



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ – CAMPUS CRATEÚS  
CURSO DE ENGENHARIA DE MINAS**

**ANTONIO FRANCISCO DA COSTA MAIA**

**AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DOS TALUDES DE ROCHA DO CORTE  
FERROVIÁRIO SITUADO NO CENTRO DA CIDADE DE CRATEÚS/CE PELOS  
MÉTODOS RMR, Q - BARTON E SMR**

**CRATEÚS – CE**

**2021**

ANTONIO FRANCISCO DA COSTA MAIA

AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DOS TALUDES DE ROCHA DO CORTE  
FERROVIÁRIO SITUADO NO CENTRO DA CIDADE DE CRATEÚS/CE PELOS  
MÉTODOS RMR, Q - BARTON E SMR

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal do Ceará – Campus de Crateús, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Rafael Chagas Silva  
Coorientador: Prof. Dr. Francisco Diones Oliveira Silva

CRATEÚS – CE

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- M184a Maia, Antonio Francisco da Costa.  
Avaliação da estabilidade dos taludes de rocha do corte ferroviário situado no centro da cidade de Crateús/CE pelos métodos RMR, Q-Barton e SMR / Antonio Francisco da Costa Maia. – 2021.  
98 f.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia de Minas, Crateús, 2021.  
Orientação: Prof. Me. Rafael Chagas Silva.  
Coorientação: Prof. Dr. Francisco Diones Oliveira Silva.
1. Classificação geomecânica. 2. Talude artificial de rocha. 3. Estabilidade de talude. I. Título.  
CDD 622
-

ANTONIO FRANCISSCO DA COSTA MAIA

AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DOS TALUDES DE ROCHA DO CORTE  
FERROVIÁRIO SITUADO NO CENTRO DA CIDADE DE CRATEÚS/CE PELOS  
MÉTODOS RMR, Q - BARTON E SMR

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal do Ceará – Campus de Crateús, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Aprovada em: 05/07/2021.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Me. Rafael Chagas Silva (Orientador)

Universidade Federal do Ceará

---

Prof. Dr. Francisco Diones Oliveira Silva (Coorientador)

Universidade Federal do Ceará

---

Prof. Me. Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira

Universidade Federal do Ceará

---

Prof. Me. Carlos Eduardo da Silva Araujo

Universidade Federal de Pernambuco

A meus amados pais: Edgar Gouveia Maia e  
Gonçala Alexandre da Costa Maia – pela  
oportunidade (contingência) de ter me  
oferecido a vida.

## RESUMO

Os métodos de classificações geomecânicas aplicados na avaliação da estabilidade de taludes artificiais de rochas são essenciais para garantir a segurança em obras de engenharia. Estas classificações são realizadas por meio da descrição e da caracterização do maciço rochoso através de parâmetros geológicos e geotécnicos. Os parâmetros avaliados são categorizados por pontuações que qualificam a estabilidade dos taludes. Em vista disso, o presente trabalho utilizou de métodos de classificações geomecânicas - RMR, Q - Barton e SMR - para avaliar a estabilidade dos taludes rochosos do corte ferroviário situado no centro da cidade de Crateús – CE, com o propósito de identificar riscos potenciais associados à instabilidade destes taludes e, assim, propor, para os casos necessários, possíveis medidas de estabilização. Para tanto, os taludes identificados como T1 e T2 foram subdivididos em *Scanlines* de 5 (cinco) metros de comprimento ao longo de uma extensão de 30 (trinta) metros. Neste intervalo, foi realizada a caracterização geológico-geotécnica das estruturas identificadas e, posterior análise cinemática dos taludes estudados utilizando o *Software Stereonet 11*. Posteriormente, os dados geológico-geotécnicos foram utilizados nos sistemas de classificação RMR, Q – Barton e SMR. A análise cinemática permitiu identificar 4 (quatro) famílias de descontinuidades, codificadas como F1, F2, F3 e F4, que mostraram características geotécnicas similares, excetuando a Família F3 que se mostrou mais proeminente nos taludes. As Famílias F2 e F4 mostraram-se favoráveis a formação de rupturas em cunha. As classificações RMR e Q–Barton apresentaram resultados semelhantes, caracterizando o maciço rochoso dos taludes como rocha ruim e de muito má qualidade, respectivamente. Por outro lado, a classificação SMR de Romana caracterizou o maciço rochoso como classe regular (normal), com pequena probabilidade de rupturas planares e sucessivas rupturas em cunha, sendo necessário propor medidas de estabilização/contenção, sendo estas: utilização de telas metálicas ou muros de suporte ao longo do pé dos taludes em zonas mais fraturadas e o uso de concreto projetado nas regiões das faces dos taludes para impedir rupturas em cunhas.

**Palavras-chave:** Classificação geomecânica. Talude artificial de rocha. Estabilidade de talude.

## ABSTRACT

The geomechanical classifications methods applied in the evaluating the stability of artificial rock slopes are essential to ensure safety in engineering works. These classifications are carried out through the description and characterization of the rock mass through geological and geotechnical parameters. The evaluated parameters are categorized by scores that qualify the stability of the slopes. In view of this, the present work uses the geomechanical classifications methods - RMR, Q - Barton and SMR - to evaluate the stability of the rock slopes of the railroader cut located in the center of the city of Crateús - CE, in order to identify potential risks associated with instability of these slopes and, thus, to propose, for internal cases, possible stabilization measures. Therefore, the slopes identified as T1 and T2 were subdivided into Scanlines of 5 (five) meters in length along a length of 30 (thirty) meters. In this interval, the geological-geotechnical characterization of the identified structures was carried out, followed by kinematic analysis of the studied slopes using the Stereonet 11 software. Subsequently, the geological-geotechnical data were used in the RMR, Q - Barton and SMR classification systems. The kinematic analysis allowed to identify 4 (four) families of discontinuities, coded as F1, F2, F3 and F4, which have similar geotechnical characteristics, except for the F3 family, which is more prominent on the slopes. The F2 and F4 Families are favorable to the formation of wedge breaks. The RMR and Q - Barton classifications showed similar results, characterizing the rock mass of the slopes as bad rock and very poor quality, respectively. On the other hand, Romana's SMR classification characterized the rock mass as a regular (normal) class, with small probability of planar ruptures and successive wedge ruptures, requiring to propose stabilization/containment measures, namely: use of wire mesh or support walls along the foot of the slopes in more fractured areas and the use of shotcrete in the regions of the slope faces to prevent breakage in wedges.

**Keywords:** Geomechanical classification. Artificial rock slope. Slope stability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do município de Crateús – CE.....	15
Figura 2 - Mapa de localização do pontilhão situado no centro da cidade de Crateús.....	16
Figura 3 - Vista dos taludes a partir do pontilhão que os atravessa.....	16
Figura 4 - Corte ferroviário para a passagem da linha Férrea.....	17
Figura 5 - Características das descontinuidades no maciço rochoso.....	22
Figura 6 - Representação dos planos onde ocorrem as medições dos ângulos.....	23
Figura 7 - Exemplos de famílias de descontinuidades não persistentes nos horizontes a), b) e c) .....	25
Figura 8 - Perfil de rugosidade para identificação em campo.....	26
Figura 9 - Ilustração de abertura e largura das descontinuidades.....	27
Figura 10 - Representação das orientações relativas das famílias de descontinuidades em um maciço rochoso.....	32
Figura 11 - Ilustração dos tipos de maciços rochosos: (a) em blocos; (b) irregulares; (c) tabulares e d) colunares.....	34
Figura 12 - Representação dos polos na rede estereográfica por meio de nuvens de polos.	35
Figura 13 - Esquema de (a) ruptura planar; e sua (b) representação estereográfica.....	36
Figura 14 - Esboço de a) ruptura em cunha; e sua b) representação estereográfica.....	37
Figura 15 - Esquema de a) ruptura por tombamento; e sua b) projeção estereográfica.....	38
Figura 16 - Esquema de a) ruptura circular; e sua b) projeção estereográfica.....	38
Figura 17 - Procedimento de determinação do RQD.....	40
Figura 18 - Correlação entre o valor do RQD e o índice $J_v$ .....	41
Figura 19 - Ábaco de determinação do tempo de auto-suporte para aberturas de túneis....	46
Figura 20 - Ilustração da relação entre a orientação de descontinuidades e a face do talude no maciço rochoso.....	54
Figura 21 - Mapa litológico do município de Crateús-CE.....	59
Figura 22 - Individualização dos Taludes em T1 – vermelho e T2 – azul.....	64
Figura 23 - Porções dos taludes bastante intemperizadas.....	65
Figura 24 - Região no qual foi empregado o método da Scanline utilizado para determinar as propriedades das descontinuidades em uma extensão de 5 (cinco) metros...	65
Figura 25 - Rocha formadora dos taludes, Ortognaisse.....	66
Figura 26 - Presença de minerais félsicos, quartzo e feldspato potássico, no Ortognaisse.	67
Figura 27 - Presença de material argiloso no talude T2.....	67

