio.	26
Figura 7 – Desenho esquemático indicando a transição da escala observacional, entre a rocha intacta e um maciço rochoso muito fraturado.....	28
Figura 8 – Desenho esquemático representando a atitude das descontinuidades, onde "A" é a direção do mergulho (dip direction) e "B" o ângulo de mergulho (dip)..	29
Figura 9 – Desenho esquemático indicando a presença de três famílias de descontinuidades, além do modo de aferição através do uso da trena graduada.....	29
Figura 10 – Ilustração da persistência das descontinuidades, sendo o primeiro bloco caracterizado com baixa persistência e o segundo bloco por uma alta persistência.	30
Figura 11 – Ilustração esquemática de blocos com descontinuidade fechada em (a) e em (b) descontinuidade aberta.....	30
Figura 12 – Perfis de classificação de rugosidade e nomenclaturas sugeridas.	31
Figura 13 – Gráfico que correlaciona o índice <i>Q-Slope</i> , o ângulo de inclinação do talude e sua estabilidade.....	42
Figura 14 – Representação esquemática do equipamento para a execução do ensaio.....	44
Figura 15 – Configuração dos taludes em mina a céu aberto	46
Figura 16 – Localização das sondagens realizadas na área Sul.....	53
Figura 17 – Disposição dos furos de sondagem e suas respectivas informações litológicas.....	56
Figura 18 – Modelo geológico	63
Figura 19 – (a) Vista em planta do modelo geológico com as demarcações de seções leste-oeste e norte-sul; (b) Seção geológica leste-oeste; (c) Seção geológica norte-sul.	64
Figura 20 – Modelo de classes geomecânicas do índice RMR	65
Figura 21 – Modelo de classes geomecânicas do <i>Q-Slope</i>	66
Figura 22 – Modelo indicando os ângulos máximos propostos para a face dos taludes na configuração da cava final proposta.	67
Figura 23 – (a) Vista em planta do modelo dos ângulos de faces de taludes com as demarcações de seções leste-oeste e norte-sul; (b) Seção geológica leste-oeste; (c) Seção geológica norte-sul.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Grau de faturamento	32
Tabela 2 – Classificação da qualidade do maciço a partir do RQD.....	33
Tabela 3 – Sistema de classificação geomecânica RMR.....	34
Tabela 4 – Correções e guias auxiliares para o sistema de classificação RMR.....	35
Tabela 5 – Condições de compartimentação do maciço rochoso	36
Tabela 6 – Condições de rugosidade do maciço rochoso.....	37
Tabela 7 – Condições de alteração do maciço rochoso.....	37
Tabela 8 – Condições de afluência de água no maciço rochoso	37
Tabela 9 – Condições do estado de tensão do maciço (SRF)	38
Tabela 10 – Condições geológicas e do ambiente.....	39
Tabela 11 – Condições físicas do maciço rochoso	40
Tabela 12 – Faixas de tensão e resistência do talude	40
Tabela 13 – Presença de descontinuidades importantes.....	41
Tabela 14 – Orientação das descontinuidades	41
Tabela 15 – Mecanismos de ruptura em taludes.....	47
Tabela 16 – Resultados do RQD.....	60
Tabela 17 – Resultados do RMR	61
Tabela 18 – Resultados do <i>Q-Slope</i>	62
Tabela 19 – Apresentação dos ângulos propostos para as faces dos taludes.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM	Aprendizagem de Máquina
ANM	Agência Nacional de Mineração
APP	Área de Preservação Permanente
CDF	Cinturão Dom Feliciano
CE	Complexo Encantadas
CMP	Complexo Metamórfico Porongos
CPRM	Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais
ESRG	Escudo Sul-Rio-Grandense
GSI	<i>Geological Stress Index</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IQD	Inverso do Quadrado da Distância
ISRM	<i>International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering</i>
Q	<i>Tunelling Quality Index</i>
RMR	<i>Rock Mass Rating</i>
RQD	<i>Rock Quality Designation</i>
RS	Rio Grande do Sul
SRF	<i>Stress Reduction Factor</i>
TTj	Terreno Tijucas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	16
1.1.1 Gerais.....	16
1.1.2 Específicos	17
1.2 Justificativa	17
2 ÁREA DE ESTUDO	18
2.1 Localização da área	18
2.2 Contexto geológico	19
2.2.1 Geologia regional.....	19
2.2.2 Geologia local	22
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
3.1 Maciços rochosos.....	27
3.1.1 Rocha intacta e descontinuidades	27
3.1.2 Caracterização das descontinuidades	28
3.2 Classificação geomecânica	32
3.2.1 RQD (<i>Rock Quality Designation</i>)	32
3.2.2 Sistema RMR (<i>Rock Mass Rating</i>).....	33
3.2.3 Sistema Q	35
3.2.4 Sistema <i>Q-Slope</i>	38
3.3 Ensaio de carga pontual (<i>Point Load Test</i>)	43
3.3.1 Índice de Carga Pontual	44
3.4 Estabilidade de taludes em rocha	45
3.5 Modelagem geológico-geotécnica	47
3.5.1 Inverso do Quadrado da Distância (IQD)	49
3.6 Trabalhos anteriores	50
4 MATERIAIS E MÉTODOS	52
4.1 Revisão e compilação de informações prévias	52
4.2 Descrições geotécnicas de furos de sondagem.....	52
4.2.1 Localização das sondagens	52
4.3 Classificação litológica dos furos de sondagem	54

4.4 Ensaio de Carga Pontual (<i>Point Load Test</i>).....	54
4.5 Elaboração dos modelos geológico-geotécnicos	55
4.5.1 Construção do modelo geológico	56
4.5.2 Elaboração do modelo geotécnico	57
4.5.2.1 Confeção do modelo de blocos	58
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
5.1 Integração de dados	59
5.2 Classes litológicas	59
5.3 Descrição geotécnica de testemunhos de sondagem	60
5.3.1 Cálculo do RQD	60
5.3.2 Classificação do maciço rochoso (RMR)	61
5.4 Aplicação do método <i>Q-Slope</i>	62
5.5 Modelagem geológica implícita	63
5.6 Modelagem geotécnica	65
6. CONCLUSÕES	68
7. RECOMENDAÇÕES	70
REFERÊNCIAS	71
APÊNDICE A.....	81
ANEXO A	82
ANEXO B	83

1 INTRODUÇÃO

O interesse dos seres humanos por recursos minerais apresenta significativa evolução desde o início das civilizações. De acordo com Hartmann e Mutmanský (2002), a mineração em sua forma mais simples surgiu há mais de 450 mil anos, na era paleolítica, mostrando que desde a antiguidade o homem se interessou pelos materiais geológicos devido as suas qualidades estéticas e propriedades físico-mecânicas, que vieram a corroborar para o desenvolvimento tecnológico das mais diversas sociedades e culturas. Por se tratar de uma atividade de suma importância, atualmente, a indústria mineral está presente em vários meios da vida contemporânea por disponibilizar uma grande gama de instrumentos essenciais para o desenvolvimento humano a partir de materiais como: metais, areia, brita, carvão, argila, materiais para produção de cerâmica, cimento, fertilizantes e uma infinidade de materiais.

No contexto da mineração, as minas a céu aberto têm papel importante na indústria e economia. Face ao desenvolvimento de minas de grande porte, questões relacionadas a estabilidade geotécnica passaram a ser tão relevantes quanto questões relacionadas a produtividade que anteriormente eram prioridade (Braga Neto, 2019). Deste modo, pesquisas de amadurecimento sistemático do conhecimento geotécnico são importantes para o entendimento do comportamento geomecânico de maciços rochosos, subsidiando e garantindo a construção de estruturas seguras através de análises de estabilidade de taludes com base na geometria de corte de minas a céu aberto e seus componentes principais, como altura de talude e altura de bancada, ângulo inter-rampa e ângulo de bancada, largura de bermas e largura de rampas (Wyllie & Mah, 2004; Braga Neto, 2019).

Há uma constante elaboração de novas tecnologias que tornem a mineração progressivamente mais rentável e segura, neste contexto, um planejamento geotécnico de lavra correto é altamente valioso, reunindo um conjunto de estudos necessários para a implantação do empreendimento. Este processo requer uma vasta gama de conhecimentos técnicos que contemplem diversas especialidades, tanto das geociências quanto da engenharia, que são fundamentais para uma frutífera vida útil do empreendimento mineiro. Além disso, é fundamental que se obedeça às restrições técnicas, operacionais, ambientais e de segurança, através do reconhecimento geológico do depósito, que pode ser obtido através de um modelamento.

Deste modo a produção de um modelo geotécnico representativo, baseado em informações obtidas por meio de técnicas de campo e prospecção, é essencial na medida que essa é parte fundamental e preliminar no planejamento de lavra. Esse modelo possibilita a compreensão do comportamento espacial, sendo base para os estudos de viabilidade e demanda de investimentos, devendo refletir a realidade de forma que seja possível prever a qualidade do maciço, tanto para projetos *greenfield* ou *brownfield*, de pequeno, médio ou grande porte. Inicialmente o modelo geotécnico de longo prazo, pode ser aprimorado no dia a dia, na medida que o projeto inicia, dando origem a modelos de curto prazo mais precisos.

No Rio Grande do Sul, a mineração de calcário se encontra principalmente na região centro-sul do estado. O município de Caçapava do Sul abriga cerca de 85% do mármore dolomítico produzido no estado, no entanto, há um crescente interesse na região de Santana da Boa Vista, devido à grande demanda deste minério, que é um dos mais úteis e versáteis entre diversas rochas e minerais industriais, abrangendo um grande leque de disponibilidade, possuindo um preço relativamente baixo, podendo ser empregado na construção civil, como corretivo de pH de solo ou fertilizante. (Nahass, 2003). Deste modo uma mineradora que já extrai mármore, pretende instalar um empreendimento na forma de um projeto *greenfield*, que consiste em instalar uma operação em um local onde não há infraestrutura existente. O mármore da região centro-sul do estado do Rio Grande do Sul é majoritariamente dolomítico, sendo um produto de baixo valor agregado, portanto, é imprescindível um bom planejamento de lavra para que o empreendimento seja seguro e rentável.

1.1 Objetivos

1.1.1 Gerais

O principal objetivo deste trabalho é a modelagem geológico-geotécnica de um projeto *greenfield* de uma mina de mármore a céu aberto a ser explorada no município de Santana da Boa Vista, RS. Como objetivo secundário, a partir da modelagem geológico-geotécnica, está a definição dos intervalos adequados para os ângulos dos taludes com base no sistema de classificação *Q-Slope*.

1.1.2 Específicos

Para a construção de um modelo geotécnico e definição dos ângulos de taludes mais adequados, os seguintes objetivos específicos precisam ser cumpridos:

- Descrição geotécnica de testemunhos de sondagem, com interpretação de descontinuidades do maciço rochoso e suas características;
- Integração dos dados disponíveis como: descrição de sondagens, topografia e mapas geológico-estruturais, para a construção do modelo geológico e geotécnico em 3D;
- Aplicar o modelo geotécnico produzido, para definição dos ângulos de taludes mais adequados na cava projetada.

1.2 Justificativa

Através da necessidade crescente da atividade de mineração, instalou-se uma corrida pela busca de tecnologias que tornem a exploração cada vez mais eficiente e rentável, como qualquer outro empreendimento econômico. Entretanto, a indústria de mineração é caracterizada por visar aproveitamento econômico de recursos exauríveis e não renováveis, diferenciando-se das outras indústrias, assim, a maximização da riqueza futura deve se realizar durante a vida útil de um empreendimento (Yamamoto, 2013; Curi, 2014).

O mármore majoritariamente dolomítico da região centro-sul do estado do Rio Grande do Sul, conhecido popularmente como calcário, é um produto de baixo valor agregado, portanto, é necessário que seja realizado um bom planejamento de lavra para que o empreendimento seja rentável. A modelagem geotécnica, atrelada ao uso de tecnologias será empregada de modo a reduzir o tempo e gastos que seriam maiores em metodologias clássicas.

Além disso, um dos benefícios deste trabalho é a aproximação da universidade com uma empresa local, firmando ganhos mútuos, tanto para o empreendimento quanto para o desenvolvimento de pesquisas acadêmicas.

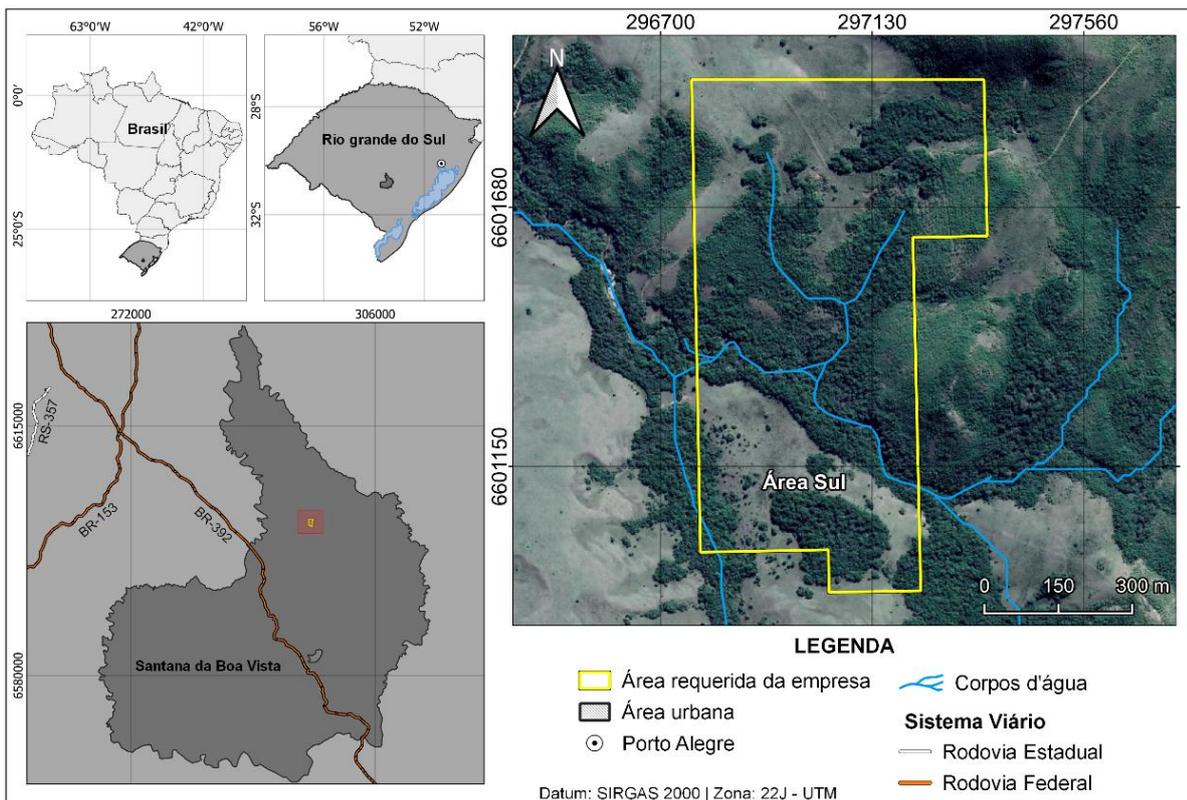
2 ÁREA DE ESTUDO

Neste capítulo serão retratadas as características da área de estudo, tal como sua localização geográfica e seu contexto geológico nos cenários regional e local.

2.1 Localização da área

A área de estudo trata-se de uma área de pesquisa requisitada por uma empresa de mineração e localiza-se em Santana da Boa Vista a aproximadamente 28km da área urbana do município, que está situado na mesorregião central do Rio Grande do Sul, cerca de 300km a SW de Porto Alegre, entre as coordenadas geográficas E e N (Fig. 1).

Figura 1 – Mapa de situação, localização e detalhe da área de estudo.



Fonte: Autora. Modificado IBGE, Hasenack, H.; Weber, E.

O acesso a área de estudo partindo de Porto Alegre, pode ser dado através da BR-290, na direção ao centro do estado. Em seguida, é preciso entrar na BR-153, em direção ao sul, e após deve-se acessar a BR-392 à sudeste, sentido Santana da Boa

Vista, e por fim, dobrar à leste, no km 218,5 em uma estrada não pavimentada por onde se percorre aproximadamente 23 km chegando-se à área de pesquisa.

2.2 Contexto geológico

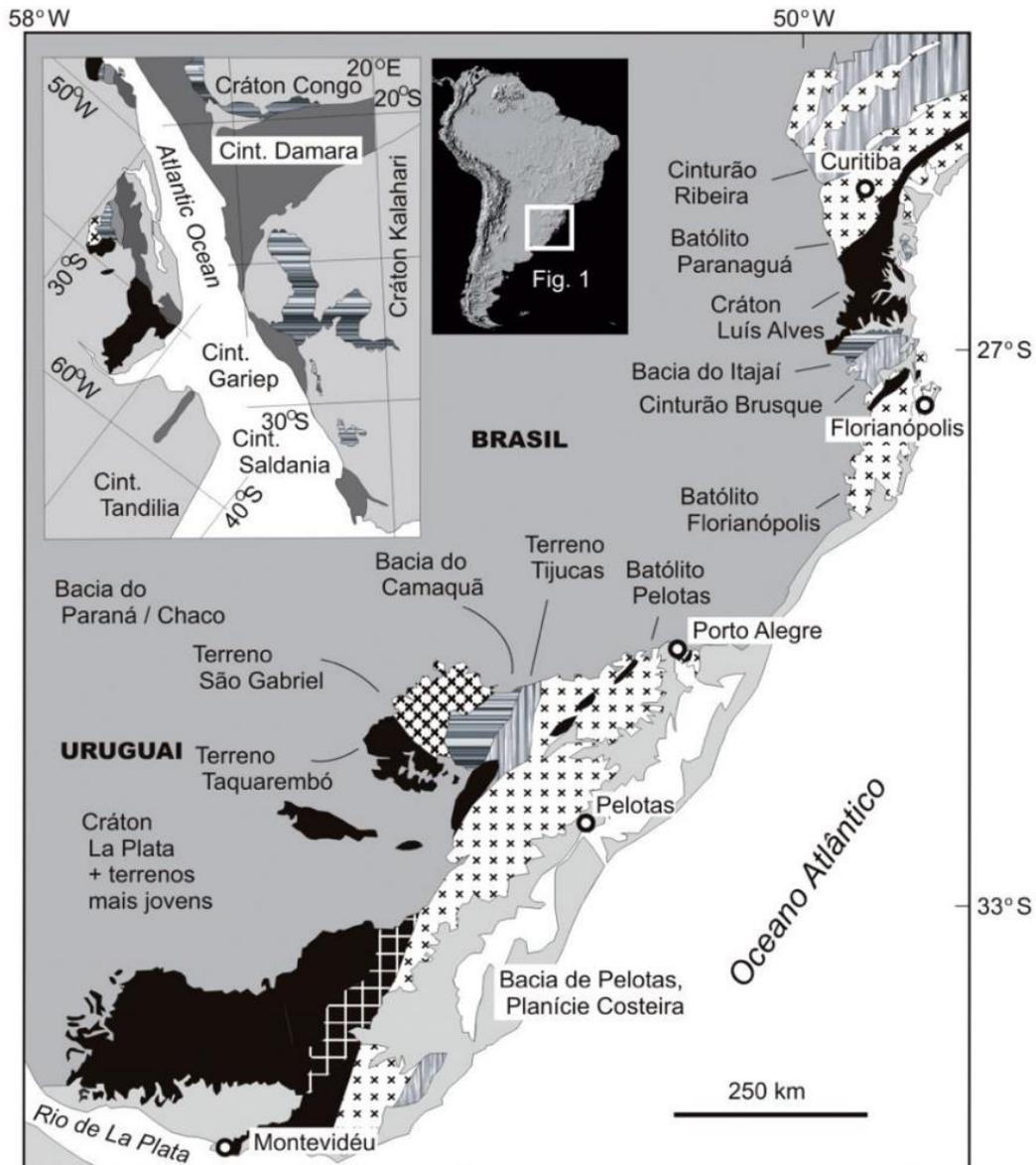
2.2.1 Geologia regional

A área de estudo está inserida no Escudo Sul Rio-grandense (ESrg) que é caracterizado pelo conjunto de rochas Pré-Cambrianas no sul do Rio Grande do Sul, constituindo-se da parte sul da Província Mantiqueira (Hasui & Almeida, 1984). Segundo Hartmann *et al.* (2007), o ESrg resulta dos processos de formação e deformação da crosta continental que ocorreu em dois ciclos orogênicos, sendo o primeiro de idade paleoproterozoica (2,26 – 2 Ga), seguido de um ciclo neoproterozoico definido como Ciclo Brasileiro (900 – 535Ma).

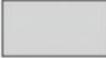
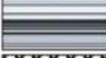
O ESrg ocupa a porção centro-sul do estado do Rio Grande do Sul, abrangendo uma área de cerca de 50.000 km², sendo dividido em duas grandes unidades geotectônicas: a faixa móvel denominada Cinturão Dom Feliciano (CDF) e o Cráton Rio de la Plata. (Soliani Jr, 1986; Fragoso-Cesar, 1980). A região onde encontra-se a área de estudo deste trabalho constitui o CDF, que se trata de um segmento da porção sul da Província Mantiqueira representando um segmento crustal fortemente deformado constituído de complexos metamórficos graníticos e migmatíticos com idades que variam de 650 e 620Ma (Chemale Jr., 2000, Fernandes *et al.* 1992, Chemale *et al.* 1995, Basei *et al.* 2011, Bitencourt & Nardi 2000, Philipp & Machado 2005, Saalman *et al.* 2005, 2006, 2010, Philipp *et al.* 2013, 2016, Hartmann *et al.* 1999, 2000, 2011, Chemale Jr. *et al.* 2012).

Segundo Hartmann *et al.* (2007) o CDF é dividido com base nos dados geológico-estruturais, elementos-traços e dados isotópicos (Sm-Nd, Rb-Sr) em quatro unidades geotectônicas distintas, sendo denominadas de Terreno Taquarembó, Terreno São Gabriel, Terreno Tijucas e Batólito Pelotas (Fig. 2).

