

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**PAULA BALBINO SAMPAIO**

**ANÁLISE GEOTÉCNICA E GEOFÍSICA DE ESTABILIDADE DE TALUDES EM  
UMA MINA NA REGIÃO DE CAÇAPAVA DO SUL - RS**

**Caçapava do Sul**

**2022**

**PAULA BALBINO SAMPAIO**

**ANÁLISE GEOTÉCNICA E GEOFÍSICA DE ESTABILIDADE DE TALUDES EM  
UMA MINA NA REGIÃO DE CAÇAPAVA DO SUL - 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: Prof. Dr. José Waldomiro Jiménez Rojas.

Coorientador: Geól. Bruno Teixeira Campos Sousa

**Caçapava do Sul**

**2022**

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) .

S324a Sampaio, Paula

Análise Geotécnica e Geofísica de estabilidade de taludes  
em uma mina na região de Caçapava do Sul - RS / Paula Sampaio.  
65 p.

Tese(Doutorado)-- Universidade Federal do Pampa, GEOLOGIA,  
2022.

"Orientação: José Waldomiro Jiménez Rojas".

1. Geotécnica. 2. Análise de Estabilidade de talude. 3.  
geofísica. I. Título.

**PAULA BALBINO SAMPAIO**

**ANÁLISE GEOTÉCNICA E GEOFÍSICA DE ESTABILIDADE DE TALUDES EM UMA MINA NA  
REGIÃO DE CAÇAPAVA DO SUL - 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.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em:

21 de março de 2022.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. José Waldomiro Jiménez Rojas.  
Orientador  
UNIPAMPA

---

Prof. Ms. Diogo Peixoto Cordova  
UNIPAMPA

---

Geofísico Ms. Lenon Ilha  
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **LENON MELO ILHA, Técnico de Laboratório Área**, em 25/03/2022, às 08:52, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **DIOGO PEIXOTO CORDOVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/03/2022, às 09:58, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



Assinado eletronicamente por **JOSE WALDOMIRO JIMENEZ ROJAS, Diretor(a) Campus Caçapava do Sul**, em 25/03/2022, às 10:52, 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](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0764944** e o código CRC **E2ED2256**.

---

Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul

Dedico esse trabalho aos meu pais,  
Andréia e Paulo.

## RESUMO

A geotécnica busca determinar as propriedades geomecânicas dos solos e das rochas, visando solucionar problemas de engenharia e compreender o comportamento do material perante uma ação antrópica. As minas a céu aberto são responsáveis pela maior parte da produção mineral brasileira e apresentam taludes na sua estrutura, que são quaisquer superfícies inclinadas de solo ou material rochoso, logo, podem ser naturais ou artificiais. Nessa perspectiva, entendemos que a estabilidade dos taludes está relacionada ao seu fator de segurança, o qual é calculado a partir da caracterização geomecânica do solo e modelagem numérica. A determinação desse fator é fundamental na prevenção de desabamentos, sendo baseado no método de equilíbrio limite e no critério de Mohr-Coulomb. Partindo do exposto, este trabalho busca correlacionar conhecimentos geológicos, geofísicos e geotécnicos a partir da aplicação de métodos, como o scanline e eletrorresistividade e uso de softwares específicos visando a definição do fator de segurança de uma mina a céu aberto de mármore na região de Caçapava do sul – RS. O modelo de talude foi proposto com auxílio do software Slide visando um fator de segurança de no mínimo 1,3, como é recomendado na classificação das normas da ABNT NMR-02, item 2.4. Foram realizados múltiplos cálculos para o Fator de Segurança e o menor valor obtido foi de 6,027. O valor obtido a partir da modelagem, é considerado satisfatório.

Palavras-chave: scanline, eletrorresistividade, RQD, RMR, fator de segurança, análise cinemática.

## ABSTRACT

Geotechnics seeks to determine the geomechanical properties of soils and rocks in order to solve engineering problems and understand the behavior of the material before an anthropic action. Open pit mines are responsible for most of the Brazilian mineral production and this mining method has slopes in its structure. Slope is any sloping surface of soil or rock material; it can be natural or artificial. Slope stability is related to its safety factor, which is calculated from the geomechanical characterization of the soil and numerical modeling. The determination of the safety factor is fundamental in the prevention of landslides, it is based on the Limit Equilibrium method and on the Mohr-Coulomb criterion. This work seeks to correlate geological, geophysical, and geotechnical knowledge through the application of methods such as scanline and resistivity tests, and the use of specific software to define the safety factor of a marble open-pit mine in the region of Caçapava do Sul – RS. The slope model will be proposed with the aid of the software Slide aiming a minimum safety factor of 1.3, as recommended is the classification of the standards of ABNT NMR – 02 item 2.4. Multiple calculations were performed for the Safety Factor and the lowest value obtained was 6,026. The value obtained from the modeling is considered satisfactory.

Keywords: Scanline, resistivity teste, RQD, RMR, safety factor, kinematic analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da área. ....	18
Figura 2 - Mapa Geológico de Caçapava do Sul - RS.....	20
Figura 3 - Fotografia da rocha in situ.....	22
Figura 4: Ilustração da geometria geral dos taludes.....	23
Figura 5 - Classificação da rugosidade. ....	27
Figura 6 - Equipamento martelo de Schmidt. ....	30
Figura 7 - Ábaco de Miller. ....	31
Figura 8 - Esquema ilustrativo de ruptura planar.....	35
Figura 9 - Esquema ilustrativo de ruptura em cunha.....	36
Figura 10 - Estereograma ilustrando ruptura em cunha. ....	36
Figura 11 – Sistema de tombamento de blocos. ....	37
Figura 12 - Esquema ilustrativo de tombamento de blocos.....	37
Figura 13 - Esquema ilustrativo de tombamento flexural. ....	38
Figura 14: Esquema detalhado método de Bishop.....	42
Figura 15: Representação esquemática do método da eletrorresistividade.....	44
Figura 16 - Fluxograma das etapas do trabalho.....	47
Figura 17 - Fotografia do Scanline 1. ....	48
Figura 18 - Ilustração da geometria do arranjo Dipolo-Dipolo. ....	49
Figura 19 - (A) Equipamento Syscal Pro; (B) Eletrodos. ....	50
Figura 20 - Ábaco de Miller. ....	51
Figura 21 - Perfil de eletrorresistividade.....	55
Figura 22 - Estereogramas dos Scanlines. ....	56
Figura 23 - Estereogramas dos mecanismos de ruptura do Scanline 3.....	57
Figura 24-Estereogramas dos mecanismos de ruptura do Scanline 4.....	58
Figura 25- Estereogramas dos mecanismos de ruptura do Scanline 5.....	58
Figura 26- Estereogramas dos mecanismos de ruptura do Scanline 6.....	59
Figura 27- Modelo do perfil do talude analisado.....	60
Figura 28- Fator de Segurança obtido no Slide.....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do espaçamento em mm.....	25
Tabela 2 - Classificação da persistência. ....	26
Tabela 3 - Classificação dos tipos de aberturas.....	28
Tabela 4 - Classificação das descontinuidades não preenchidas. ....	29
Tabela 5 - Classificação das descontinuidades preenchidas. ....	29
Tabela 6 - Classificação RQD para os maciços rochosos.....	32
Tabela 7 - Classificação de Parâmetros RMR Scanline.....	33
Tabela 8 - Tabela de ajuste RMR.....	34
Tabela 9 - Classificação do maciço rochoso. ....	34
Tabela 10 - Tabela da classificação dos níveis de segurança e seus critérios. ....	39
Tabela 11 - Correlação dos níveis de segurança e os fatores de segurança mínimos estabelecidos. ....	40
Tabela 12 - Classificação maciço.....	53
Tabela 13 - Fator corretivo do RMR. ....	54
Tabela 14 - Classificação final do maciço rochoso.....	54
Tabela 15 - Tabela de parâmetros Dips. ....	56
Tabela 16 - Tabela de Parâmetros SLIDE .....	59

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 OBJETIVO GERAL.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>16</b>
<b>3 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>17</b>
<b>4 ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>18</b>
<b>4.1 LOCALIZAÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>4.2 GEOLOGIA REGIONAL .....</b>	<b>19</b>
<b>4.3 GEOLOGIA LOCAL.....</b>	<b>21</b>
<b>5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>23</b>
<b>5.1 TALUDES .....</b>	<b>23</b>
<b>5.2 DESCONTINUIDADES .....</b>	<b>23</b>
<b>5.2.1 ORIENTAÇÃO E ATITUDE .....</b>	<b>24</b>
<b>5.2.2 ESPAÇAMENTO .....</b>	<b>25</b>
<b>5.2.3 PERSISTÊNCIA .....</b>	<b>26</b>
<b>5.2.4 RUGOSIDADE .....</b>	<b>26</b>
<b>5.2.5 ABERTURA E PREENCHIMENTO.....</b>	<b>27</b>
<b>5.2.7 RESISTÊNCIA .....</b>	<b>30</b>
<b>5.3 SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS .....</b>	<b>31</b>
<b>5.3.1 RQD .....</b>	<b>32</b>
<b>5.3.2 RMR .....</b>	<b>33</b>

<b>5.4 ANÁLISE CINEMÁTICA DE TALUDES ROCHOSOS.....</b>	<b>34</b>
<b>5.4.1 RUPTURA PLANAR.....</b>	<b>35</b>
<b>5.4.2 RUPTURA EM CUNHA.....</b>	<b>35</b>
<b>5.4.3 RUPTURA POR TOMBAMENTO.....</b>	<b>37</b>
<b>5.5 ESTABILIDADE DE TALUDES.....</b>	<b>38</b>
<b>5.5.1 FATOR DE SEGURANÇA.....</b>	<b>39</b>
<b>5.5.2 PARÂMETROS DE ESTABILIDADE.....</b>	<b>40</b>
<b>5.6 TEORIA DO EQUILÍBRIO LIMITE EM MÉTODOS DE ANÁLISE.....</b>	<b>41</b>
<b>5.6.1 MÉTODO DE BISHOP.....</b>	<b>41</b>
<b>5.7 GEOFÍSICA.....</b>	<b>43</b>
<b>5.7.1 ELETORRESISTIVIDADE.....</b>	<b>43</b>
<b>5.8 <i>SOFTWARES</i>.....</b>	<b>45</b>
<b>6 METODOLOGIA.....</b>	<b>47</b>
<b>6.1 SCANLINE.....</b>	<b>48</b>
<b>6.2 CAMINHAMENTO ELÉTRICO.....</b>	<b>49</b>
<b>6.3 ENSAIO ESCLEROMÉTRICO.....</b>	<b>51</b>
<b>7 RESULTADOS.....</b>	<b>53</b>
<b>7.1 RQD – ROCK QUALITY DESIGNATION.....</b>	<b>53</b>
<b>7.2 RMR – ROCK MASS RATING.....</b>	<b>53</b>
<b>7.3 ANÁLISE GEOFÍSICA.....</b>	<b>54</b>
<b>7.4 ANÁLISE CINEMÁTICA.....</b>	<b>55</b>
<b>7.4.1 SCANLINE 3.....</b>	<b>57</b>

<b>7.4.2 SCANLINE 4 .....</b>	<b>57</b>
<b>7.4.3 SCANLINE 5 .....</b>	<b>58</b>
<b>7.4.4 SCANLINE 6 .....</b>	<b>58</b>
<b>7.5 FATOR DE SEGURANÇA .....</b>	<b>59</b>
<b>8 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>61</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A Geologia é a ciência que estuda o planeta como um todo e, como toda ciência, interliga-se a outros domínios, por exemplo, com a geologia de engenharia (geotécnica) e a geofísica. A geotécnica busca determinar as propriedades geomecânicas dos solos e das rochas, a fim de solucionar problemas de engenharia e compreender o comportamento do material perante uma ação antrópica.

A importância desse domínio científico fica evidente quando consideramos acidentes de grande escala, como o rompimento de uma barragem, e até mesmo os acidentes em menor escala, seria o caso dos desabamentos de prédios e encostas, que poderiam ser evitados a partir de estudos geotécnicos apropriados. A estabilidade de taludes é um objeto de estudo comum entre engenheiros e geólogos, além de ser muito importante para a segurança, produtividade e vida útil de uma mina (LINHARES,2011).

Talude é qualquer superfície inclinada de solo ou material rochoso, pode ser natural ou artificial (GERSCOVICH, 2009). Para determinar sua estabilidade são necessários estudos analíticos, como caracterização geomecânica do maciço rochoso, definição da configuração geométrica e estudos numéricos, em que, a partir dos dados adquiridos e com auxílio de uma ferramenta computacional, é proposto um modelo de talude para verificação dos fatores de segurança através de metodologias consagradas.

Além dos métodos geotécnicos descritos acima, também é conveniente o uso de métodos geofísicos na definição do fator de segurança do talude. A aplicação da geofísica é vantajosa, principalmente, ao considerarmos que, de maneira rápida e não invasiva, ela obtém dados da superfície e subsuperfície (SOUZA, 2006). Ademais, um dos métodos geofísicos mais comumente empregados é o método da Eletroresistividade, fundamentado na lei de Ohm, que oferece informações importantes acerca da caracterização geomecânica do solo como saturação em água, porosidade e mineralogia (BORGES, 2002).

A determinação do fator de segurança é fundamental na prevenção de desabamentos, sendo baseado no método de equilíbrio limite e no critério de

Mohr-Coulomb. De maneira simplificada, esse método consiste na razão da resistência média ao cisalhamento pela sua tensão média na superfície, pois quando a tensão é maior que a resistência, ocorrem rupturas que podem ser planares, em cunha ou por tombamento. O cálculo correto do fator de segurança garante uma continuidade econômica e segura das operações em uma mina.

Caçapava do Sul, apesar de ser conhecida desde a década de 40 por sua riqueza em minério de cobre, tem como principal atividade econômica a mineração de mármore dolomítico (BORTOLOTTI, 1987; RIBEIRO et al., 1966). Ainda que se trate de um depósito de mármore, o produto comercializado é o calcário, chegando a representar cerca de 70% da comercialização desse produto no estado do Rio Grande do Sul, no ano de 2017, segundo o Anuário Mineral Estadual – RS de 2018.

Este trabalho busca correlacionar conhecimentos geológicos, geofísicos e geotécnicos a partir da aplicação de métodos não invasivos, como a determinação da qualidade do maciço rochoso e eletrorresistividade e uso de softwares específicos, visando a definição do fator de segurança dos taludes de uma bancada de uma mina a céu aberto de mármore na região de Caçapava do Sul – RS. A área foi gentilmente cedida pela Inducal, empresa que atua no município há mais de 60 anos.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Determinar a estabilidade dos taludes a partir do cálculo do fator de segurança, utilizando-se de métodos geofísicos, geotécnicos e ferramentas computacionais. O local escolhido é uma mina a céu aberto de Mármore na região de Caçapava do Sul – RS.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Aplicar a metodologia Scanline;
- Caracterizar o maciço rochoso através do cálculo do RQD e RMR;
- Determinar a resistência a compressão uniaxial média a partir do Ábaco de Miller;
- Determinar as áreas de interesse no Scanline a partir da análise geofísica;
- Realizar análise cinemática no Software Dips;
- Construir um modelo de talude no Software Slide®.

### **3 JUSTIFICATIVA**

O Brasil tem sua história atrelada à mineração desde o descobrimento, ela foi uma das grandes responsáveis pela ocupação territorial e um dos setores básicos da economia nacional. Atualmente, o país conta com mais de nove mil minas em operação, segundo a Agência Nacional de Mineração em 2016, que respondem por 30% do saldo da balança comercial e geram mais de 180 mil empregos diretos e quase dois milhões indiretos.