Figura 28 - Distinção das famílias de juntas presentes no maciço rochoso: F1 - vermelho, F2 - verde, F3 - amarelo e F4 - azul.....	68
Figura 29 - Diagrama de contorno com os 30 (trinta) pontos plotados.....	70
Figura 30 - Planos representativos das famílias dos taludes.....	70
Figura 31 - Planos e polos plotados das descontinuidades que compõem a Família F1.....	72
Figura 32 - Representação dos planos e polos das descontinuidades da Família F2.....	73
Figura 33 - Planos e polos referentes à Família F3.....	75
Figura 34 - Planos e polos representativos da Família F3.....	77
Figura 35 - Representação geométrica das condições estruturais para que ocorram rupturas em cunha, planar e por tombamento de blocos.....	78
Figura 36 - Análise dos mecanismos de ruptura para as quatro famílias de fraturas.....	79
Figura 37 - Ocorrência de ruptura em cunha no talude T1.....	80
Figura 38 - Formação de blocos de rocha no talude T1 devido a presença de um elevado número de descontinuidades.....	81
Figura 39 - Amostra utilizada no teste do martelo geológico.....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização do espaçamento entre as descontinuidades.....	24
Tabela 2 - Caracterização da persistência.....	25
Tabela 3 - Caracterização da abertura das descontinuidades.....	28
Tabela 4 - Caracterização do preenchimento.....	29
Tabela 5 - Caracterização da presença de água nas descontinuidades.....	30
Tabela 6 - Classificação do estado de alteração dos maciços rochosos.....	31
Tabela 7 - Classificação do estado de alteração das paredes das descontinuidades.....	31
Tabela 8 - Classificação do maciço rochoso conforme o número de famílias.....	32
Tabela 9 - Descrição do tamanho dos blocos mediante o índice $J_v$ .....	33
Tabela 10 - Classificação de maciços rochosos mediante o formato e tamanho dos blocos.	33
Tabela 11 - Classificação do maciço rochoso mediante o valor do RQD.....	40
Tabela 12 - Valores relativos à resistência à compressão da rocha intacta.....	43
Tabela 13 - Valores relativos ao RQD.....	43
Tabela 14 - Valores relativos ao espaçamento das juntas.....	43
Tabela 15 - Valores relativos às condições das descontinuidades.....	44
Tabela 16 - Valores relativos às características individuais das descontinuidades para o RMR.....	44
Tabela 17 - Faixa de valores para presença de água subterrânea no RMR.....	45
Tabela 18 - Efeito da orientação da escavação no sistema RMR.....	45
Tabela 19 - Valores de correção relativos à obra utilizada.....	46
Tabela 20 - Propriedades do maciço de acordo com o valor do RMR.....	46
Tabela 21 - Valores correspondentes ao índice $J_n$ .....	48
Tabela 22 - Valores adotados para o índice $J_r$ .....	48
Tabela 23 - Valores adotados para o índice $J_a$ .....	49
Tabela 24 - Valores adotados para o índice $J_w$ .....	50
Tabela 25 - Valores adotados para o índice SRF.....	51
Tabela 26 - Procedimentos a serem seguidos para a determinação dos parâmetros RQD, $J_n$ , $J_a$ , $J_r$ , $J_w$ e SRF.....	52
Tabela 27 - Caracterização do maciço rochoso consoante o valor de $Q$ .....	52
Tabela 28 - Valores adotados para fator $F_1$ .....	54
Tabela 29 - Valores correspondentes ao fator $F_2$ .....	55
Tabela 30 - Valores relativos ao fator $F_3$ .....	55

Tabela 31 - Valores correspondentes ao fator $F_4$ .....	56
Tabela 32 - Caracterização do talude consoante o valor do SMR.....	56
Tabela 33 - Tipos de suporte recomendados conforme o valor do SMR.....	57
Tabela 34 - Classificação do estado de resistência da amostra de rocha.....	58
Tabela 35 - Média preliminar das atitudes das famílias de fraturas presentes nos taludes, aferidas manualmente.....	69
Tabela 36 - Atitudes das descontinuidades levantadas aleatoriamente em campo.....	69
Tabela 37 - Atitudes representativas das famílias de fraturas.....	70
Tabela 38 - Atitudes, na notação clar, representativas da Família F1.....	71
Tabela 39 - Características geotécnicas da Família F1.....	72
Tabela 40 - Atitudes, na notação clar, representativas da Família F2.....	73
Tabela 41 - Propriedades geotécnicas da Família F2.....	74
Tabela 42 - Atitudes, na notação clar, representativas da Família F3.....	74
Tabela 43 - Características geomecânicas da Família F3.....	76
Tabela 44 - Atitudes, na notação clar, das fraturas que compõem a Família F4.....	76
Tabela 45 - Propriedades geomecânicas da Família F4.....	77
Tabela 46 - Classificação do talude T1 pelo índice RQD.....	83
Tabela 47 - Classificação RMR do talude T1.....	83
Tabela 48 - RMR corrigido pela relação entre as orientações das descontinuidades e do talude.....	84
Tabela 49 - Determinação da classificação Q - Barton.....	85
Tabela 50 - Cálculo do índice RMR para as Famílias F1 e F2.....	86
Tabela 51 - Cálculo do índice SMR para a linha de interseção entre os planos F2 e F4.....	87

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CE	Ceará
CFN	Companhia Ferroviária do Nordeste
CPRM	Serviço Geológico do Brasil (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais)
E	Leste
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSA	<i>Geological Society of America</i>
GSI	<i>Geological Stress Index</i>
ISMR	Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas ( <i>International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering</i> )
$J_n$	Índice do número de juntas
$J_r$	Índice de rugosidade das juntas
$J_a$	Índice de alteração das paredes das juntas
$J_w$	Índice do fluxo de água
kPa	Quilo Pascal
N	Norte
NE	Nordeste
NW	Noroeste
PFI	Perfil investigado do talude T1
PFII	Perfil investigado do talude T2
Q – BARTON	Índice de Qualidade de Tuneis ( <i>Tunneling Quality Index</i> )
MPa	Mega Pascal
RMR	<i>Rock Mass Rating</i>
RQD	<i>Rock Quality Designation</i>
SMR	<i>Slope Mass Rating</i>
SRF	Estado de tensão do Maciço
S	Sul
SE	Sudeste
SW	Sudoeste
T1	Talude 1
T2	Talude 2
UFC	Universidade Federal do Ceará
W	Oeste

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha_j$	Strike da descontinuidade
$\alpha_s$	Strike do talude
$\beta_j$	Ângulo de mergulho da descontinuidade
$\beta_s$	Ângulo de mergulho do talude
cm	Centímetro
$e_n$	Valores médios do espaçamento das famílias de descontinuidades
$f$	Corresponde ao número de descontinuidades por unidade de comprimento
F1	Corresponde a fratura enumerada como número 1
F2	Corresponde a fratura enumerada como número 2
F3	Corresponde a fratura enumerada como número 3
F4	Corresponde a fratura enumerada como número 4
$F_1$	Paralelismo entre a direção da junta e a face do talude
$F_2$	Refere-se ao mergulho das descontinuidades
$F_3$	Paralelismo entre o mergulho das descontinuidades e a face do talude
$F_4$	Relaciona-se ao método de escavação utilizado
$I_b$	Tamanho dos blocos
$J_v$	Índice descontinuidades por volume ( <i>volumetric joint count</i> )
L	Corresponde ao comprimento da linha de varredura em metros
l	Remete ao comprimento total do testemunho recuperado
$l_i$	Corresponde as porções dos testemunhos maiores que 10 cm
m	Metro
mm	Milímetro
N	Número de descontinuidades cortadas pela linha de varredura
$n_j$	Número total de famílias
S	Espaçamento médio entre descontinuidades
$\alpha$	Azimute da descontinuidade
$\varphi$	Inclinação do plano da descontinuidade em relação à horizontal
$\lambda$	Frequência de juntas
$\varphi$	Ângulo de atrito interno
°	Grau

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>14</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1</b>	<b>Avaliação geomecânica de maciços rochosos.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1.1</b>	<i>Mecânica das rochas: maciço rochoso, rocha intacta e descontinuidades.....</i>	<b>18</b>
<b>3.1.2</b>	<i>Descontinuidade.....</i>	<b>19</b>
<b>3.2</b>	<b>Caracterização de maciços rochosos.....</b>	<b>21</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Caracterização das descontinuidades.....</b>	<b>21</b>
<b>3.2.1.1</b>	<i>Orientação.....</i>	<b>22</b>
<b>3.2.1.2</b>	<i>Espaçamento entre descontinuidades.....</i>	<b>23</b>
<b>3.2.1.3</b>	<i>Persistência.....</i>	<b>24</b>
<b>3.2.1.4</b>	<i>Rugosidade.....</i>	<b>26</b>
<b>3.2.1.5</b>	<i>Abertura.....</i>	<b>27</b>
<b>3.2.1.6</b>	<i>Preenchimento.....</i>	<b>28</b>
<b>3.2.1.7</b>	<i>Resistência das paredes.....</i>	<b>29</b>
<b>3.2.1.8</b>	<i>Percolação.....</i>	<b>29</b>
<b>3.2.1.9</b>	<i>Alteração do maciço rochoso.....</i>	<b>30</b>
<b>3.2.2</b>	<i>Número de famílias e tamanho de blocos.....</i>	<b>32</b>
<b>3.3</b>	<b>Análise cinemática de taludes rochosos.....</b>	<b>34</b>
<b>3.3.1</b>	<i>Ruptura planar.....</i>	<b>35</b>
<b>3.3.2</b>	<i>Ruptura em cunha.....</i>	<b>36</b>
<b>3.3.3</b>	<i>Ruptura por tombamento (toppling).....</i>	<b>37</b>
<b>3.3.4</b>	<i>Ruptura circular.....</i>	<b>38</b>
<b>3.4</b>	<b>Classificações geomecânicas.....</b>	<b>38</b>
<b>3.4.1</b>	<i>Rock Quality Designation (RQD).....</i>	<b>39</b>
<b>3.4.2</b>	<i>Rock Mass Rating (RMR).....</i>	<b>42</b>
<b>3.4.3</b>	<i>Rock Quality Tunnel - Q – Barton.....</i>	<b>47</b>
<b>3.4.4</b>	<i>Slope Mass Rating (SMR).....</i>	<b>53</b>
<b>3.4.4.1</b>	<i>Fator <math>F_1</math>.....</i>	<b>53</b>
<b>3.4.4.2</b>	<i>Fator <math>F_2</math>.....</i>	<b>54</b>