Figura 2 – Unidades tectono-estratigráficas do sul do Brasil e do Uruguai



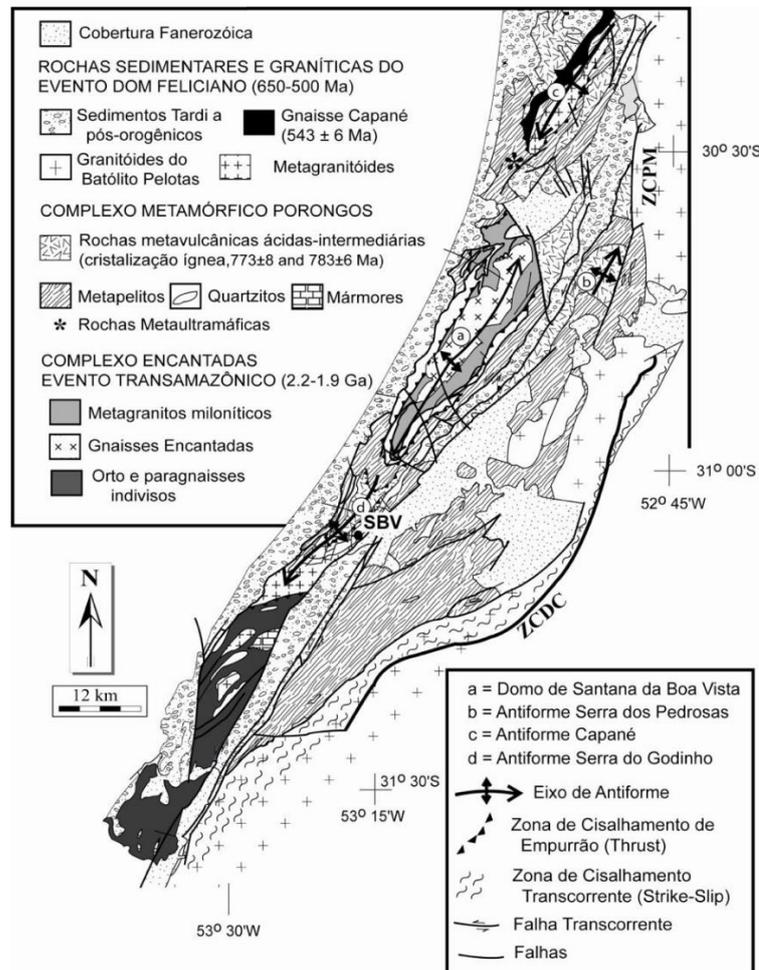
CONVENÇÕES

-  Rift Mesozóico e sedimentos cenozóicos da planície costeira
-  Bacia do Paraná; rochas vulcânicas e sedimentares Paleozóicas/Mesozóicas
-  Bacias de antepaís neoproterozóicas; rochas sedimentares clásticas e vulcânicas sódicas e potássicas
-  Terreno São Gabriel; Neoproterozóico; gnaisses TTG e metassedimentares do Complexo Cambaí e rochas vulcânicas andesíticas do Complexo Vacacaí
-  Terreno Tijucas. Complexos Brusque e Porongos; 2.0-0.9 Ga; metapelito, quartzito e rochas vulcânicas félsicas; inclui rochas máficas e ultramáficas
-  Batólito Pelotas; Neoproterozóico; rochas graníticas potássicas; abundantes xenólitos paleoproterozóicos de rochas graníticas e metassedimentares
-  Terreno Taquarembó e outros. Fragmentos arqueanos/paleoproterozóicos do Cráton La Plata, principalmente granitos potássicos e granulitos. Malha branca representa o fragmento continental La China; xistos ultramáficos, tonalitos, plataforma deformada com quartzitos, mármore e conglomerados. Inclui o Complexo Granulítico S. Maria Chico.

O Terreno Tijucas (TTj) trata-se de unidade geotectônica onde insere-se área de estudo do presente trabalho, possuindo uma forma alongada no sentido NE-SW, com o comprimento de cerca de 170km e largura que varia de 15 a 30km, no sentido nordeste, estando em contato tectônico a oeste com o Terreno São Gabriel ao longo da Zona de Cisalhamento de Caçapava do Sul, com o Batólito Pelotas a leste pela Zona de Cisalhamento da Dorsal de Canguçu e a nordeste pela Zona de Cisalhamento Passo do Marinheiro (Hartmann *et al.* 2007, Fernandes *et al.* 1992, Philipp *et al.* 2003 e 2016).

As principais unidades do TTj (Fig. 3) incluem rochas do embasamento ortognáissico de idade paleoproterozoica, expostos no Domo de Santana da Boa Vista, que pertence ao do Complexo Encantadas (CE), sendo circundados pelas rochas metassedimentares e metavulcânicas de idade neoproterozoica do Complexo Metamórfico Porongos (CMP) (Hartmann *et al.* 2000, Philipp *et al.* 2016).

Figura 3 – Mapa geológico do Terreno Tijucas.



Fonte: Philipp *et al.* (2008)

2.2.2 Geologia local

A área de estudo compreende as rochas do CE e do CMP e as sequências sedimentares pertencentes a Bacia do Camaquã que correspondem ao Grupo Guaritas.

O CE (PP2gen) é uma unidade paleoproterozoica, composta por gnaisses dioríticos, tonalíticos e trondjemíticos que apresentam anfibolitos subordinadamente e rochas meta-ultramáficas ricas em hornblenda, ambos intrudidos por gnaisses monzo e sienograníticos (Philipp *et al.* 2008 e 2016; Lusa, *et al.* 2010; Travassos, 2014). Estruturalmente apresenta quatro grandes antiformes regionais, sendo elas: Domo de Santana, Serra dos Pedrosa, Antiforme Capané e Serra do Godinho, formados em eventos de deformação tardios que controlam o padrão estrutural dos afloramentos com orientação NE-SW (Porcher, 1992; Gauna, 2018). O Domo de Santana (Fig.4) trata-se de uma supraestrutura onde afloram os granitóides milonitizados intercalados com granitóides menos deformados (PP2ybv).

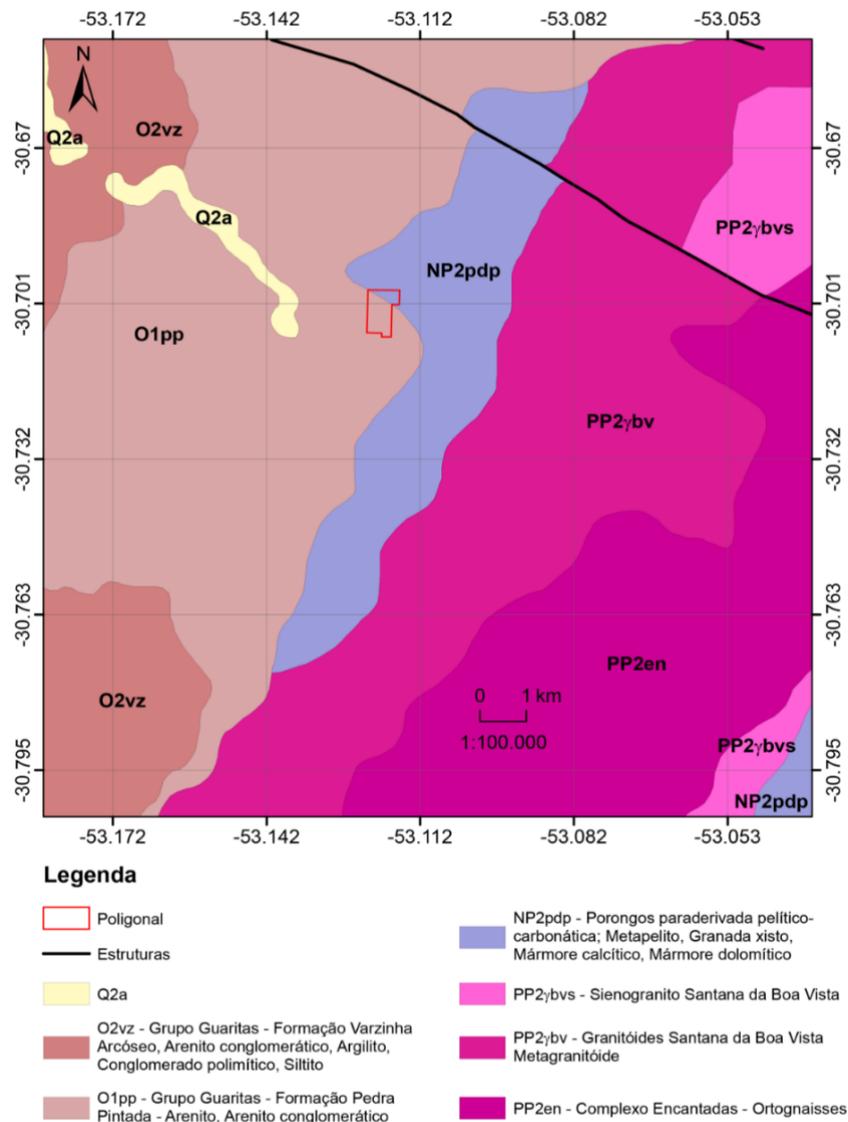
O CMP (NP2pdp) trata-se de uma unidade neoproterozoica constituída de uma sequência metavulcanossedimentar cujo grau de metamorfismo varia entre as fácies xisto verde e anfibolito inferior (Fig.4) (Hartmann *et al.* 2000). A sequência sul e sudeste consiste em uma pilha de quartzitos, xistos e lentes de mármore, intercalada com metariolitos, metadacitos e meta-andesitos, enquanto que a sequência norte trata-se de um empilhamento mais recente de metapelitos e quartzitos intercalados com rochas metavulcânicas representadas por metatufos e metadacitos. (Saalman *et al.* 2010; Philipp, 2016). A oeste do CMP afloram as rochas da Bacia do Camaquã, especificamente o Grupo Guaritas, que possui aproximadamente 800m de espessura e representa o último episódio de deposição preservado da Bacia do Camaquã, com rochas que foram depositadas em uma bacia tipo rift, tendo a sua borda leste limitada pelo Domo de Santana (Goñi *et al.* 1962; Borba, 2006). O Grupo Guaritas, está em sua maior parte depositado horizontalmente, tendo sido afetado por uma deformação rúptil de caráter direcional e gravitacional que compreende duas unidades limitadas entre si por discordância erosiva, sendo representadas pela Formação Pedra Pintada na base, e pela Formação Varzinha no topo (Fig. 4) (Borba, 2006; Paim *et al.*, 2000).

A Formação Pedra Pintada (O1pp) é composta de arenitos finos a médios, bem selecionados, com estratificação cruzada acanalada de grande porte, interpretados como associações de fácies de dunas eólicas e em menor proporção ocorrem arenitos

finos a grossos e pelitos com laminação cruzada de corrente e onda interpretados como depósitos interdunas e flúvio-lacustres (Fig.4) (Borba, 2006; Paim *et al*, 1994 e 2000). Intercalados à base das fácies fluviais e eólicas desta formação encontram-se derrames de rochas vulcânicas da Formação Rodeio Velho (Almeida *et al*. 2009).

A Formação Varzinha (O2vz) encontra-se deposta concordante às unidades da Fm. Pedra Pintada (Fig.4), composta predominantemente por arenitos finos a muito grossos de origem aluvial, seguido de acumulações eólicas, recobertas por uma sucessão lacustre com deltas associados. Tanto as fácies aluviais da base, quanto as do topo, estão associadas a sistemas de leques deltaicos provenientes da borda leste da bacia além disso, (Borba, 2006; Paim *et al*, 1994 e 2000).

Figura 4 – Mapa geológico da área de interesse na escala 1:100.000.

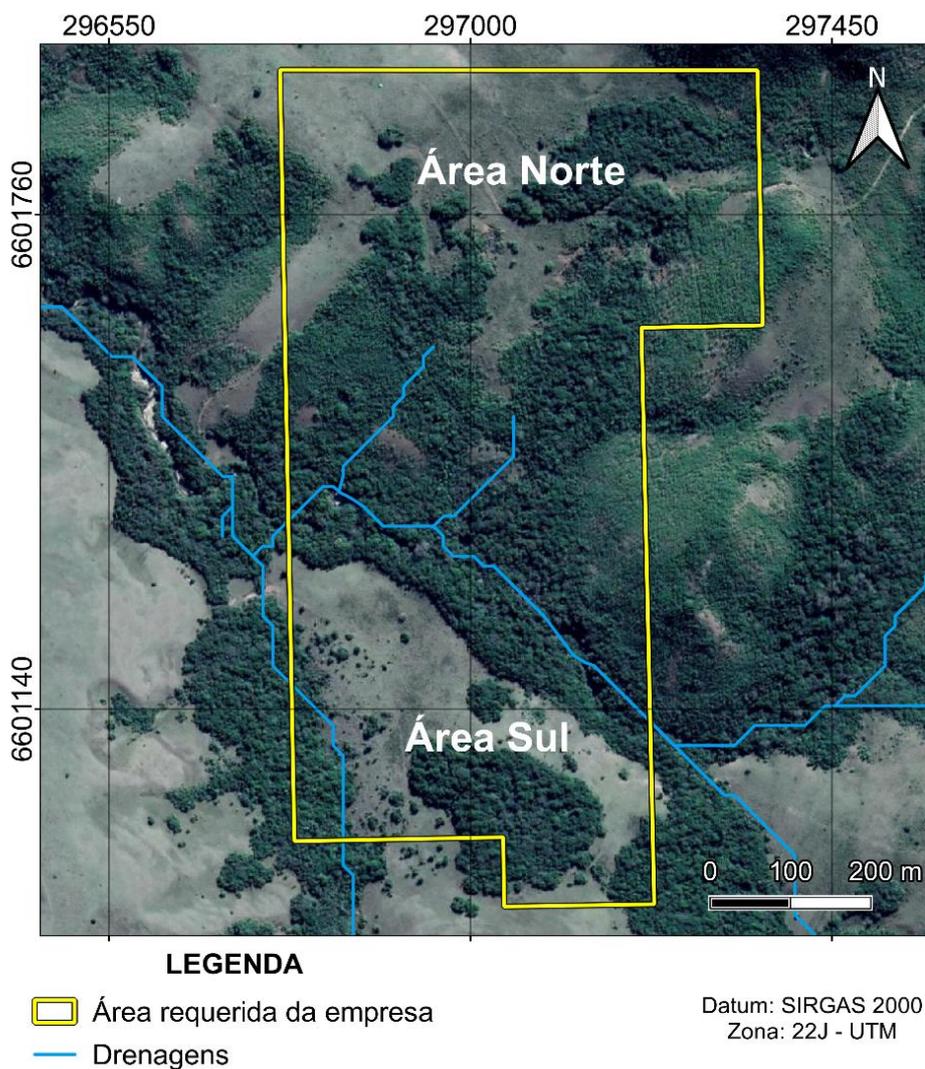


Fonte: Extraído de Razzera (2021)

Os resultados do mapeamento geológico descritos no relatório final de pesquisa da empresa, são baseados nas características físicas analisadas em cada afloramento, sendo elas a dimensão, grau de alteração, presença de estruturas, granulometria da rocha, mineralogia, dureza e susceptibilidade ao ataque de ácido clorídrico (HCl) a 10% (Razzera, 2021).

Durante o mapeamento geológico foi definida a presença do material do calcário na forma de talco mármores de composição predominantemente dolomítica. Devido à presença de condicionantes ambientais, a área foi subdividida em duas zonas, norte e sul, no entanto, para este trabalho, só será descrito em detalhe a área sul (Fig. 5).

Figura 5 – Divisão da área de estudo em área norte e sul.



Fonte: Modificado de Razzera (2021)

As duas jazidas estão separadas por um corpo hídrico denominada como Área de Preservação Permanente (APP), com orientação NW-SE que passa pelo centro da área, sendo cercada por vegetação (Razzera, 2021).

A área de pesquisa está inserida dentro dos limites correspondentes às unidades do CMP, sendo recoberta por sedimentos da Fm. Pedra Pintada que pertence ao Grupo Guaritas (Fig. 4). No entanto, é importante ressaltar que a área foi mapeada de forma detalhada, portanto a área de cobertura que se apresenta no mapeamento da CPRM (2007) devido a escala, é na realidade, menor. Além disso, os mármores são amplamente aflorantes na área de estudo, sendo recobertos por rochas conglomeráticas ou por solo oriundo da alteração de rochas conglomeráticas e dos mármores locais (Razzera, 2021).

Ao todo, durante o mapeamento geológico realizado pela empresa, foram identificados três tipos de mármores na área de pesquisa, sendo eles: 1) Mármores dolomíticos puros pouco deformados; 2) Mármores mistos (dolomíticos e calcíticos) dobrados e milonitizados; e 3) Mármores calcíticos (rosa) milonitizados e deformados. Os três tipos ocorrem intercalados, sendo difícil a individualização dos corpos. Os mármores mistos são o produto do processo de metamorfismo e deformação, gerando uma rocha de cor predominantemente cinza (composição dolomítica), e granulação fina a muito fina, com bandas descontínuas de cor rosa (composição calcítica) e granulação grossa a média (Razzera, 2021).

Os regimes deformacionais descritos anteriormente, para o Terreno Tijucas, ocorrem amplamente nos mármores da área. São identificados na forma de bandas descontínuas dobras, alongamento mineral e cominuição mineral (milonitização). Este último processo afeta quase todas as rochas da área deixando os mármores com uma matriz de granulação fina a muito fina, na qual é possível distinguir grãos de quartzo alongados e recristalizados (Razzera, 2021).

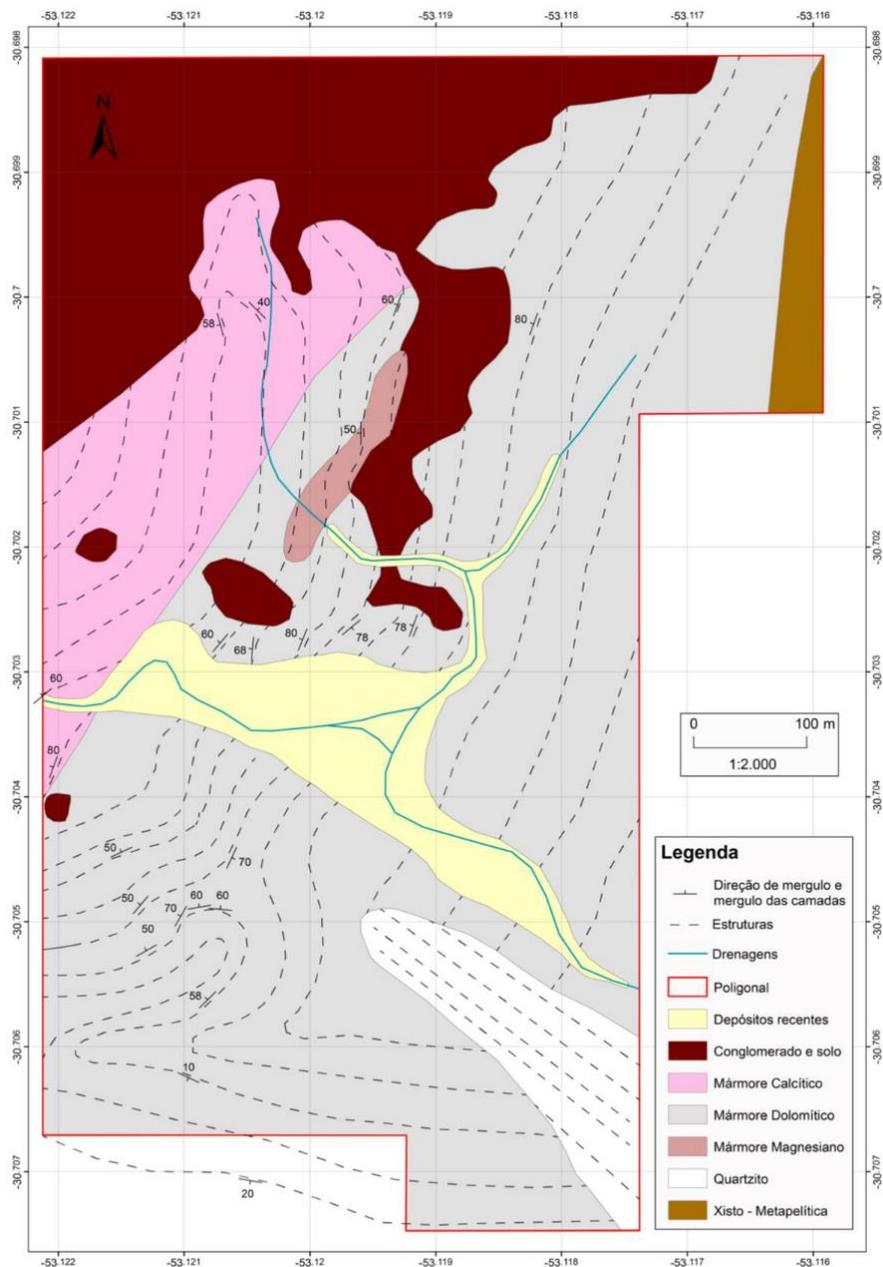
A área de pesquisa encontra-se cercada por drenagens afluentes do corpo hídrico principal, com orientação norte-sul. Nesta área, além dos mármores, que apresentam camadas inclinadas com ângulos de 50° a 80°, mergulhando predominantemente para NE, é possível encontrar afloramentos de um corpo alongado de quartzito com orientação NW-SE (Razzera, 2021).

Sobrepondo os mármores, foi identificada apenas uma camada de rocha conglomerática, na forma de lajeado, de composição granítica, quartzo e vulcânica, suportados pela matriz. Diferente da área norte, o solo produzido pela alteração do

conglomerado é pouco desenvolvido, predominando a presença de clastos de mármore e quartzitos (Razzera, 2021).

Deste modo, após a realização do mapeamento geológico de campo, estudo estrutural e análise composicional dos teores de óxidos de cálcio e magnésio (os quais não serão contemplados neste trabalho), foi elaborado o mapa geológico que abrange todas as litologias das áreas Norte e Sul (Fig. 6).

Figura 6 – Mapa geológico, estrutural e composicional da área quanto aos teores de óxidos de cálcio e magnésio.



Fonte: Extraído de Razzera (2021).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Maciços rochosos

O maciço rochoso é um conjunto de blocos rochosos, justapostos ou articulados, formados por uma matriz rochosa ou rocha intacta, constituído por blocos e pelas superfícies que os limitam, denominadas descontinuidades, que compreendem a água e o estado de tensões presentes no local (Azevedo & Marques, 2002; Serra & Ojima, 1998).