As minas a céu aberto são responsáveis pela maior parte da produção mineral brasileira, sendo pequena a quantidade de minas subterrâneas. Elas apresentam taludes na sua estrutura, a determinação assertiva da geometria desses componentes além de garantir a segurança e continuidade das operações, otimiza o aproveitamento do depósito trazendo um maior retorno econômico às empresas.

A estabilidade dos taludes está relacionada ao seu fator de segurança, o qual é calculado a partir da caracterização dos parâmetros geomecânicos do maciço e modelagem numérica. Dessa forma, fica evidente a importância dos estudos geológicos, geotécnicos e geofísicos na vida útil de uma mina, com benefícios à segurança dos trabalhadores e à economia local e nacional.

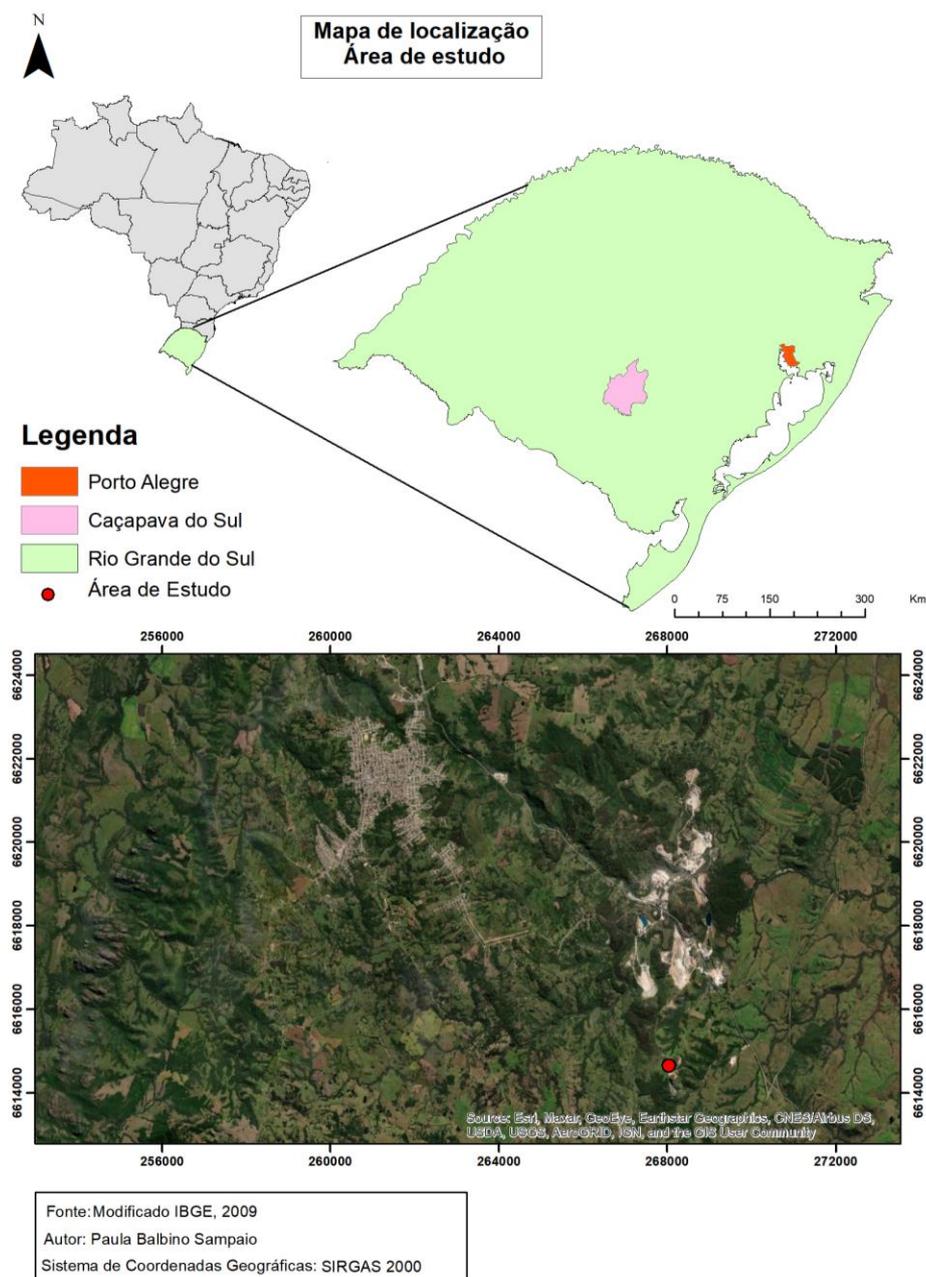
Os materiais que contribuirão para a execução desse trabalho, como as ferramentas utilizadas no levantamento geofísico, no método scanline, os softwares e os materiais de campo, serão disponibilizados pela universidade. A área de estudo foi cedida por parceria da Industrial de Calcários Caçapava Ltda. – Inducal sediada em Caçapava do Sul.

## 4 ÁREA DE ESTUDO

### 4.1 Localização

Caçapava do Sul está localizada no estado do Rio Grande do Sul, acerca de 260km da capital, Porto Alegre. Segundo o IBGE, pertence à mesorregião sudeste Rio-Grandense e apresenta o 5º melhor PIB da região, com o setor industrial sendo responsável por aproximadamente 13% do PIB municipal.

Figura 1 - Mapa de localização da área.



Fonte: Autora. Extraído e adaptado do IBGE, 2009.

A área cedida pela empresa está em uma cava desativada em processo de reativação. Os estudos do projeto da empresa estão na fase inicial, dessa forma o presente estudo servirá para ampliar a base de dados da empresa. A mina a céu aberto encontra-se, aproximadamente, a 15km do Campus Caçapava do Sul da Universidade Federal do Pampa, com acesso pela BR – 392 e um percurso de cerca de 3km por estrada vicinal pertencente a Inducal.

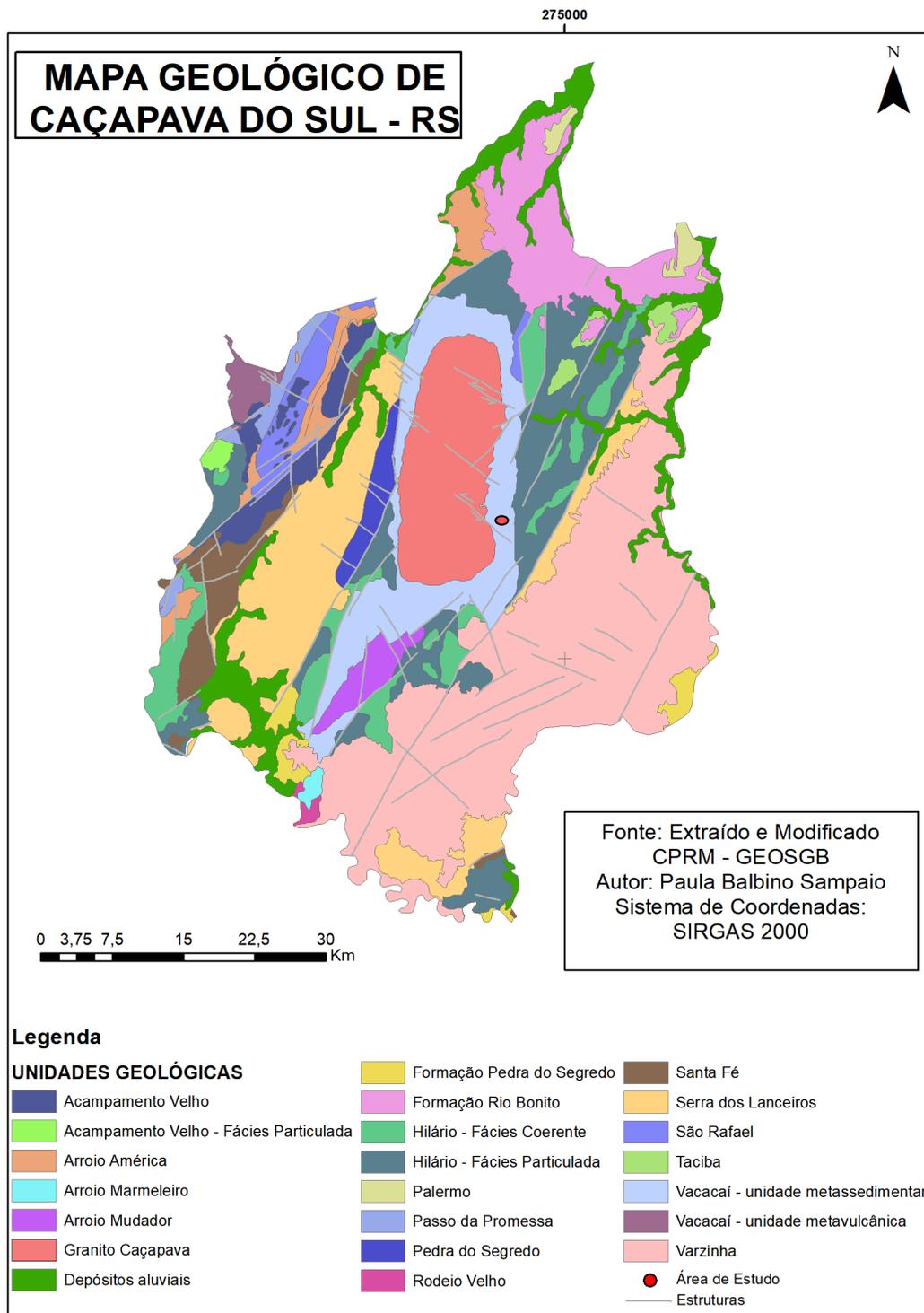
## **4.2 Geologia regional**

O Escudo Sul Rio-Grandense apresenta cerca de 65.000 km<sup>2</sup> e uma diversidade geológica pré-cambriana. Compreende rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, as quais estão vinculadas aos estágios pré, sin e pós colisional da Orogênese Brasileira no neoproterozóico (ALMEIDA et al.,1981). É subdividido em Terreno São Gabriel, Batólito Pelotas, Terreno Tijucas, Terreno Taquarembó e Bacia do Camaquã.

A área de estudo está incluída no bloco São Gabriel, o qual está localizado na zona central do embasamento cristalino do Rio Grande do Sul, é limitado a norte e oeste pelas rochas da Bacia do Paraná, a leste pelo Cinturão Porongos e a sul pelo Bloco Taquarembó. Os blocos são lineamentos paralelos e subparalelos de direção NW-SE e com extensão de aproximadamente 70 km (HARTMANN; CHEMALE JR., PHILIPP, 2007).

As unidades do Terreno São Gabriel foram em grande parte formadas por acreção juvenil, com associações petrotectônicas de ambientes de margem passiva e de retroarco, ofiolitos, arcos magmáticos vulcano-sedimentares e plutônicos. Em termos estruturais, suas unidades foram fortemente controladas por zonas de cisalhamento dúcteis, de direção NE/SW que, quando próximas ao Lineamento Ibaré, são rotacionadas para as orientações E-W a NW/SE (HARTMANN; CHEMALE JR., PHILIPP, 2007).

Figura 2 - Mapa Geológico de Caçapava do Sul - RS.



Fonte: Autora. Extraído e adaptado CPRM – GEOSBG (RAMGRAB et al., 2004).

As rochas que compõem a área de estudo são mármores e xistos pertencentes à unidade geológica Vacacaí, conhecida também como Formação Passo Feio, a qual circunda os granitos da Suíte Granítica de Caçapava do Sul. Essa unidade é constituída por uma sequência metavulcanossedimentar

neoproterozóica metamorizadas na facie xisto verde a anfibolito inferior durante o metamorfismo regional da orogênese brasileira (RIBEIRO et al., 1966; NARDI & BITTENCOURT, 1989).

A intrusão do Granito Caçapava na Formação Passo Feio é marcada pelo registro de um domo termal em torno do corpo granítico, caracterizando uma típica auréola de influência. A relação entre essas duas unidades é extensamente estudada, pois se acredita que os depósitos de sulfetos, de grande importância econômica para o município, tenham sua origem relacionada à remobilização e/ou assimilação de sulfetos pré-existentes durante a intrusão do Granito Caçapava (REMUS, 1999).

Segundo Bittencourt (1983), ocorreram dois eventos metamórficos principais na Formação Passo Feio, o primeiro atingiu o pico termal mais elevado, chegando à fácies anfibolito. O evento mais jovem é acompanhado por forte deformação e apresenta um caráter retrometamórfico que colocou as rochas regionais na fácies xisto verde.

O mármore é composto por variedades mineralógicas distintas e tonalidades que variam de branco, branco acinzentado, branco esverdeado, branco avermelhado de acordo com suas áreas aflorantes. A principal ocorrência é na cor branca, rico em dolomita composto principalmente por carbonato de cálcio, magnésio e calcita (BORTOLOTTI, 1987).

### **4.3 Geologia local**

A intrusão do Granito Caçapava é um evento geológico com grande interesse econômico pois, como dito anteriormente, foi responsável pela remobilização dos sulfetos. Contornando esse corpo plutônico há um cinturão de rochas metamórficas que compõe a Formação Passo Feio, essa ocorrência apresenta na sua porção leste um corpo rochoso de composição carbonática, também de grande importância para economia municipal.

A área de estudo está localizada nos mármore dolomíticos que pertencem a esse corpo carbonatado. Essas rochas são constituídas principalmente por dolomita e apresentam calcita, calcita ferrífera, talco, tremolita, diopsídio, forsterita, clorita e flogopita. Em menor quantidade

possuem titanita, apatita e quartzo, sendo comum a ocorrência de serpentinização, resultado da alteração da forsterita. Mostram-se com um alto grau fraturamento e estrutura irregular, sendo muito comum a ocorrência de bandas milimétricas de colorações variadas (BORTOLOTTI, 1987).

Figura 3 - Fotografia da rocha *in situ*.



Fonte: Autora.

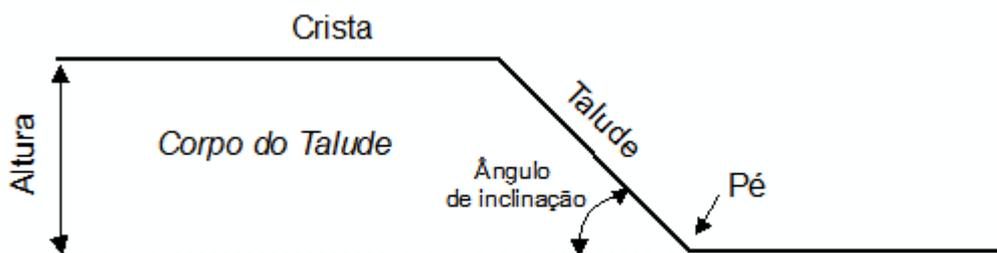
O mármore presente na área de estudo apresenta coloração branca com alguns pontos acinzentados. Sua foliação é incipiente, sendo sua estrutura em amostra de mão considerada maciça. Apresenta calcita e clorita como preenchimento de algumas fraturas.

## 5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 5.1 Taludes

Segundo Gerscovich (2009), talude é qualquer superfície inclinada tanto de solo quanto de rocha, e podem ser naturais ou artificiais. Apresentam a característica de se manter estáveis apenas com as propriedades do material e sua inclinação. Os taludes naturais são compostos por diferentes materiais, tem uma maior complexidade geológica, maior heterogeneidade e sobretudo anisotropia (GONÇALVES, 2017).