3.4.4.3	<i>Fator F<sub>3</sub></i> .....	55
3.4.4.4	<i>Fator F<sub>4</sub></i> .....	56
3.5	<b>Teste do martelo geológico</b> .....	57
3.6	<b>Geologia da área de estudo</b> .....	58
4	<b>MATERIAIS</b> .....	60
5	<b>MÉTODOS</b> .....	61
5.1	<b>Revisão na literatura dos métodos de avaliação geomecânica em taludes</b> .....	61
5.2	<b>Coleta das informações geológicas e geotécnicas em campo</b> .....	61
5.3	<b>Análise e refinamento dos dados coletados para avaliação geomecânica dos taludes</b> .....	62
6	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	64
6.1	<b>Caracterização geológico-geotécnica dos taludes estudados</b> .....	64
6.1.1	<i>Caracterização geológica</i> .....	66
6.1.2	<i>Caracterização geotécnica</i> .....	68
6.1.2.1	<i>Família F1</i> .....	71
6.1.2.2	<i>Família F2</i> .....	72
6.1.2.3	<i>Família F3</i> .....	74
6.1.2.4	<i>Família F4</i> .....	76
6.2	<b>Análise cinemática</b> .....	77
6.3	<b>Classificação geomecânica</b> .....	81
6.3.1	<i>Resistência da rocha intacta pelo ensaio do martelo geológico</i> .....	81
6.3.2	<i>Cálculo do RQD</i> .....	82
6.3.3	<i>Classificação RMR</i> .....	83
6.3.4	<i>Classificação Q – Barton</i> .....	84
6.3.5	<i>Classificação SMR</i> .....	85
7	<b>CONCLUSÃO</b> .....	88
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	89
	<b>ANEXO I - PERFIL INVESTIGADO DO TALUDE T1</b> .....	92
	<b>ANEXO II – PERFIL INVESTIGADO DO TALUDE T2</b> .....	94

## 1 INTRODUÇÃO

As classificações geomecânicas são sistemas empíricos que permitem descrever e quantificar o maciço rochoso quanto ao grau de estabilidade. Para tanto, avaliam-se parâmetros geotécnicos e geológicos identificados *in situ* e/ou por meio de ensaios em laboratório para classificar o maciço rochoso em categorias. Essas classificações são muito utilizadas nas fases iniciais de projetos na área de Geologia de Engenharia e podem auxiliar na tomada de decisões, como, por exemplo, na prevenção e mitigação de riscos inerentes as obras envolvendo a construção de taludes rochosos artificiais (BIENIAWSKI, 1989).

Os taludes artificiais são aqueles produzidos pelo homem para alguma razão utilitária, um exemplo seria os taludes rochosos resultantes da escavação de rochas para as aberturas da passagem de linhas férreas. Como consequência, esses taludes podem apresentar instabilidade provocada pelas perturbações no campo de tensões do maciço rochoso, tendo como resultado a movimentação de massa de rocha que podem ocasionar, invariavelmente, danos materiais e/ou pessoais a uma localidade. Isto posto, a avaliação preliminar da estabilidade de taludes artificiais pode ser realizada pelos sistemas de classificações geomecânicas, a fim de garantir a segurança dos taludes pela introdução de métodos de estabilização mais adequados (BIENIAWSKI, 1989).

Neste contexto, insere-se os taludes rochosos da linha férrea do centro da cidade de Crateús-CE. Esses taludes resultaram da abertura do maciço rochoso por detonação com uso de explosivos durante a primeira metade do século XX para a implementação da linha férrea ligando a cidade de Crateús ao distrito de Poty e, posteriormente, à comunidade de Oiticica, na divisa do estado do Piauí, em 1932. Atualmente, esses taludes compõem parte da infraestrutura condicionante da mobilidade urbana da cidade, em virtude de sua localização privilegiada no centro da cidade, visto que não apenas o trem da Companhia Ferroviária do Nordeste (CFN) passa pelo corte ferroviário, como também os habitantes se locomovem pelo pontilhão construído na avenida disposta transversalmente ao corte ferroviário, assim como trafegam-se as margens deste corte.

Nota-se, portanto, a importância de avaliar a estabilidade destes taludes rochosos, a fim de verificar se há riscos de rupturas que possam causar danos à estrutura e acidentes envolvendo a população. Deste modo, este trabalho aplicará as classificações geomecânicas Rock Mass Rating (RMR), Q - Barton e Slope Mass Rating (SMR) para caracterizar os taludes rochosos do corte ferroviário do centro da cidade de Crateús – CE e, então, classificá-los quanto

a estabilidade, e propor, se necessário, através da classificação SMR, possíveis medidas de estabilização.

### **1.1 Objetivo geral**

Este trabalho teve como objetivo avaliar a estabilidade dos taludes do corte ferroviário localizados no centro da cidade de Crateús-CE por meio das classificações geomecânicas RMR, Q – Barton e SMR.

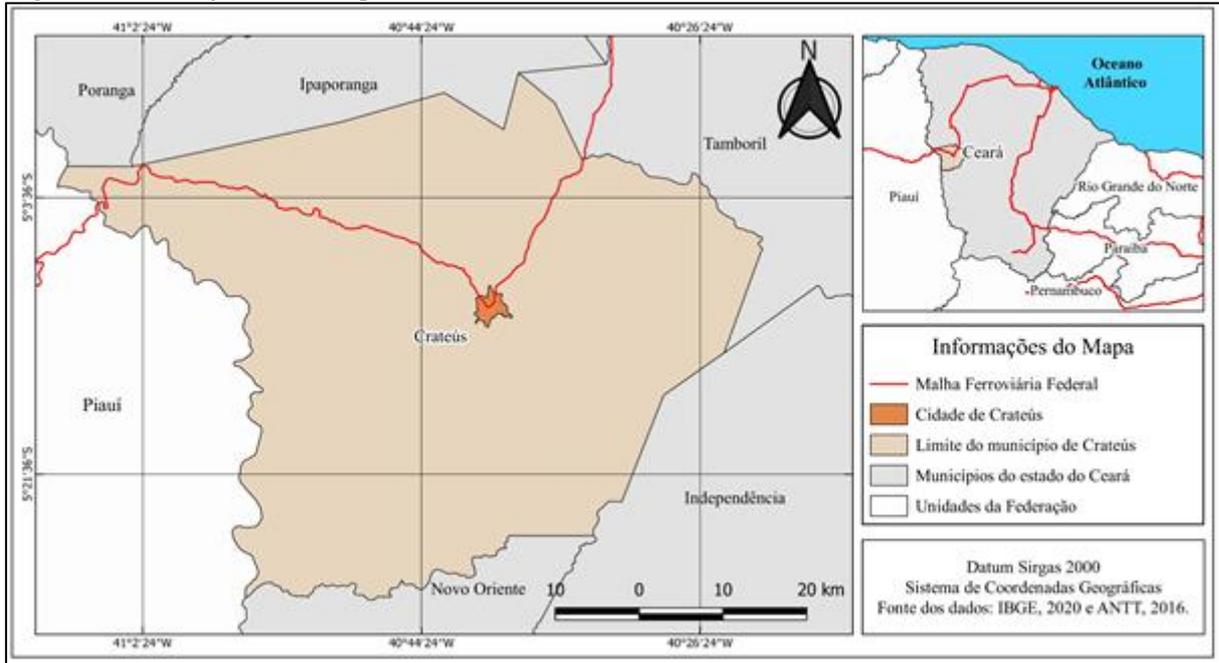
### **1.2 Objetivos específicos**

- caracterizar os parâmetros geológicos e geotécnicos dos taludes rochosos estudados;
- determinar as famílias de descontinuidades dos taludes rochosos;
- avaliar a possibilidade de ruptura nos taludes rochosos através da análise cinemática; e
- definir medidas de estabilização para o talude estudado, se necessário.

## 2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A cidade de Crateús localiza-se na porção oeste do estado do Ceará e faz divisa com o estado do Piauí, Figura 1. Crateús é um dos municípios mais importantes do sertão cearense, com população de aproximadamente de 75.000 habitantes e, com uma extensão territorial de 2985 km<sup>2</sup>, distante cerca de 359 km da capital Fortaleza (COSTA, 2007).

Figura 1- Localização do município de Crateús – CE.



Fonte: do próprio autor.

Os taludes que são objetos de estudo do presente trabalho compõem parte da história da estrada de ferro do município de Crateús. Não há registros da data de realização do corte no maciço rochoso para passagem da linha férrea, entretanto, de acordo com os dados do site Estações Ferroviárias do Brasil, em 1912, a estação da linha férrea que ligava os municípios de Sobral a Ipu, chamada de linha Norte, chegou à cidade de Crateús, inaugurando a primeira estação ferroviária do município, em 12 de dezembro do mesmo ano. Em 1916, esta estação foi estendida até a comunidade de Poty e em 1932 à comunidade de Oiticica, na divisa do estado do Piauí. Portanto, infere-se que os taludes datam dos anos de 1912 a 1916, período em que foi construído o trecho Crateús – Poty. Atualmente, a linha férrea pertence à Companhia Ferroviária do Nordeste (CFN) e a distribuição da malha ferroviária pelo município de Crateús é mostrada na Figura 1. As Figura 2, 3 e 4 mostram a localização do pontilhão e os dois taludes resultantes do corte ferroviário no maciço rochoso, respectivamente.

Figura 2 - Mapa de localização do pontilhão situado no centro da cidade de Crateús.



Fonte: do próprio autor.

Figura 3 - Vista dos taludes a partir do pontilhão que os atravessa.



Fonte: transposto do Google Earth (Acesso em 21/03/2021).

Figura 4 - Corte ferroviário para a passagem da linha Férrea.



Fonte: do próprio autor.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados fundamentos sobre a ciência da mecânica de rochas aplicada a caracterização de maciços rochosos, assim como outros elementos importantes para a compressão da presente pesquisa, tais como a descrição geológica.