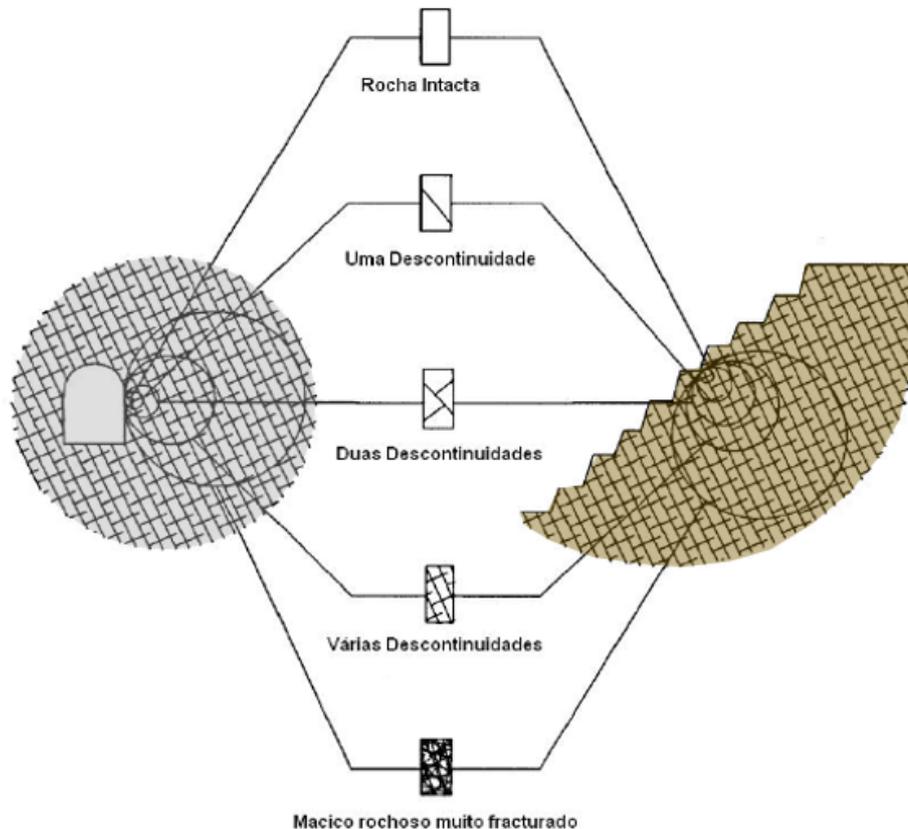
A caracterização geomecânica dos maciços é relevante devido as diferentes formas de comportamento de um bloco rochoso quando certa modificação é aplicada, isso se deve a necessidade que se alcance um equilíbrio estático dos blocos, pois as características irão diferir de inúmeras formas, de acordo com as particularidades geológicas de cada maciço rochoso (Vatanable, 2018).

3.1.1 Rocha intacta e descontinuidades

Segundo Brady & Brown (1993), rocha intacta é entendida como um material que não apresenta descontinuidades, com ausência de rupturas, apresentando-se em pequenas escalas, assim, pequenas perfurações já representam as suas propriedades. As descontinuidades são planos de fragilidade que podem ou não controlar o desempenho e qualidade do maciço rochoso, podendo ou não conter resistência à tração, sendo representadas por planos de acamamento, foliação, contatos, falhas e fraturas, etc (Assis, 2003; Souza, 2019).

Em razão da grande variação de propriedades em função das diversas escalas, caracterizar as propriedades mecânicas de uma massa rochosa pode ser moroso, desse modo, a conceituação de maciço rochoso, de rocha intacta e descontinuidades devem ser bem determinados (Fig. 7) (Brady & Brown, 1993).

Figura 7 – Desenho esquemático indicando a transição da escala observacional, entre a rocha intacta e um maciço rochoso muito fraturado.



Fonte: Souza (2019)

3.1.2 Caracterização das descontinuidades

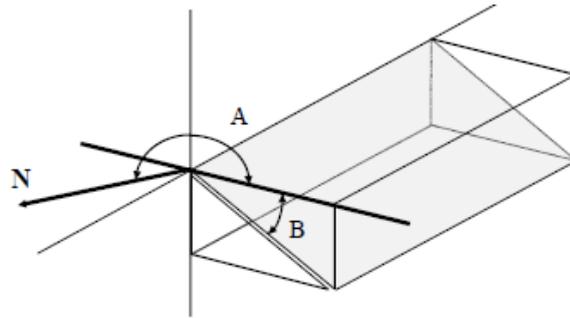
As descontinuidades são as principais estruturas investigadas em um maciço rochoso, pois influenciam de forma direta na resistência e no comportamento geomecânico dos maciços, sendo o plano de fraqueza onde boa parte das rupturas ocorrem (Oliveira & Brito, 1998; Jaques, 2014). A presença de descontinuidades pode ter efeito dominante na resposta de um maciço rochoso em função de atividades mineiras, interferindo no planejamento do layout de uma mina, podendo até mesmo inviabilizar um empreendimento (Brady & Brown, 1993; Souza, 2019).

As características mais importantes das descontinuidades são a orientação, espaçamento, persistência, abertura, rugosidade, preenchimento, número de famílias, grau de fraturamento e amplitude.

A orientação das descontinuidades no maciço rochoso é definida através da medida de sua atitude (Fig. 8), que é obtida através da direção do mergulho e mergulho, também conhecido como *dip direction/dip*, correspondendo a linha de maior

inclinação sobre o plano da descontinuidade, uma vez que o ângulo da direção de mergulho varia de 0 a 360° e o ângulo de mergulho varia entre 0 e 90° (Souza, 2019; Cavalcante, 1997).

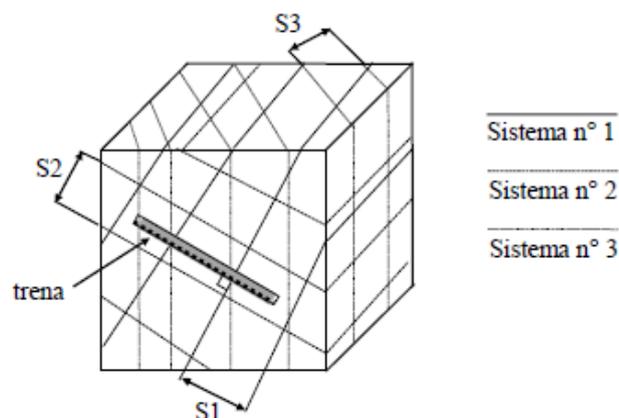
Figura 8 – Desenho esquemático representando a atitude das descontinuidades, onde "A" é a direção do mergulho (*dip direction*) e "B" o ângulo de mergulho (*dip*).



Fonte: Cavalcante (1997)

O espaçamento corresponde a distância perpendicular entre duas descontinuidades adjacentes que façam parte da mesma família, sendo responsável por condicionar o tamanho dos blocos, uma vez que um espaçamento pequeno irá indicar o intenso fraturamento do maciço rochoso, e um espaçamento maior irá indicar pouco fraturamento do maciço (Cavalcante, 1997). Para que o espaçamento seja aferido é comumente utilizado uma trena graduada, com pelo menos 3 metros de comprimento (Fig. 9).

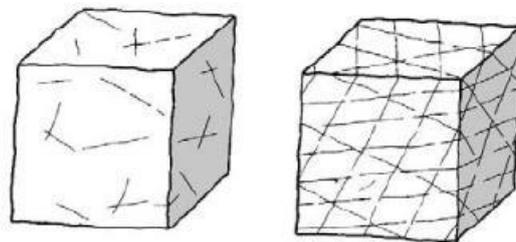
Figura 9 – Desenho esquemático indicando a presença de três famílias de descontinuidades, além do modo de aferição através do uso da trena graduada.



Fonte: Cavalcante (1997)

A persistência diz respeito a extensão de uma descontinuidade em relação ao plano que está sendo observado (Fig. 10), sendo um dos parâmetros mais difíceis de ser identificado, especialmente em taludes de grande extensão. Desta forma, estimar a persistência é de extrema importância, pois irá influenciar na resistência ao cisalhamento presente nos planos de descontinuidades e na fragmentação do maciço rochoso (Brady & Brown, 1993).

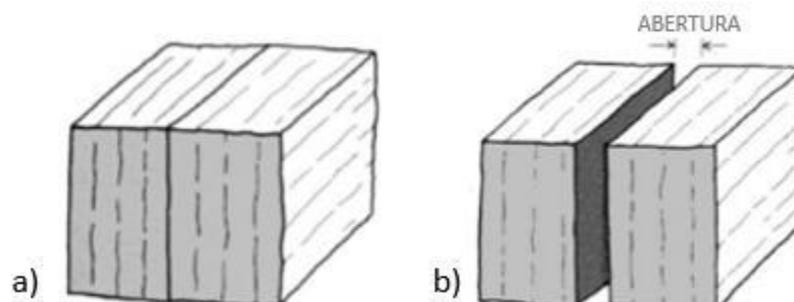
Figura 10 – Ilustração da persistência das descontinuidades, sendo o primeiro bloco caracterizado com baixa persistência e o segundo bloco por uma alta persistência.



Fonte: Brady & Brown (1993)

A abertura corresponde a distância perpendicular que divide as paredes de uma descontinuidade (Fig. 11) que pode ser preenchido por água ou ar (Brady & Brown, 1992). O tamanho da abertura varia de acordo com os eventos de formação da descontinuidade, podendo resultar de deslocamentos cisalhantes, aberturas provocadas por tração, carreamento de partículas ou dissolução, ou mesmo em função da rugosidade das paredes, que será descrito a seguir.

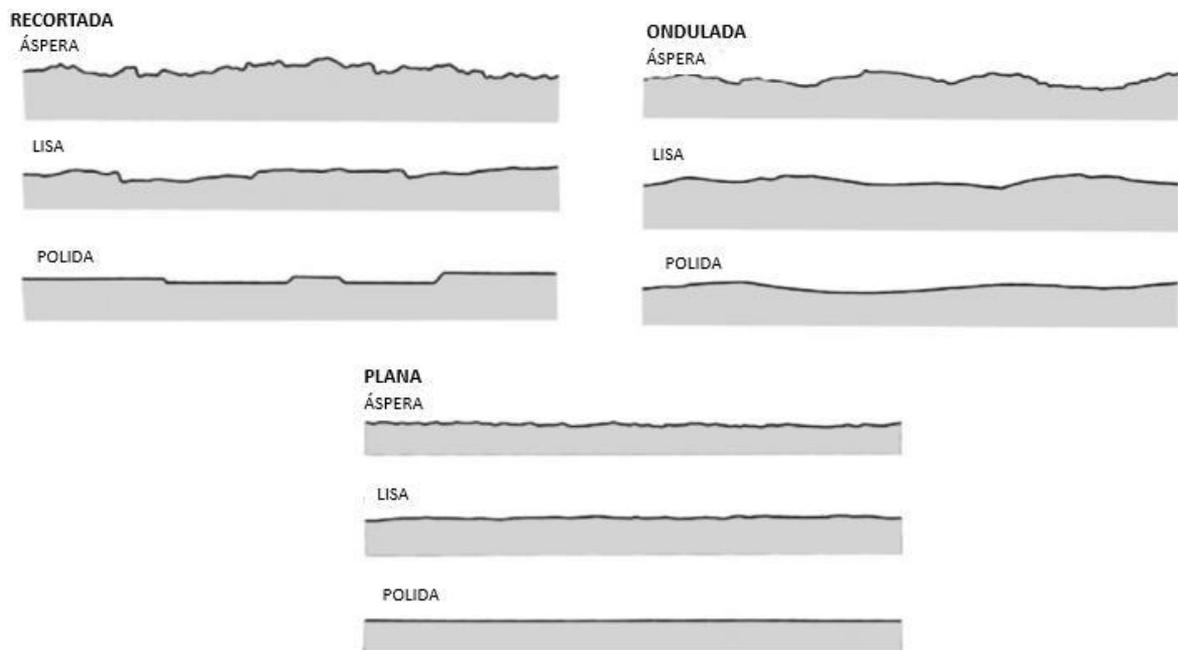
Figura 11 – Ilustração esquemática de blocos com descontinuidade fechada em (a) e em (b) descontinuidade aberta.



Fonte: Brady & Brown (1993) e modificado por Souza (2019)

A rugosidade é caracterizada pelas irregularidades e/ou ondulações intrínsecas à descontinuidade, podendo interferir na resistência ao cisalhamento das descontinuidades (Fig. 12). Em relação ao seu plano médio da descontinuidade a rugosidade pode ser descrita em recortes ou planos, sendo identificada através da aspereza (rugosidade de primeira ordem) ou ondulação (primeira ordem) de uma superfície (Cavalcante, 1997).

Figura 12 – Perfis de classificação de rugosidade e nomenclaturas sugeridas.



Fonte: Modificado de Brady & Brown (1993)

O preenchimento trata-se de um material preenchendo aberturas no maciço rochoso, sendo geralmente um material menos resistente que o maciço, sendo os mais comuns materiais como areia, silte e argila (Cavalcante, 1997).

Segundo a ISRM (1978) o número de famílias de descontinuidades é quantidade de famílias que forma o conjunto de descontinuidades (uma família é um conjunto de descontinuidades com a mesma atitude e gênese), podendo haver descontinuidades isoladas também. O grau de faturamento, pode expresso pela quantidade de descontinuidades presentes por metro linear de maciço rochoso, como demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Grau de faturamento

Siglas	Nº de fraturas por metro	Denominação
F1	<1	Ocasionalmente fraturado
F2	1 – 5	Pouco fraturado
F3	6 – 10	Mediamente fraturado
F4	11 – 20	Muito fraturado
F5	> 20	Extremamente fraturado

Fonte: ISRM (1978)

Por fim, a amplitude se trata da medida da profundidade da cavidade gerada pelas ondulações da face da descontinuidade em contato com uma superfície plana (ISRM, 1978).

3.2 Classificação geomecânica

Segundo Bieniawski (1973), a necessidade de uma classificação adequada acerca da geomecânica das rochas é reconhecida há muito tempo, deste modo, diversas propostas foram feitas. A classificação geomecânica de um maciço rochoso, é constituída da observação de propriedades da rocha, que isolada ou associadamente, subordinam o seu comportamento. As especificidades da rocha variam de acordo ao ambiente a qual está submetida, em função da história geológica do local estudado.

Os sistemas de classificação mais utilizados e conhecidos atualmente, são o RMR (*Rock Mass Rating*) elaborado por Bieniawski (1973) e o sistema Q (*Tunneling Quality Index*) proposto por Barton *et al.* (1974). Além desses, algumas outras metodologias também costumam ser utilizadas, como o RQD (*Rock Quality Designation*) proposto por Deere (1963), e o GSI (*Geological Stress Index*) idealizado por Hoek *et al.* (1994) e o atual sistema proposto por Barton & Bar (2015), intitulado de sistema Q-Slope, uma modificação do sistema Q para a análise da estabilidade de taludes.

3.2.1 RQD (*Rock Quality Designation*)

O RQD (*Rock Quality Designation*) foi o primeiro índice quantitativo proposto por Deere (1963), tendo como objetivo definir a qualidade de um maciço rochoso

através da descrição de testemunhos de sondagem, com base em uma medida indireta de descontinuidades. Este método é fundamentado na porcentagem de recuperação de uma amostra de rocha, levando em consideração apenas as partes do testemunho que apresentem mais de 10cm de comprimento, fazendo então o somatório dessas partes e por fim divide-se pelo tamanho total, assim, se obtém o RQD (Mesquita, 2008). Seu cálculo é dado conforme a equação 1.

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

A classificação segundo Deere (1989) é dada por cinco classes que descrevem a qualidade do maciço rochoso (tabela 2). O valor obtido pela equação 1 irá depender da orientação e grau de fraturamento do testemunho de sondagem que pode ser obtido a partir da tabela 1.

Tabela 2 – Classificação da qualidade do maciço a partir do RQD

Parâmetros	Descrição do parâmetro	Valor
RQD (%)	Muito ruim	0 - 25
	Ruim	25 - 50
	Regular	50 - 75
	Bom	75 - 90
	Excelente	90 - 100

Fonte: Deere (1989)

Posteriormente, Bieniawski (1974) elaborou um novo sistema de classificação de maciços rochosos, que poderiam ser aplicados em túneis e taludes baseado em casos históricos de engenharia e sendo um dos parâmetros de entrada o RQD de Deere (1963).

3.2.2 Sistema RMR (*Rock Mass Rating*)

O sistema *Rock Mass Rating* (RMR) é um dos métodos mais empregados na classificação de maciços rochosos (Bieniawski, 1973, 1976, 1979, 1989, 1993). O sistema é fundamentado na utilização de seis parâmetros geológico-geotécnicos, aos quais se atribuem pesos, que posteriormente são somados aritmeticamente para que

se obtenha o índice RMR, que varia de 0 a 100, podendo ser dividido em cinco classes que irão classificar o maciço de muito bom a muito ruim. Sabe-se que ao longo dos anos, Bieniawski fez sucessivos refinamentos na forma de quantificar o RMR, que ocorreram devido a incorporação de novos registros de casos e surgimento de diferentes parâmetros propostos.

Os parâmetros que constituem o índice RMR, são: resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, o RQD, espaçamento das descontinuidades, as características das descontinuidades, presença da água subterrânea e orientação das descontinuidades, para ajuste do RMR. O valor do índice define a classificação do maciço em cinco classes: maciço rochoso muito bom; maciço rochoso bom, maciço rochoso razoável, maciço rochoso fraco e maciço rochoso muito fraco. (Bieniawski, 1989; Souza, 2019; Hoek *et al.* 1995; Vilca *et al.* 2016).

Para que o RMR seja empregado é essencial que o maciço rochoso seja avaliado de acordo com janelas amostrais denominadas *scanlines*, em um intervalo onde teoricamente as propriedades geomecânicas são similares. Assim, as *scanlines* adquirem uma classificação onde cada um dos seis parâmetros admite um valor de acordo com as tabelas 3 e 4, que quando somados atribuirão ao maciço a sua classe geomecânica (Bieniawski, 1989; Souza, 2019).

Tabela 3 – Sistema de classificação geomecânica RMR.

A PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO COM SEUS PESOS								
Parâmetro		Faixa de valores						
1	Resistência da rocha intacta (MPa)	Índice de carga puntiforme	>10	4-10	2-4	1-2	Para menores valores, recomenda-se ensaio (α_c)	
		Resistência a compressão uniaxial	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5
	Peso	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25	
	Peso		20	17	13	8	3	
3	Espaçamento das descontinuidades		>2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm	
	Peso		20	15	10	8	5	
4	Padrão das descontinuidades (ver tabela E)		Superfície muito rugosa, e sem alteração, fechadas e sem persistência	Superfície pouco rugosa e levemente alteradas, abertura <1 mm	Superfície pouco rugosa e muito alteradas, abertura <1 mm	Superfície estriada ou espessura de preenchimento <5 mm ou abertura persistente de 1-5 mm	Espessura de preenchimento com material argiloso >5 mm ou abertura persistente >5 mm.	
	Peso		30	25	20	10	0	
5	Ação da água subterrânea	Vazão de infiltração por 10 m de túnel (l/m)	nulo	<10	10-25	25-125	>125	
		(pressão de água na junta)/ α_1	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5	
	Condições gerais no maciço		Completamente seco	úmido	molhado	gotejamento	fluxo abundante	
Peso		15	10	7	4	0		

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989)

Tabela 4 – Correções e guias auxiliares para o sistema de classificação RMR.

B CORREÇÃO POR DIREÇÃO E ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES (ver Tabela F)						
Direção e orientação do mergulho		Muito Favorável	Favorável	Moderado	Desfavorável	Muito Desfavorável
Pesos	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60
C DETERMINAÇÃO DAS CLASSES DO MACIÇO ROCHOSO EM FUNÇÃO DO PESO TOTAL						
Peso	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	<21	
Número da classe	I		II		III	
Descrição	Excelente		Bom		Regular	
D COMPORTAMENTO DO MACIÇO ROCHOSO POR CLASSE						
Número da classe	I		II		III	
Tempo médio de auto-sustentação / tamanho do vão	20 anos / 15 m		1 ano / 10 m		1 semana / 5 m	
Coesão do maciço rochoso (kPa)	>400		300-400		200-300	
Ângulo de atrito do maciço rochoso (°)	>45		35-45		25-35	
E GUIA PARA A CLASSIFICAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES						
Persistência / Comprimento (m)	<1		1-3		3-10	
Peso	6		4		2	
Abertura / Espessura (mm)	Nula		<0,1		0,1-1,0	
Peso	6		5		4	
Rugosidade	Muito rugosa		Rugosa		Pouco rugosa	
Peso	6		5		3	
Preenchimento (característica) / Espessura (mm)	Nulo		duro / <5		duro / >5	
Peso	6		4		2	
Grau de Alteração (Intemperismo)	Inalterada		Levemente alterada		Moderada, alterada	
Peso	6		5		3	
F EFEITOS DA DIREÇÃO E ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES, EM TÚNEIS*						
Direção Perpendicular ao eixo do Túnel			Direção Paralela ao eixo do Túnel			
Ângulo de mergulho 45-90°		Ângulo de mergulho 20-45°		Mergulho 45-90°		Mergulho 20-45°
Muito Favorável		Favorável		Muito Favorável		Desfavorável
Ângulo de mergulho contrário 45-90°			Ângulo de mergulho contrário 20-45°		Mergulho de 0-20° sem relação a direção	
Desfavorável			Muito Desfavorável		Desfavorável	

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989)

3.2.3 Sistema Q

O sistema Q foi proposto por Barton *et al.* (1974) após a observação de diversos túneis escandinavos, com a proposta de classificar os maciços rochosos a partir de seis fatores relevantes, além de sugerir a necessidade de suporte a partir do índice Q. O valor numérico obtido varia de 0,001 e 1.000 em escala logarítmica através da equação 2.

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \cdot \left(\frac{J_n}{J_a} \right) \cdot \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \quad (2)$$

Sendo:

- Q o índice de qualidade do maciço rochoso;
- RQD a designação da qualidade das rochas;
- J_n índice de influência do número de famílias de descontinuidades;
- J_r índice de influência da rugosidade das paredes das descontinuidades;
- J_a índice de influência da alteração das paredes das descontinuidades;

- J_w índice de influência da água subterrânea;
- SRF índice de influência do estado de tensões no maciço.

Barton *et al.* (1974) apresentou três quocientes exibidos na equação 2, deste modo:

$\left(\frac{RQD}{J_n}\right)$ - Representa a compartimentação do maciço rochoso e o tamanho do bloco.

$\left(\frac{J_n}{J_a}\right)$ - Representa as características de rugosidade e atrito das paredes das descontinuidades do maciço rochoso ou dos materiais que os preenchem.

$\left(\frac{J_w}{SRF}\right)$ - É um fator empírico que considera os carregamentos externos, tensões *in-situ* e a influência da água, sendo denominado por “tensão ativa”.