Figura 4: Ilustração da geometria geral dos taludes.



Fonte: Extraído e modificada, Gerscovich (2009).

Já os taludes artificiais exibem uma homogeneidade mais acentuada que os maciços naturais (MARANGON, 2009). Conhecidos também como taludes construídos, são resultados de cortes em encostas e são os principais componentes das minas a céu aberto. Para determinar sua geometria, é necessário analisar as características do terreno, as propriedades do maciço e as forças atuantes no corpo a fim de obedecer aos parâmetros do fator de segurança (MASSAD, 2010).

### 5.2 Descontinuidades

Maciço rochoso é um termo usado para definir um conjunto de blocos de rocha intacta delimitadas por descontinuidades. As descontinuidades formam planos de fraqueza nos quais há pouco ou nenhuma resistência à tração, sua caracterização está intimamente ligada à parâmetros geomecânicos e à

determinação do índice de qualidade do maciço, apresentando grande relevância para os estudos de estabilidade (FIORI; CARMIGNANI, 2011).

Existem diferentes tipos de descontinuidades de origem geológica, de acordo com Fiori (2015) podem ser classificadas como:

- Planos de acamamento: são típicos de rochas sedimentares e constituem os planos de separação entre os estratos, apresenta uma enorme persistência lateral.
- Planos de juntas: são estruturas formadas pela atuação de tensões ao longo das quais a movimentação é praticamente inexistente, geralmente ocorrem em famílias.
- Planos de falha: frequentemente originam planos de fraqueza contínuos e persistentes, se caracterizam por sofrerem deslocamentos substanciais e são classificadas segundo o sentido da movimentação relativa (normais, inversas ou direcionais).
- Foliação metamórfica: propriedade de rochas metamórficas através da qual as rochas podem se partir em fatias ou lâminas, é uma propriedade que varia de acordo com o grau metamórfico.

Pare se caracterizar um maciço é necessária a descrição da matriz rochosa e das descontinuidades a partir de dados obtidos dos estudos dos afloramentos. Para padronizar e facilitar no processo de levantamento das descontinuidades a ISRM (1978) sistematizou alguns parâmetros para descrição das descontinuidades. São eles orientação espacial, espaçamento, persistência, rugosidade, resistência, abertura, preenchimento, grau de alteração e percolação (FIORI, 2015).

### **5.2.1 Orientação e Atitude**

A atitude de um plano é a definição da disposição espacial desse plano com relação ao plano horizontal e à linha meridiana N-S verdadeira. É o primeiro passo para descrição das descontinuidades, para defini-las são necessários dois parâmetros: a direção (*strike*) e o mergulho (*dip*). Esses parâmetros são obtidos através de uma bússola com clinómetro. A direção é dada pelo ângulo entre a linha N-S e a intersecção do pano geológico com a

horizontal, sempre referida ao norte verdadeiro. E o mergulho é o ângulo do plano com a horizontal (FIORI;CARMIGNANI,2011).

A direção do mergulho (*dip direction*) mede a direção da máxima declividade em relação ao Norte, esse parâmetro tem grande importância para analisar as relações tridimensionais entre planos e linhas num diagrama bidimensional (BRADY; BROWN, 2005).

A atitude das medidas é fundamental para determinar as famílias de estruturas presentes no maciço. Essas famílias apresentam atitudes e características estruturais-geológicas mais ou menos homogêneas (ROCHA, 1981). A representação e análise desse conjunto estrutural é feita a partir de projeções estereográficas, no presente trabalho as projeções foram realizadas com auxílio do software Dips.

### 5.2.2 Espaçamento

O espaçamento, também conhecido como frequência, determina a distância média entre as descontinuidades (FIORI,2015). O espaçamento entre as estruturas tem relação direta com o tamanho individual dos blocos que compõe o maciço, o que influenciará no planejamento dos padrões de suporte do talude (WYLLIE,2017).

A medição desse parâmetro é obtida com auxílio de fita graduada, sendo as distâncias tomadas ao longo de linhas de varredura (FIORI,2015). A ISRM (1983) determina uma terminologia para caracterizar os maciços em função dos espaçamentos das descontinuidades (Tabela 1).

Tabela 1 - Classificação do espaçamento em mm.

TERMO	ESPAÇAMENTO(mm)
Extremamente pequeno	<20
Muito pequeno	20-60
Pequeno	60-200
Moderado	200-600
Grande	600-2000
Muito grande	2000-6000
Extremamente grande	>6000

Fonte: Extraído e modificado Fiori, 2015.

### 5.2.3 Persistência

A persistência de uma descontinuidade é uma expressão de sua continuidade ininterrupta ao longo da sua extensão. Na prática consiste em medir o comprimento do traço das descontinuidades nos afloramentos. A determinação da persistência das estruturas é importante para a caracterização do maciço, principalmente daquelas orientadas desfavoravelmente em relação a estabilidade do talude (FIORI, 2015) . A classificação sugerida pela ISRM (1983) está exposta na tabela a seguir.

Tabela 2 - Classificação da persistência.

TERMO	PERSISTÊNCIA (m)
Persistência muito pequena	<1
Persistência pequena	1-3
Persistência média	3-10
Persistência grande	10-20
Persistência muito grande	>20

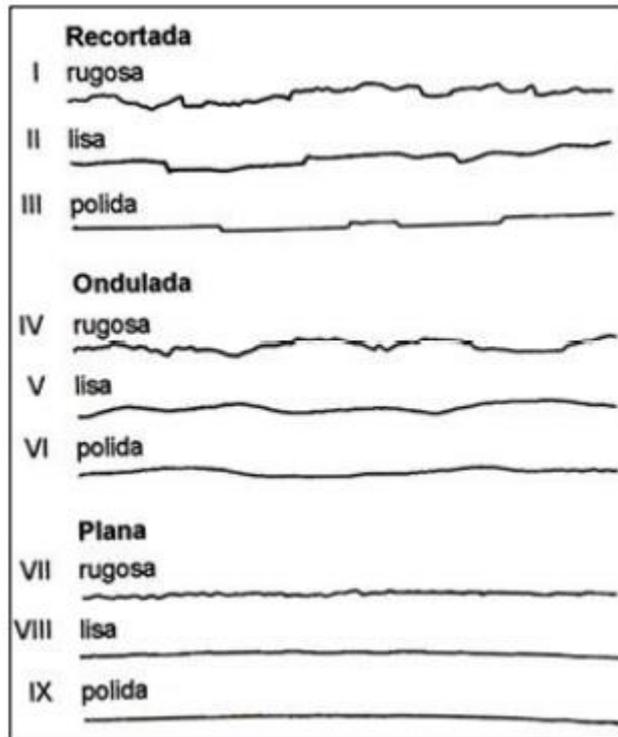
Fonte: extraído Fiori, 2015.

### 5.2.4 Rugosidade

A rugosidade está relacionada às irregularidades de relevo presentes nos planos das descontinuidades. A ondulação e a rugosidade dos planos podem controlar as possíveis direções de deslocamento relativo dos blocos. Para avaliar esse parâmetro, o método mais comumente empregado é o da comparação visual das descontinuidades com os perfis padrão de rugosidade (RAMOS, 2009).

A ISRM (1978,1981) propõe alguns perfis padrão onde há três classes principais (denteada, ondulada ou plana) e cada uma apresenta três subclasses (rugosa, lisa e estriada) (Figura 5).

Figura 5 - Classificação da rugosidade.



Fonte: ISRM (1981).

A rugosidade das paredes de uma descontinuidade é um parâmetro importante para caracterizar sua resistência ao cisalhamento, pois é responsável por uma parcela do atrito entre elas. A importância da rugosidade diminui à medida que aumenta a abertura da descontinuidade ou a espessura do preenchimento (FIORI, 2015).

### 5.2.5 Abertura e Preenchimento

A abertura é o espaço entre as paredes das descontinuidades ou a média de afastamento dos blocos adjacentes (FIORI, 2015). Resulta da atuação dos mesmos esforços que criaram a descontinuidade e influencia na resistência ao cisalhamento, já que uma maior abertura corresponde a uma diminuição de contatos entre as paredes da descontinuidade (RAMOS, 2009).

As aberturas tendem a ser maiores junto a superfície do terreno, como consequência do relaxamento dos esforços, tornando-se menores à medida que aumenta a profundidade. O espaço entre as descontinuidades pode estar vazio, parcialmente preenchido ou completamente preenchido (FIORI, 2015).

Tabela 3 - Classificação dos tipos de aberturas.

DESIGNAÇÃO	ABERTURA (mm)
Muito fechadas	< 0,1
Fechadas	0,1 - 0,25
Parcialmente fechadas	0,25 - 0,5
Abertas	0,5 - 2,5
Largas	2,5 - 10
Muito largas	10 - 100
Extremamente largas	100 - 1000
Cavernosas	> 1000

Fonte: adaptado ISRM, 1981.

O tipo de material de preenchimento interfere nas propriedades da descontinuidade. Se o material for de menor competência que a rocha intacta haverá uma diminuição na resistência do maciço. Por exemplo, as argilas são preenchimentos comuns em zonas miloníticas e devido ao seu elevado conteúdo em água e sua alta plasticidade, podem causar graves problemas à estabilidade de taludes. Em outros casos as descontinuidades podem ser preenchidas por precipitados minerais ricos em sílica, que podem ser tão ou mais resistentes que a rocha intacta, nesse caso a um aumento significativo na resistência do maciço (FIORI, 2015).

### 5.2.6 Percolação

A percolação de água por meio de maciços rochosos resulta, principalmente, do fluxo através das descontinuidades. Altas velocidades de fluxo através de descontinuidades abertas podem resultar em perdas de carga devido à turbulência (FIORI, 2015).

Dessa forma a maior ou menor capacidade de percolação de fluxo por parte das descontinuidades deve ser levado em conta na descrição de maciços

rochosos (FIORI, 2015). A ISRM (1983) propôs um modelo descritivo para as descontinuidades preenchidas e não preenchidas.

Tabela 4 - Classificação das descontinuidades não preenchidas.

CLASSIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO
I	A descontinuidade é muito fechada e seca, não podendo ser possível o aparecimento de fluxos de água
II	A descontinuidade é seca, com nenhuma evidência de fluxo de água
III	A descontinuidade é seca mas mostra evidência de fluxo de água, ex: manchas de ferrugem, etc
IV	A descontinuidade é úmida mas não existe água livre
V	A descontinuidade apresenta percolação, ocasionalmente apresenta gotas de água, mas não apresenta fluxo contínuo
VI	A descontinuidade mostra um fluxo contínuo de água (vazão estimada em litros/minuto)

Fonte: adaptado ISRM, 1983.

Tabela 5 - Classificação das descontinuidades preenchidas.

CLASSIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO
W1	Os materiais de preenchimento são fortemente consolidados e secos e a existência de fluxos significativos é improvável, devido à permeabilidade muito baixa
W2	Os materiais de preenchimento estão úmidos, mas não existe água livre presente
W3	Os materiais de preenchimento estão molhados e existem gotas ocasionais
W4	Os materiais de preenchimento mostram sinais de lavagem, existindo fluxo contínuo de água (estimar vazão)
W5	Os materiais de preenchimento são carregados localmente e existem consideráveis fluxos de água ao longo dos canais de lavagem (estimar vazão e pressão)
W6	Os materiais de preenchimento estão completamente lavados, observa-se altas pressões de água (estimar vazão e registrar a pressão)

Fonte: adaptado ISRM, 1983.

### 5.2.7 Resistência

A resistência a compressão é uma componente muito importante da resistência ao corte e deformabilidade, consiste na medida da capacidade do material em suportar esforços compressivos. É comumente obtida por meio de correlações com outras propriedades (RAMOS, 2009).

A resistência à compressão uniaxial pode ser estimada por meio do esclerômetro portátil, do ensaio de carga pontual ou de outras metodologias normalmente utilizadas nos levantamentos geológicos (FIORI, 2015). No presente estudo a estimativa foi realizada empregando um ensaio esclerométrico (martelo de Schmidt).

Figura 6 - Equipamento martelo de Schmidt.

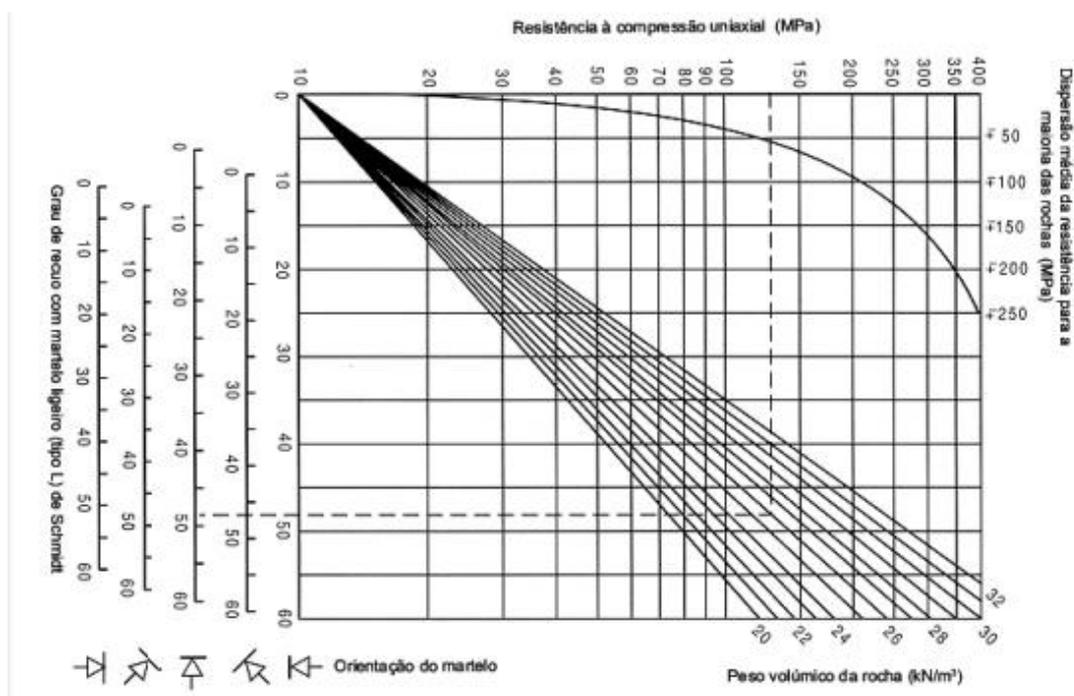


Fonte: Autora.

No ensaio com martelo de Schmidt é “disparada” uma massa normalizada (valor é função do tipo de martelo) contra o material a ensaiar, após o que é lida, numa escala do aparelho, é o valor do recuo daquela massa. Este valor é função da energia absorvida na deformação, a qual se relaciona com a dureza da superfície que recebeu o impacto (RAMOS, 2009).

Vale ressaltar que o valor da resistência uniaxial é obtido a partir do ábaco de Miller (1966), onde o valor indicado no martelo é correlacionado com o peso específico da rocha e o ângulo de orientação do martelo (Figura 7).

Figura 7 - Ábaco de Miller.



Fonte: Vallejo, et al., 2002.

### 5.3 Sistemas de Classificação de Maciços Rochosos

As classificações geomecânicas são métodos importantes e válidos desde a fase inicial do projeto mineiro, pelo fato de ser uma maneira simples e acessível de prever o comportamento do maciço rochoso. Essa ferramenta é usada para caracterizar os maciços rochosos com base em observações de campo, ensaios *in situ* ou em amostras coletadas (FIORI, 2015).