#### 3.1 Avaliação geomecânica de maciços rochosos

A caracterização e descrição dos maciços rochosos é uma metodologia imprescindível no âmbito dos estudos da geotecnia que almejam avaliar o seu comportamento, de tal maneira que seja o mais próximo possível do real, devido às particularidades das solicitações que eles estão submetidos (COSTA, 2015). Neste contexto, a avaliação geomecânica dos maciços rochosos dispõe de um conjunto de técnicas teóricas e empíricas que permitem quantificar e qualificar o maciço rochoso de obras civis e de operações mineiras, com intuito de garantir segurança e economia nos trabalhos. Para tanto, os itens descritos a seguir versarão de definições e aplicações pertinentes a esta temática.

##### *3.1.1 Mecânica das rochas: maciço rochoso, rocha intacta e descontinuidades*

O comitê de mecânica de rochas da Geological Society of America (GSA) a definiu como ciência teórica e aplicada do comportamento mecânico da rocha; é o segmento da mecânica que se preocupa com a resposta da rocha aos campos de força do seu ambiente físico (AZEVEDO; MARQUÊS, 2006). Assim sendo, entende-se que o objeto de trabalho da mecânica de rochas é o meio Físico que compreende o maciço rochoso.

Azevedo e Marquês (2006) consideram o maciço rochoso como meio descontínuo, formado pelo material rocha, também designada de rocha intacta ou matriz rochosa e pelas descontinuidades que o atravessam. As rochas são materiais naturais, formadas por processos geológicos e constituídas de um ou mais minerais de forma agregada. As descontinuidades configuram todas as fraturas (microfissuras, fissuras, juntas e falhas) e estruturas (planos de acamamento e foliações) encontradas nas rochas que podem ocorrer em qualquer escala. Neste aspecto, considera-se que o maciço rochoso é tipicamente mais heterogêneo e anisotrópico que uma rocha intacta (FIORI, 2015). Todavia, as propriedades da rocha intacta não devem ser descartadas quando é avaliado o maciço descontínuo, pois, se ele apresenta descontinuidades muito espaçadas e/ou possui algum grau de alteração as propriedades da rocha intacta poderão influenciar categoricamente no comportamento geotécnico do maciço rochoso (ÁVILA, 2012).

Para Fiori (2015), maciço rochoso é uma massa de rocha interrompida por descontinuidades, constituída de blocos discretos, estes últimos com propriedades de rochas intactas. De modo análogo, Gomes (2009) define maciço rochoso como um conjunto de blocos de rocha de dimensões e formas variadas, justapostos e articulados. Costa (2015) classifica maciço rochoso como sendo o conjunto de blocos formado por rocha intacta e contínua limitados por planos de fraqueza, chamados de descontinuidades, que podem tanto ser de origem mecânica como sedimentar. Por sua vez, Gonçalves (2016) descreve maciço rochoso como um conjunto de blocos de rocha adjacentes e estruturados, onde o material que compõe os blocos é a rocha intacta, e os espaços que delimitam os blocos são intitulados de descontinuidades.

A rocha intacta é a porção do maciço rochoso que não apresenta descontinuidades ou planos de fraqueza e pode ser classificada como sã ou alterada (FIORI, 2015). A rocha intacta é designada sã, quando não possui qualquer alteração e demonstra alta resistência quando submetida ao impacto do martelo geológico (GOMES, 2009).

### ***3.1.2 Descontinuidade***

Como visto na seção anterior, a diferença fundamental entre maciço rochoso e rocha intacta é a presença de descontinuidades. Sendo que a resistência mecânica e deformidade do maciço rochoso estão condicionadas à comparência das descontinuidades, de tal forma que o grau de estabilidade depende mais da presença de descontinuidades do que da resistência da rocha intacta (FIORI, 2015).

Descontinuidades são planos de fraqueza de ocorrência natural ou artificial nas rochas, podem apresentar escala microscópica, contorno dos grãos de minerais, ou macroscópicas/mesoscópica formadas pela ação rúptil-dúctil da movimentação da crosta terrestre, foliações e bandamentos de rochas metamórficas ou ainda pelo fraturamento induzido pelo desmonte de rochas com uso de explosivos. Ao longo destes planos, o material rochoso é estruturalmente não uniforme e apresenta uma menor resistência ao cisalhamento, até mesmo nulo (AZEVEDO; MARQUÊS, 2006; FIORI, 2015).

Para Fiori (2015), a estabilidade de taludes é influenciada, em grande medida, pelos vários tipos de descontinuidades no maciço rochoso. E depende:

- a) das orientações das descontinuidades em relação ao talude ou com outras descontinuidades no maciço;
- b) da resistência ao movimento ao longo das superfícies;

- c) da persistência e do espaçamento ao movimento das superfícies;
- d) da facilidade com que a água pode penetrar, acumular ou fluir ao longo das descontinuidades.

Os principais tipos de descontinuidade encontrados no maciço rochoso são (FIORI, 2015):

- planos de acamamento: são rochas sedimentares formadas pela deposição de sedimentos em camadas, cujos planos de separação de cada estrato diferente apresentam propriedades físicas diversas;
- planos de juntas: são estruturas planares criadas pelo aumento ou alívio das tensões, onde a movimentação das paredes da abertura é, praticamente, nula. Ocorre em todos os tipos de rochas. Normalmente ocorrem em famílias distribuídas ao longo de uma superfície preferencial no maciço rochoso;
- planos de falhas: caracterizam-se pelo movimento das paredes da descontinuidade ao longo de uma direção preferencial. São menos frequentes do que as juntas. Podem, às vezes, formar zonas de falhas com uma série de superfícies de deslocamentos, ordenadas em uma zona de faixa de material fragmentado que pode ser caracterizado como cataclasito. Regularmente, os falhamentos ocasionam planos de fraqueza, que são contínuos e persistentes ao longo do maciço rochoso;
- foliação metamórfica: são formadas quando o protólito (ígneo ou sedimentar ou ainda metamórfico) sofre algum grau de metamorfismo, o que corrobora para a formação de lâminas que podem ser paralelas ou subparalelas ao longo de uma direção preferencial na rocha;
- discordância ou inconformidades: são superfícies que representam quebras no processo de sedimentação. Normalmente, essas superfícies representam mudanças nas propriedades geotécnicas das rochas;
- margens de intrusões ígneas: ocorre quando rochas ígneas cortam de forma concordante ou discordante o acamamento de sequências sedimentares. Exemplos: intrusão de um *sill* concordante ou paralelo a sequência da estratificação sedimentar; intrusão de um dique discordante à estratificação sedimentar;
- planos de cisalhamento e fendas de tração: os planos de cisalhamento são produtos de movimentos tanto antigos quanto recentes de rochas e solos. Já as

fendas de tração decorrem de feições recentes associadas a presença de água, sendo facilmente identificadas no topo dos taludes.

A caracterização geotécnica não atribui pesos, valores quantitativos e qualitativos, na avaliação individual de todas as descontinuidades, ou seja, não há uma pontuação específica para cada variedade de descontinuidade, a análise apenas contabiliza os grupos de feições, principalmente as mais proeminentes para análise de estabilidade do maciço rochoso (WATTS; WEST, 1986 *apud* ZENÓBIO, 2000).

### **3.2 Caracterização de maciços rochosos**

De acordo com Fiori (2015), para avaliar as propriedades geotécnicas de um maciço rochoso, é imprescindível o conhecimento de:

- propriedades da rocha intacta;
- ocorrência e natureza das descontinuidades;
- extensão e grau de alteração das descontinuidades;
- posição espacial das descontinuidades.

A descrição geral do maciço rochoso inicia-se com base nos dados das propriedades de descontinuidades e rocha intacta, assim como outros fatores característicos do conjunto, tais como: orientação e quantidade de famílias de descontinuidades; tamanho dos blocos formados entre estas famílias; e grau de alteração do maciço rochoso (GONÇALVES, 2016).

#### **3.2.1 Caracterização das descontinuidades**

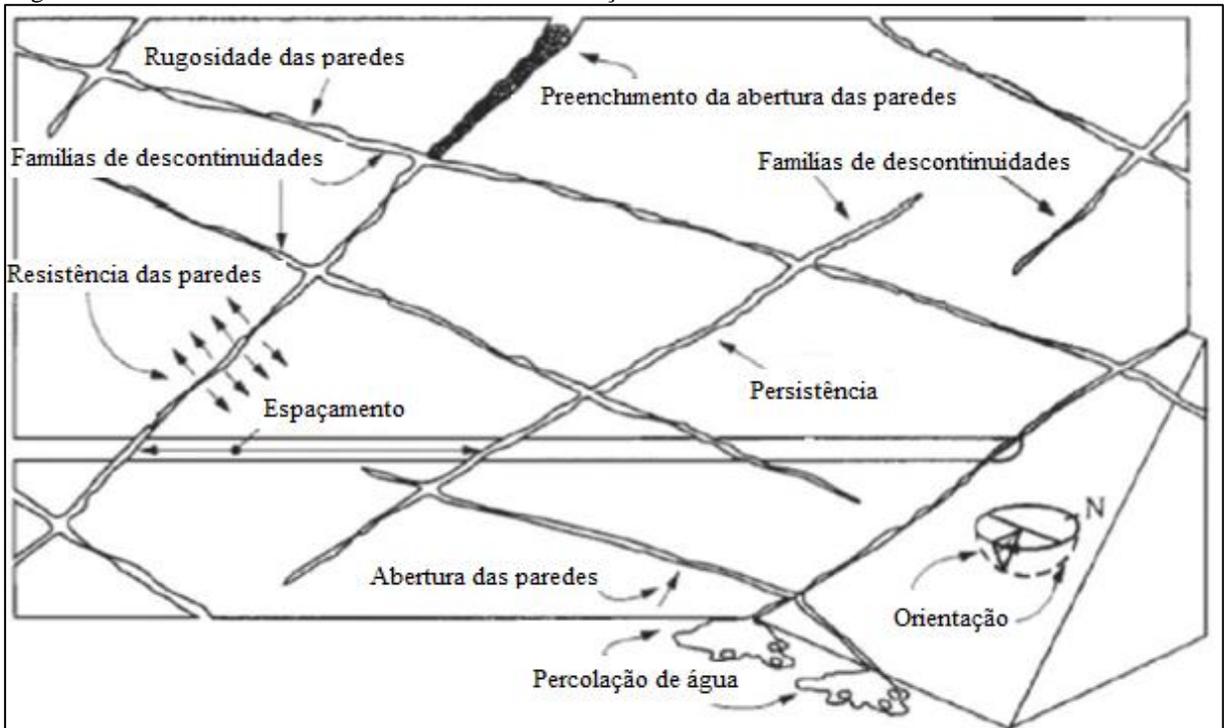
Freitas (2011) ressalta que a resistência, deformabilidade e a permeabilidade do maciço são tipicamente regidas pelas descontinuidades. Assim sendo, o conhecimento e interpretação destas feições corrobora para uma melhor compreensão do maciço rochoso.

A Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM) (1981) e Fiori (2015) definem que as características mais importantes das descontinuidades (Figura 5) que podem inferir no comportamento geomecânico dos maciços rochosos são:

- orientação ou atitude;
- espaçamento entre descontinuidades;
- persistência;
- rugosidade das paredes;
- abertura das paredes;
- preenchimento da abertura das paredes;

- resistência das paredes;
- percolação de água;
- alteração do maciço rochoso.

Figura 5 - Características das discontinuidades no maciço rochoso.

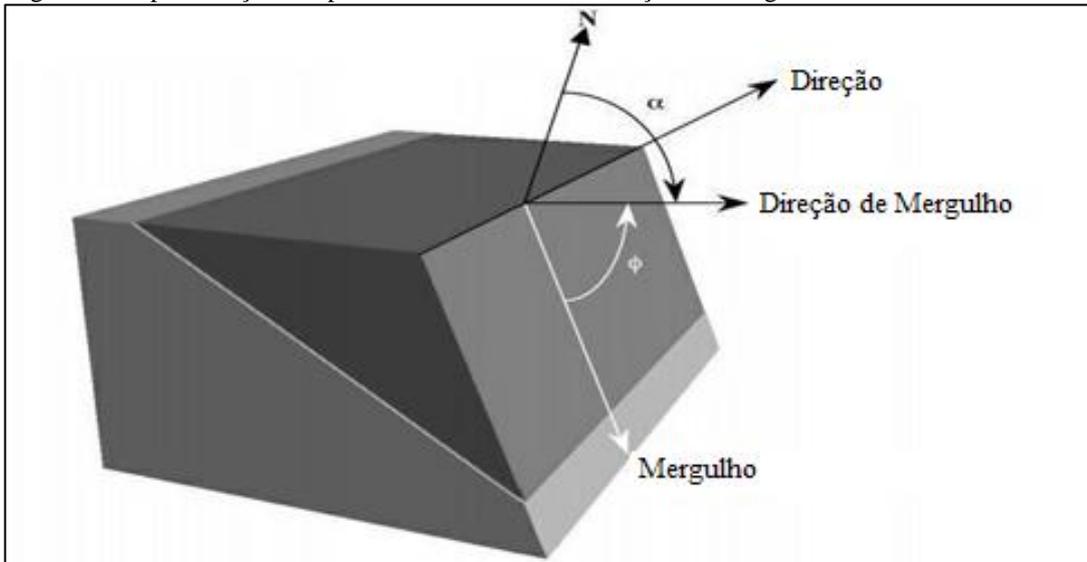


Fonte: modificado de Santos (2015).

### 3.2.1.1 Orientação

A orientação (atitude) refere-se à disposição da descontinuidade no espaço, representada por sua direção e mergulho. A Figura 6, mostra a representação gráfica da obtenção da atitude de uma camada, onde: o mergulho ou *dip* ( $\varphi$ ) representa a máxima inclinação do plano da descontinuidade em relação à horizontal; a direção do mergulho ou azimute (*dip direction*) corresponde a direção da projeção horizontal da linha de maior inclinação do plano, medida no sentido horário a partir do norte ( $\alpha$ ); e a direção (*strike*) que é o ângulo entre a direção norte e a linha de interseção entre um plano inclinado com a horizontal e o plano horizontal, forma um ângulo reto com a direção do mergulho. A bússola de geólogo é o instrumento utilizado para realizar a aferição da atitude de uma descontinuidade (AZEVEDO; MARQUÊS, 2006).

Figura 6 - Representação dos planos onde ocorrem as medições dos ângulos.



Fonte: adaptado de Azevedo e Marquês (2020).

### 3.2.1.2 Espaçamento entre descontinuidades

Também denominado de frequência, corresponde à distância média entre as descontinuidades presentes em uma mesma linha de varredura (FIORI, 2015). Por outro lado, Azevedo e Marquês (2006), definem este espaçamento como a distância perpendicular entre descontinuidades de uma mesma família e podem ser medidos em afloramentos rochosos ou em testemunhos de sondagem por meio de fita métrica, câmeras fotográficas ou periscópios.

O espaçamento médio entre descontinuidades ( $S$ ), medido ao longo da linha de varredura, é calculado por meio da Equação 1 (FIORI, 2015).

$$S = \frac{L}{N} \quad (1)$$

Por outro lado, a frequência de descontinuidades presentes na linha de varredura ( $f$ ) pode ser calculada pela Equação 2 (FIORI, 2015).

$$f = \frac{N}{L} \quad (2)$$

Em que:  $S$  é o espaçamento médio entre descontinuidades (m);  $f$  representa a frequência (quantidade de descontinuidades por metro linear medido);  $N$  é o número de descontinuidades cortadas pela linha de varredura; e  $L$  corresponde ao comprimento da linha de varredura em metros.

De acordo com Fiori (2015), o espaçamento das descontinuidades pode comprometer a qualidade do maciço rochoso, das seguintes formas:

- quando interceptado por várias juntas de pequeno espaçamento, o maciço rochoso comporta-se como um material granular;
- quando o espaçamento é elevado ou a frequência é pequena, o comportamento do maciço rochoso será condicionado pelas propriedades da rocha intacta;
- em casos insólitos, quando o espaçamento pequeno pode alterar o tipo de ruptura do maciço (ex. de ruptura planar para ruptura circular);
- aumento da condutividade hidráulica, conforme o aumento da frequências de descontinuidades no maciço. Porquanto, o espaçamento tem elevado interferência na permeabilidade e nas características de percolação do maciço fissurado.

A caracterização do espaçamento médio foi proposta pela ISRM (1981), conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1- Caracterização do espaçamento entre as descontinuidades.

<b>Especificação</b>	<b>Espaçamento (mm)</b>
Bastante próximos	<20
Muito próximos	20 – 60
Próximos	60 -200
Moderado	200 – 600
Afastados	600 – 2000
Muito afastados	2000 – 6000
Bastante afastados	>6000

Fonte: transposto de ISRM (1981).

### 3.2.1.3 Persistência

A persistência, também conhecida por extensão ou continuidade, é definida como sendo a extensão em área ou a dimensão de uma descontinuidade (AZEVEDO; MARQUÊS, 2006). Outrossim, como sendo a continuidade ininterrupta ao longo da extensão tanto horizontal quanto vertical. A continuidade é aferida por meio da avaliação macroscópica dos maciços rochosos, onde os traços das descontinuidades são identificados e medidos por meio de uma fita métrica nas faces livres dos taludes, túneis e galerias subterrâneas. Configura-se como uma das características mais importantes na avaliação de maciços rochosos, devido a influência na determinação de rupturas e no desenvolvimento de juntas de tração no topo de um talude (FIORI, 2015). A Tabela 2, mostra a caracterização da persistência de descontinuidades.

Tabela 2 - Caracterização da persistência.

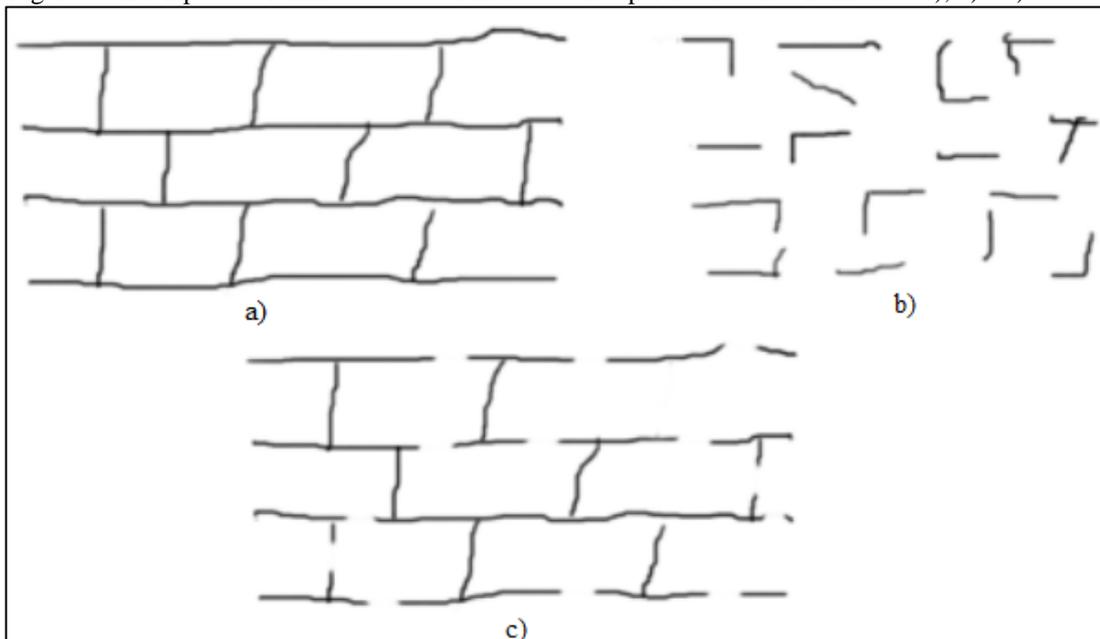
<b>Especificação</b>	<b>Comprimento (m)</b>
Muito pouco extensa	<1
Pouco extensa	1 – 3
Extensa	3 – 10
Muito extensa	10 – 20
Muito grande extensa	>20

Fonte: transposto de ISRM (1981).