O sistema Q de Barton, diferente do RMR, não leva em consideração a influência da orientação das descontinuidades e a resistência da rocha intacta. No entanto, os parâmetros J_n , J_r e J_a executam um papel mais importante do que a orientação, uma vez que esses parâmetros determinam o grau de autonomia dos blocos ao se movimentarem (Hoek *et al.* 1995). Os valores de cada parâmetro que são imprescindíveis para a obtenção do índice Q estão dispostos nas tabelas 2, 5, 6, 7, 8 e 9.

Tabela 5 – Condições de compartimentação do maciço rochoso

Parâmetros	Descrição do parâmetro	Valor
Condições de compartimentação do maciço (J_n)	Descontinuidades esparsas ou ausentes	0,5 - 1
	Uma família de descontinuidades	2
	Uma família e algumas aleatórias	3
	Duas famílias de descontinuidades	4
	Duas famílias e algumas aleatórias	6
	Três famílias de descontinuidades	9
	Três famílias e algumas aleatórias	12
	Quatro ou mais famílias de descontinuidades	15
	Rocha totalmente diaclasada	20

Fonte: Barton *et al.* (1974)

Tabela 6 – Condições de rugosidade do maciço rochoso

Parâmetros	Descrição do parâmetro	Valor
Condições de rugosidade (J_r)	Fraturas descontínuas	4
	Fraturas rugosas ou irregulares, onduladas	3
	Fraturas lisas, onduladas	2
	Fraturas polidas, onduladas	1,5
	Fraturas rugosas ou irregulares, planas	1,5
	Fraturas lisas, planas	1
	Fraturas polidas ou estriadas, planas	0,5

Fonte: Barton *et al.* (1974)

Tabela 7 – Condições de alteração do maciço rochoso

Parâmetros	Descrição do parâmetro	Valor
Condições de alteração do maciço (J_a)	a) Contato entre as paredes de rocha das discontinuidades	
	Paredes duras, compactas com preenchimentos impermeáveis	0,75
	Paredes não alteradas, apenas com leve descoloração	1
	Paredes ligeiramente alteradas, com partículas arenosas e	2
	Paredes com partículas siltosas ou areno-argilosas	3
	Paredes com partículas de materiais moles ou de baixo ângulo de	4
	b) Contato entre as paredes de rocha das discontinuidades antes de 10cm de escorregamento	
	Paredes com partículas de areia e de rocha desintegrada, etc.	4
	Descontinuidades com preenchimento argiloso sobreconsolidado	6
	Descontinuidades com preenchimento argiloso subconsolidado	8
Descontinuidades com preenchimento argiloso expansivo como	8 - 12	

Fonte: Barton *et al.* (1974)

Tabela 8 – Condições de afluição de água no maciço rochoso

Parâmetros	Descrição do parâmetro	Valor	
		Valores de (J_w)	Pressão da água (Kg/cm ²)
Condições de afluição de água no maciço (J_w)	A - Escavação a seco ou com pequena afluição de água (<5 litros/m)	1	<1
	B - Afluição média da água com lavagem ocasional do preenchimento das fraturas	0,66	1 - 2,5
	C - Afluição elevada em rochas competentes, sem preenchimento das juntas	0,5	2,5 - 10
	D - Afluição elevada com considerável lavagem do preenchimento das juntas	0,33	2,5 - 10
	E - Afluição excepcionalmente elevada (ou jatos de pressão), decaindo com o tempo	0,2 - 0,1	>10
	F - Afluição excepcionalmente elevada (ou jatos de pressão), sem decaimento com o tempo	0,1 - 0,05	>10

Fonte: Barton *et al.* (1974)

Tabela 9 – Condições do estado de tensão do maciço (SRF)

Parâmetros	Descrição do parâmetro	Valor
SRF	a) Zonas alteradas	
	A - Ocorrência de múltiplas zonas alteradas contendo argila ou rocha	10
	B - Zona alterada contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada	5
	C - Zona alterada contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada	2,5
	D - Múltiplas zonas esmagadas em rocha competente, sem argila em	7,5
	E - Zona esmagada em rocha competente, sem argila (profundidade de	5
	F - Zona esmagada em rocha competente, sem argila (profundidade de	2,5
	G - Fraturas abertas, fraturamento muito intenso em qualquer profundidade	5
	b) Rocha competente, problemas de tensões de rochas	
	H - Tensões baixas, próximo a superfície ($\sigma_c/\sigma_1 > 200$)	2,5
	I - Tensões médias ($\sigma_c/\sigma_1 = 200$ a 10)	1
	J - Tensões altas ($\sigma_c/\sigma_1 = 10$ a 5)	0,5 - 2
	K - Explosões moderadas de rocha ($\sigma_c/\sigma_1 = 5$ a 2,5)	5 - 10
	L - Explosões intensas de rochas ($\sigma_c/\sigma_1 < 2,5$)	10 - 20
	c) Rochas incompetentes (comportamento plástico devido ao tipo das deformações)	
	M - Tensões moderadas	5 - 10
	N - Tensões elevadas	10 - 20
d) Rochas expansivas (expansão com a presença de água)		
O - Pressão de expansão moderada	5 - 10	
P - Pressão de expansão elevada	10 - 15	

Fonte: Barton *et al.* (1974)

3.2.4 Sistema Q-Slope

O sistema *Q-Slope* é um método empírico que pode ser aplicado na avaliação da estabilidade de rochas escavadas em minas a céu aberto, permitindo que os especialistas em geotecnia realizem possíveis ajustes nos ângulos de inclinação à medida que as condições do maciço rochoso se tornam aparentes durante uma escavação (Bar & Barton, 2017).

O *Q-Slope* foi desenvolvido de modo a complementar o sistema Q, que tem sido amplamente utilizado nos últimos 40 anos (Barton *et al.* 1974; Grimstad & Barton, 1993; Barton Grimstad, 2014). Os parâmetros do sistema Q (RQD, J_n, J_a e J_r) permanecem inalterados no *Q-Slope*. No entanto, é utilizado um novo método para aplicar as relações J_r/J_a em ambos os lados das cunhas em potencial, com ponderações de orientação relativas para cada lado. O termo J_w, que no *Q-Slope* é denominado *J_{wice}*, leva em consideração a exposição a longo prazo as várias condições climáticas e ambientais, como fortes chuvas erosivas e efeitos de cunha de gelo. Também foram incorporadas três categorias de SRF, passando a ser chamado de SRF_{slope}, com parâmetros relevantes para condições da superfície do declive e taxas de tensão e grandes descontinuidades, como falhas, zonas de fraqueza ou

enxames de juntas (Barton & Bar, 2015; Bar & Barton, 2017). Deste modo, para que se estime o *Q-Slope* utiliza-se a equação 3.

$$Q_{Slope} = \left(\frac{RQD}{Jn} \right) \cdot \left(\frac{Jr}{Ja} \right)_0 \cdot \left(\frac{J_{wice}}{SRF_{slope}} \right) \quad (3)$$

Os três grupos formados com esses parâmetros são:

$\left(\frac{RQD}{Jn} \right)$ – Representa o tamanho dos blocos.

$\left(\frac{Jr}{Ja} \right)$ – Representa a resistência ao corte entre os blocos.

$\left(\frac{J_{wice}}{SRF_{slope}} \right)$ – Representa a influência do estado tensional.

Como comentado, o *Q-Slope* utiliza os mesmos seis parâmetros do sistema Q (tabelas 2, 5, 6, 7, 8 e 9.), no entanto, o par de resistência ao atrito Jr e Ja pode ser aplicado, quando necessário, aos lados individuais de cunhas potencialmente instáveis. Os fatores de orientação aplicados de maneira simples, como (Jr/Ja) 1 x 0,75 para o conjunto J1 e (Jr/Ja) 2 x 0,9 para o conjunto J2, fornecem estimativas da redução geral da resistência ao atrito total da cunha. O termo Jw, que agora é denominado *Jwice*, descrito na tabela 10, leva em conta uma faixa adequadamente mais ampla de condições ambientais para taludes, os quais são sujeitos a essas condições por muito tempo. Essas condições incluem extremos de intensa precipitação erosiva e gelo (Barton & Bar, 2015; Bar & Barton, 2017; Pinta Lopéz, 2019).

Tabela 10 – Condições geológicas e do ambiente

Parâmetros	Descrição do parâmetro	Valor			
		Deserto	Úmido	Tropical	Gelo
Condições geológicas e do ambiente (<i>J_{wice}</i>)	Estrutura estável, rocha competente	1	0,7	0,5	0,9
	Estrutura estável, rocha incompetente	0,7	0,6	0,3	0,5
	Estrutura instável, rocha competente	0,8	0,5	0,1	0,3
	Estrutura instável, rocha incompetente	0,5	0,3	0,05	0,2

Fonte: Barton & Bar (2015)

Como citado acima, o SRF passou a ser chamado de SRF_{slope}, onde compara-se informações obtidas em campo às tabelas que descrevem as condições SRFa, SRFb e SRFc. No SRFa são descritas as condições físicas da superfície do possível talude devido a desmonte e à susceptibilidade ao intemperismo e erosão, sendo assim, esse parâmetro não se aplica ao presente trabalho; o SRFb descreve as faixas de tensão e resistência do talude; o SRFc está relacionado com a presença de discontinuidades importantes, como falhas e zonas de fraqueza e suas características (Barton & Bar, 2015; Bar & Barton, 2017). As tabelas 11, 12 e 13 apresentam respectivamente os critérios utilizados na avaliação do estado de tensão dos maciços rochosos dos parâmetros SRFa, SRFb e SRFc.

Tabela 11 – Condições físicas do maciço rochoso

Parâmetros	Descrição do parâmetro	Valor
(SRFa)	A - Leve desprendimento devido à posição em superfície, perturbação decorrente de desmontes ou escavações	2,5
	B - Blocos soltos, sinais de fendas de tração e juntas de cisalhamento, susceptibilidade ao intemperismo, graves perturbações de desmonte	5
	C - Como B, mas com maior susceptibilidade ao intemperismo	10
	D - Talude em avançado estado de erosão e desprendimento decorrente de constante erosão resultante da ação de água ou gelo/neve.	15
	E - Talude residual com significante transporte de material em queda.	20

Fonte: Barton & Bar (2015)

Tabela 12 – Faixas de tensão e resistência do talude

Parâmetros	Descrição do parâmetro	σ_c/σ_1^a	Valor
(SRFb)	F - Intervalo tensão-resistência moderado	50 - 200	2,5-1
	G - Intervalo tensão-resistência alto	10-50	5-2,5
	H - Falha localizada em rocha intacta	5 - 10	10-5
	I - Limite de tensão escoamento plástico ou de esmagamento	2,5-5	15-10
	J - Fluxo plástico de material deformado	1-2,5	20-15

^a σ_c = resistência a compressão simples / σ_1 = tensão máxima principal

Fonte: Barton & Bar (2015)

Tabela 13 – Presença de descontinuidades importantes

Parâmetros	Descrição do parâmetro			Causa falha se não suportado	
	Favorável	Desfavorável	Muito desfavorável		
Condições físicas (SRFc)	K -Descontinuidade principal com pouca ou nenhum argila	1,00	2,00	4,00	8
	L - Descontinuidade principal com RQD ₁₀₀ =0 ^b devido a argila e rocha muito fragmentada	2	4	8	16
	M - Descontinuidade principal com RQD ₃₀₀ =0 ^c devido a argila e rocha muito fragmentada intacta	4	8	12	24

^b RQD₁₀₀ = 1 metro de amostra perpendicular da descontinuidade
^c RQD₃₀₀ = 3 metros de amostra perpendicular da descontinuidade

Fonte: Barton & Bar (2015)

Além disso, passou a ser considerado o Fator-O, descrito na tabela 14, que consiste no fator de orientação das descontinuidades, fornecendo ajustes de orientação para descontinuidades em taludes, deste modo, os parâmetros são divididos em conjuntos A e B, onde o conjunto A é aplicado em descontinuidades mais desfavoráveis, enquanto o conjunto B são aplicados em casos de descontinuidades secundárias, ou seja, no caso de formações em cunha potencialmente instáveis (Barton & Bar, 2015).

Tabela 14 – Orientação das descontinuidades

Fator - O	A	B
Orientação muito favorável	2	1.5
Favorável	1	1
Desfavorável	0.75	0.9
Muito desfavorável	0.50	0.8
Causando falha se não suportado	0.25	0.5

Fonte: Barton & Bar (2015)

Por fim, para que se avalie as condições de estabilidade de taludes a partir deste método, é necessário que se obtenha os valores de *Q-Slope* e de β , onde β se trata do ângulo de inclinação do possível talude.

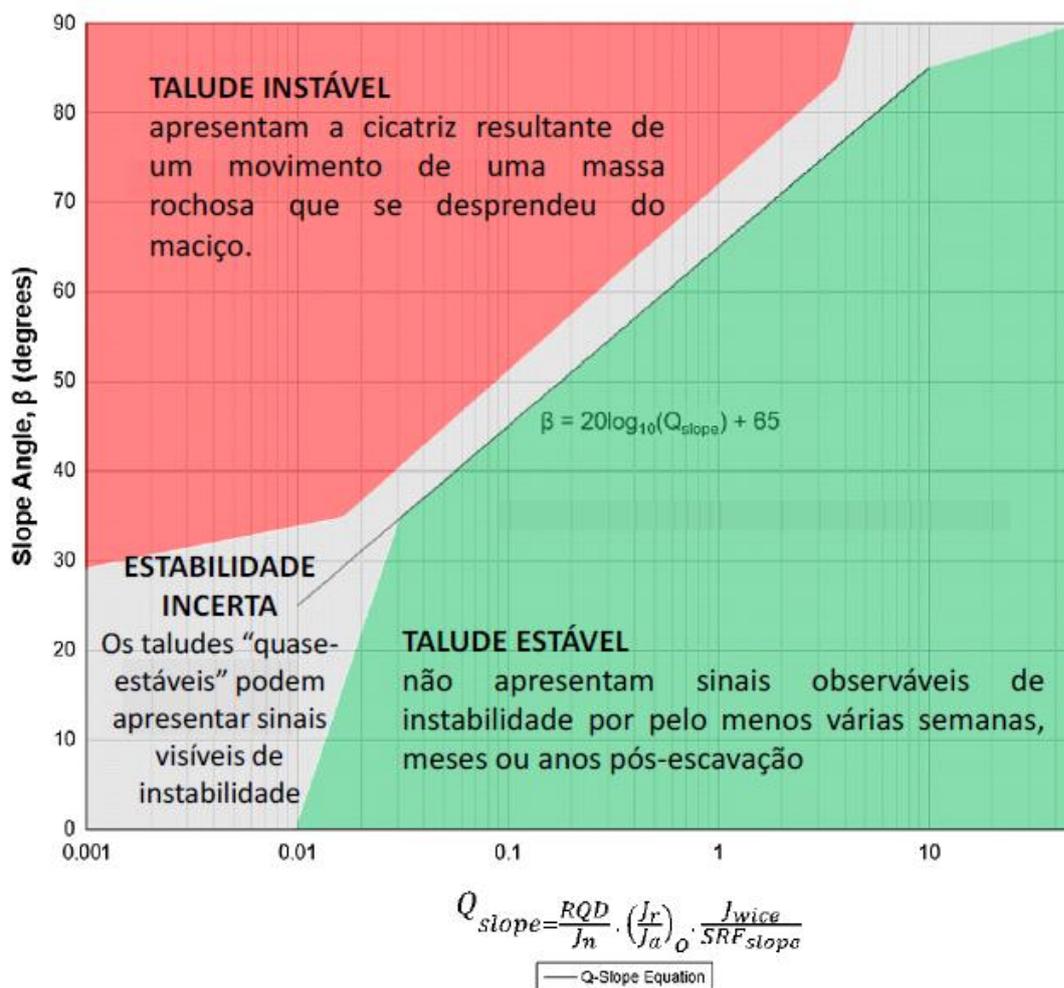
Segundo Barton & Bar (2015), em casos onde já existe um talude escavado e o interesse seja avaliar sua estabilidade através do método *Q-Slope*, o β a ser utilizado será o ângulo do talude durante a análise. No entanto, para casos onde seja

necessário realizar uma retroanálise, ou quando não há talude escavado, como o caso deste projeto, o uso da equação 4 se faz necessário (Barton & Bar, 2015)

$$\beta = 20\log_{10}(QSlope) + 65 \quad (4)$$

A construção da equação 4 foi obtida a partir de um estudo empírico em taludes estáveis sob essas condições no período de 6 meses a 50 anos, criando uma probabilidade de falha de apenas 1%, podendo ser utilizada para considerar o uso de reforço ou suporte, para taludes de qualquer altura. Assim, uma vez que se obtenha os valores de *Q-Slope* e β , pode-se plotar os resultados no gráfico abaixo (Fig.13) de modo a compreender a estabilidade do talude.

Figura 13 – Gráfico que correlaciona o índice *Q-Slope*, o ângulo de inclinação do talude e sua estabilidade.



Fonte: Modificado de Barton & Bar (2015)

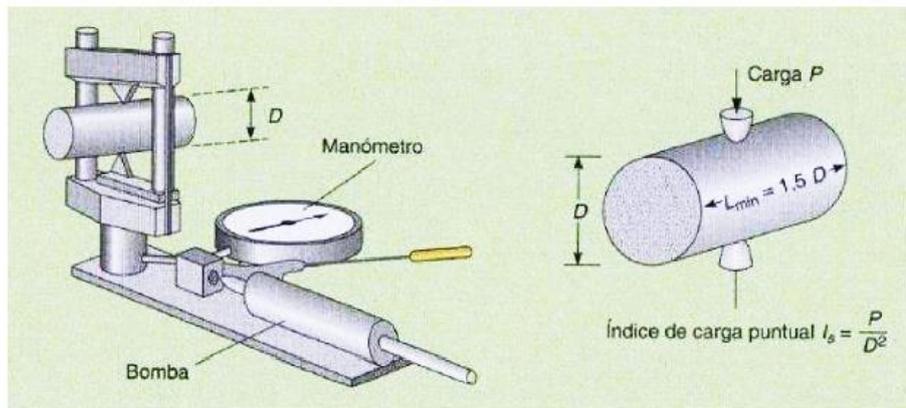
3.3 Ensaio de carga pontual (*Point Load Test*)

A determinação da resistência à compressão simples da rocha, a partir de ensaios de compressão uniaxial, é uma tarefa que requer preparo especial das amostras e ótima condução dos ensaios. Para o caso deste projeto, a resistência à compressão simples e o comportamento de tensão-deformação não requerem muito detalhamento, bastando o conhecimento aproximado do valor da resistência, uma vez que se trate de um trabalho preliminar com tempo e recursos limitados. Neste caso, há vantagens em recorrer a ensaios que sejam mais simples e econômicos que forneçam índices correlacionáveis com a resistência à compressão uniaxial do maciço, neste caso, foi utilizado o ensaio de carga pontual (ISRM, 1985).

Segundo a ISRM (1985), o ensaio de carga pontual trata-se de um ensaio destrutivo pelo qual o teste deve ser repetido algumas vezes na mesma amostra, para que se realize uma análise estatística dos resultados. Além disso, a metodologia é definida como rápida e de fácil execução, podendo ser realizada em campo ou no laboratório, com amostras regulares ou não, sem que seja necessário preparar um corpo de prova (ISRM, 1985; Varela *et al.* 2015).

Basicamente, o ensaio consiste em levar amostras à ruptura por meio de uma carga concentrada em duas ponteiros cônicas, sob amostras regulares ou não, em que a direção aplicada pode ser axial ou diametral (Fig. 14). O equipamento é constituído essencialmente por um sistema hidráulico onde há aplicação de carga contínua, um sistema de medição de força (P) e um sistema de medição da distância (D), entre duas ponteiros através das qual é aplicada a carga (Rezende, 2016).

Figura 14 – Representação esquemática do equipamento para a execução do ensaio



Fonte: Extraído de Varela *et al.* (2015)

3.3.1 Índice de Carga Pontual

Como padrão definido pela ISRM (1985), o índice de carga pontual é definido para corpos de prova cilíndricos com diâmetro D igual a 50mm, onde a aplicação da carga P é realizada na direção diametral, calculada pela equação 5.

$$I_{s(50)} = \frac{P}{D^2} \quad (5)$$

Onde,

$I_{s(50)}$ – Resistência a carga pontual;

P – É a carga de ruptura;

D – É a distância entre duas ponteiros cônicas.

Segundo a norma ISRM (2007), para ensaios idênticos realizados sobre corpos de prova cilíndricos com outros diâmetros, a relação P/D^2 deverá ser multiplicada por um fator corretivo (F), a fim de se obter o índice de carga pontual corrigido, através das equações 6 e 7.

$$I_{s(50)} = F \frac{P}{D^2} \quad (6)$$

Resultando em:

$$F = \left(\frac{D}{50}\right)^{0,45} \quad (7)$$

Para amostras ensaiadas axialmente, ou até mesmo para amostras com formas irregulares, que obedecem aos critérios do ISRM (1985) é necessário definir um diâmetro D_e através da equação 8.

$$I_{s(50)} = F \frac{P}{D_e^2} \quad (8)$$

Assim, é possível calcular a compressão uniaxial através da compressão simples a partir da equação 9 descrita por Bieniawski (1989):

$$\sigma_c = a \cdot I_{s(50)} \quad (9)$$

Onde:

σ_c – Compressão uniaxial;

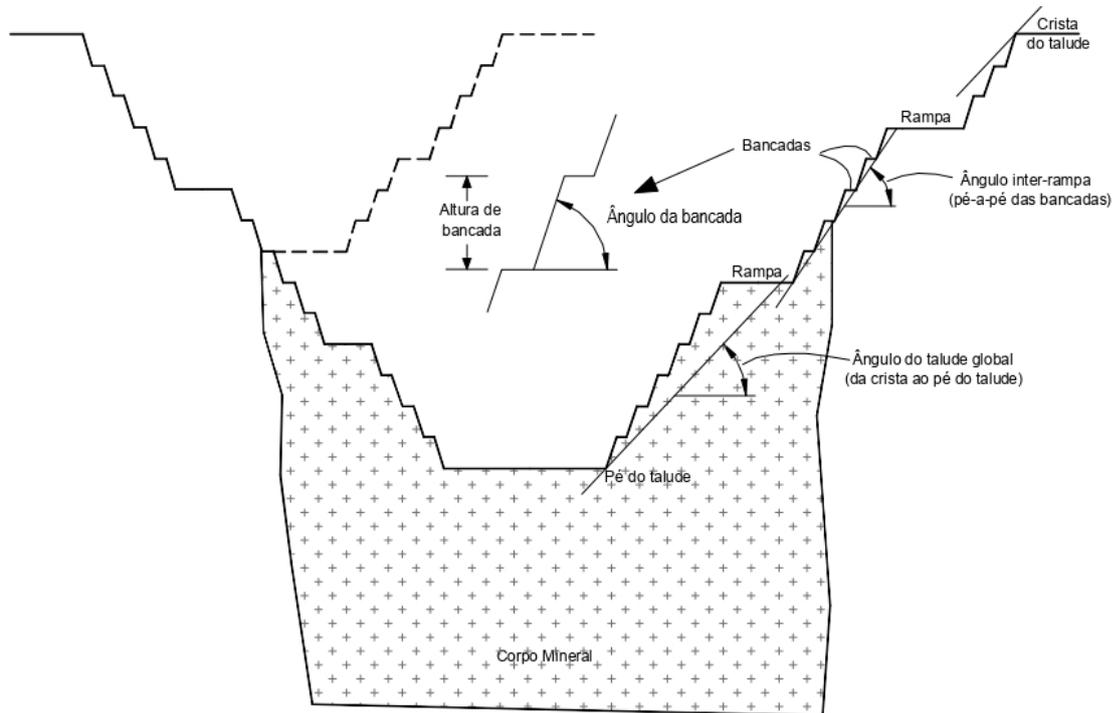
a – Parâmetros de correlação;

$I_{s(50)}$ – Resistência a carga pontual.