A primeira classificação geotécnica de maciços foi elaborada por Terzagui em 1946, desde então houve um aumento progressivo do reconhecimento e da importância de certos fatores anteriormente desconhecidos. Os sistemas de classificação mais difundidos e utilizados, 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) (FIORI, 2015).

### 5.3.1 RQD

O RQD foi o primeiro índice quantitativo proposto por Deere (1963) para descrever a qualidade do maciço rochoso, seu objetivo era quantificar a qualidade das rochas retiradas nos furos de sondagem. É fundamentado na porcentagem de recuperação e considera apenas as partes de testemunho que possuem mais de 10 cm de comprimento. O somatório dessas partes dividido pelo tamanho total é o resultado do RQD.

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

Em casos em que não existem sondagens disponíveis Priest e Hudson (1976) desenvolveram uma maneira de determinar o RQD a partir da medida do espaçamento das descontinuidades em face rochosa exposta (BRADY e BROWN, 2005).

$$RQD' = 100 e^{-0.1 \lambda} \times (0,1\lambda + 1)$$

Onde:

RQD': Índice teórico de qualidade da rocha.

$\lambda$ : Número de descontinuidades dividido pelo comprimento total da *scanline* em metros.

A partir do valor obtido tem-se a classificação RQD para os maciços rochosos, proposta por Deere (1963), exposta na tabela 6.

Tabela 6 - Classificação RQD para os maciços rochosos.

RQD	Classificação
0 – 25 %	Muito Fraco
25 – 50 %	Fraco
50 – 75 %	Razoável
75 – 90 %	Bom
90 – 100 %	Excelente

Fonte: Deere, 1963.

### 5.3.2 RMR

Bieniawski (1974, 1989) propôs um novo modelo de classificação que é aplicável para túneis e taludes, sua abordagem é simples e mais completa devida à quantidade de parâmetros que considera. A vantagem da aplicação da classificação RMR é que somente alguns parâmetros básicos relacionados a geometria e condições mecânicas do maciço são necessários (PAULI, 2021).

Os parâmetros considerados no RMR são:

- Resistência a compressão uniaxial da rocha;
- RQD;
- Espaçamento das descontinuidades;
- Condição das descontinuidades (alteração, rugosidade e preenchimento);
- Condições de percolação e
- Orientação das descontinuidades.

As propriedades citadas acima, com exceção da condição das descontinuidades, são atributos quantitativos. Bieniawski propôs pesos específicos para cada parâmetro.

Tabela 7 - Classificação de Parâmetros RMR Scanline.

Parâmetros		Range de Valores					
1	Resistência à compressão simples (MPa)	>250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	1 - 5	0 - 1
	Avaliação	15	12	7	4	2	1
2	RQD	90/100	75/90	50/75	25/50	<25	x
	Avaliação	20	17	13	8	3	x
3	Espaçamento (m)	> 2	0,6 - 2	0,2 - 0,6	0,06 - 0,2	<0,6	x
	Avaliação	20	15	10	8	5	x
4	Rugosidade	Muito rugosa sem abertura	Levemente rugosa abertura < 1 mm	Levemente rugosa abertura < 1 mm alterado	Lisa	Lisa e friável	x
	Avaliação	30	25	20	10	0	x
5	Presença de Água	Completamente seco	Úmido	Molhado	Gotejando	Fluindo	x
	Avaliação	15	10	7	4	0	x

Fonte: Extraído e adaptado, Bieniawski (1989).

Para calcular o RMR, além dos parâmetros citados anteriormente, há que considerar o valor de ajuste, pois o resultado do método é adimensional e a orientação das descontinuidades é considerado um parâmetro de ajuste. Dessa forma o RMR é obtido a partir do somatório dos pesos dos cinco parâmetros e é descontado o valor do ajuste.

Tabela 8 - Tabela de ajuste RMR.

Orientação das descontinuidades	Obras ou empreendimentos	Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Ajuste RMR	Túneis	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	x

Fonte: Extraído e adaptado, Bieniawski (1989).

Em posse do valor RMR, o maciço pode ser classificado de cinco maneiras diferentes, como exposto na tabela 9.

Tabela 9 - Classificação do maciço rochoso.

CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO A PARTIR DOS VALORES TOTAIS					
VALOR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 21
CLASSE	I	II	III	IV	V
DESCRIÇÃO	Muito Boa	Boa	Razoável	Pobre	Muito Pobre

Fonte: Extraído e adaptado, Bieniawski (1989).

#### 5.4 Análise cinemática de taludes rochosos

De acordo com Fiori & Carmignani (2009), a cinemática estuda a movimentação dos corpos, sem levar em consideração as forças que causam o movimento. Tem como objetivo determinar os pontos em que o maciço apresenta menor estabilidade e, conseqüentemente, maior suscetibilidade a rupturas. A identificação dos modelos potenciais de ruptura é fundamental para a análise de estabilidade de taludes (FIORI; CARMIGNANI, 2009).

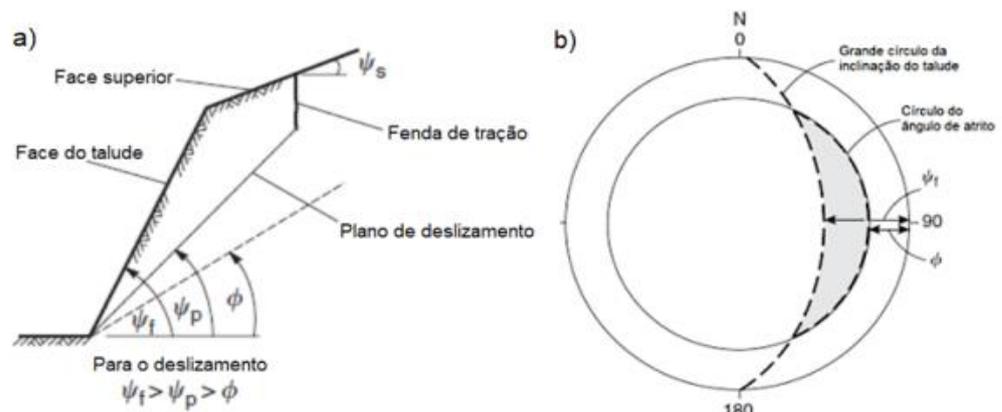
O primeiro passo em uma análise cinemática é a obtenção das medidas estruturais com auxílio de bússola Brunton. Posteriormente os dados são interpretados a partir de estereogramas gerados com o auxílio do software Dips 7.0, pertencente à plataforma RocScience. A análise das projeções

estereográficas permite determinar as estruturas que estão na zona crítica, ou seja, que são mais passíveis a instabilidades.

#### 5.4.1 Ruptura planar

Ocorre quando o strike do plano de deslizamento é aproximadamente paralelo à face do talude, sendo necessária uma diferença angular menor que  $20^\circ$ . O ângulo de inclinação do plano da descontinuidade deve ser maior do que o seu ângulo de atrito e menor do que a inclinação do talude. A extremidade superior do plano de descontinuidade deve intersectar a berma ou terminar em uma fratura de tração (WYLLIE, 2017).

Figura 8 - Esquema ilustrativo de ruptura planar.



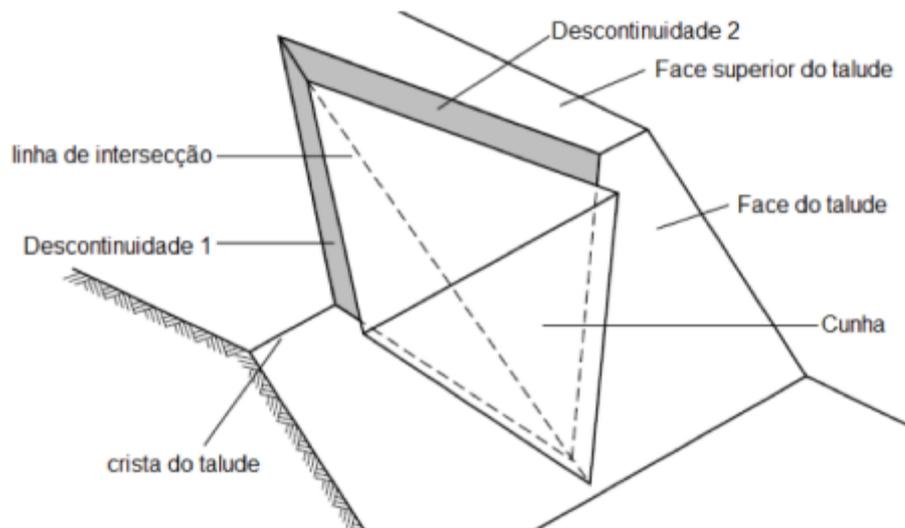
Fonte: Wyllie e Mah (2004).

Devido à suas condições geométricas características é um dos fenômenos de ruptura menos frequentes.

#### 5.4.2 Ruptura em cunha

É condicionada pela interseção de estruturas presentes no maciço rochoso. Correspondem ao deslizamento de um bloco com forma em cunha, formado por dois planos de descontinuidades, na direção de sua linha de intersecção. Uma característica marcante desse tipo ruptura é a alta velocidade do movimento e, como consequência, causam danos elevados (FIORI; CARGMIGNANI, 2015).

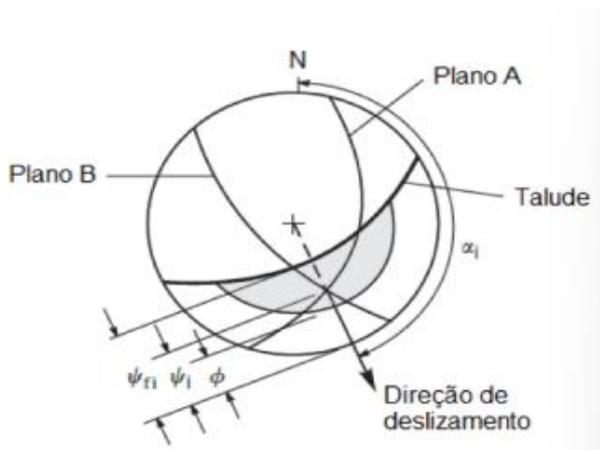
Figura 9 - Esquema ilustrativo de ruptura em cunha.



Fonte. Modificado de Simons, Menzies e Matthews, (2001).

Ocorre quando a linha de intersecção tiver direção próxima a direção de face do talude e seu ângulo de caimento for superior ao ângulo de atrito das estruturas, estaremos sob a possibilidade de ruptura do tipo cunha (FIORI; CARGMIGNANI, 2015). A partir do estereograma é possível definir a forma da cunha, a orientação da linha de intersecção e a direção de deslizamento (WYLLIE; MAH, 2004)

Figura 10 - Estereograma ilustrando ruptura em cunha.



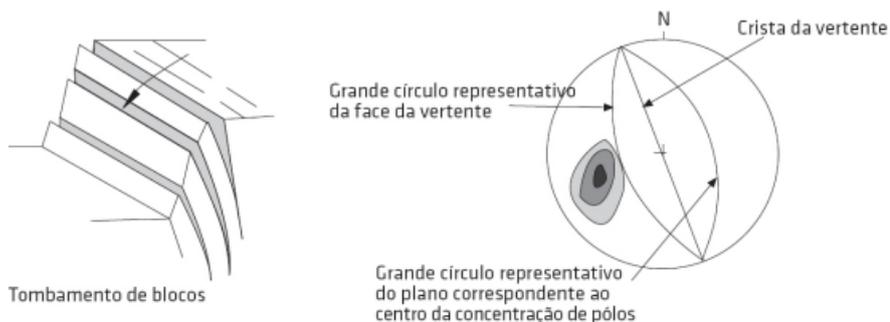
Fonte: Wyllie e Mah (2004).

### 5.4.3 Ruptura por tombamento

O tombamento ocorre quando o vetor resultante das forças atuantes se localiza fora ou abaixo do centro de gravidade, acarretando a rotação de uma massa de rocha sobre um ponto na base (ANHRENT, 2005).

Esse tipo de ruptura acontece, normalmente, em blocos de grande altura em relação à sua base ou estruturas geológicas com grandes mergulhos. O tombamento pode ser em blocos ou flexural, o que vai depender da geometria, orientação e extensão das descontinuidades da massa deslocada (ANHRENT, 2005).

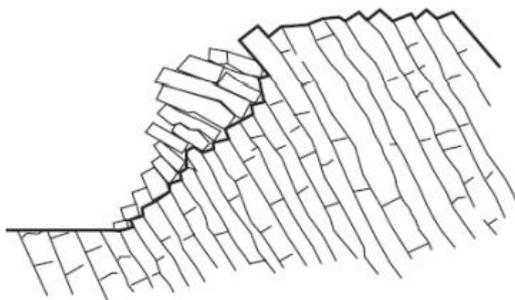
Figura 11 – Sistema de tombamento de blocos.



Fonte: Modificado de Simons, Menzies e Matthews (2001)

O tombamento em blocos ocorre em maciços rochosos em que a rocha possui estruturas colunares ou tabulares, sendo essas estruturas formadas individualmente por descontinuidades que mergulham de maneira brusca na face do talude e possuem uma segunda família de descontinuidades ortogonais. São um tipo de ruptura típica de arenito laminado e basalto colunar.

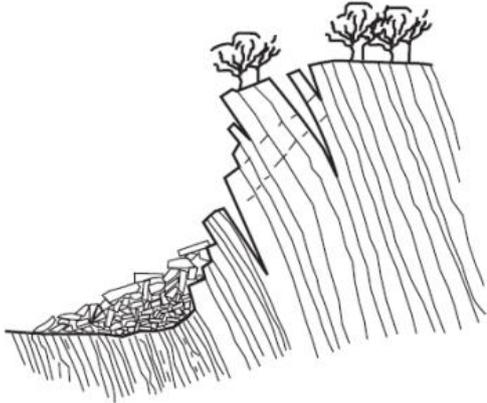
Figura 12 - Esquema ilustrativo de tombamento de blocos.



Fonte: Modificado de Simons, Menzies e Matthews (2001)

O processo de tombamento flexural ocorre, tipicamente, em rochas metamórficas foliadas. Esse tipo de ruptura ocorre em colunas contínuas que são separadas por descontinuidades bem desenvolvidas, de mergulho acentuado, tombando em flexão à medida que se dobram para frente.

Figura 13 - Esquema ilustrativo de tombamento flexural.



Fonte: Modificado de Simons, Menzies e Matthews (2001)

## 5.5 Estabilidade de taludes

A estabilidade de um talude é condicionada por fatores geométricos e fatores geológicos que regulam a presença de planos e zonas de debilidade e anisotropias, assim como fatores hidrogeológicos e fatores geotécnicos relacionados com o comportamento mecânico do terreno (NOGUEIRA, 2010).

Morgenstern (1995) propõe uma série de passos iniciais para analisar a estabilidade dos taludes: **a) Caracterização de campo:** determinação das condições geológicas e hidrogeológicas atuantes; **b) Identificação dos tipos de materiais inconsolidados:** resulta em parâmetros de resistência, deformação e permeabilidade; **c) Verificação das condições de drenagem;** **d) Caracterização geométrica do talude:** tentativa de identificação da localização, orientação e forma da ruptura potencial.

A análise de estabilidade de taludes pode ser realizada através de diferentes metodologias, estes métodos de análise se baseiam em princípios físico-matemáticos onde forças estabilizadoras e instabilizadoras atuam sobre o talude e determinam as condições de equilíbrio. A razão entre essas duas forças traduz o conceito de Fator de Segurança (MACHADO, 2020).