Fiori (2015) classificou o maciço rochoso quanto a presença de descontinuidades como:

- persistentes: quando a extensão da descontinuidade ultrapassa as dimensões expostas do maciço rochoso;
- subpersistentes: referem-se às descontinuidades com dimensões passíveis de aferição no maciço rochoso exposto;
- não persistentes: são as descontinuidades que possuem extensão terminadas em outras descontinuidades (Figura 7).

Figura 7 - Exemplos de famílias de descontinuidades não persistentes nos horizontes a), b) e c).



Fonte: adaptada de Gonçalves (2016).

### 3.2.1.4 Rugosidade

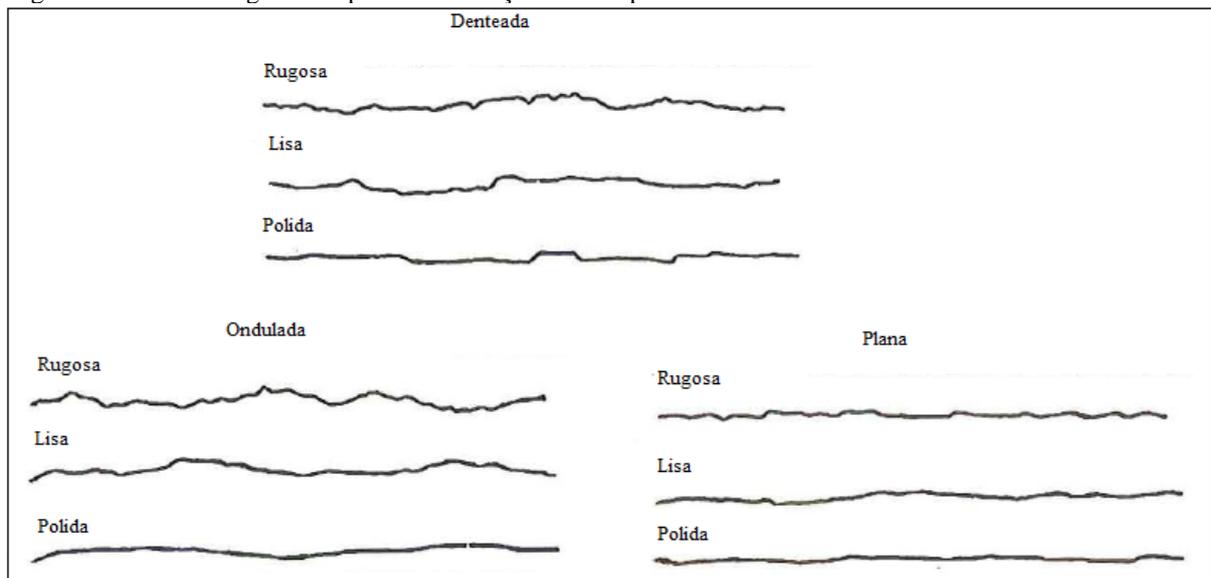
A rugosidade diz respeito às irregularidades e ondulações contidas nas paredes das descontinuidades (COSTA, 2015). Conforme Fiori (2015) e Azevedo e Marquês (2006) a rugosidade é um parâmetro de elevada importância na resistência ao cisalhamento das descontinuidades, especificamente em casos de juntas abertas e não preenchidas, o qual facilita que ocorra movimento de cisalhamento por toda a extensão longitudinal da superfície das descontinuidades, ao contrário das juntas limpas e fechadas que contribui para a obstrução do cisalhamento.

A superfície das paredes de uma descontinuidade pode ser classificada em dois tipos (FIORI, 2015; AZEVEDO; MARQUÊS, 2006):

- ondulação de superfície: atinge até dezenas de metros. Resulta em variações na atitude em relação a uma determinada descontinuidade;
- rugosidade de superfície: são rugosidades de pequenos metros. É responsável pelo atrito entre os dois blocos contíguos de uma descontinuidade.

Existem diversos métodos na literatura pelo o qual é possível caracterizar o grau de irregularidade de superfície dos planos das fraturas. Uma delas consiste em determinar o tipo de rugosidade das descontinuidades por meio da observação direta em campo, a partir do perfil padronizado, Figura 8, proposto pela ISMR (1981). Esse método requer bastante atenção do usuário, pois é passível de erros, devido as dificuldades encontradas em algumas descontinuidades em relação a sua visibilidade.

Figura 8 – Perfil de rugosidade para identificação em campo.

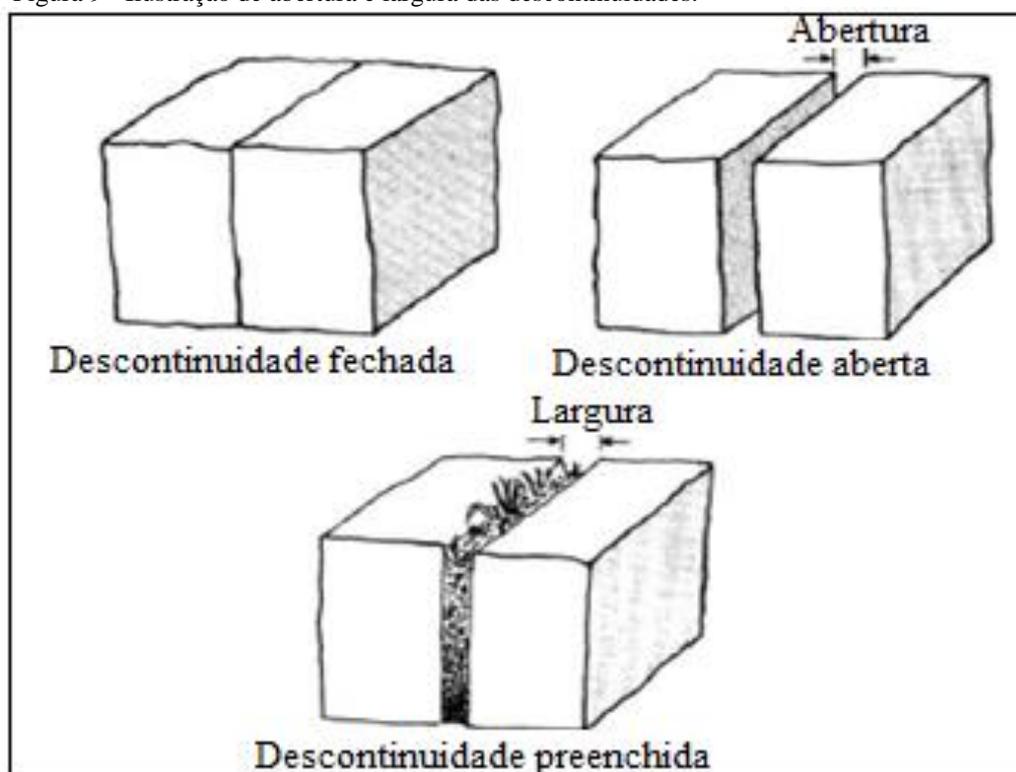


Fonte: modificado de Zenóbio (2000).

### 3.2.1.5 Abertura

A abertura corresponde ao espaço entre as paredes das juntas ou a distância média de afastamento das paredes contíguas da descontinuidade (FIORI, 2015). Para Azevedo e Marquês (2006) a abertura corresponde à distância ortogonal que separa as paredes de rocha de uma descontinuidade aberta e podem ser preenchidas por água ou ar. As aberturas são categorizadas em relação ao tipo de preenchimento, são elas: vazias, parcialmente preenchidas e totalmente preenchidas. Por outro lado, a largura entre as paredes de uma descontinuidade pode ser preenchida por material sólido, como argila, silte, areia, minerais e solos, Figura 9.

Figura 9 - Ilustração de abertura e largura das descontinuidades.



Fonte: adaptado de Costa (2015).

Vale salientar que a abertura e a largura influenciam diretamente na resistência ao cisalhamento ao longo da descontinuidade. Em aberturas muito pequenas, onde as paredes se tocam, a resistência ao cisalhamento será influenciada pela rugosidade da superfície e pela resistência uniaxial da rocha. Por outro lado, em aberturas muito grandes, a resistência ao cisalhamento será condicionada, exclusivamente, pelas propriedades do material de preenchimento, ângulo de atrito interno e coesão (FIORI, 2015). A Tabela 3 mostra a caracterização da abertura de descontinuidades.

Tabela 3 - Caracterização da abertura das discontinuidades.

Aspecto	Especificação	Abertura (mm)
Descontinuidades fechadas	Muito fechada	<0,1
	Fechada	0,1 - 0,25
	Parcialmente aberta	0,25 - 0,5
Descontinuidades entreabertas	Aberta	0,5 - 2,5
	Moderadamente larga	2,5 - 10
	Larga	10
Descontinuidades abertas	Muito larga	10 - 100
	Extremamente larga	100 - 1000
	Cavernosa	>1000

Fonte: transposto de ISRM (1981).