3.4 Estabilidade de taludes em rocha

Em escavações a céu aberto, caso provável do futuro empreendimento a ser modelado neste trabalho, a configuração geométrica da cava depende basicamente da distribuição espacial do corpo em conjunto com as suas características geomecânicas. A configuração dos taludes de uma mina (Fig. 15), normalmente é constituída de um talude de bancada, o talude inter-rampa e o talude global, os quais obedecem a alguns aspectos geométricos (Zea, 2004). Sabe-se intuitivamente que quanto mais íngreme um talude, menor a remoção de estéril, diminuindo o custo da extração, no entanto, com o acréscimo dos ângulos de talude a partir do avanço da escavação, faz com que o risco de instabilidade também aumente (Zea, 2004).

Figura 15 – Configuração dos taludes em mina a céu aberto



Fonte: Zea (2004)

A estabilidade de taludes rochosos é fortemente influenciada pelo controle estrutural e litologia em questão, em especial as discontinuidades. Em geral as rupturas ocorrem preferencialmente ao longo destes planos de fraqueza, que podem ser estratificações, foliações, juntas e falhas. Assim, é essencial que estas discontinuidades sejam caracterizadas de forma adequada para uma análise de estabilidade confiável (Ferraz *et al.* 2019).

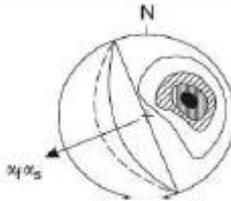
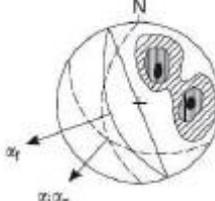
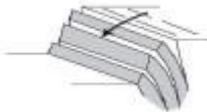
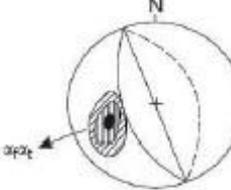
Segundo Goodman (1989), com a determinação do mecanismo de ruptura, é possível avaliar a probabilidade de ruptura, o fator de segurança e realizar uma previsão do grau de risco aceitável. Quando há múltiplos planos de discontinuidades interceptando-se entre si em ângulos oblíquos, estudos de modelos cinemáticos podem ser úteis na antecipação da mais provável superfície de ruptura.

De acordo com Wyllie e Mah (2004) existem diferentes tipos de rupturas que condicionados a diversas condições geológicas, em especial, as estruturas, podendo formar padrões de ruptura planar, em cunha ou tombamento (Tabela 15).

Desta forma, pode-se determinar a forma dos blocos formados por intersecções de discontinuidades e a direção na qual eles podem deslizar, porém a análise permite

chegar a conclusões apenas em relação à orientação, não sendo possível determinar espaçamentos, posição e dimensões (Ferraz et al. 2019).

Tabela 15 – Mecanismos de ruptura em taludes

Tipo de Ruptura	Estereograma	Condições Estruturais
<p>Planar</p> 		<p>- Descontinuidade apresenta ângulo de mergulho menor que o do talude e direção paralela à face do talude.</p> <p>- Mergulho da descontinuidade maior que o ângulo de atrito.</p>
<p>Em Cunha</p> 		<p>- Direção da interseção dos planos de descontinuidade próxima da direção do mergulho do talude.</p> <p>- O mergulho da interseção menor que o mergulho do talude e maior que o ângulo de atrito.</p>
<p>Tombamento</p> 		<p>- Rocha resistente contendo descontinuidades com mergulho alto para dentro do talude.</p> <p>- Normal ao plano de tombamento com mergulho menor que a inclinação do talude e menor que o ângulo de atrito</p>
<p>Legenda:</p>  Concentração dos polos  Grande círculo representando a face do talude  Grande círculo representando as descontinuidades.	<p>α_1 Direção do mergulho da face do talude α_2 Direção de deslizamento α_3 Direção de tombamento α^1 Direção do mergulho da linha de interseção</p>	

Fonte: Ferraz et al. (2019)

3.5 Modelagem geológico-geotécnica

Um dos principais elementos para a caracterização do maciço rochoso é o modelo geológico, que tem por objetivo o entendimento espacial dos processos geológicos a partir de dados como sondagens, mapeamentos, características regionais e avaliação da distribuição e natureza das rochas na subsuperfície (Otoya, 2011).

Sabe-se da intrínseca influência das características litológicas no comportamento do maciço, assim, de modo a obter uma representação mais próxima da realidade do local estudado é necessário que se realize a modelagem geológica,

para que seja possível descrever os cenários de estabilidade e quando necessário, traçar as soluções para os possíveis problemas que se apresentem (Conti *et al.* 2014).

Atualmente, a partir de ferramentas computacionais é possível processar vastos conjuntos de dados geológicos que auxiliem na geração de modelos geológicos tridimensionais. Dentre as metodologias empregadas, duas são consideradas principais, denominadas modelagem explícita e implícita (Vollgger *et al.* 2013).

Segundo Cowan *et al.* (2003), os modelos explícitos se fundamentam na designação dos limites geológicos de modo manual através da produção de seções que podem ser vinculados a superfícies tridimensionais. (Apesar da vantagem de armazenar dados tridimensionais, segundo Vollgger *et al.* (2013), essa metodologia pode não ser eficaz no caso de dados complexos, uma vez que a definição manual dos elementos torne o processo demorado e possivelmente tendencioso na interpretação geológica, resultando em modelos pouco representativos.

A modelagem implícita apresenta algumas vantagens e relação ao método explícito, a começar pela reprodutibilidade, automatização, simples atualização do modelo com dados recentes, além do mínimo viés e incorporação de informações de diversas fontes de dados (Cowan *et al.* 2003; Vollgger *et al.* 2013; Vollgger *et al.* 2015; Gonçalves *et al.* 2017). O método consiste na parametrização de informações obtidas como valores numéricos em função de coordenadas x, y e z, onde posteriormente é calculado esse valor para toda a área de estudo (Gonçalves *et al.* 2017).

O modelo geotécnico, por sua vez, é baseado na distribuição de parâmetros geomecânicos em determinadas faixas litológicas, podendo ser aplicado em diversas áreas das geociências e engenharia. Atualmente várias metodologias podem ser aplicadas para a geração de um modelo tridimensional, seja ele geotécnico ou geológico. Cada uma delas possui suas peculiaridades, mas podem ser divididos em dois grandes grupos, sendo os métodos tradicionais e os métodos estatísticos (VOGBR, 2014).

Os métodos tradicionais são fundamentados em desenhos manuais, utilizando ou não ferramentas CAD (*Computer Aided Design*). Essa metodologia consiste na elaboração de seções verticais ou horizontais com base na interpretação das informações de furos de sondagem. Os métodos estatísticos por sua vez, podem calcular a probabilidade de ocorrência de diferentes litotipos ou classes de maciço, mostrando as regiões problemáticas quanto à incerteza associada, principalmente a

definição dos limites dos corpos modelados, através de algoritmos interpoladores (Müller et al, 2012).

Dentre os algoritmos de interpolação temos os ditos métodos clássicos, como o Inverso do Quadrado da Distância (IQD), Mínima Curvatura, Vizinho mais Próximo, entre outros, que não levam em consideração a continuidade espacial dos dados, e a krigagem, que permite que se considere a tendência de continuidade espacial dos dados, a partir da análise dos variogramas e definição das direções principais de maior e de menor continuidade.

A krigagem, segundo Yamamoto e Landim (2013), é utilizada quando constata-se a continuidade espacial de uma área estudada, algo não que não pode ser afirmado para trabalho devido à escassez de informações, tornando seu uso pouco, deste modo, para a estimativa dos valores dos blocos, foi utilizado o IQD.

3.5.1 Inverso do Quadrado da Distância (IQD)

Este método é um dos mais utilizados dentro dos métodos clássicos, trata-se de um interpolador determinístico univariado de médias ponderadas. O peso dado durante a interpolação é tal que a influência de um ponto amostrado em relação ao outro diminui conforme aumenta a distância ao nó da grade a ser estimado. Desta forma, quanto mais distante um ponto a ser observado estiver, menor será seu peso e conseqüentemente, sua influência também será menor (De Souza, 2010). O IQD é definido pela equação 10.

$$\hat{Z}_i = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^2} \cdot Z_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^2} \right)} \quad (10)$$

Onde \hat{Z}_i é o valor interpolado; Z_i é o valor do atributo amostrado; d_i é a distância euclidiana entre o ponto amostrado e o estimado (De Souza, 2010).

3.6 Trabalhos anteriores

Na região de Santana da Boa Vista, onde se encontra a área de estudo, não há nenhum tipo de estudo publicado que contemple o conteúdo deste trabalho. No entanto, há diversos estudos que tratam da geologia e geotectônica da região, como por exemplo Chemale Jr., 2000 e 2012, Fernandes et al. 1992, Chemale et al. 1995; Basei et al. 2011; Bitencourt & Nardi 2000; Philipp & Machado 2005; Saalman et al. 2005, 2006, 2010, Philipp et al. 2013, 2016; Hartmann et al. 1999, 2000, 2007, 2011; e Gauna, 2018.

Para o conteúdo específico deste trabalho, relacionado a modelagem geotécnica, foram utilizados como referência os trabalhos de Vatanable, 2018; Dal Bosco, 2019; Souza, 2019 e Pinta López, 2019.

Vatanable (2018), realizou o trabalho no distrito de Minas do Camaquã/RS, onde quantificou e qualificou as informações geotécnicas obtidas em testemunhos de sondagem em um estudo de caso, com base na classificação geomecânica, mais especificamente o RMR, para classificar os blocos de acordo com as classes de maciço rochoso, contribuindo para o planejamento e segurança operacional de um empreendimento que se encontrava em fase de pesquisa, semelhante ao caso abordado no presente trabalho. Além disso, o autor aplica técnicas de geoestatística para obter o comportamento direcional e a não-linearidade de certas variáveis geotécnicas para estimar modelos tridimensionais.

Dal Bosco (2019) realizou uma análise global da estabilidade de taludes em uma mineração a céu aberto de mármore, em Caçapava do Sul/RS. O estudo foi realizado a partir da caracterização de descontinuidades, setorizando a cava de acordo com as descontinuidades e variações litológicas, além disso, realizou a análise da estabilidade de taludes, definindo os mecanismos de ruptura e fator de segurança para cada um dos taludes. O autor ainda simulou a influência do ângulo de mergulho e de orientação dos taludes a partir do fator de segurança, visando garantir uma otimização adequada da geometria dos taludes em termos econômicos e de segurança.

Souza (2019) realizou uma caracterização geomecânica do maciço rochoso da Cava Três Buracos, em Pilar de Goiás/GO através de mapeamentos, descrições geológico-geotécnicas dos furos de sondagem, compilado dos ensaios de laboratório existentes e estimativa de parâmetros. Além disso, a autora ainda elaborou um modelo

tridimensional de classes geomecânicas, com o objetivo de avaliar a qualidade do maciço, auxiliando na identificação de mecanismos de ruptura nos taludes, através da aplicação de análises cinemáticas e métodos de equilíbrio limite no estudo dos taludes das cavas operacionais e finais, a fim de determinar os parâmetros geométricos que viabilizarão a abertura da cava Três Buracos.

Pinta Lopéz (2019) realizou um trabalho em uma pedreira de dacito instalada na área de Tanlahua, na divisa das cidades San Antonio e Quito, no Equador. O trabalho da autora consistiu na análise de estabilidade de taludes com a construção de um modelo dinâmico de estabilidade baseado no levantamento geológico-geotécnico, determinando as propriedades geomecânicas do maciço rochoso como a resistência a compressão uniaxial, RQD, e a caracterizando as descontinuidades, determinando então a qualidade da rocha com base na sua classificação, propondo parâmetros de estabilização de taludes.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

De modo a atender os objetivos caracterizados no capítulo 1, o desenvolvimento do projeto envolveu as etapas que serão descritas a seguir.

4.1 Revisão e compilação de informações prévias

Durante esta etapa, foi realizado um apanhado de bibliografias que incluíssem estudos realizados com o escopo semelhante ao deste trabalho, como a caracterização e classificação de maciços rochosos, elaboração de modelos geológicos e geotécnicos tridimensionais, mecanismos de ruptura em taludes, além da revisão do contexto geológico regional e local da área de estudo.

Simultaneamente, os dados levantados no relatório de pesquisa mineral pela empresa que requereu a área de estudo também foram adicionados ao conteúdo do trabalho, sendo essenciais para a descrição de características geológicas e estruturais em termos locais. A caracterização geomecânica do maciço será obtida através da compilação de diferentes estudos, que envolverão trabalhos de campo e laboratoriais. Além disso, visita de campo também foi realizada para reconhecimento da área de estudo e coleta de amostras para ensaio de carga pontual.

4.2 Descrições geotécnicas de furos de sondagem

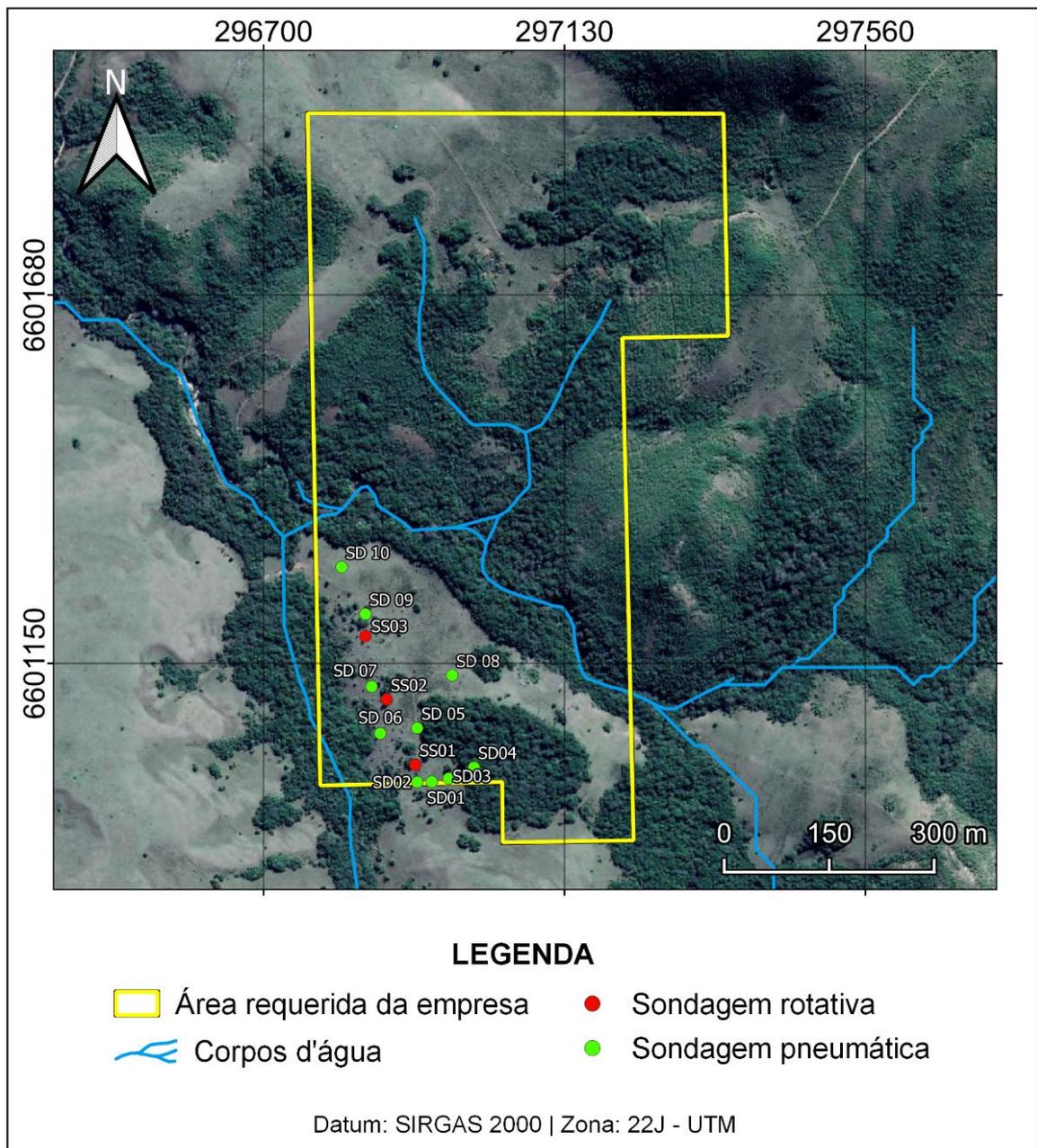
As descrições dos furos de sondagem alocados pela empresa que detém o requerimento da área junto à Agência Nacional de Mineração (ANM), foram realizadas com base nas metodologias RQD (Deere, 1963), RMR (Bieniawski, 1989) e *Q-Slope* (Bar & Barton, 2017). Os furos estiveram dispostos no Laboratório de Lavra, Planejamento e Tratamento de Minérios (LATRAM), disponibilizado pela Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA).

4.2.1 Localização das sondagens

Ao total, na Área Sul, foram realizados dez furos de sondagem (Fig. 16). Para efeitos de pesquisa, foram realizados sete furos de sondagem exploratórios

simplificados, sem recuperação de testemunho, para delimitação do corpo de interesse, a partir de sondagens pneumáticas. Com vistas a caracterizar a área de estudo, atestando a qualidade e continuidade do maciço, também foram realizadas três sondagens rotativas com recuperação de testemunho, sendo estes, essenciais para o presente estudo. As fotografias dos testemunhos de sondagem podem ser observadas no Anexo – B.

Figura 16 – Localização das sondagens realizadas na área Sul



Fonte: Modificado Razzera (2021)

4.3 Classificação litológica dos furos de sondagem

A descrição litológica dos furos de sondagem pode ser encontrada no relatório de pesquisa mineral disponibilizado pela empresa que detém a área requerida, auxiliando na classificação litológica do maciço. No entanto, a descrição disponibilizada conta com um nível de detalhe que foge do possível para o escopo deste projeto, uma vez que a modelagem será realizada em uma escala onde não será viável aplicar tamanha precisão.

Deste modo, a classificação litológica foi realizada com base na observação visual dos furos de sondagem, ainda levando em consideração as descrições disponíveis no relatório, entretanto, atentando-se a camadas que apresentassem mais de 1 metro, abrangendo porções maiores da rocha. Assim, as rochas foram agrupadas em cinco classes: Mármore Branco (MB), Mármore Cinza (MC), Mármore Misto (MISTO), Quartzito (QZT) e Solo Residual Carbonático (SRC).

4.4 Ensaio de Carga Pontual (*Point Load Test*)

Para a realização dos ensaios em rocha, foram utilizados os furos de sondagem disponibilizados pela empresa e amostras coletadas *in situ* com base nos domínios geológico-geotécnicos, com o objetivo de determinar os parâmetros de resistência da rocha, através do ensaio de carga pontual. Foram coletadas três amostras em cada furo, com base na litologia, ensaiadas no Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro (LPM), na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e por fim, os resultados foram planilhados de modo que pudesse ser realizado o cálculo e a correlação dos valores obtidos com a resistência uniaxial do maciço.

As amostras selecionadas foram submetidas ao ensaio conforme descrito no tópico 3.3. As amostras eram irregulares, sendo aplicadas as cargas nas direções axial (normal à foliação) e diametral (paralelo à foliação). A escolha das direções foi baseada especialmente no formato das amostras, uma vez que algumas amostras irregulares não se comportavam bem no equipamento.

Em seguida, os dados obtidos foram devidamente planilhados, para que fosse possível realizar os cálculos para obter o índice de carga pontual corrigido, de modo

que ao final do processo, se obtivesse os valores de compressão uniaxial conforme as indicações da ISRM (1985; 2007).

4.5 Elaboração dos modelos geológico-geotécnicos

De modo a obter uma representação mais próxima possível da realidade da área de estudo, foram elaborados os modelos geológico-geotécnicos tridimensionais. A elaboração do modelo exige de várias etapas de trabalho, a iniciar pela compilação de todos os dados disponíveis, como dados topográficos, dados litológicos e geotécnicos, que incluem dados obtidos na descrição de sondagens e resultados de ensaios de laboratório.

Após a devida descrição dos furos de sondagem, foram definidas as litologias denominadas Mármore Branco (MB), Mármore Cinza (MC), Mármore Misto (MISTO) e Quartzito (QZT), às quais, foram atribuídas classificações de RMR e *Q-Slope*, de modo que fossem agrupados faixas do maciço com comportamento similar.

As descrições foram realizadas nos furos com recuperação de sondagem, sendo eles: SS01, SS02 e SS03, no entanto, os furos de sondagem sem recuperação que vão de SD01 até SD10 foram classificados de acordo com os perfis esquemáticos apresentados no relatório de pesquisa mineral e com base na proximidade com os furos recuperados, de modo a adicionar um maior número de informações ao banco de dados.