### 5.5.1 Fator de Segurança

Fator de Segurança (FS) é uma análise quantitativa da estabilidade do talude, seu conceito mais típico consiste na razão entre a resistência existente no solo e as forças que atuam sobre ele. Além de indicar o grau de estabilidade de um talude, indica também a superfície de ruptura crítica (ANHRENT, 2005). Pode ser representada de maneira simplificada pela seguinte fórmula:

$$FS = \frac{\text{forças resistentes}}{\text{forças atuantes}}$$

O valor limite entre a condição estável e instável de um talude é classicamente considerado como 1,0, onde o fator de segurança ser igual ou menor que 1 indica instabilidade ou eminência de rompimento e fator de segurança maior que 1 indica condição de estabilidade.

O fator de segurança de um projeto corresponde a um valor mínimo necessário, varia em função do tipo e vida útil da obra. A Norma Reguladora da Mineração (NRM) especifica parâmetros qualitativos na norma NRM-02, no item 2.4 sugerindo as boas práticas a serem consideradas no projeto. Apesar de abordar a questão da estabilidade de taludes, ela não trata especificamente dos parâmetros a serem utilizados. Dessa forma utilizamos como referência a NBR 11682, embora não seja uma norma específica para taludes de mineração, apresenta fatores de segurança mínimos de acordo com o grau de segurança necessário (DAL BOSCO, 2019).

Tabela 10 - Tabela da classificação dos níveis de segurança e seus critérios.

Nível de Segurança	Critérios de Segurança a vidas humanas	Critérios de Danos Materiais e Ambientais
ALTO	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais, urbanos ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de alto valor histórico social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetam serviços essenciais Danos ambientais: Proximidades de oleodutos, barragens de rejeito e fábrica de produtos tóxicos
MÉDIO	Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas; Ferrovias e rodovias de tráfego moderado	Danos materiais: Locais próximos a propriedade de valor moderado Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados
BAIXO	Áreas e edificações com movimento e permanência eventual de pessoas; Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido.	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor reduzido Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos

Fonte: Extraída e modificada ABNT (2009).

Tabela 11 - Correlação dos níveis de segurança e os fatores de segurança mínimos estabelecidos.

	ALTO	MÉDIO	BAIXO
ALTO	1.5	1.5	1.4
MÉDIO	1.5	1.4	1.3
BAIXO	1.4	1.3	1.2

Fonte: Extraída e modificada ABNT (2009).

No presente trabalho, o fator mínimo considerado para determinar a estabilidade do talude será 1.3, visto que é frequentemente o valor aplicado à mineração.

### 5.5.2 Parâmetros de estabilidade

De acordo com Caputo (1988), resistência ao cisalhamento é a propriedade do solo em suportar cargas e conservar sua estabilidade. Trata-se de um parâmetro amplamente conhecido no meio geotécnico e varia de acordo com o tipo de material, as condições hidrogeológicas, as deformações atuantes e o tempo de carregamento (ANHERT, 2005).

A resistência ao cisalhamento é um parâmetro representado principalmente pela coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito interno ( $\phi$ ). A coesão do solo é a força de atração entre as superfícies e suas partículas, pode ser real, quando é resultado do efeito de agentes cimentantes e atração eletrostática, ou aparente, resultado da tensão superficial da água nos capilares do solo. A partir dessas informações é possível calcular a resistência ao cisalhamento através da seguinte fórmula:

$$T = c + (\sigma - u) \operatorname{tg} \phi$$

Onde:

T- Resistência ao cisalhamento

C - Coesão

$\sigma$  – tensão normal ao plano cisalhante

u – Pressão neutra ou pressão nos poros

$\phi$  – ângulo de atrito interno

O ângulo de atrito interno representa as características friccionais entre as partículas do solo, é definido como o ângulo máximo entre a força exercida no solo com a força normal à superfície de contato. Ele depende de fatores como grau de compactação e granulometria (SILVA; CARVALHO, 2007).

Além dos parâmetros citados acima, também é importante ressaltar que, em taludes naturais, grande parte dos eventos de instabilidade ocorrem após período de chuva intensa ou estação chuvosa. Evidenciando, assim, a importância da pluviosidade e saturação em água como parâmetros na análise de estabilidade de taludes.

## **5.6 Teoria do Equilíbrio Limite em Métodos de Análise**

Existem diversos métodos, cada qual com a sua particularidade, para analisar a estabilidade de taludes. Os métodos baseados na teoria do equilíbrio limite utilizam das leis da estática para determinar o estado de equilíbrio. Segundo Massad (2010), os métodos que se utilizam da teoria de equilíbrio limite levam em conta alguns princípios:

- a) Consideram o fator de segurança constante na superfície de ruptura, ignorando fenômenos de ruptura progressiva;
- b) Tratam o maciço como um material rígido plástico;
- c) Usam equações de equilíbrio para calcular valores médios da tensão cisalhante mobilizada ( $\tau$ ) e tensão normal ( $\sigma$ ), necessários para estimativa da resistência ao cisalhamento pelo critério de Mohr-Coulomb.

Apesar de serem amplamente utilizados, os métodos de análise de equilíbrio limite apresentam algumas limitações. Eles não consideram as deformações e consideram as tensões distribuídas uniformemente. Por essa razão, a maioria dos métodos de equilíbrio limite subdivide a região analisada em fatias, analisando as condições de cada fatia isoladamente.

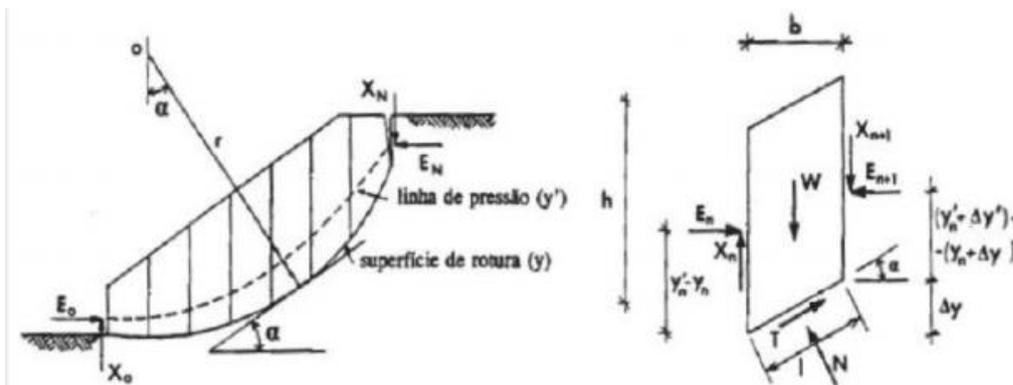
### **5.6.1 Método de Bishop**

O método de Bishop (1955) é baseado no método das fatias e foi elaborado, inicialmente, para superfícies de ruptura circular, mas pode ser

adaptado para superfícies não circulares. Neste método, o equilíbrio completo de forças é verificado.

Foi desenvolvido um novo método ao qual se adotou uma simplificação, conhecido como método de Bishop simplificado. Essa simplificação considera que as forças de interação entre as fatias são horizontais e se anulam, inclusive desconsideram as forças tangenciais entre elas.

Figura 14: Esquema detalhado método de Bishop.



Fonte: Silva (2010).

Segundo Costa (2012), o cálculo do fator de segurança é obtido a partir da seguinte equação:

$$FS = \frac{1}{\sum W \cdot \text{sen } \alpha} \cdot \sum \left[ \left[ c' \cdot b + (W(1 - ru) + (X_{n1} - X_n)) \tan \Phi' \right] \frac{\text{sec } \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha \cdot \tan \alpha}{FS}} \right]$$

Onde:

$c'$  = coesão (kPa)

$b$  = largura da fatia (m)

$W$  = peso próprio da fatia (kN)

$ru$  = pressão intersticial

$\Phi'$  = ângulo de atrito ( $^\circ$ )

$\alpha$  = Inclinação da base

$X_{n1}$  = Resultante das tensões cisalhantes na face direita da fatia

$X_n$  = Resultante das tensões cisalhantes na face esquerda da fatia

## **5.7 Geofísica**

Trata-se da ciência que estuda as propriedades físicas e os processos físicos que ocorrem no interior da terra e regiões vizinhas do espaço. Apresenta uma relação íntima da Física com a Geologia, de modo que, a partir de embasamento físico, busca resolver questões de ordem geológica. A principal diferença entre a geologia e a geofísica está na aquisição de dados, a geologia trabalha com a obtenção direta de dados e a geofísica os obtém de maneira indireta.

Esta pode ser separada em duas vertentes, a Geofísica Global investiga os fenômenos físicos que ocorrem no planeta como terremotos e tsunamis, por exemplo. Já a Geofísica Aplicada ou Geofísica de Exploração, utiliza da interpretação das medidas, a partir de contrastes, para determinar estruturas no subsolo, diferenciar litologias e outras propriedades, em uma escala menos abrangente que a global.

Os métodos geofísicos utilizam de equipamentos modernos para realizar suas medições e variam em função dos parâmetros. Os métodos gravimétricos e magnetométricos utilizam campo natural, estudam as perturbações que determinados corpos ou estruturas produzem sobre campos já existentes. Já os métodos geoeletricos e sísmicos são artificiais, ou seja, a interpretação é feita sobre as ondas projetadas pelos aparelhos. Neste trabalho, utilizaremos um método geoeletrico.

A aplicação de métodos geofísicos traz inúmeros benefícios, por se tratar de um método de aquisição indireta, caracteriza-se por ser não invasiva, ou seja, não afeta a área de estudo podendo ser executada várias vezes em uma mesma área sem causar danos. Além disso, apresenta um curto período de operação e uma ampla cobertura.

### **5.7.1 Eletroresistividade**

A utilização de métodos geoeletricos como ferramenta de investigação geológica torna-se viável devido aos contrastes existentes nas propriedades geoeletricas dos solos, rochas e minerais. Baseia-se no estudo do potencial elétrico, onde a partir de medições na superfície é possível determinar, no

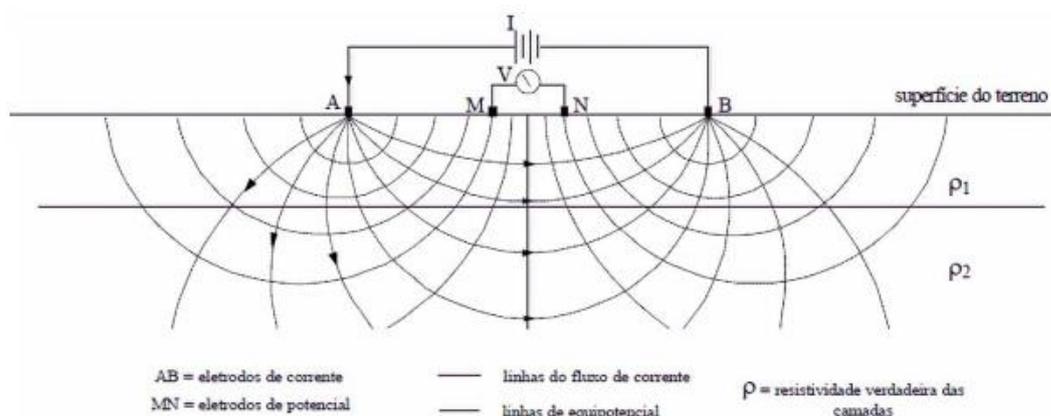
subsolo, a existência de corpos minerais, reconhecer estruturas geológicas e determinar a saturação em água (SOUZA, 2006).

Entre as principais propriedades elétricas utilizadas na investigação geométrica, destaca-se a resistividade elétrica. Ela representa a dificuldade encontrada pela corrente elétrica para se propagar no meio e seus mecanismos de propagação podem ser eletrônicos ou iônicos. Nos mecanismos eletrônicos, os elétrons são transportados através da matriz rochosa, já nos iônicos ocorrem deslocamentos de íons presentes na água contida nos poros e fissuras do meio (SOUZA, 2006).

A resistividade varia de acordo com conteúdo em água, em sais e em argila, porosidade, permeabilidade, temperatura e a condutividade dos minerais. De maneira geral, materiais com baixa porosidade tendem a apresentar altas resistividades; por outro lado, materiais com grande presença de minerais argilosos tendem a uma baixa resistividade.

O método geofísico da Eletroresistividade gera uma fonte artificial e contínua ( $I$ ), a partir de um instrumento denominado resistivímetro, que é introduzido no solo por um par de eletrodos denominados de A e B, como ilustrado na figura abaixo. A diferença de potencial ( $\Delta V$ ) é medida por um circuito no receptor (eletrodos M e N), onde os dados são obtidos para interpretação posterior.

Figura 15: Representação esquemática do método da eletroresistividade.



Fonte: IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2011).

A aplicação do método de Eletrorresistividade é possível devido a sua fundamentação na Lei de Ohm, ela determina que a corrente elétrica que percorre um condutor é proporcional à voltagem aplicada nos seus terminais. Dessa forma, as três principais grandezas elétricas (tensão, corrente e resistência elétrica) estão diretamente ligadas.

$$\rho\alpha = K * \Delta V / I (\Omega m)$$

Onde:

K = Fator geométrico relacionado com a distribuição dos eletrodos

$\Delta V$  = Diferença de potencial

I = Corrente artificial aplicada

## 5.8 Softwares

Os *softwares* são ferramentas amplamente usadas na sociedade moderna. Para a realização deste trabalho foram utilizados os *softwares* Dips e Slide, ambos pertencentes a empresa *RocScience*.

Segundo o site da empresa, o Dips é um programa designado para análise interativa de orientação baseada em dados geológicos. As projeções estereográficas elaboradas pelo *software* seguem as mesmas técnicas usadas em trabalhos manuais. Através dele é possível visualizar os vetores de orientação, contornos de densidade, planos e intersecções. Além disso, apresenta recursos computacionais que permitem identificar as famílias de descontinuidades e sua orientação média, calcular a confiança, variabilidade de agrupamento e realizar análise cinemática.

Para auxiliar no cálculo do fator de segurança e na proposição do modelo de talude, será utilizado o software Slide® 6.0, também pertencente a empresa *RocScience*. Essa ferramenta analisa a estabilidade de taludes em duas dimensões.

O Slide 6.0 analisa a estabilidade de superfícies de deslizamento utilizando métodos de equilíbrio limite, em fatias verticais, como por exemplo o método de Bishop. As superfícies de escorregamento podem ser analisadas de

forma determinística (fator de segurança) ou probabilística (probabilidade de ruptura).

O software se divide em três módulos: Modelo, Cálculo e interpretação.

- **Modelo:** nessa etapa são inseridos os parâmetros geométricos, geológicos, hidrológicos e geomecânicos.

- **Cálculo:** etapa onde o programa realiza o cálculo matricial a partir dos parâmetros carregados na etapa anterior.

- **Interpretação:** é o resultado da simulação do modelo, onde são disponibilizados recursos gráficos.