### 3.2.1.6 Preenchimento

O preenchimento, ou enchimento, é o termo utilizado para descrever todo material que ocupa, parcial ou totalmente, a distância entre as paredes da rocha de uma descontinuidade aberta, conforme visto no item 3.2.1.5, largura. O material de enchimento pode ser óxido de ferro, calcita, clorita, areias, argilas ou siltes, dentre outros (AZEVEDO; MARQUÊS, 2006). De acordo com Azevedo e Marquês (2006), o enchimento determina o comportamento mecânico da descontinuidade, influenciando na resistência ao cisalhamento, na deformabilidade e na permeabilidade. Os materiais de preenchimento são, na grande maioria, menos resistentes que as paredes das rochas das descontinuidades, a exemplo o enchimento com argila, que devido ao elevado teor de umidade e plasticidade, reduzem a estabilidade do talude.

Assim, de acordo com esta seção e as seções 3.2.1.4 e 3.2.1.5, os 3 (três) parâmetros geotécnicos que condicionam a resistência ao cisalhamento através de um plano de junta são a sua abertura, rugosidade e o material de preenchimento, que irá determinar, em última instância, a resistência das suas paredes (FIORI, 2015).

A caracterização do preenchimento pode ser realizada por meio da Tabela 4, proposta por Bieniawski (1989).

Tabela 4 - Caracterização do preenchimento.

Característica	Identificação em campo
Preenchimento	Nenhum
	Resistente com espessura menor que 5 mm
	Resistente com espessura maior que 5 mm
	Mole com espessura menor que 5 mm
	Mole com espessura maior que 5 mm

Fonte: transposto de Bieniawski (1989).

### 3.2.1.7 Resistência das paredes

Este parâmetro compreende a resistência à compressão das paredes das descontinuidades. Sua importância decorre do fato de ser um dos mais importantes componentes condicionantes da resistência ao cisalhamento e da deformabilidade dos maciços rochosos. Há na literatura diversos métodos simples de determinar, *in situ*, a resistência das paredes das descontinuidades, sendo os métodos mais utilizados o martelo de Schmidt e o martelo geológico (FIORI, 2015).

### 3.2.1.8 Percolação

Também chamada de condições de fluxo, corresponde à passagem de água entre as descontinuidades abertas (AZEVEDO; MARQUÊS, 2006). De acordo com Freitas (2011), a água é um dos fatores mais elementares no processo de erosão dos solos, no intemperismo das rochas e na estabilidade de taludes rochosos por meio da distribuição do gradiente hidráulico ao longo dos planos das descontinuidades. A percolação da água é condicionada, terminantemente, pelo tamanho da abertura e pelo tipo de preenchimento da descontinuidade. Outros fatores importantes relacionam-se a gênese e a idade da descontinuidade, visto que, a percolação de água ocorre com maior facilidade em aberturas mais recentes, considerando que ainda não foram oclusas ou cimentadas por materiais de preenchimento (GIANI, 1992 *apud* GONÇALVES, 2016).

De acordo com Fontinhas (2012), a análise do fluxo de água no interior de uma descontinuidade, permite realizar uma estimativa caudal da percolação, para tanto, deve-se levar em consideração as condições climáticas da região em estudo e o nível do lençol freático

do maciço rochoso. A ISRM (1981) propôs uma classificação qualitativa do fluxo de água ao longo de uma descontinuidade com preenchimento e sem preenchimento, conforme verificado na Tabela 5.

Tabela 5 - Caracterização da presença de água nas descontinuidades.

Classe	Designação	Descontinuidade sem preenchimento	Descontinuidade com preenchimento
I	Seco	Fratura muito plana e fechada. Descontinuidades aparecem secas e sem possibilidade de Percolação de água.	Enchimento muito consolidado e seco. Não é possível percolação de água.
II		Fratura seca e sem evidência de percolação de água.	Enchimento muito consolidado e seco. Não é possível percolação de água.
III	Moderadamente seco	Fratura seca e com evidências de percolação de água.	Enchimento úmido e com presença de gotas ocasionais.
IV	Úmido	Fratura úmida, sem percolação de água livre.	Enchimento que mostra evidência de lavagem e com fluxo de água contínuo.
V	Escorrimentos	Fratura, ocasionalmente gotejando, mas sem fluxo contínuo.	Enchimento localmente lavado e com fluxo considerável.
VI	Fluxo elevado	Fratura com fluxo contínuo de água.	Enchimento completamente lavado e com pressões de água elevadas.

Fonte: transposto de ISRM (1981).

### 3.2.1.9 Alteração do maciço rochoso

Segundo Fiori (2015), o estado de alteração de uma rocha refere-se aos processos destrutivos ocasionados por agentes atmosféricos e/ou por fluidos hidrotermais, tanto na superfície ou próximo a ela que produzem um manto de alteração *in situ*. Esta alteração é também denominada de intemperismo, físico e químico (FIORI, 2015; AZEVEDO; MARQUÊS, 2006). A alteração dos maciços rochosos acomete, inicialmente, as paredes das descontinuidades e, posteriormente, propaga-se nas rochas por intermédio do ar atmosférico e

da percolação de água (FONTINHAS, 2012). A caracterização do grau de alteração das rochas e a classificação do grau de alteração das paredes das descontinuidades são mostrados nas Tabelas 6 e 7, respectivamente.

Tabela 6 - Classificação do estado de alteração dos maciços rochosos.

<b>Grau</b>	<b>Designação</b>	<b>Identificação de Campo</b>
IA	Rocha fresca	Sem evidências de material de alteração
IB	Muito pouco alterada	Descolamento ao longo das maiores superfícies de descontinuidades
II	Pouca alterada	Descoloramento indicando alteração da rocha e das descontinuidades. Todas as rochas apresentam-se descoloridas por ação do intemperismo e podem estar um pouco enfraquecidas em relação ao estado fresco
III	Moderadamente alterada	Menos da metade da rocha apresenta-se decomposta, formado solo. Rocha fresca ou descolorida ocorre sob a forma de corpos relativamente contínuos ou em blocos
IV	Muito alterada	Mais da metade da rocha apresenta-se decomposta, formado solo. Rocha fresca ou descolorida ocorre sob a forma de corpos relativamente contínuos ou em blocos
V	Completamente alterada	Toda a rocha está decomposta. A estrutura da rocha original ainda estar presentes em grande parte
VI	Solo residual	Toda rocha é convertida em solo. A estrutura e a textura da rocha original estão destruídas. Há grande mudança no volume, mas o solo não sofreu transporte significativo

Fonte: Fiori (2015).

Tabela 7 - Classificação do estado de alteração das paredes das descontinuidades.

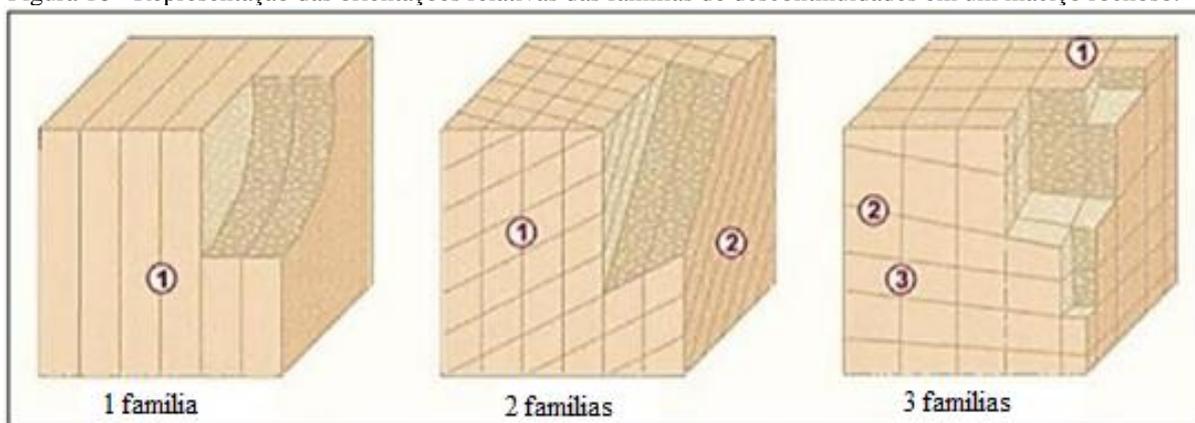
<b>Grau</b>	<b>Designação</b>	<b>Identificação de Campo</b>
I	Parede sã	Nenhum sinal visível a olho nu de minerais alterados; às vezes observa-se uma leve descoloração na superfície da descontinuidade.
II	Parede levemente alterada	A descoloração e mudança de cor dos minerais sinalizam alterações na superfície das descontinuidades.
III	Parede alterada	Menos da metade do material rochoso está decomposto.
IV	Parede muito alterada	Mais da metade do material rochoso está decomposto e/ou desintegrado em solo.

Fonte: Zenóbio (2000).

### 3.2.2 Número de famílias e tamanho de blocos

De acordo com Azevedo e Marquês (2006), família refere-se ao conjunto de descontinuidades que apresentam superfícies aproximadamente paralelas entre si. A identificação das famílias pode ser realizada com auxílio de bússola geológica, clinômetro ou por meio de análise visual. A Figura 10 ilustra o conjunto de três famílias de descontinuidades presentes em um maciço rochoso.

Figura 10 - Representação das orientações relativas das famílias de descontinuidades em um maciço rochoso.



Fonte: Gonçalves (2016).

O maciço rochoso pode ser categorizado de acordo com o número de famílias, conforme proposto pela ISRM (1981), Tabela 8.

Tabela 8 - Classificação do maciço rochoso conforme o número de famílias.

<b>Tipo de maciço rochoso</b>	<b>Número de famílias</b>
I	Maciço compacto, apresenta descontinuidades casuais
II	1 família de descontinuidades
III	1 família de descontinuidades, apresentando ainda outras descontinuidades casuais
IV	2 famílias de descontinuidades
V	2 famílias de descontinuidades, apresentando ainda outras descontinuidades casuais
VI	3 famílias de descontinuidades
VII	3 famílias de descontinuidades, apresentando ainda outras descontinuidades casuais
VIII	4 famílias de descontinuidades ou mais
IX	Brecha, maciço fraturado

Fonte: transposto de ISRM (1981).