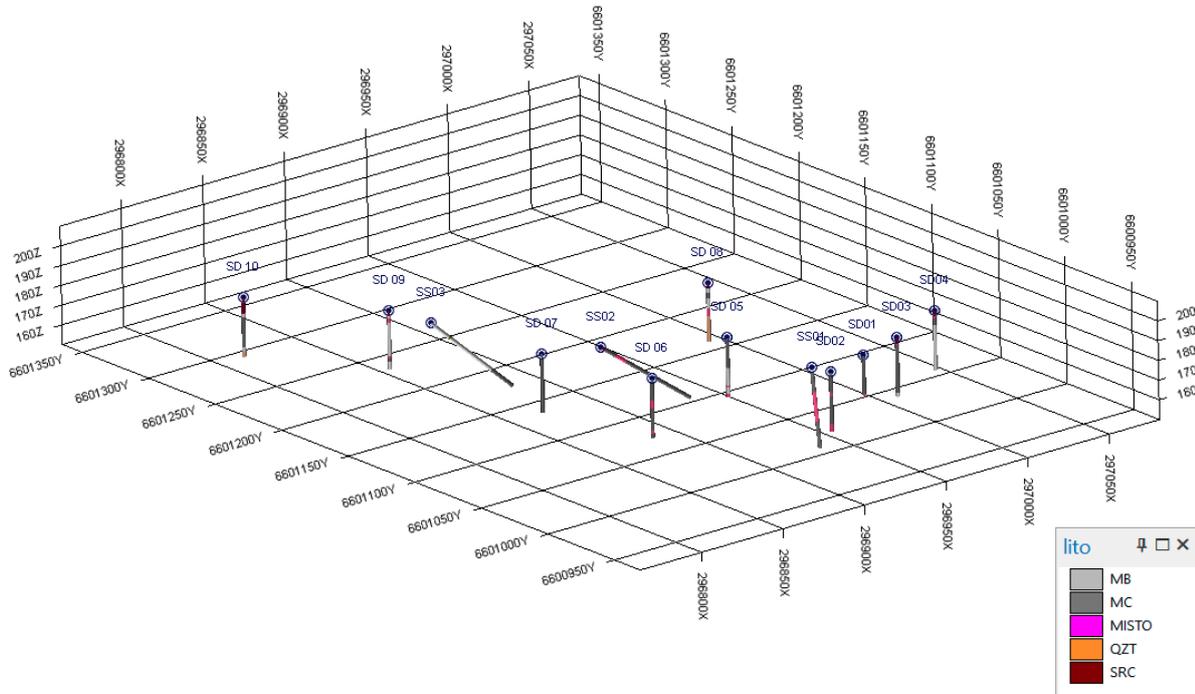
Como *input* para a formulação dos modelos, as informações obtidas a partir da caracterização dos furos de sondagem com e sem recuperação de testemunho foram agrupadas em um único formato, em quatro arquivos distintos:

- *Collar*: Onde foram fornecidas as informações das coordenadas dos furos, além de informações da cota;
- *Survey*: Dispõe os dados de orientação dos furos recuperados;
- *Geology*: Descreve as litologias para cada intervalo dos furos;
- *Assay*: Apresenta a descrição geotécnica para cada intervalo dos furos, com os resultados do RMR, *Q-Slope* e *Beta*.

Após a geração destes arquivos, foi realizada uma checagem do banco de dados, onde foram corrigidos erros de digitação, resultados duplicados, verificação de coordenadas etc., uma vez que a presença destes erros impossibilitasse a inserção

dos dados nos softwares. Na figura 17 é possível observar a disposição dos furos de sondagem e suas informações litológicas.

Figura 17 – Disposição dos furos de sondagem e suas respectivas informações litológicas.



Fonte: Autora

4.5.1 Construção do modelo geológico

Para a execução da modelagem geológica neste trabalho, a modelagem implícita foi o método selecionado, baseada em técnicas de aprendizagem de máquina (*machine learning*) que se trata de um estudo sistemático a partir de algoritmos e sistemas que aperfeiçoam seu desempenho baseando-se na experiência obtida a partir dos dados disponíveis (Flach, 2012; Gonçalves *et al.* 2017).

A metodologia utilizada no trabalho foi desenvolvida por Gonçalves *et al.* (2017) descreveu uma metodologia de modelagem implícita sob o paradigma de AM em unidades geológicas que possuem controle estrutural. Segundo os autores, essa metodologia incorpora informações estruturais, fornecendo uma medida de incerteza ao modelo a partir de técnicas supervisionadas que trabalham a partir de um rótulo ou classificação. Deste modo, é possível determinar parâmetros de covariância, não necessitando que se utilize a variografia tradicional uma vez que se estabeleça um

desvio padrão que crie uma maior confiabilidade para o modelo (Gonçalves *et al.* 2017).

Após ser realizada a integração de informações no formato de arquivos citados anteriormente, os dados são processados utilizando *scripts* na linguagem de programação Python, onde o algoritmo calcula as probabilidades de determinado bloco ser de cada uma das litologias. A litologia com a maior probabilidade calculada é aquela considerada como predita para aquele bloco. Além disso, a incerteza do bloco também é calculada, sendo dessa forma possível filtrar somente os blocos que obtiverem uma baixa incerteza. Após a realização desta etapa, o modelo geológico final pode ser visualizado e manipulado através do *software Micromine®*.

Para contextualização do resultado obtido no modelo geológico, foi proposta uma cava final que envolvesse a maior parte do modelo geológico, com incerteza menor que 0.25, dentro das litologias MB, MC e MISTO. A altura de bancada foi definida em 10m e o tamanho de berma de 5m. Para fins de visualização a cava foi desenhada com um ângulo de face de 85°.

4.5.2 Elaboração do modelo geotécnico

O modelo geotécnico do maciço rochoso foi elaborado através dos parâmetros levantados na caracterização geomecânica de testemunhos de sondagem e dos dados obtidos no ensaio de carga pontual para obtenção da resistência da rocha intacta. Estes parâmetros foram agrupados em faixas do maciço com o comportamento geomecânico similar, utilizando-se os critérios de classificação RMR (Bieniawski, 1989) e Q-Slope (Barton & Bar, 2015).

Para a produção do modelo, os arquivos citados no tópico 4.5 foram inseridos no *Micromine®* onde foi realizada a devida validação dos dados. Após importar os dados e elaborar legenda para as classes, é possível obter a distribuição dos furos de acordo com as classificações geomecânicas definidas previamente, juntamente com a geometria da cava proposta.

O método de interpolação dos parâmetros geotécnicos no modelo blocos, foi o do inverso do quadrado da distância. Devido a baixa densidade de dados, o volume de busca considerado foi definido com raio de 100m, e sem número mínimo de amostras, o que é suficiente para estimar todos os blocos dentro do limite definido.

4.5.2.1 Confeção do modelo de blocos

De modo a obter uma estimativa de valores dos parâmetros geotécnicos para regiões não amostradas, realizou-se uma interpolação a partir da confeção de um modelo de blocos.

Usualmente, as dimensões dos blocos a serem utilizados blocos são definidos em razão do espaçamento da malha de amostragem, variando de $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{4}$, a ser definido de acordo com o tipo e objetivo de estudo, além do nível de detalhe necessário, fase do projeto e ainda o tamanho das bancadas projetadas. Para o caso deste projeto, não é requerido um nível alto de detalhe, especialmente em função da baixa disponibilidade de dados, portanto, foram definidos blocos de 10mx10mx10m de modo que houvesse relativa representatividade dos índices de RMR, *Q-Slope* e β .

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão abordados os resultados obtidos após a aplicação das metodologias que foram estabelecidas no capítulo anterior.

5.1 Integração de dados

No decorrer desta etapa, foram reunidas informações prévias com o objetivo de estruturar um banco de dados que pudesse ser utilizado na obtenção dos resultados. Inicialmente, foi realizada a revisão bibliográfica, que fez parte da base teórica deste trabalho, utilizando diferentes autores de livros e artigos acadêmicos, além de dissertações e teses que apresentassem informações pertinentes ao tema.

Paralelamente, a empresa forneceu as pesquisas realizadas na área de interesse, incluindo o relatório final de pesquisa (RFP), levantamento da superfície topográfica, além das sondagens com e sem recuperação de testemunho. Por meio de uma parceria com a empresa, os testemunhos de sondagem foram armazenados no laboratório da UNIPAMPA. A partir dessas informações foi possível realizar muitas das etapas propostas neste projeto, viabilizando a integração dos dados compilados com os resultados das descrições geológico-geotécnicas, do ensaio de resistência, culminando com a realização da classificação geomecânica do maciço rochoso.

5.2 Classes litológicas

Apesar da descrição litológica completa e detalhada dos furos de sondagem estar disponível no relatório de pesquisa mineral pertencente a empresa requerente, optou-se por classificar as litologias de maneira mais generalizada, baseando-se essencialmente no aspecto visual dos furos.

Além disso, é importante destacar que apesar de apenas os furos 01, 02, e 03 terem sido analisados enquanto testemunhos recuperados, os furos de sondagem sem recuperação foram classificados de acordo com os perfis esquemáticos apresentados no relatório de pesquisa mineral, deste modo, um maior número de informações foram adicionadas ao banco de dados.

A classificação litológica foi realizada em classes de rocha que tivessem ao menos 1 metro de comprimento, para que de fato, sua modelagem posterior ficasse

representativa. Assim, as classes litológicas definidas foram: Mármore Branco (MB), Mármore Cinza (MC), Mármore Misto (MISTO) e Quartzito (QZT).

5.3 Descrição geotécnica de testemunhos de sondagem

5.3.1 Cálculo do RQD

O objetivo deste método é definir a qualidade do maciço rochoso com base na porcentagem de recuperação de uma amostra, onde se leva em consideração as partes que apresentem mais de 10cm de comprimento (Deere, 1963).

Os valores de RQD foram obtidos a partir da medida indireta de descontinuidades em testemunhos de sondagem e os resultados estão dispostos na tabela 16, onde a classificação de qualidade da rocha varia de razoável, para o furo 3, e fraco a muito fraco para os furos 1 e 2. Ao observar os resultados, considera-se o maciço como de má qualidade, no entanto, deve-se levar em consideração a execução das sondagens, que pode não ter sido realizada com a melhor qualidade possível, uma vez que durante a descrição, foram observadas porções de testemunhos com marcas de rotação, possivelmente pela ação mecânica do equipamento e fraturas artificiais recentes. Ainda que as fraturas artificiais sejam desconsideradas do cálculo do RQD, em caso de dúvida se uma fratura é artificial ou natural, o correto é considerá-la como natural, obtendo-se uma classificação mais conservadora.

Tabela 16 – Resultados do RQD

	De	Até	Litologia	Recuperação (m)	Recuperação (%)	Quantidade de Fraturas	Frequência de fraturas	Soma de pedaços >10cm (m)	RQD (%)	Qualidade do maciço
FURO 1	3	15,5	MC	7	0,6	35	3	3	0,23	Muito fraco
	15,5	33,2	MISTO	12	0,7	62	4	3	0,17	Muito fraco
	33,2	50	MC	8	0,5	40	2	4	0,26	Fraco
FURO 2	2	8	MC	2	0,4	16	3	1	0,15	Muito fraco
	8	14	MISTO	4	0,7	31	5	2	0,38	Fraco
	14	50	MC	23	0,6	119	3	16	0,43	Fraco
FURO 3	0	12	MB	8	0,8	17	2	7	0,64	Razoável
	12	37	MB	23	0,9	90	4	13	0,52	Razoável
	37	50	MC	12	0,9	74	6	7	0,57	Razoável

Fonte: Autora

5.3.2 Classificação do maciço rochoso (RMR)

A classificação do maciço rochoso, pelo método RMR, foi realizada ao longo dos três furos com base na respectiva avaliação dos seis parâmetros propostos por Bieniawski (1989). Para a pontuação designada ao parâmetro de resistência a compressão uniaxial do maciço, foram utilizados os resultados obtidos por meio do ensaio de carga pontual, disponíveis no Apêndice A, sendo este realizado sob a metodologia descrita no tópico 4.4.

Após a classificação três diferentes classes foram atribuídas, sendo: Classe I, Classe II e Classe III (Tabela 17). Um maciço rochoso classificado como Classe I é tido como excelente, ocorrendo somente no furo 03, especificamente no MB. Por sua vez, um maciço de Classe II é tido como bom, ocorrendo nos três furos e nas três litologias diferentes. Por fim, um maciço de Classe III, é definido como regular, ocorrendo nos furos 01 e 02, contemplando as litologias MC e MISTO.

Novamente, é importante salientar que o valor do RQD, um dos parâmetros utilizados na soma de pesos do RMR, pode ter sofrido influência da qualidade da sondagem, produzindo assim resultados conservadores que influenciaram os resultados do RMR. Além disso, os três furos, em especial o furo 01, por terem sido as primeiras sondagens executadas na campanha, apresentavam características de quebra recente que podem ter sido provocados pelo mal uso ou má calibração do equipamento, reduzindo consideravelmente a qualidade do maciço.

Tabela 17 – Resultados do RMR

	De	Até	Litologia	1) Resistência à compressão uniaxial (Peso)	2) RQD (Peso)	3) Espaçamento descontinuidades (Peso)	4) Padrão descontinuidades (Peso)	5) Água subterrânea (Peso)	RMR	Classe
FURO 1	3	15,5	MC	2	5	10	25	15	57	III
	15,5	33,2	MISTO	4	5	10	25	15	59	III
	33,2	50	MC	4	8	10	25	15	62	II
FURO 2	2	8	MC	7	3	10	25	15	60	III
	8	14	MISTO	7	8	8	25	15	63	II
	14	50	MC	4	8	10	25	15	62	II
FURO 3	0	12	MB	2	13	30	27	15	87	I
	12	37	MB	4	13	5	27	15	64	II
	37	50	MC	4	13	5	27	15	64	II

Fonte: Autora

Os valores de RMR obtidos a partir dos furos com recuperação de testemunho foram extrapolados para os furos sem recuperação que se encontravam próximos às sondagens com recuperação de testemunho, de acordo com a litologia.

5.4 Aplicação do método *Q-Slope*

Os valores atribuídos a cada um dos seis parâmetros geomecânicos foram substituídos na equação 3, de modo a obter-se o valor de *Q-Slope* conforme descrito no tópico 3.2.4. Os valores de *Q-Slope* obtidos, estão no intervalo entre 0,9 e 4,3 (Tabela 18). O Fator-O não foi aplicado para ajustes devido à falta de informações estruturais acerca das descontinuidades presentes na área.

Tabela 18 – Resultados do *Q-Slope*

	De	Até	RQD	Jn	Jr	Ja	Jwice	SRFb	Q-Slope
FURO 1	3	15,5	23	3	2	2	0,5	2,5	1,5
	15,5	33,2	17	3	2	2	0,5	2,5	1,1
	33,2	50	26	6	2	2	0,5	2,5	0,9
FURO 2	2	8	15	2	2	2	0,5	2,5	1,5
	8	14	38	4	2	2	0,5	2,5	1,9
	14	50	43	3	2	2	0,5	2,5	2,9
FURO 3	0	12	64	6	2	1	0,5	2,5	4,3
	12	37	52	20	2	1	0,5	2,5	1,0
	37	50	57	9	2	1	0,5	2,5	2,5

Fonte: Autora

Inserindo-se os resultados obtidos do *Q-Slope* na equação 4 foi possível calcular os ângulos β , de modo que fosse obtido o ângulo máximo estável para a face dos taludes projetados. Os valores obtidos variam entre 64° e 78° conforme mostra a tabela 19.

Tabela 19 – Apresentação dos ângulos propostos para as faces dos taludes

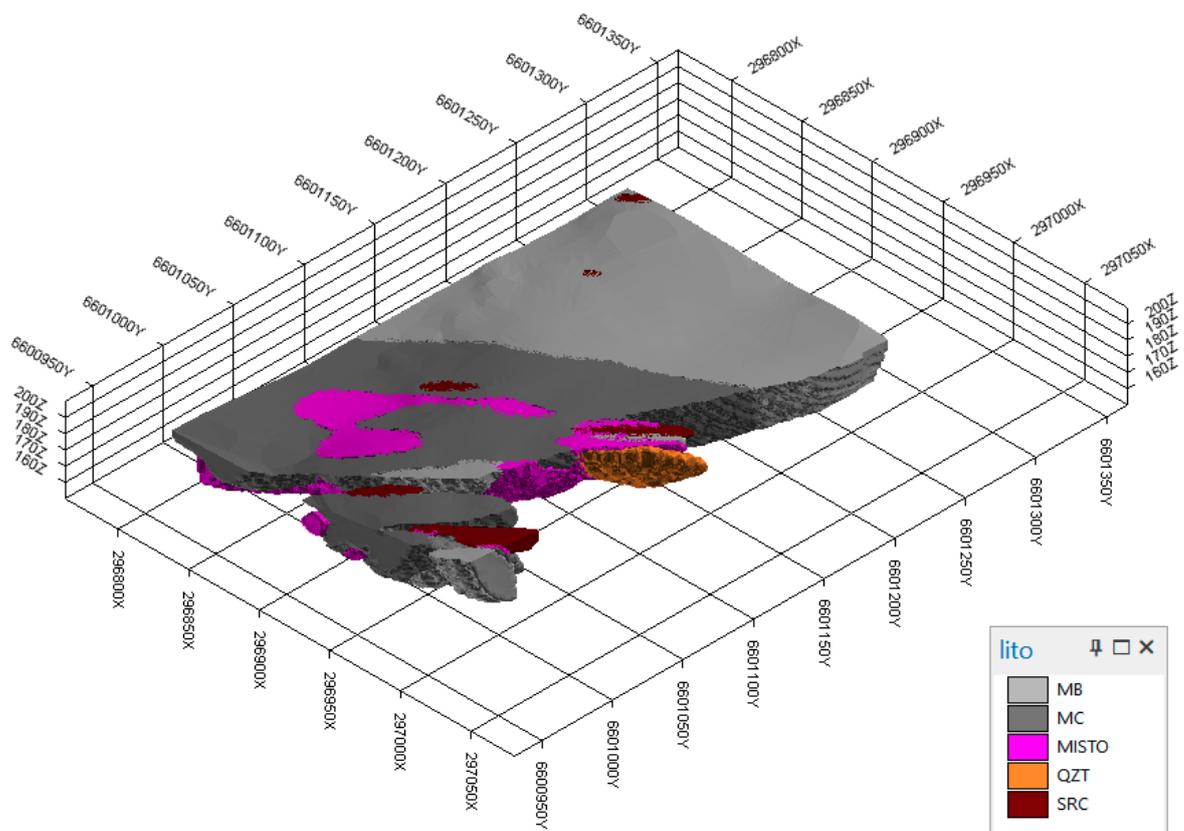
	De	Até	Q-Slope	β
FURO 1	3	15,5	1,5	69
	15,5	33,2	1,1	66
	33,2	50	0,9	64
FURO 2	2	8	1,5	69
	8	14	1,9	71
	14	50	2,9	74
FURO 3	0	12	4,3	78
	12	37	1,0	65
	37	50	2,5	73

Fonte: Autora

5.5 Modelagem geológica implícita

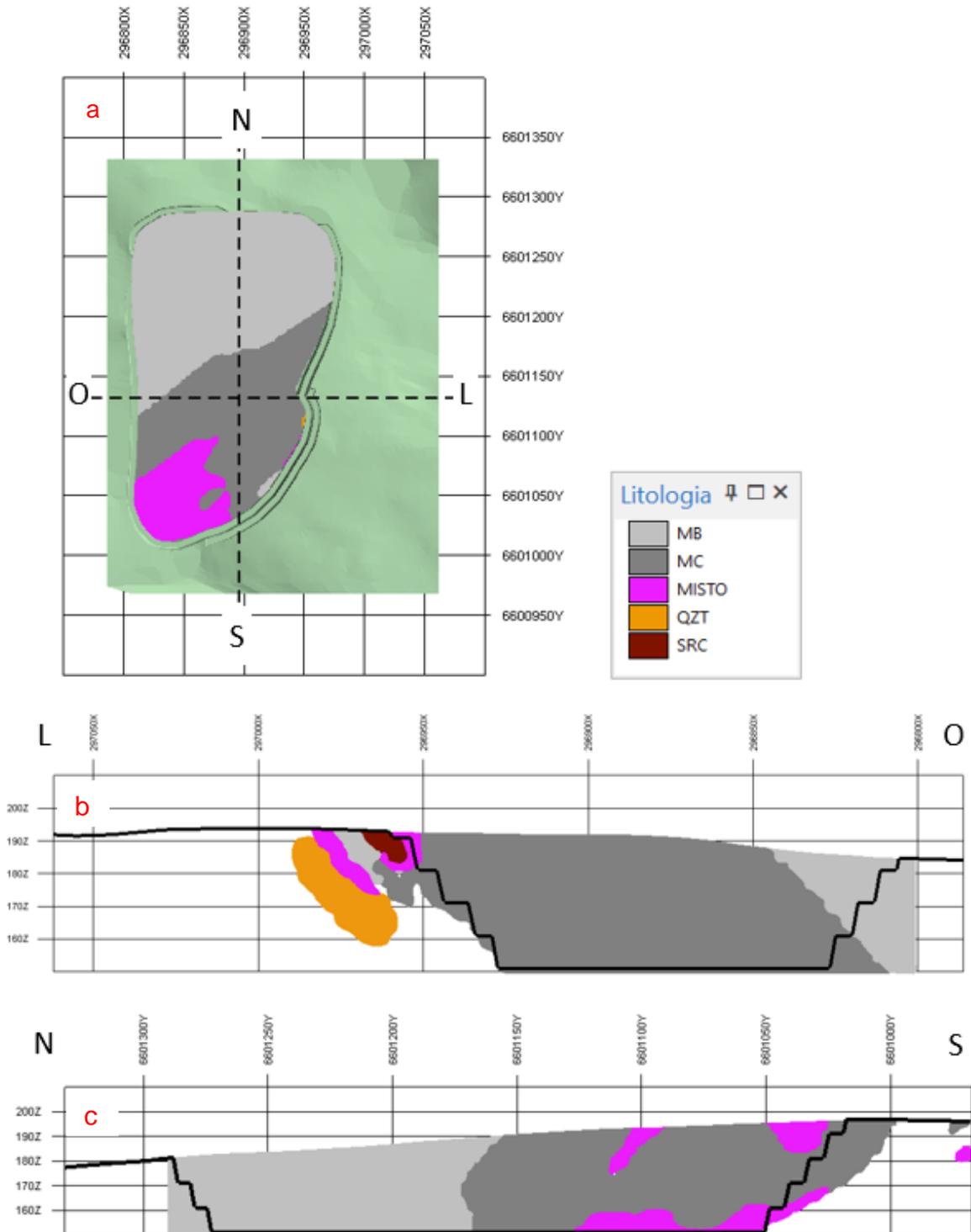
A modelagem geológica foi realizada conforme a metodologia proposta, sendo obtido o modelo implícito a partir da interpretação litológica dos furos de sondagem (Fig. 18). No resultado do modelo obtido são apresentadas as cinco litologias, que apresentam camadas mergulhando predominantemente para noroeste. Para a melhor visualização da distribuição de litologias no modelo, foram realizadas duas seções em corte, uma no sentido leste-oeste e outra norte-sul (Fig. 18).