## 6 METODOLOGIA

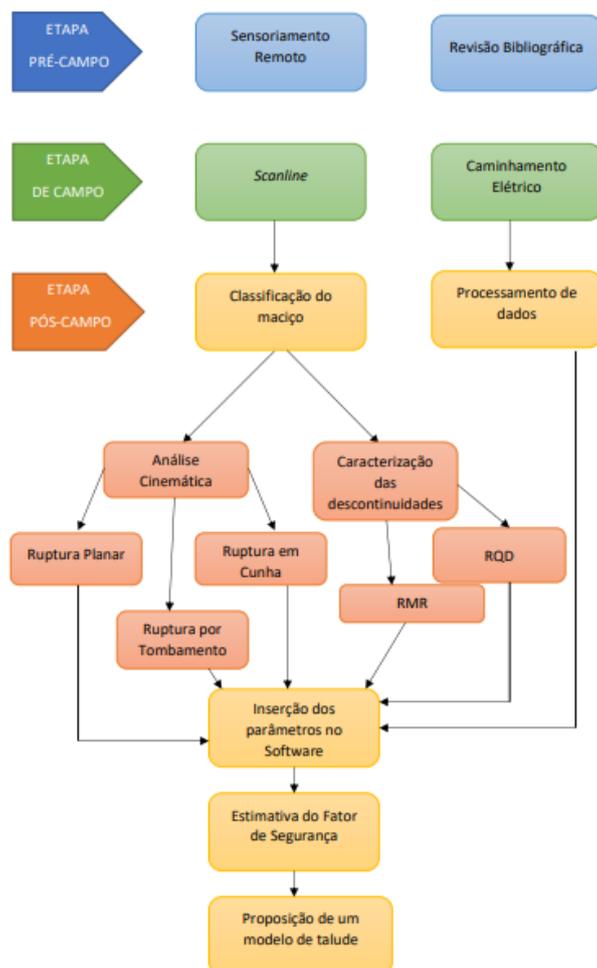
A pesquisa foi dividida em três etapas principais:

(a) Etapa Pré-Campo: na primeira etapa foi construído o embasamento teórico do trabalho caracterizado pela produção de um banco de dados a partir de sensoriamento remoto e realização da revisão bibliográfica.

(b) Etapa de Campo: consiste na etapa de aquisição dos dados mediante a realização de duas saídas à campo nos dias 11 de janeiro e 2 de fevereiro de 2022, onde no primeiro dia foi realizado um reconhecimento da área e no segundo dia foram aplicados os métodos Scanline e Caminhamento Elétrico.

(c) Etapa Pós-Campo: trata-se dos resultados obtidos através do processamento e análise dos dados com auxílio de ferramentas computacionais.

Figura 16 - Fluxograma das etapas do trabalho.



Fonte: Autora.

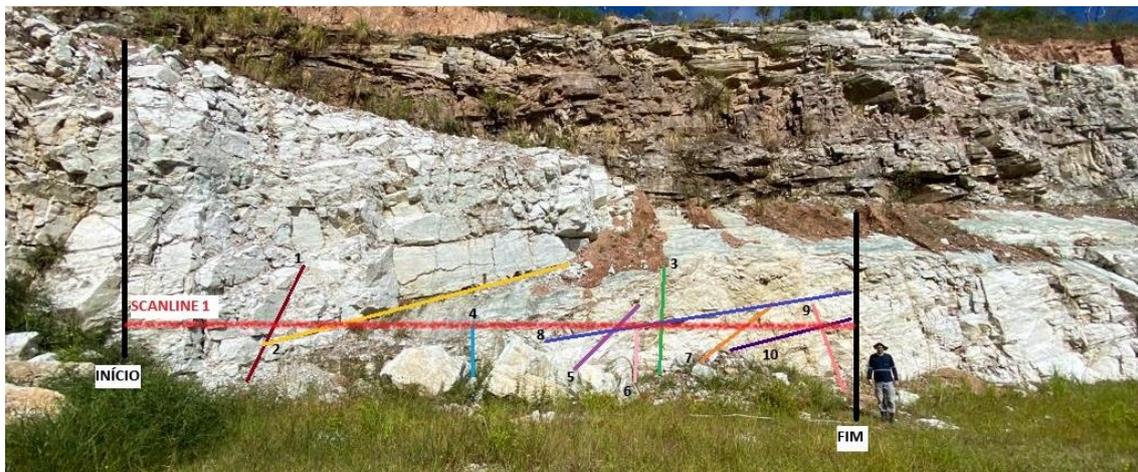
Os materiais e equipamentos necessários para a realização das etapas descritas anteriormente foram disponibilizados pela Universidade Federal do Pampa, campus Caçapava do Sul.

## 6.1 Scanline

O método Scanline foi executado conforme descrito por Chaminé e Gaspar (1995) e Brady e Brown (2005). Consiste em colocar uma fita graduada paralela a face exposta do talude, onde são medidas as atitudes de todas as descontinuidades que a intersectam e descritos os parâmetros necessários para a classificação do maciço.

Para o levantamento foram estipuladas 8 linhas de varredura com 10 metros cada, elas foram realizadas em sequência e apresentam orientação NNE-SSW. O objetivo da continuidade das linhas é a comparação com o levantamento geofísico realizado no local.

Figura 17 - Fotografia do Scanline 1.



Fonte: Autora.

Todas as descontinuidades, representativas, que intersectam a Scanline foram registradas em planilhas de amostragem. As tabelas contam com parâmetros como orientação, distância da intersecção, comprimento do traço, rugosidade, preenchimento, abertura, presença de água e outras observações consideradas importantes.

Para a medição da atitude dos planos foi utilizada a bússola modelo *Brunton*, a distância de intersecção e comprimento dos traços foram medidos

com trena, os outros parâmetros de caracterização das discontinuidades foram definidos conforme ábacos e modelos citados no item 5.2.

Os dados obtidos em campo foram tabelados e, posteriormente, aqueles referentes à orientação e espaçamento das discontinuidades foram plotados e analisados no software Dips a partir da produção de estereogramas.

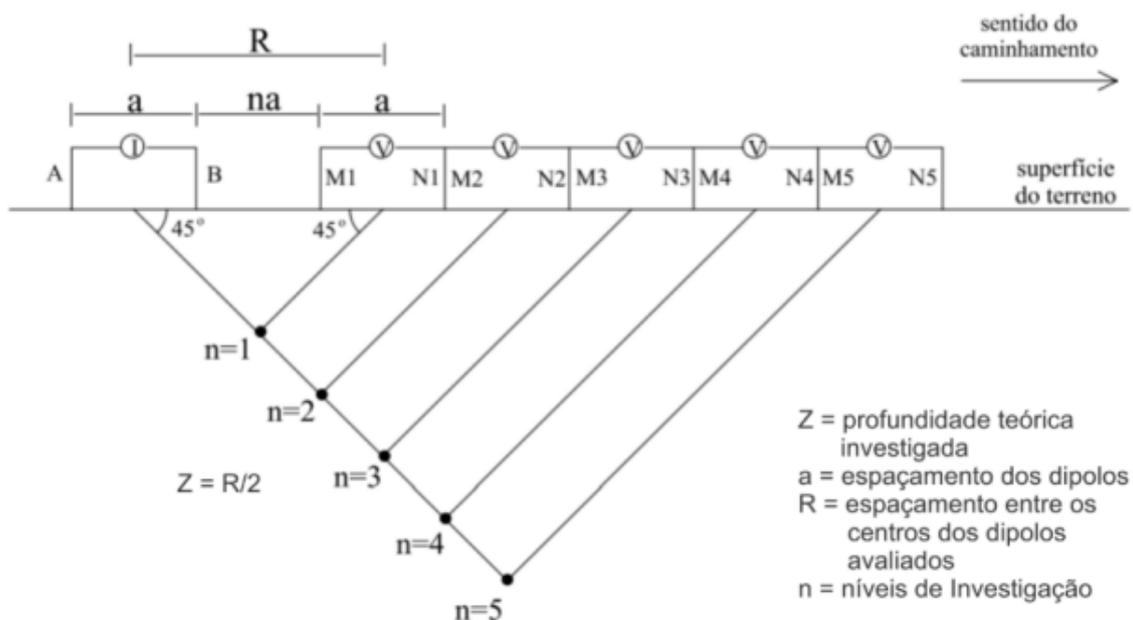
## 6.2 Caminhamento Elétrico

O caminhamento Elétrico é um método de eletrorresistividade com aquisição de dados a partir do avanço lateral de todo o arranjo de eletrodos ao longo do perfil. Dessa forma, ele apresenta uma ou mais profundidades, aproximadamente, constantes e obtêm informações mais amplas sobre a variação horizontal.

O arranjo de campo utilizado será o Dipolo-Dipolo, esse tipo de geometria revela-se como um dos mais precisos e rápidos a serem executados. E apresenta as seguintes características:

- O centro dos dipolos AB e MN não são fixos;
- Espaçamento entre os eletrodos A-B igual ao M-N;
- Cada dipolo MN refere-se a um nível de investigação.

Figura 18 - Ilustração da geometria do arranjo Dipolo-Dipolo.



Fonte: extraído e modificado de Gandolfo & Dallas (2007).

A aplicação do método proporcionará a primeira investigação de subsuperfície da mina em processo de reativação. A eletrorresistividade é vantajosa para o estudo de estabilidade de taludes pois a partir dele é possível caracterizar a homogeneidade do maciço, determinar as áreas de menor resistividade e identificar possíveis anomalias relacionadas aos planos de fraqueza da rocha (descontinuidades).

A aquisição de dados foi realizada com o resistímetro *Syscal Pro* de 10 canais, fabricado pela *IRIS Instruments* (França). Foi proposto um perfil longitudinal (bancada 1) ao eixo principal da bancada situado na crista do talude. O levantamento durou cerca de 40 minutos e contou com uma linha de 80 metros com espaçamento dos eletrodos de cinco metros e alcançou 20m de profundidade, sendo o seu produto uma imagem 2D da subsuperfície.

Figura 19 - (A) Equipamento Syscal Pro; (B) Eletrodos.



Fonte: Autora.

O primeiro passo para o processamento dos dados é a eliminação de dados erráticos e a correção da inversão e do RMS (*Root Mean Square*). A

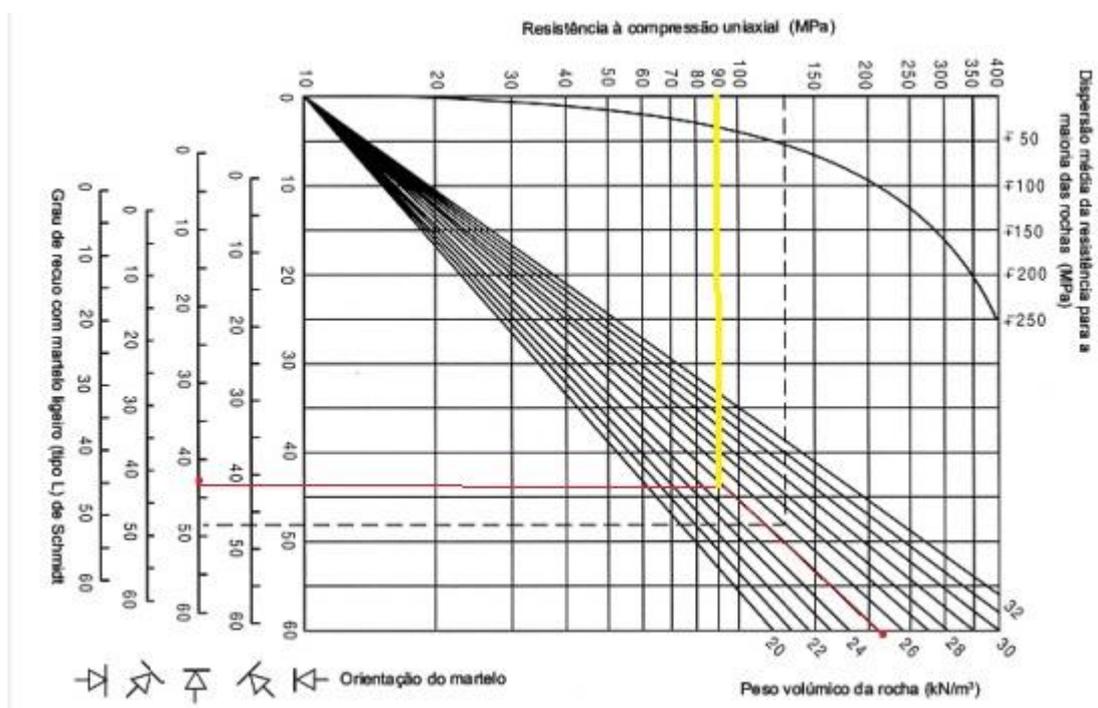
inversão gera o modelo 2D com base em uma resistividade aparente de uma e pseudoseção e o RMS error é o erro que o programa gera a partir das interações da inversão do método de interpolação dos mínimos quadrados.

De acordo com Loke e Barker (1996), o tratamento dos dados é fundamental para que os dados fiquem mais condizentes com a realidade. Os valores de resistividade aparente, obtidos no caminhamento elétrico, são então convertidos e o produto é um mapa 2D detalhado. O processamento dos dados foi realizado no software Res2Dinv (versão estudante), o mapa obtido servirá de base para comparação e complementação para os dados obtidos no levantamento geotécnico.

### 6.3 Ensaio Esclerométrico

O esclerómetro utilizado é do tipo de Schimidt, aparelho que permite obter *in situ* e de forma não invasiva, a resistência à compressão do material. As medidas obtidas em campo foram tabeladas e, posteriormente, plotadas no ábaco de Miller.

Figura 20 - Ábaco de Miller.



Fonte: Extraído e Modificado de Vallejo, et al., 2002.

O valor do peso específico da rocha ( $25,37\text{kN/m}^3$ ) foi cedido pela empresa parceira do projeto. A resistência a compressão uniaxial estimada a partir do ensaio esclerométrico foi de 90 MPa.

## 7 RESULTADOS

O presente capítulo consiste na apresentação dos resultados obtidos a partir do desenvolvimento das metodologias propostas.

### 7.1 RQD – *Rock Quality Designation*

Como explicado anteriormente, o RQD é calculado a partir da medida do espaçamento das descontinuidades na face exposta do talude. Foram obtidas 74 medidas em 79,5 metros de varredura, assim:

$$RQD' = 100 e^{-0.1\lambda} \times (0,1\lambda + 1)$$

$$\lambda = 74 / 79,5 = 0,93$$

$$RQD = 99,593\%$$

Segundo a classificação de Deere, 1967, o valor obtido é referente a um maciço rochoso considerado excelente.

### 7.2 RMR – *Rock Mass Rating*

A partir do cálculo do RQD e dos parâmetros obtidos em campo, foi possível classificar o maciço rochoso de acordo com a classificação proposta por Bieniawski, 1989.

Tabela 12 - Classificação maciço.

Classificação de Parâmetros RMR Scanline							
Parâmetros	Range de Valores						
1	Resistência à compressão simples (MPa)	>250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	1 - 5	0 - 1
	Avaliação	15	12	7	4	2	1
2	RQD	90/100	75/90	50/75	25/50	<25	x
	Avaliação	20	17	13	8	3	x
3	Espaçamento (m)	> 2	0,6 - 2	0,2 - 0,6	0,06 - 0,2	<0,6	x
	Avaliação	20	15	10	8	5	x
4	Rugosidade	Muito rugosa sem abertura	Levemente rugosa abertura < 1 mm	Levemente rugosa abertura < 1 mm alterado	Lisa	Lisa e friável	x
	Avaliação	30	25	20	10	0	x
5	Presença de Água	Completamente seco	Úmido	Molhado	Gotejando	Fluindo	x
	Avaliação	15	10	7	4	0	x

Fonte: Extraído e adaptado, Bieniawski (1989).

O valor do RMR é adquirido através da soma dos valores designados aos parâmetros. O maciço avaliado apresenta RMR igual a 77, pois há de se considerar um fator corretivo referente a orientação das descontinuidades (tabela 13).

Tabela 13 - Fator corretivo do RMR.

Orientação das descontinuidades	Obras ou empreendimentos	Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Ajuste RMR	Túneis	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	x

Fonte: Extraído e adaptado, Bieniawski (1989).

A tabela 14 mostra que, segundo a classificação de Bieniawski (1989), o maciço rochoso é considerado de boa qualidade.

Tabela 14 - Classificação final do maciço rochoso.

CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO A PARTIR DOS VALORES TOTAIS					
VALOR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 21
CLASSE	I	II	III	IV	V
DESCRIÇÃO	Muito Boa	Boa	Razoável	Pobre	Muito Pobre

Fonte: Extraído e adaptado, Bieniawski (1989).

### 7.3 Análise Geofísica

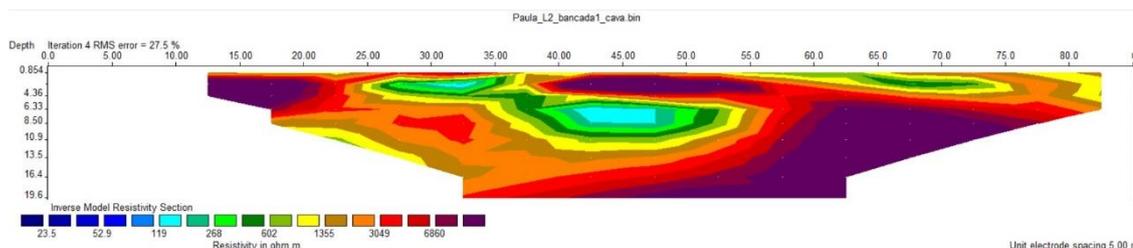
Os dados do levantamento geofísico de caminhamento elétrico, realizado na área de estudo, foram processados e apresentados em seções 2D. Os valores de resistividade estão representados com escala colorimétrica, padronizados em escala única em ohm.m. A paleta de cores varia entre cores frias, para valores menores, e quentes, para valores maiores.

O levantamento geofísico permite a caracterização da subsuperfície de maneira não invasiva. Dessa forma é possível determinar as características referentes a homogeneidade do maciço e correlacionar zonas de menor resistividade com a presença de descontinuidades, visto que a presença de

descontinuidades favorece a percolação de água meteórica e consequentemente diminui o potencial resistivo do corpo.

O perfil, situado na crista do talude, apresenta cerca de 70 metros de comprimento e 20 metros de profundidade. Os valores de resistividade do maciço variam de 119 a 6860 ohm.m.

Figura 21 - Perfil de eletrorresistividade.



Fonte: Autora.

Os resultados obtidos constata a heterogeneidade do maciço rochoso e revelam uma zona de menor resistividade, a qual é estabelecida dos 20 aos 60 metros do perfil e dos 0,854 a 10,9 metros de profundidade. A anomalia, da zona de menor resistividade, apresenta formato elipsoide e gradação da escala de cor. As cores variam do vermelho (bordas da elipse) ao azul (centro), com resistividades entre 119 e cerca de 5000ohm.m.

A partir da análise dos dados geofísicos foi possível inferir que a zona anômala caracteriza uma área com maior concentração de descontinuidades e, com isso, direcionar o foco da análise cinemática para os scanlines 3, 4, 5 e 6, os quais foram estabelecidos dos 20 aos 60 metros do perfil.

#### 7.4 Análise Cinemática

A análise cinemática consiste na caracterização geomecânica do maciço a partir da identificação dos modelos potenciais de ruptura. Nesse capítulo são apresentadas as projeções estereográficas das medidas estruturais obtidas em campo. Os estereogramas foram produzidos utilizando o *software* Dips, além da orientação das medidas, foram utilizados os parâmetros expostos na tabela 15. O valor do ângulo de atrito do maciço foi cedido pela empresa colaboradora do projeto.

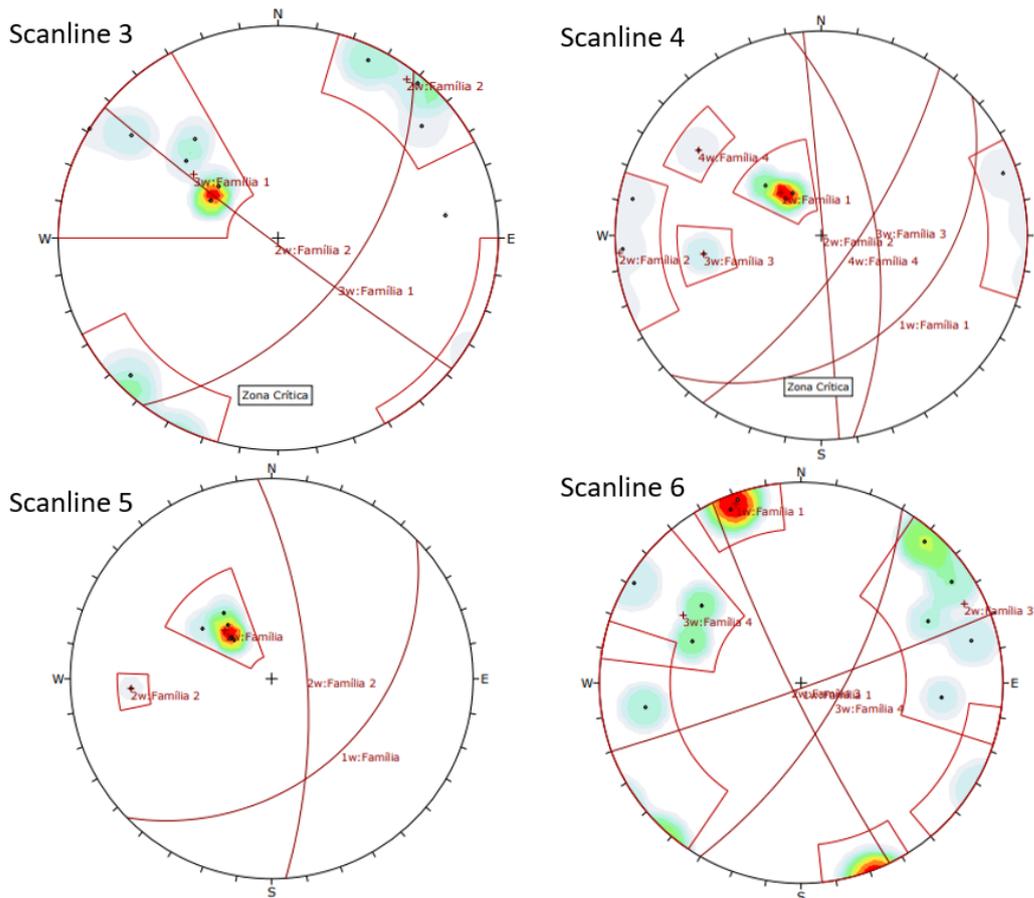
Tabela 15 - Tabela de parâmetros Dips.

PARÂMETROS DIPS	
DIP DIRECTION (TALUDE)	045
DIP (TALUDE)	80
LIMITE LATERAL	20°
ÂNGULO DE ATRITO	32.85

Fonte: Autora.

O talude apresenta orientação do strike NW-SE, mesma orientação das linhas de varredura. Os *scanlines* alvos de investigação cinemática foram definidos a partir da análise geofísica e analisados de forma individual (figura 22). Foram analisadas 35 medidas estruturais, divididas em três famílias principais.

Figura 22 - Estereogramas dos *Scanlines*.



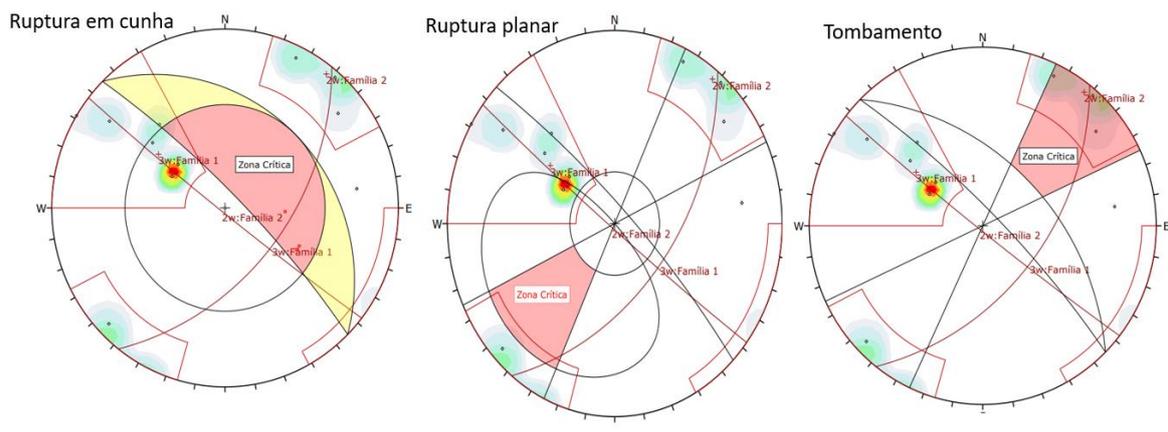
Fonte: Autora.

### 7.4.1 Scanline 3

Ao analisar o estereograma representativo da ruptura em cunha foi possível constatar 464 intersecções de planos, onde 17% delas se encontram em zona crítica. Vale ressaltar que a maior parte das discontinuidades são resultado das detonações, dessa forma o risco de ruptura em cunha não é considerável.

Dos 33 planos considerados para ruptura planar, nenhum se encontra em zona crítica. Tendo em conta a ruptura por tombamento, foram aferidos 33 planos, com 8 deles em zona crítica. Todas as discordâncias da zona crítica da ruptura por tombamento são pertencentes à família 2, o que caracteriza uma família com orientação concordante com o mergulho e/ou com alto ângulo de mergulho.

Figura 23 - Estereogramas dos mecanismos de ruptura do Scanline 3

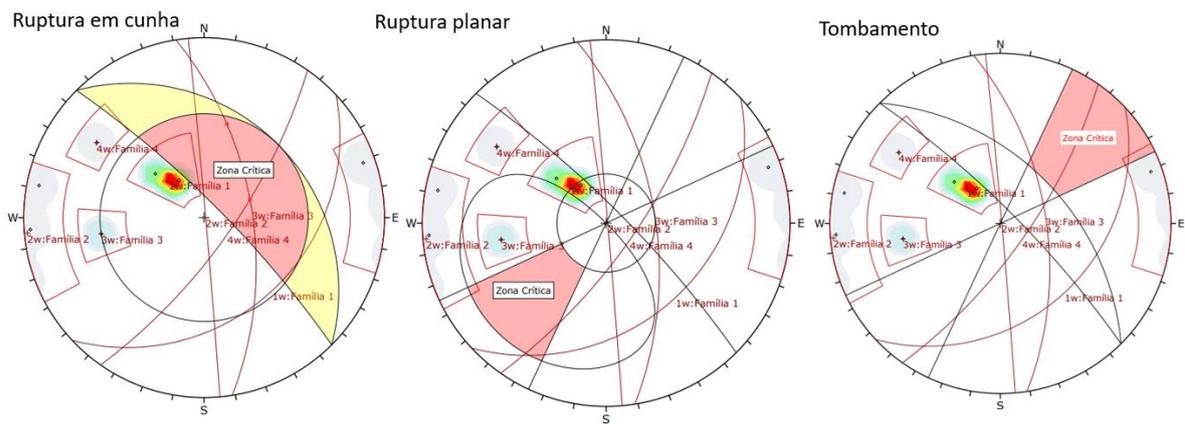


Fonte: Autora.

### 7.4.2 Scanline 4

Para a Scanline 4 não foram constados planos na zona crítica para mecanismos de ruptura planar e tombamento. Para a ruptura em cunha foram analisados 158 planos, mas apenas 4% de encontra em zona crítica. Na scanline 4 as famílias mostram-se paralelizadas e perpendiculares em relação ao ângulo do talude.

Figura 24-Estereogramas dos mecanismos de ruptura do Scanline 4

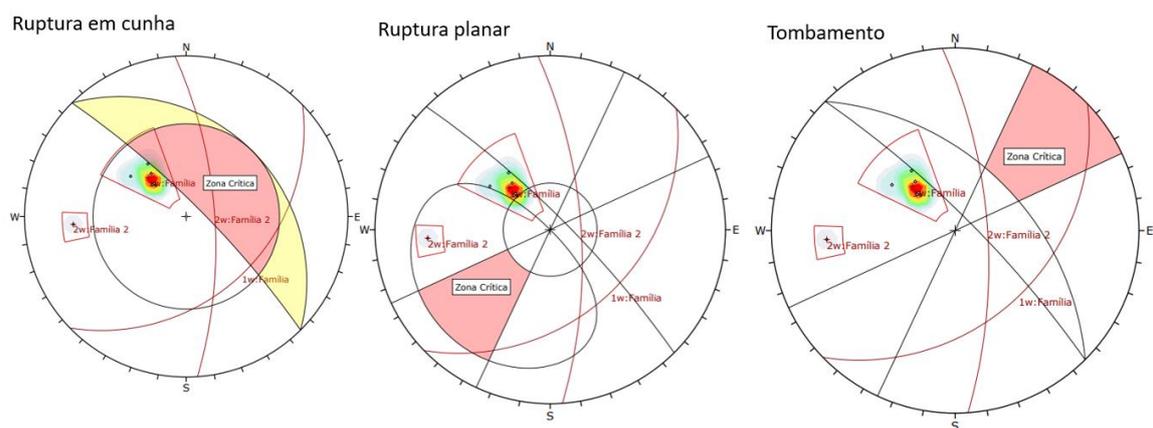


Fonte: Autora.

### 7.4.3 Scanline 5

Na análise cinemática do scanline 5 foi possível constatar que nenhum dos polos das descontinuidades se encontra em zona crítica, o que indica, como dito anteriormente, um comportamento colateral das descontinuidades. Dessa forma, a empresa não deve se preocupar com movimentos de massa provenientes de ruptura e deve focar nos movimentos originados de desprendimento de blocos.

Figura 25- Estereogramas dos mecanismos de ruptura do Scanline 5



Fonte: Autora.

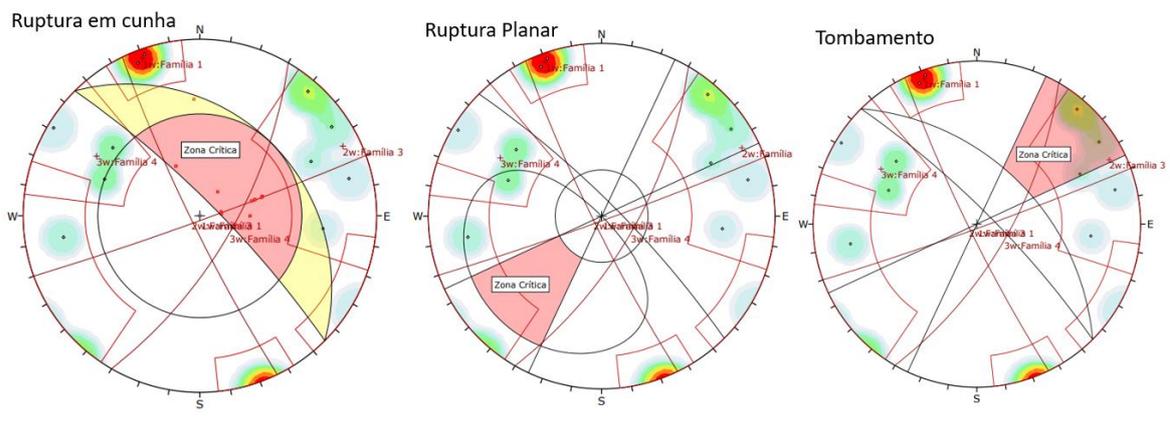
### 7.4.4 Scanline 6

Foram analisados 156 planos para a ruptura em cunha, 36 deles apresentam o polo na zona crítica (22% das amostras). Como dito anteriormente, a maior parte das fraturas consideradas são de natureza

antrópica e apresentam menor persistência, dessa forma o risco de ruptura em cunha é desconsiderado.