Figura 18 – Modelo geológico



Fonte: Autora

Figura 19 – (a) Vista em planta do modelo geológico com as demarcações de seções leste-oeste e norte-sul; (b) Seção geológica leste-oeste; (c) Seção geológica norte-sul.



Fonte: Autora

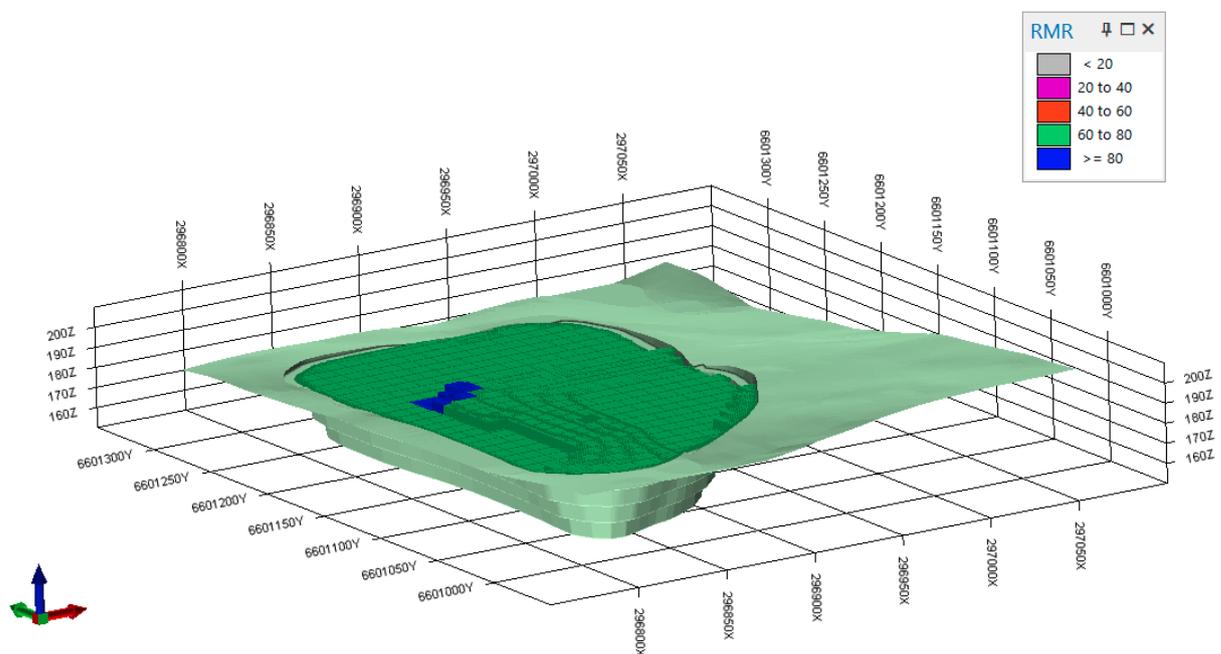
5.6 Modelagem geotécnica

Conforme descrito no tópico 4.5.2 e 4.5.2.1, os modelos geotécnicos foram elaborados através dos parâmetros levantados na caracterização geomecânica de testemunhos de sondagem e dados obtidos em ensaios para avaliação da resistência da rocha intacta que compõem o maciço rochoso. Estes parâmetros foram agrupados em faixas do maciço com o comportamento geomecânico similar, utilizando-se os critérios de classificação RMR (Bieniawski, 1989) e *Q-Slope* (Barton & Bar, 2015).

Nas figuras 20, 21 e 22 é possível visualizar o resultado das estimativas realizadas ao longo do modelo de blocos, para cada um dos parâmetros geomecânicos, filtrados somente os blocos dentro da cava proposta.

O primeiro modelo apresenta os valores de RMR (Fig. 20), subdivididos nas cinco classes descritas por Bieniawski (1989), cujos resultados são exibidos em detalhe na tabela 17, sendo possível identificar somente as classes I e II, uma vez que os blocos estimados em classe III ficaram fora dos limites da cava proposta.

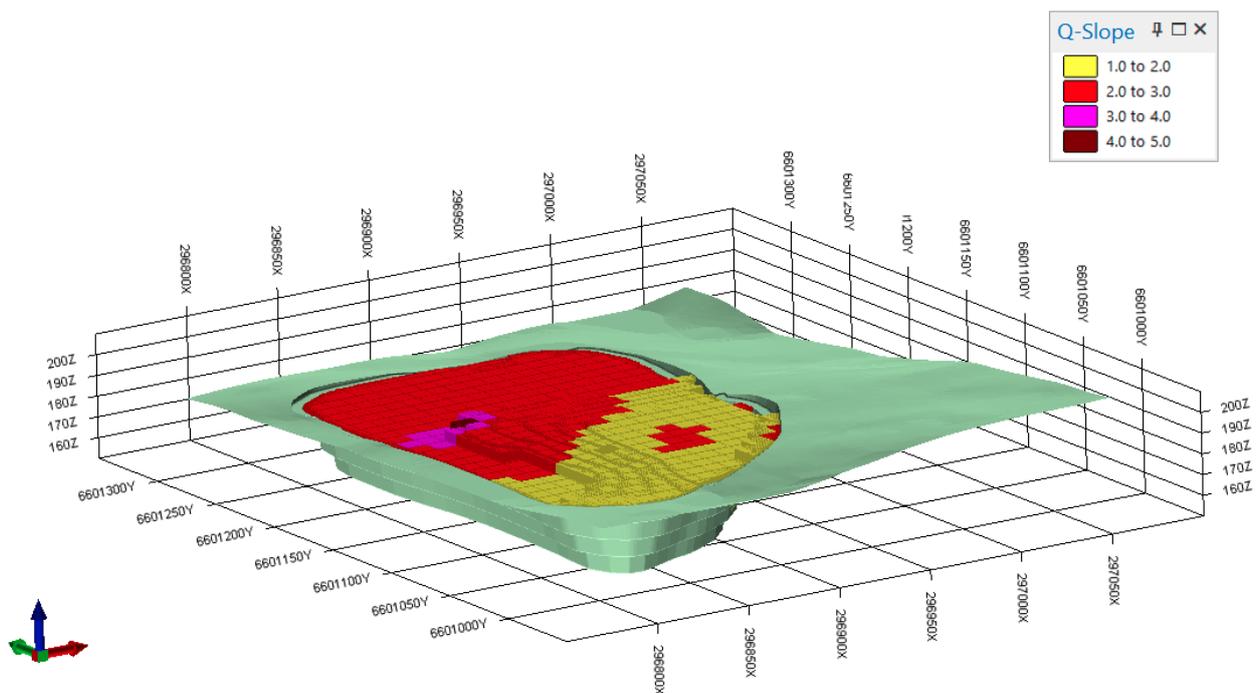
Figura 20 – Modelo de classes geomecânicas do índice RMR



Fonte: Autora

O modelo gerado para o *Q-Slope* (Fig. 21) apresenta os blocos constituídos pelos valores demonstrados na tabela 18 que variam de 0,9 a 4,3 a partir dos quais podem ser obtidos os valores de β .

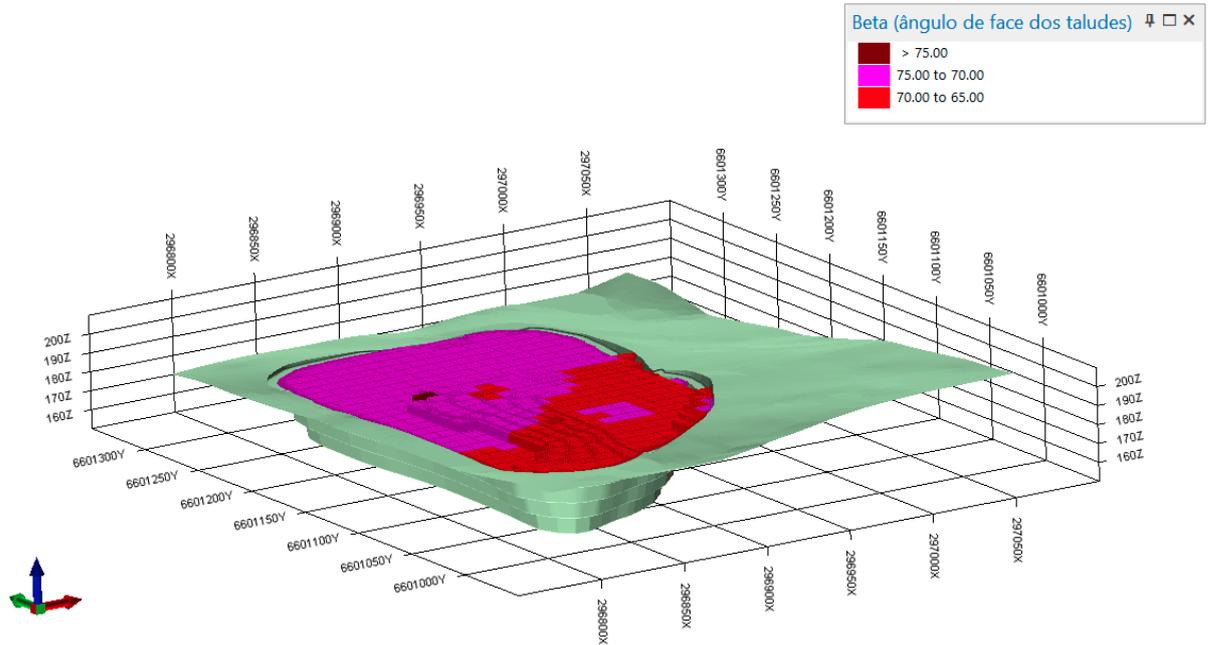
Figura 21 – Modelo de classes geomecânicas do *Q-Slope*



Fonte: Autora

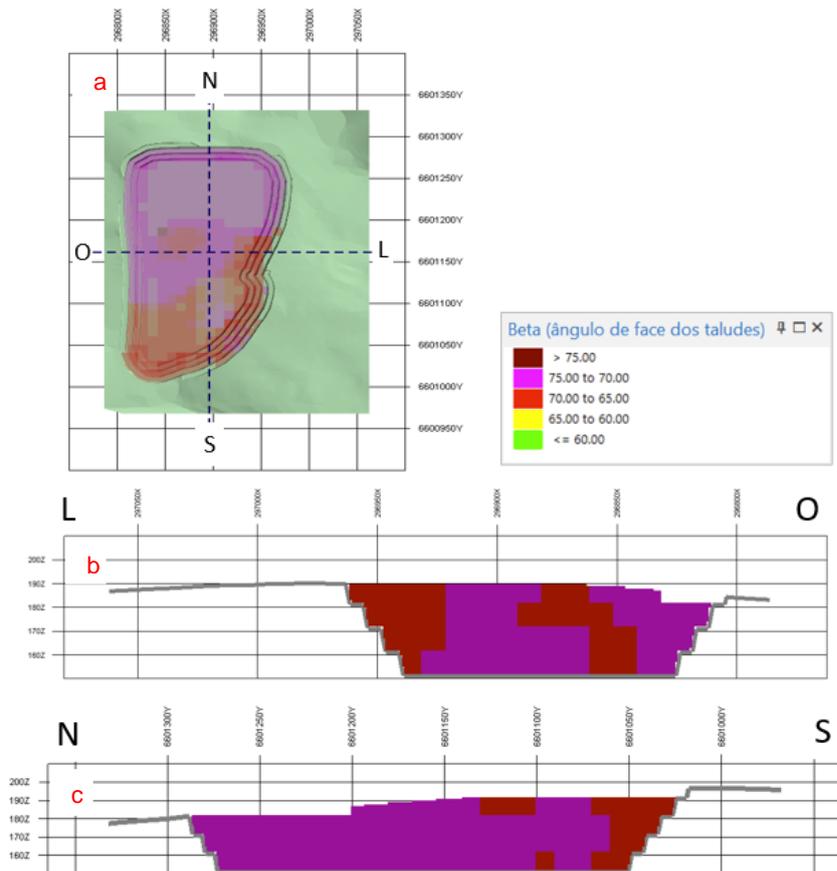
Por fim, o modelo que apresenta os valores de β (Fig. 22), propõe os ângulos de face dos futuros taludes, recortados para cava proposta, com valores que variam entre 64° e 78° , conforme a tabela 19. Para este modelo, também foram definidas duas seções (Fig. 23) para a melhor visualização dos ângulos, que se apresentam entre 70° e 75° , valores julgados razoáveis levando em consideração a penalização sofrida pelo maciço devido aos valores de RQD.

Figura 22 – Modelo indicando os ângulos máximos propostos para a face dos taludes na configuração da cava final proposta.



Fonte: Autora

Figura 23 – (a) Vista em planta do modelo dos ângulos de faces de taludes com as demarcações de seções leste-oeste e norte-sul; (b) Seção geológica leste-oeste; (c) Seção geológica norte-sul.



Fonte: Autora

6. CONCLUSÕES

Minas a céu aberto cumprem um papel de extrema importância para a indústria e economia mundial. Com a expansão de minas de grande porte, questões relacionadas a estabilidades passaram a ser tão pertinentes quanto questões econômicas, exigindo um planejamento mineiro subsidiado pela geotecnia, de modo a tornar o processo eficiente, seguro e lucrativo.

A obtenção de um modelo geológico-geotécnico, ainda que preliminar, possibilita a compreensão do comportamento espacial do maciço rochoso, de modo a representar a realidade da melhor forma possível, servindo como base para as mais variadas etapas do empreendimento.

Os estudos geotécnicos realizados com o objetivo de elaborar um modelo estão sujeitos a variabilidades, uma vez que o volume de dados necessários é considerado escasso, seja devido à falta de recursos em uma etapa inicial, difícil acesso ao maciço rochoso, dentre outros aspectos.

Frente a isto, este trabalho propôs um estudo preliminar do comportamento do maciço rochoso, utilizando ferramentas para classificações geomecânicas de modo a contribuir para o planejamento mineiro e servindo como guia de otimização para escavação.

Assim, com base na classificação RQD proposta por Deere (1963), o maciço foi classificado como de qualidade razoável, fraco a muito fraco, no entanto, conforme especificado ao longo do trabalho, este resultado pode ter sido penalizado devido a condição das sondagens, influenciando posteriormente os resultados do RMR e *Q-Slope*. A classificação RMR, proposta por Bieniawski (1973), definiu o maciço como Classe I e II (muito bom e bom) dentro dos limites da cava proposta e Classe III (regular) para maciço encontrado fora dos limites da cava, especificamente à sul. No Anexo – B é possível observar as fotografias dos testemunhos de sondagem.

Por fim, o *Q-Slope* definido por Barton & Bar (2015), indicou taludes estáveis quando utilizados valores de ângulo de face que variam de 64° a 68°. Estes valores são bastante conservadores, dado o conhecimento de outras minas que operam em maciços rochosos de condições semelhantes com ângulos maiores.

Para a construção dos modelos tridimensionais, principal objetivo deste trabalho, foi imprescindível o conhecimento dos parâmetros geomecânicos das litologias identificadas, levando em conta as particularidades de cada domínio

geotécnico, obtidas a partir da classificação citada acima. A representação dos modelos, sem dúvida, mostrou-se como o alicerce de todo o trabalho, pois a partir da modelagem, foi possível criar uma correlação entre as classes geomecânicas e as litologias presentes na área, possibilitando uma visualização global área de estudo, que auxilia no reconhecimento de zonas de maior confiabilidade, podendo contribuir para definição do posicionamento e previsibilidade da futura cava e seus respectivos taludes.

A respeito de algumas particularidades, é importante ressaltar que os modelos geotécnicos obtidos não apresentam informações de poropressão, permeabilidade e condutividade hidráulica, devido à ausência de informações deste nível. Além disso, não houve mapeamento estrutural, item que aumentaria a resolução do trabalho, uma vez que a presença de descontinuidades poderá ser a maior responsável por uma possível instabilidade dos taludes na área, pois ocorrem de maneira predominante.

Em suma, frente aos desafios aos quais foram submetidos o projeto, a exemplo da escassez de tempo de informações, os resultados foram satisfatórios e a metodologia foi aplicada adequadamente, permitindo uma compreensão generalista do comportamento do maciço. As vantagens do uso de modelagem geológico-geotécnica no planejamento das escavações são inquestionáveis, sendo possível fornecer uma previsão da qualidade do maciço rochoso antes que ocorra de fato a escavação, de modo que ao ocorrer, seja de maneira mais assertiva possível.

7. RECOMENDAÇÕES

Ao longo do desenvolvimento deste estudo, alguns fatores limitantes foram constatados, e para que haja aprimoramento da metodologia recomenda-se:

- Realizar uma pesquisa detalhada na área, agregando conhecimento e ainda se sugere a realização de métodos geofísicos, para melhor entendimento do comportamento do maciço rochoso;
- Uma vez que o presente trabalho se trata de uma pesquisa preliminar, construída através de um banco de dados escasso, propõe-se que seja realizada uma nova campanha de sondagem com recuperação de testemunho de modo a adensar a malha de informações;
- O bom resultado da classificação geomecânica depende essencialmente de uma adequada coleta de dados, para isso, é necessário que as sondagens sejam realizadas com rigor e descritas de maneira minuciosa, de modo a confeccionar um modelo de blocos com a maior representatividade possível;
- Para as estimativas no modelo de blocos, recomenda-se que seja utilizado aquele com a melhor reprodução das características originais do banco de dados;
- Deve ser realizado um mapeamento estrutural detalhado, para que haja assertividade em termos de prováveis mecanismos de ruptura, aumentando o número de informações à medida que o maciço rochoso seja exposto.
- Propõe-se a realização de ensaios tanto para a determinação de parâmetros da rocha intacta, quanto para as descontinuidades, levando em consideração os litotipos presentes;
- Tem-se que a presença de água seja um dos fatores que possam vir a promover instabilidades, para tanto, estudos hidrogeológicos são recomendados;
- Por fim, é necessário que se promova ações de conscientização da importância da descrição geotécnica de testemunhos de sondagem e modelagem geológica no incremento de segurança na futura operação.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA R.P. ET AL. **Evolution of a rift basin dominated by sub aerial deposits: The Guaritas Rift, Early Cambrian, Southern Brazil.** Sedimentary Geology 217, 30–51, 2019.

ASSIS, A.P. **Mecânica e engenharia de rochas.** Curso avançado. Publicação: G. AP-AA002/03. Universidade de Brasília – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / FT – Geotecnia, 2003.

AZEVEDO, I. C. D.; MARQUES, E. A. G. **Introdução à Mecânica das Rochas.** Viçosa: UFV, 2002.

BAR, Neil; BARTON, Nick. **The Q-slope method for rock slope engineering.** Rock Mechanics and Rock Engineering, v. 50, n. 12, p. 3307-3322, 2017.

BARTON, Nick; BAR, Neil. **Introducing the Q-slope method and its intended use within civil and mining engineering projects.** In: ISRM Regional Symposium-EUROCK 2015. OnePetro, 2015.

BARTON, N. & Grimstad, E. **Forty years with the Q-system in Norway and abroad.** Fjellsprengningsteknikk, Bergmekanikk, Geoteknikk 4.1–4.25: 25p, 2014.

BARTON, N., LIEN, R. & LUNDE, J. **Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support.** Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering, 6: 189–236, 1974.

BASEI M.A.S., Campos Neto M.C., Castro N.A., Nutman A.P., Wemmer M.T., Yamamoto M.T., Hueck M., Osako L., Siga Jr. O., Passarelli C.R. **Tectonic evolution of the Brusque Group, Dom Feliciano belt, Santa Catarina.** Journal of South American Earth Sciences, 32:324-350, 2011.

BIENIAWSKI Z. T. **Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering.** Interscience, John Wiley & Sons, New York, 272 p, 1989.

BIENIAWSKI Z. T. **Classification of rock masses for engineering: the RMR system and future trends.** In: Hudson J. A. (ed.), Pergamon Press, 3: 553- 573, 1993.

BIENIAWSKI, Z. T. **Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling.** In: Proc. 3rd Int. Congress on Rock Mechanics, 1974.

BIENIAWSKI, Z.T. **Engineering classification of jointed rock masses.** Trans. South Afr. Inst. Civ. Engrs, 15: 335-344, 1973.

BIENIAWSKI, Z.T. **Rock mass classification in rock engineering.** In: Bieniawski Z.T., ed., Proceedings of the symposium Exploration for rock engineering, Cape Town, Balkema, 1: 97 106, 1976.

BIENIAWSKI, Z.T. **The geomechanics classification in rock engineering applications.** Proceedings of the 4th Congress International Society for the Rock Mechanics, Montreux, 2: 41-48, 1979.

BITENCOURT M.F. & NARDI L.V.S. **Tectonic setting and sources of magmatism related to the Southern Brazilian Shear Belt.** Revista Brasileira de Geociências, 30:186-189, 2000.

BORBA A.W., MIZUSAKI A.M.P., SILVA D.R.A., NORONHA F.L., CASAGRANDE J. **Provenance of the Neoproterozoic Maricá Formation (Sul-rio-grandense Shield, Southern Brazil): petrographic and Sm-Nd isotopic constrains.** Gondwana Research, 9:464-474, 2006.

BRADY, Barry HG; BROWN, Edwin T. **Rock mechanics: for underground mining.** Springer science & business media, 1993.

BRAGA NETO, José Assunção. **Classificação geomecânica de taludes de mineração a céu aberto.** 2019.

CAVALCANTE, RÔMULO FONTENELE. **Análise de estabilidade de taludes de mineração por métodos do equilíbrio limite e tensão-deformação.** Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 156p, 1997.

CHEMALE JR. F. **Evolução Geológica do Escudo Sul-Rio-Grandense.** In: Holz M., De Ros L.F. (eds.) Geologia do Rio Grande do Sul. Editora UFRGS, Porto Alegre, p. 13-52, 2000.

CHEMALE JR. F., MALLMANN G., BITENCOURT M.F., KAWASHITA K. **Time constraints on magmatism along the Major Gercino Shear Zone, southern Brazil: implications for West Gondwana reconstruction.** Gondwana Research, 22:184-199, 2012.

CHEMALE JR., F. et al. **Stratigraphy and Tectonism of Precambrian to Early Paleozoic Units.** XVIII Acta Geologica Leopoldensia, 42, 5-117, 1995.

CONTI, Alexandre et al. **Estudo de Caso–Metodologia para Avaliação da Estabilidade de Taludes Rochosos em uma Mina a Céu Aberto Localizada no Estado de Goiás.** 2014.

COWAN, E. J. et al. **Practical implicit geological modelling.** In: **Fifth international mining geology conference.** Australian Institute of Mining and Metallurgy Bendigo, Victoria. p. 17-19. 2003.

CURI, Adilson. **Minas a céu aberto: planejamento de lavra.** Oficina de Textos, 2014.

DAL BOSCO, Lucas Luiz. **Análise de estabilidade de taludes e setorização de cava em uma mina de mármore.** 92 p. 2019.

DE SOUZA, Gustavo Soares et al. **Krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um argissolo**. Scientia agraria, v. 11, n. 1, p. 073-081, 2010.

DE SOUZA, Gustavo Soares et al. **Krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um argissolo**. Scientia agraria, v. 11, n. 1, p. 073-081, 2010.

DEERE, D. U. **Technical description of cores for engineering purposes**. Rock Mech. Eng. Geol. 1, 16–22, 1963.

DEERE, D. U. **Rock Quality Designation (RQD) After Twenty Years**. National Technical Information Service. Gainesville, Florida. 22 p, 1989.

FERRAZ, Erick Seliprandy et al. **Classificação geomecânica e análise de estabilidade de maciço rochoso**. REINPEC-Revista Interdisciplinar Pensamento Científico, v. 5, n. 3, 2019.

FERNANDES, L.A., Tommasi, A., Porcher, C.C. **Deformation patterns in the southern Brazilian branch of the Dom Feliciano Belt, a reappraisal**. Journal of South American Earth Sciences, p 77-96, 1992.

FERRAZ, Erick Seliprandy et al. CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA E ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE MACIÇO ROCHOSO. **REINPEC-Revista Interdisciplinar Pensamento Científico**, v. 5, n. 3, 2019.

FLACH, P. **Machine Learning: The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data**. 1st ed. Cambridge University Press, Cambridge. 2012.

FRAGOSO-CESAR, A.R.S. **O Cráton do Rio de La Plata e o Cinturão Dom Feliciano no Escudo Uruguaio-Sul-Rio-Grandense**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Anais... SBG, 31, Camboriú, 5: 2879-2891, 1980.

GAUNA, Fernanda Prestes et al. **Análise estrutural e petrográfica de milonitos a SW do Domo de Santana, Santana da Boa Vista, RS.** 2018.

GONÇALVES, Ítalo Gomes; KUMAIRA, Sissa; GUADAGNIN, Felipe. **A machine learning approach to the potential-field method for implicit modeling of geological structures.** Computers & Geosciences, v. 103, p. 173-182, 2017.

GOÑI, Juan Carlos. **Origine des roches ultrabasiques et serpentineuses du précambrien de Rio Grande do Sul (Brésil): mode de gisement et minéralisations.** Universidade do Rio Grande do Sul, Escola de Geologia, 1962.

GOODMAN, R.E. **Introduction to Rock Mechanics.** John Wiley & Sons, New York, USA, 251 p, 1989.

GRIMSTAD, E. & Barton, N. **Updating of the Q-system for NMT.** Proc. International Symposium on Sprayed Concrete, Fagernes, 22-26 October 1993: Norwegian Concrete Association: 46–66, 1993.

HARTMANN L.A., LEITE J.A.D., MC NAUGHTON N.J., SANTOS J.O.S. **Deepest exposed crust of Brazil–SHRIMP establishes three events.** Geology, 27:947-950, 1999.

HARTMAN, Howard L.; MUTMANSKY, Jan M. **Introductory mining engineering.** John Wiley & Sons, 2002.

HARTMANN, L. A. et al. **Advances in SHRIMP geochronology and their impact on understanding the tectonic and metallogenic evolution of southern Brazil.** Australian Journal of Earth Sciences, v. 47, n. 5, p. 829-844, 2000.

HARTMANN, L. A. et al. **Time frame of 753–680 Ma juvenile accretion during the São Gabriel orogeny, southern Brazilian Shield.** Gondwana Research, v. 19, n. 1, p. 84-99, 2011.

HARTMANN, L. A., CHEMALE JR., F, PHILIPP, R. P. **Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. In: Ianuzzi, R.; Frantz, J.C. (Org.). 50 anos de Geologia no Rio Grande do Sul.** Instituto de Geociências. Contribuições. 1ª ed. Porto Alegre: Editora Comunicação e Identidade, CIGO. IG-UFRGS, v. 1, p. 97-123. 2007.

HASENACK, H.; Weber, E.(org.) **Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul - escala 1:50.000.** Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia. 2010.

HASUI, Y.; OLIVEIRA, MAF de. **Província Mantiqueira–Setor Central.** O Pré-Cambriano do Brasil, São Paulo, Edgard Blücher, p. 308-344, 1984.

HOEK, E. **Strength of rock and rock masse.** 1994.

HOEK, Evert; KAISER, Peter K.; BAWDEN, William Frederick. **Support of underground excavations in hard rock.** CRC Press, 1995.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapeamento Sistemático Brasileiro.** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais>>. Acesso em: 20 out. 2020.

ISRM – International Society for Rock Mechanics. **Suggested method for determining point load strength.** Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr., 1985. 22: 51-60.

ISRM. **The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006.** International Soc. for Rock Mechanics, Commission on Testing Methods, 2007.

ISRM. **Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Mass.** Grã Bretanha, v. 15. 319 - 368 p, 1978.

LUSA, Marcelo; PHILIPP, Ruy Paulo; NARDI, Lauro Valentim Stoll. **Geoquímica e petrologia dos metagranitos do Complexo Encantadas, Santana da Boa Vista, (RS): a evolução de uma margem continental ativa no Paleoproterozóico**. Revista Brasileira de Geociências, v. 40, n. 2, p. 151-166, 2010.

MESQUITA, João Batista de. **Maçios rochosos em projetos hidrelétricos: proposta de classificação geomecânica**. 2008.

MÜLLER, E. M.; Diedrich, C; Costa, J. F. C. L. **Análise da Simulação Multiponto para a Geração de Modelos Geológicos Complexos**. In: VII Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto e Mina Subterrânea, 2012, Belo Horizonte. Anais, 2012.

NAHASS, Samir et al. **Cálcario Agrícola no Brasil**. Centro de tecnologia Mineral, p. 79. 2003.

OLIVEIRA, Antonio Manoel dos Santos et al. **Geologia de engenharia**. 1998.

OTOYA, Carlos Enrique Paredes. **Modelagem Geológica e Estrutural 3D e Análise de Estabilidade de Taludes 2D em Mina a Céu Aberto Pelo Método SRM (Synthetic Rock Mass)**. Tese de Doutorado. PUC-Rio. 2011.

PAIM, Paulo Sérgio Gomes; CHEMALE JR, Farid; LOPES, R. da C. **A bacia do Camaquã**. Geologia do Rio Grande do Sul, p. 231-274, 2000.

PAIM, Paulo Sergio Gomes. **Depositional systems and palaeogeographical evolution of the Camaqua and Santa Barbara Basins, Brazil**. 1994. Tese de Doutorado. University of Oxford.

PHILIPP, Ruy Paulo; MACHADO, Rômulo. **The late Neoproterozoic granitoid magmatism of the Pelotas Batholith, southern Brazil**. Journal of South American Earth Sciences, v. 19, n. 4, p. 461-478, 2005.

PHILIPP, Ruy Paulo et al. **SHRIMP U-Pb age and high temperature conditions of the collisional metamorphism in the Várzea do Capivarita Complex: implications**

for the origin of Pelotas Batholith, Dom Feliciano Belt, southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 66, p. 196-207, 2016.

PHILIPP, Ruy P.; LUSA, Marcelo; NARDI, Lauro VS. Petrology of dioritic, tonalitic and trondhjemitic gneisses from Encantadas Complex, Santana da Boa Vista, southernmost Brazil: Paleoproterozoic continental-arc magmatism. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 80, n. 4, p. 735-748, 2008.

PHILIPP, R. P.; MACHADO, R.; CHEMALE JR, F. Reavaliação e novos dados geocronológicos sobre o Batólito Pelotas: implicações petrogenéticas e idade das zonas de cisalhamento. **Boletim do Instituto de Geociências da USP**, v. 3, p. 71-84, 2003.

PHILIPP, Ruy Paulo; MASSONNE, Hans-Joachim; DE CAMPOS, Roberto Sacks. Peraluminous leucogranites of the Cordilheira Suite: A record of Neoproterozoic collision and the generation of the Pelotas Batholith, Dom Feliciano Belt, Southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 43, p. 8-24, 2013.

PINTA LÓPEZ, Mónica Elizabeth. **Análisis de estabilidad de los taludes en la cantera Tanlahua, parroquia San Antonio de Pichincha.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Quito: UCE.

PORCHER, C. C. **Caracterização das condições de fluxo em uma zona de cisalhamento tangencial na região de Santana da Boa Vista (RS).** Dissertação de Mestrado. UFRGS, Porto Alegre, 192 pg. 1992.

RAZZERA. **Relatório final de Pesquisa Mineral.** Processo minerário: 811.066/2017. Caçapava do Sul: 2021. 165p. Não publicado.

REZENDE, Klinger Senra. **Correlações entre propriedades geomecânicas para anfibólitos e xistos do sul do estado de Minas Gerais, Brasil.** 2016.

ROCHA, Suelen Silva et al. **Estudo Comparativo de Ferramentas Computacionais para Modelagem Geométrica e cubagem de Maciços Rochosos**. HOLOS, v. 2, p. 60-77, 2018.

SAALMANN, K. et al. **Multiple accretion at the eastern margin of the Rio de la Plata craton: the prolonged Brasiliano orogeny in southernmost Brazil**. International Journal of Earth Sciences, v. 100, n. 2-3, p. 355-378, 2011.

SAALMANN, K.; HARTMANN, L. A.; REMUS, M. **Tectonic evolution of two contrasting schist belts in southernmost Brazil: a plate tectonic model for the Brasiliano Orogeny**. International Geology Review, v. 47, n. 12, p. 1234-1259, 2005.

SAALMANN, K.; REMUS, M. V. D.; HARTMANN, L. A. **Tectonic evolution of the Neoproterozoic São Gabriel block, southern Brazil: constraints on Brasiliano orogenic evolution of the Rio de la Plata cratonic margin**. Journal of South American Earth Sciences, v. 21, n. 3, p. 204-227, 2006.

SERRA JUNIOR, E.; OJIMA, L. M. **Caracterização e classificação de maciços rochosos**. OLIVEIRA, AM; BRITO, SNA Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, p. 211-226, 1998.

SOLIANI JÚNIOR, Enio. **Os dados geocronológicos do Escudo Sul-rio-grandense e suas implicações de ordem geotectônica**. 1986. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SOUZA, Michele Márcia de. **Estudos geotécnicos para determinação e viabilização de cavas operacionais e finais estudo de caso: cava três buracos, Goiás**. 2019.

TRAVASSOS, Rodrigo Piraine. **Interpretação estrutural regional do escudo sul-rio-grandense-Rio Grande do Sul-Brasil, com base em aeromagnetometria**. 2014.

VARELA, James J. et al. **Aplicação do teste de carga pontual modificado para seleção de britadores para minério de ferro**. HOLOS, v. 7, p. 19-26, 2015.

VATANABLE, Henri Yudi. **A geoestatística como ferramenta para estimar o rock mass rating em modelos tridimensionais**. 2018.

VILCA, Yulder Cardenas et al. **Avaliação Geotécnica para Posicionamento e Definição do Projeto de Perfuração de Slot em Realces do Tipo Sublevel stoping**. Estudo de Caso: Mina Córrego do Sítio. 2016.

VOGBR, HÍDRICOS Recursos. **Modelagem Geomecânica 3D: Aplicações e Vantagens da Modelagem para Mineração**. 2014.

VOLLGGER, Stefan A.; CRUDEN, Alexander R.; COWAN, J. E. **3D implicit geological modeling of a gold deposit from a structural geologist's point of view**. In: 12th SGA Biennial Meeting-Mineral Deposit Research for a High-Tech World. SGA, Uppsala, Sweden, p. 1-4. 2013.

VOLLGGER, S.A., Cruden, A.R., Ailleres, L., Cowan, E.J. **Regional dome evolution and its control on ore-grade distribution: Insights from 3D implicit modelling of the Navachab gold deposit**. Namib. Ore Geol. Rev. 69. 2015.

WYLLIE, Duncan C.; MAH, Chris. **Rock slope engineering**. CRC Press, 2004.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, PMB. Geoestatística. **Conceitos e Aplicações: Editora Oficina de Textos, 215 pp**, 2013.

YAMAMOTO, J.K. **Krigagem ordinária: Método de amplo uso**. Disponível em: <<https://geokrigagem.com.br/krigagem-ordinaria/>> Acesso em: 16 nov. 2020.

ZEA HUALLANCA, Rolando Enrique. **Mecanismos de ruptura em taludes altos de mineração a céu aberto**. 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

APÊNDICE A – Resultados do Ensaio de Carga Pontual



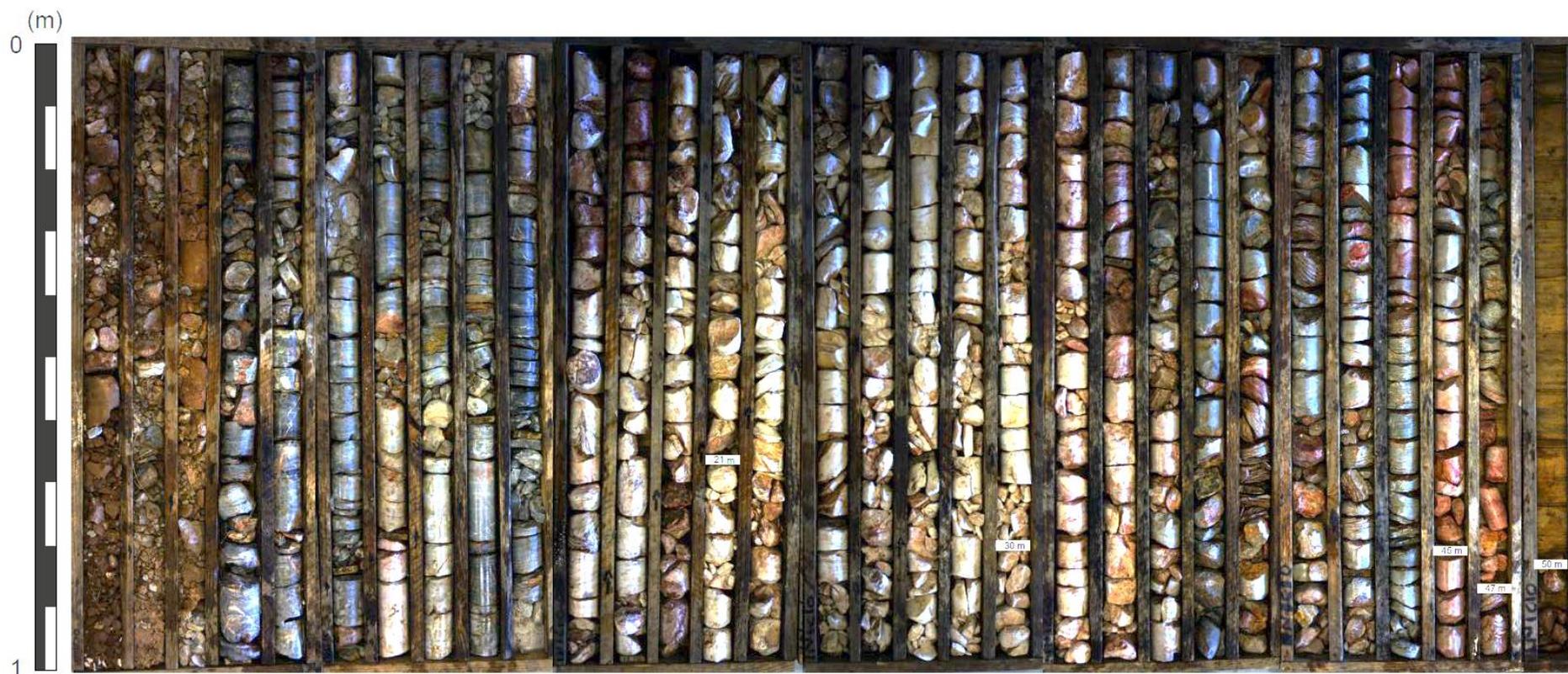
Identificação				Dimensões					Cálculo da Resistência a Compressão (Mpa)					
Ensaio		Corpo de Prova	OBS	Altura (cm)	Largura (cm)	Comp (cm)	A (Dia*Larg)	De ² (cm ²)	Pressão (kgf/cm ²)	Força-P (kgf)	Is (P/De ²) (kgf/cm ²)	F (De/50)	Is50 (F*Is) (MPa)	Resist Comp (MPa)
MA1	MC	Amostra de mão	Diametral	7,65	5,74	7,68	43,91	55,91	99,00	1122,66	20,08	0,43	0,84	18,41
MA2	MC	Amostra de mão	Axial	4,27	4,36	7,14	18,62	23,70	72,90	826,69	34,88	0,35	1,20	26,36
MA3	MISTO	Amostra de mão	Axial	2,80	5,09	5,27	14,25	18,15	155,00	1757,70	96,86	0,33	3,13	68,94
MA4	QZT	Amostra de mão	Axial	4,96	8,24	8,94	40,87	52,04	1000,00	11340,00	217,92	0,42	8,94	196,60
A1	MB	Testemunho	Diametral	5,02	5,02	9,10	25,20	32,09	68,40	775,66	24,17	0,38	0,89	19,56
A2	MB	Testemunho	Diametral	4,74	4,74	8,22	22,47	28,61	99,10	1123,79	39,28	0,37	1,41	30,98
A3	MC	Testemunho	Diametral	4,75	4,75	9,49	22,56	28,73	93,30	1058,02	36,83	0,37	1,32	29,07
A4	MC	Testemunho	Diametral	5,02	5,02	8,44	25,20	32,09	50,60	573,80	17,88	0,38	0,66	14,47
A5	MISTO	Testemunho	Axial	7,22	5,44	5,44	39,28	50,01	175,70	1992,44	39,84	0,41	1,62	35,62
A5	MISTO	Testemunho	Diametral	5,44	5,44	7,22	29,59	37,68	71,00	805,14	21,37	0,39	0,81	17,93
A6	MC	Testemunho	Axial	4,93	5,47	5,47	26,97	34,34	134,40	1524,10	44,39	0,38	1,66	36,47
A7	MC	Testemunho	Axial	2,55	4,77	4,77	12,16	15,49	122,80	1392,55	89,92	0,32	2,81	61,76
A8	MISTO	Testemunho	Axial	4,30	4,74	4,74	20,38	25,95	150,00	1701,00	65,55	0,36	2,30	50,56
A9	MC	Testemunho	Axial	3,65	4,73	4,73	17,26	21,98	80,20	909,47	41,38	0,34	1,40	30,75
							Médias		169,46	1921,64	56,45		2,07	45,53

ANEXO A – Amostras ensaiadas.



ANEXO B – Testemunhos de sondagem.

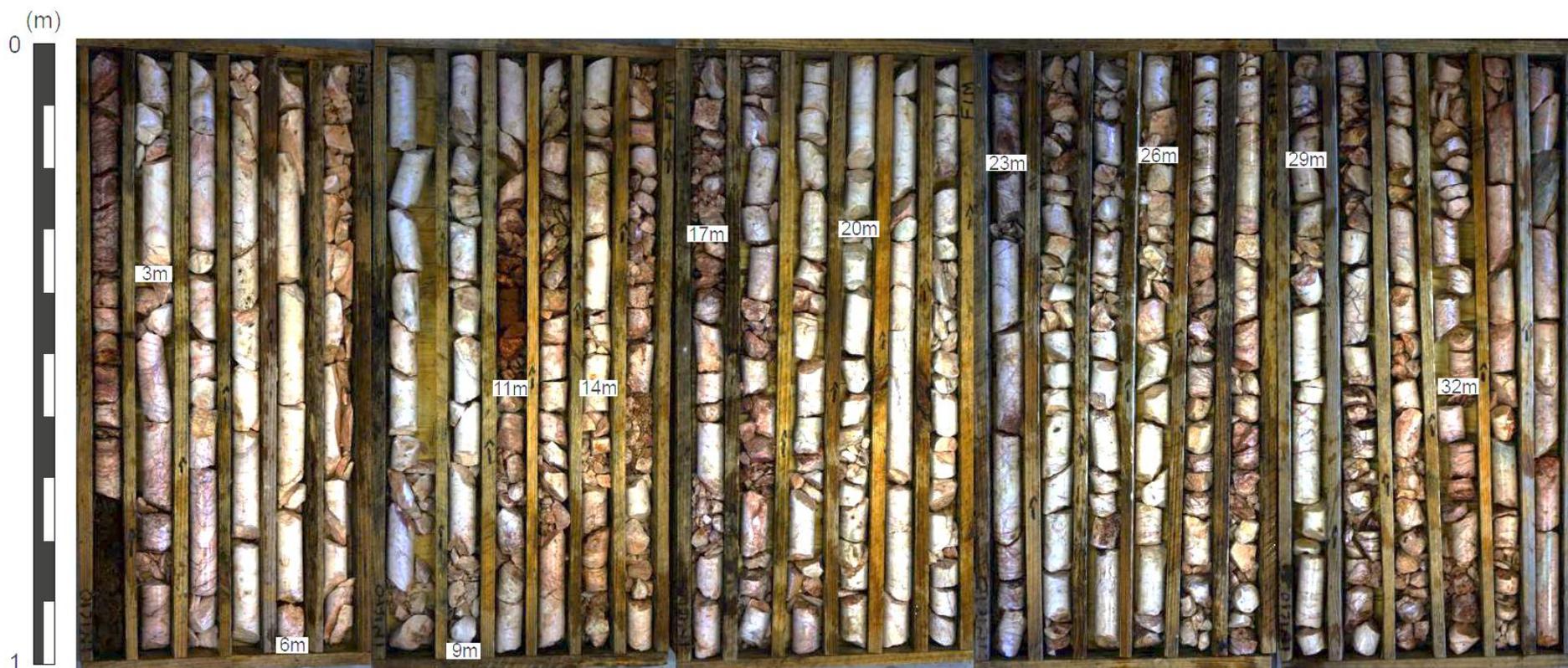
FURO 01



FURO 02



FURO 03



CONTINUAÇÃO DO FURO 03