Não há polos de descontinuidades na zona crítica para mecanismos de ruptura planas. Quanto à ruptura por tombamento, dos nove planos analisados da família 3, cinco se encontram na zona crítica, caracterizando uma família com orientação paralela à do talude.

Figura 26- Estereogramas dos mecanismos de ruptura do Scanline 6



Fonte: Autora.

## 7.5 Fator de Segurança

O presente estudo utilizou o software Slide para a determinação do fator de segurança do talude. O software se baseia no método de Equilíbrio Limite de Bishop, o qual indica a razão entre a resistência disponível e a resistência mobilizada. O primeiro passo para o cálculo do FS é a caracterização geomecânica e geométrica do talude. Os parâmetros inseridos no software estão expostos na tabela 16.

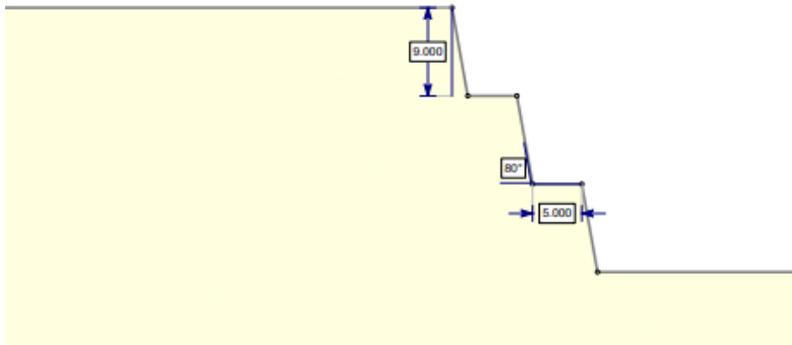
Tabela 16 - Tabela de Parâmetros SLIDE

PARÂMETROS SLIDE	
ÂNGULO DE ATRITO	32.85
ÂNGULO DO TALUDE	80°
ALTURA DO TALUDE	9m
TAMANHO DA BERMA	5m
N° DE BANCADAS	3
PESO ESPECÍFICO	25.37
COMPRESSÃO UNIAXIAL	90MPa

Fonte: Autora.

A partir do modelo de campo foi gerado um modelo digital representativo da bancada. O modelo foi importado do AutoCad no formato dxt.

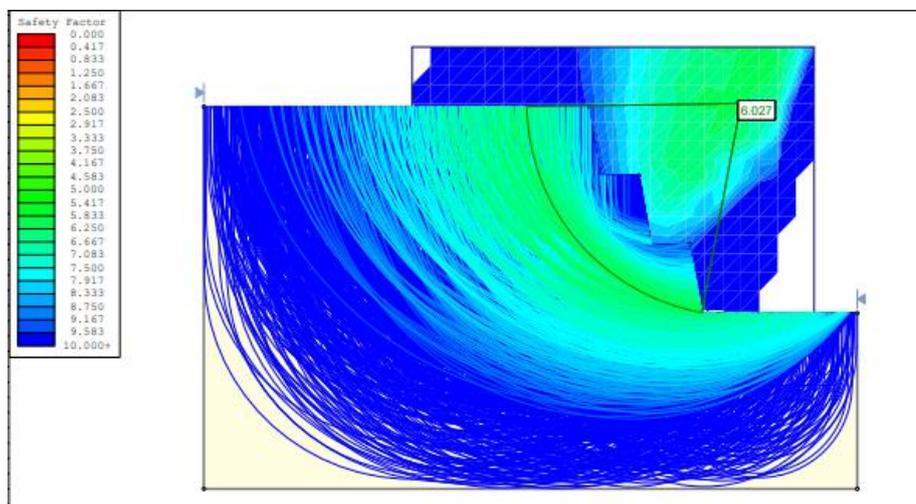
Figura 27- Modelo do perfil do talude analisado



Fonte: Autora.

O cálculo do FS foi realizado de maneira determinística, analisando as superfícies de deslizamento por meio da análise em fatias verticais, na qual se baseia o método de equilíbrio limite de Bishop. Foram realizados múltiplos cálculos para o Fator de Segurança na área do talude, o menor valor obtido foi de 6,027.

Figura 28- Fator de Segurança obtido no Slide



Fonte: Autora.

## **8 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Os métodos geológicos, geotécnicos e geofísicos utilizados no projeto foram realizados e mostraram-se satisfatórios para a determinação do fator de segurança do talude. Como resultado foram obtidos perfis, mapas e modelos computacionais.

O levantamento geofísico, a partir da investigação eletrorresistiva do maciço através da técnica de caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo, tornou possível a visualização, de forma bidimensional, da variação da resistividade do maciço em subsuperfície. A partir da análise geofísica foi possível determinar as áreas de interesse para investigações mais detalhadas através de análise cinemática.

A metodologia Scanline foi fundamental na obtenção dos parâmetros necessários para a caracterização geomecânica do maciço. O scanline é um dos métodos mais completos a serem empregados na caracterização da rocha, pois a partir dele foi possível realizar a análise cinemática e calcular o RQD e o RMR. De acordo com as suas características geomecânicas, o maciço, é considera de boa qualidade.

A análise cinemática dos mecanismos de ruptura o talude não apresentou grandes riscos para rupturas em cunha e planares. No caso de tombamentos, é possível que ocorram situações passíveis de ruptura devido a presença de descontinuidades com orientação paralela à do talude.

O uso do software Slide garante uma maior confiabilidade ao modelo de talude proposto. Foi obtido um fator de segurança com valor satisfatório de 6,027. Levando em conta que o valor mínimo previsto na NBR 11682 (2009) para estabilidade de taludes é o mínimo de 1,3, o valor obtido a partir da modelagem é excelente.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Anuário Mineral Estadual: Rio Grande do Sul 2018 ano base 2017**. Brasília, 2021.

AHRENDT, Adriana. **Movimentos de massa gravitacionais-proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão-SP**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2005.

ALMEIDA, F. F. M., HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B & FUCK, R. A. 1981. **Brazilian Strucural Provinces: an introduction**. Earth Science Rewiews, vol. 17, pág. 1-29, abril 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT-NBR 15845-2: **Rochas para revestimento Parte 2: Determinação da densidade aparente, da porosidade aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2015

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – **Estabilidade de Taludes**, Rio de Janeiro, 2006. NBR 11682.

BITENCOURT, M. F. **Metamorfitos da região de Caçapava do Sul, RS: geologia e relações com o corpo granítico**. Simpósio Sul-brasileiro de Geologia, v. 1, p. 37-48, 1983.

BORGES, Welitom Rodrigues. Investigações geofísicas na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e Eletorresistividade. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 22, p. 91-91, 2004.

BORTOLOTTI, Olavo José. **Petrologia dos Mármore de Caçapava do Sul, RS**. 1986. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986

BORTOLOTTI, Olavo José. **Petrography of marbles from Caçapava do Sul, RS, Southern Brazil**. Ciência e Natura, v. 9, n. 9, p. 37-66, 1987.

BRAGA, Antonio Celso de Oliveira. **Métodos da eletorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática**. 2006. ii, 121 f. Tese (livredocência) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2006

BRADY, B.H.G; BROWN, E.T. Rock mechanics for underground mining, 3rd ed. London: Klumer Academic Publishers. 2005.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações, Fundamentos**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1996.

CARMIGNANI, Luigi; FIORI, Alberto Pio. **Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. rev. e ampl. Curitiba: Ed. UFPR, 2009.

CHAMINÉ, H. I. & GASPAR, A. F. (1995). **Estudo da compartimentação de maciços rochosos pela técnica de amostragem linear**. Aplicação a uma travessa da Mina de Carvão de Germunde. Estudos, Notas & Trabalhos Inst. Geol. Min., Porto,37: 97-111

DAL BOSCO, Lucas Luiz. Análise Global de Estabilidade de Taludes e Setorização de Cava em Uma Mina de Mármore. 2019. 92 f. TCC (Graduação) - Curso de Geologia, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2019.

DEERE, D. U.; MILLER, R. P.. Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock. Kirtland Air Force Base, New Mexico: Air Force Weapons Laboratory, 1966. 327 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. NRM-02 – Lavra a céu aberto. Brasília, DNPM, 2001.

FIORI, A.P., CARMIGNANI L. (EDS). 2015. Fundamentos de Mecânica dos Solos e das rochas - Aplicações na estabilidade de taludes. São Paulo, Oficina de Textos, 576 p.

GANDOLFO, O. C. B.; GALLAS, J. D. F. 2007. **O arranjo pólo-dipolo como alternativa ao dipolo-dipolo em levantamentos 2D de eletrorresistividade**. Revista Brasileira de Geofísica.

GANDOLFO, O. C. B. **Ensaio geofísicos**. Notícias da construção, São Paulo, p. 56 - 57, 01 out. 2012.

GERSCOVICH, Denise M.S. **Estabilidade de Taludes. Faculdade de Engenharia Departamento de Estruturas e Fundações**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2009.

GONÇALVES, Cláudio Francisco Ferreira. **Caracterização e classificação geomecânica de taludes rochosos: aplicação a caso de estudo**. Tese de Doutorado.2017.

HARTMANN, L. A.; CHEMALE JR, Farid; PHILIPP, R. P. **Evolução geotectônica do Rio Grande do Sul no pré-cambriano**. Ianuzzi R. & Frantz JC.(Org.), v. 50, p. 97-123, 2007.

HOEK, E; BRAY, J. Rock Slope Engineering. 3° ed. IMM, London, 1981. HOEK-BROWN CRITERION – 2002 edition.5th North American Rock Mechanics Symposium. Toronto, Canada. Vol. 1, p.267-273.

HOEK, E; MARINOS, P. A brief history of the development of the Hoek Brown failure criterion. Soils and Rocks. 2007. No. 2., November.

LINHARES, R. MARIANO. **Análise de Estabilidade de Talude Rodoviário em Solo Residual**. Trabalho de Conclusão. Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 46p, 2011.

IBRAM, **Mineração do Brasil**. Portal da mineração. História. <https://portaldamineracao.com.br/sobre-a-mineracao/historia/> acessado em: 13 de Julho 2021.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Malha municipal da divisão político-administrativa Brasileira, 2009.

IPT. 2011. **Levantamento geofísico e ensaios geotécnicos laboratoriais no maciço argiloso compactado da barragem principal, pertencente à barragem de contenção de rejeitos do palmital, município de Alumínio (SP)**. RELATÓRIO TÉCNICO No 122.567-205, 41p

MACHADO, Higor; SILVA, Frank; MOREIRA, Samuel Santos. **Influência Da Inclinação Na Concepção De Taludes Artificiais**. Faculdade Evangélica de Goianésia. 2020.

MARANGON, M. **Mecânica dos Solos II**. Faculdade de Engenharia - NuGeo/ Núcleo de Geotecnia. Documentos de apoio à disciplina Mecânica dos Solos. Universidade Federal de Juiz de Fora - Faculdade de Engenharia, Departamento de Transportes, 2005

MARANGON, Marcos. **Geotecnia de fundações**. Disponibilizado pela Universidade Federal de Juiz de Fora, 2009.

MARINOS V., MARINOS P., HOEK, E. (2005). The geological strength index: applications and limitations. Bull. Eng. Geol.Env., 64:55-65

MASSAD, Façal. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. Oficina de textos, 2010.

MORGENSTERN, N. R. **The Role of Analysis in the Evaluation of Slope Stability. Landslides**, In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDE, 1995.

NARDI, L.V.S. & BITENCOURT, MF. **Geologia, petrologia e geoquímica do Complexo Granítico de Caçapava do Sul, RS**. Revista Brasileira de Geociências, 19:153-169. 1989

NOGUEIRA, Nuno Alexandre Castanheira Cruz. **Análise de estabilidade de taludes artificiais: técnicas e métodos para avaliação da estabilidade**. 2010. Tese de Doutorado.

PAULI, Eduarda Dalla Nora. **Análise de estabilidade de talude utilizando o método de Scanline em uma pedra de diabásio**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) - Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2021.

PRIEST, S. D.; HUDSON, J. A. (1976). Discontinuity spacings in rock. Journal rock mechanics, mining eand geomechanics, vol. 13, 00 135-148. Pergamon Press. Great Britain

PRIEST, S.D.; HUDSON, J.A. 1981. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. *Int. Journal Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr.*, v.18, p.183-197.

RAMGRAB, G. E. et al. Folha SH. 22 - Porto Alegre. In: SCHOBENHAUS, C. et al. *Carta geológica do Brasil ao milionésimo, sistema de informações geográficas, programa geologia do Brasil*. Brasília: CPRM, 2004.

RAMOS, Tânia Marisa Maia Azevedo. **Ensaio geomecânico em rochas metassedimentares do maciço da Mina das Azeleiras (Mosteiro de Tibãe): comparação, potencialidades e limitações**. Departamento de Engenharia Geotécnica, ISEP. 2009

REMUS, M.D.V., HARTMANN, L.A., MCNAUGHTON, N.J., FLETCHER, I.R. **Shrimp UPb zircon ages of volcanism from the São Gabriel Block, southern Brazil**. In: Simpósio sobre vulcanismo e ambientes associados. *Anais... Boletim de Resumos*, 83, 1999

RIBEIRO, M.; BOCCHI, P. R.; FIGUEIREDO, P. M. **Geologia da Quadrícula de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul**, Brasil. *Boletim DNPM DFPM*, Porto Alegre, 1966, n. 127, 1966

SIMONS, Noel; MENZIES, Bruce; MATTHEWS, Marcus. *A Short Course in Soil and Rock Slope Engineering*. London: Thomas Telford, 432 p. 2001.

SILVA, Apolino José Nogueira da; CARVALHO, Fabíola Gomes de. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, 2007.

SILVA, Vanessa Coutinho. **Métodos analíticos para avaliar a contribuição de estacas para o fator de segurança de taludes**. UFRJ. 2013.

SOFTWARE DIPS ROCSCIENCE. Rocscience, 2021. Disponível em Acesso em: 10 fev. 2022.

SOFTWARE SLIDE ROCSCIENCE. Rocscience, 2021. Disponível em Acesso em: 18 fev. 2022.

SOUZA, Luiz Antonio Pereira de. **Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2006.

SOUZA, Lorryne Karoline; RIBEIRO, Kátia Daniela. **LIMITES DE ATTERBERG USADOS COMO SUBSÍDIO PARA O MANEJO ADEQUADO DOS SOLOS**. In: XIII Mostra Integrada de Pesquisa e Extensão. 2017.

VALLEJO G. de; FERRER, M.; ORTUÑO, L. & OTEO, C. *Ingeniería geológica*. Prentice Hall, Madrid, 715p. 2002.

WYLLIE, Duncan C.; MAH, Christopher W.. *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*. 4. ed. New York: Spon Press, 2004. 431 p.