De forma conexa, o tamanho dos blocos formados no maciço rochoso correlaciona-se com o número de famílias de descontinuidades presentes. A determinação deste parâmetro, leva em consideração a análise de descontinuidades presentes no maciço, onde são analisados

os seguintes parâmetros: quantidade, orientação, espaçamento e persistência (AZEVEDO; MARQUÊS, 2006). O tamanho dos blocos pode ser determinado de duas maneiras: pelo índice  $I_b$ , que corresponde às dimensões médias dos blocos avaliados no afloramento, dado pela Equação 3; ou pelo índice volumétrico de juntas,  $J_v$ , que quantifica o número total de descontinuidades que interceptam uma unidade de volume do maciço rochoso,  $1\text{m}^3$ , conforme mostrado na Tabela 9. Valores de  $J_v$  superiores a 60 correspondem a maciços rochosos muito fraturados (FREITAS, 2011).

$$I_b = \sum \frac{e_n}{n_j} \quad (3)$$

Em que  $I_b$  = tamanho dos blocos,  $e_n$  = valores médios do espaçamento das famílias de descontinuidades e  $n_j$  = número total de famílias.

Tabela 9 - Descrição do tamanho dos blocos mediante o índice  $J_v$ .

<b>Descrição</b>	<b><math>J_v</math> (descontinuidade/<math>\text{m}^3</math>)</b>
Blocos muito grandes	<1
Blocos grandes	1 – 3
Blocos médios	3 – 10
Blocos pequenos	10 – 30
Blocos muito pequenos	>30

Fonte: Gonçalves (2016).

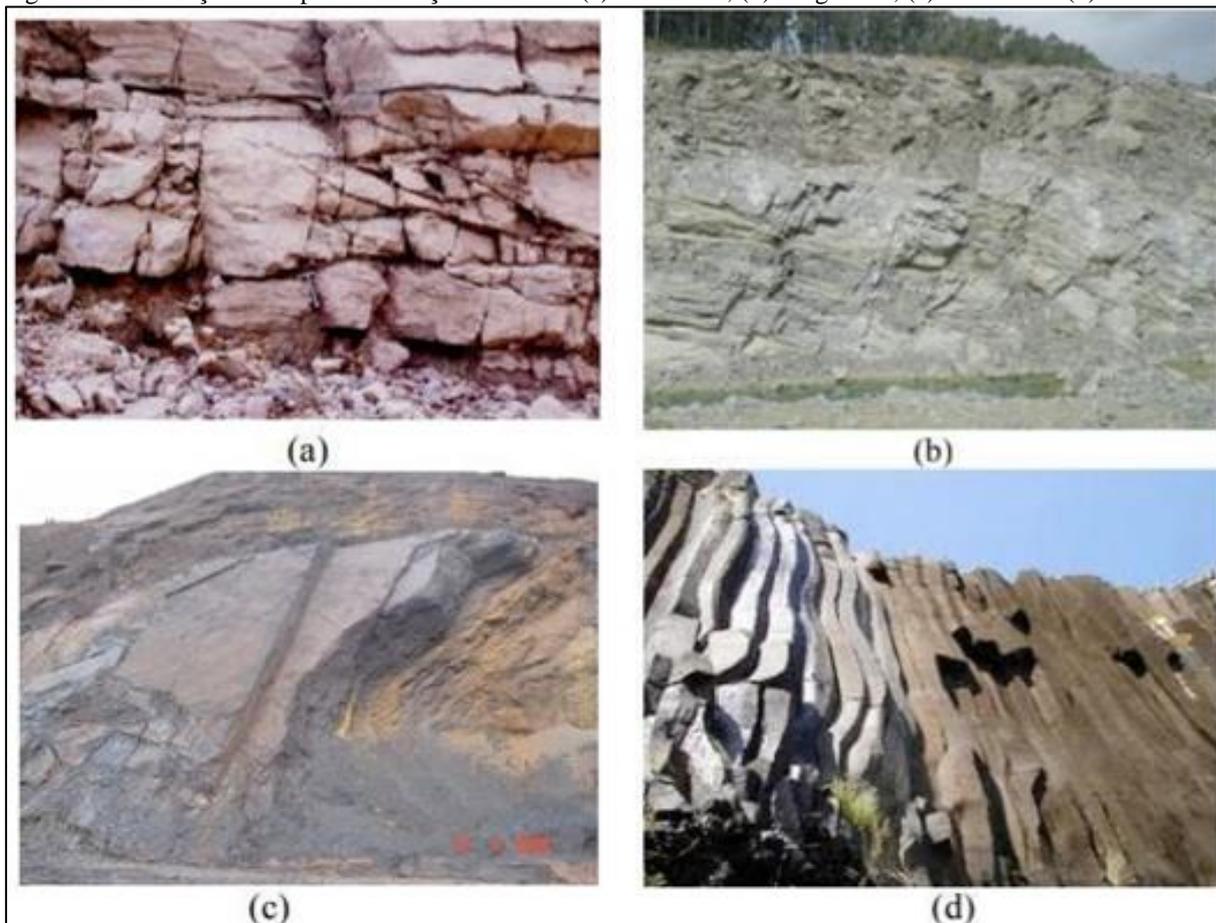
A quantidade e a orientação de famílias condicionam o formato dos blocos, esta classificação do maciço rochoso é realizada com o auxílio da Tabela 10. A Figura 11 ilustra exemplos de diferentes formatos de blocos de maciço rochoso *in situ* (AZEVEDO; MARQUÊS, 2006).

Tabela 10 - Classificação de maciços rochosos mediante o formato e tamanho dos blocos.

<b>Tipo de maciço rochoso</b>	<b>Descrição</b>
Maciço	Poucas juntas ou espaçamento grande
Em blocos	Blocos aproximadamente equidistantes
Tabular	Blocos com uma direção bastante menor do que as outras duas
Colunar	Blocos com uma direção bastante maior do que as outras duas
Irregular	Grandes variações do tamanho e forma dos blocos
Britado	Extremamente fraturado

Fonte: adaptado de Azevedo e Marquês (2006).

Figura 11 - Ilustração dos tipos de maciços rochosos: (a) em blocos; (b) irregulares; (c) tabulares e (d) colunares.



Fonte: Azevedo e Marquês (2020).

O estudo da caracterização dos maciços rochosos permite identificar superfícies de ruptura ao longo da escavação. Portanto, a identificação, caracterização e avaliação destas superfícies serão descritas no item 3.3.

### 3.3 Análise cinemática de taludes rochosos

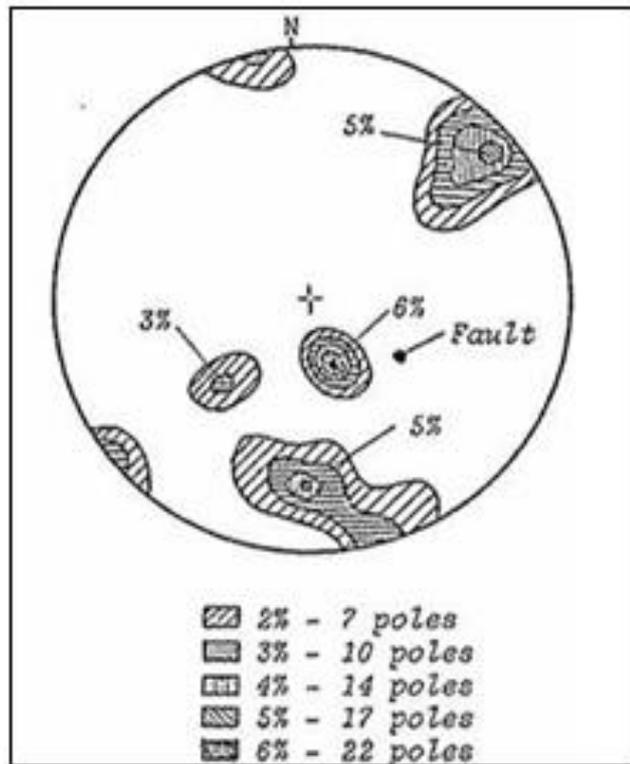
A expressão cinemática refere-se à movimentação de corpos sem, no entanto, considerar as forças que ocasionam o movimento. Isto posto, a análise de estabilidade de taludes se dá por meio da relação entre a posição espacial de todos os planos das discontinuidades e as atitudes do talude, identificando, dessa forma, a configuração geométrica de maior probabilidade de ocorrência de rupturas (FIORI, 2015).

Os principais modelos de rupturas encontrados em taludes são: planar, em cunha, por tombamento e circular. Pires (2009) ressalta que, dependendo do tamanho e da variedade de rochas e estruturas no talude, podem ocorrer vários modos de ruptura em um mesmo maciço rochoso. Vale ressaltar, que a análise de rupturas deve considerar, exclusivamente, as

descontinuidades que promovam a formação de planos de ruptura com potencial de movimento de massa.

A análise cinemática é realizada por meio de projeção estereográfica. A rede estereográfica é definida como uma superfície circular utilizada para representar os planos das descontinuidades, denotados por polos ou vetores. Cada nuvem de pontos representa uma família de descontinuidades, onde cada ponto, denominado de polo representa uma descontinuidade (FONTINHAS, 2012). Verifica-se na Figura 12, uma ilustração da representação de nuvens de polos na rede estereográfica.

Figura 12 - Representação dos polos na rede estereográfica por meio de nuvens de polos.



Fonte: D'Alessandro (2007).

Nos tópicos seguintes serão apresentados os modelos de ruptura em taludes rochosos.

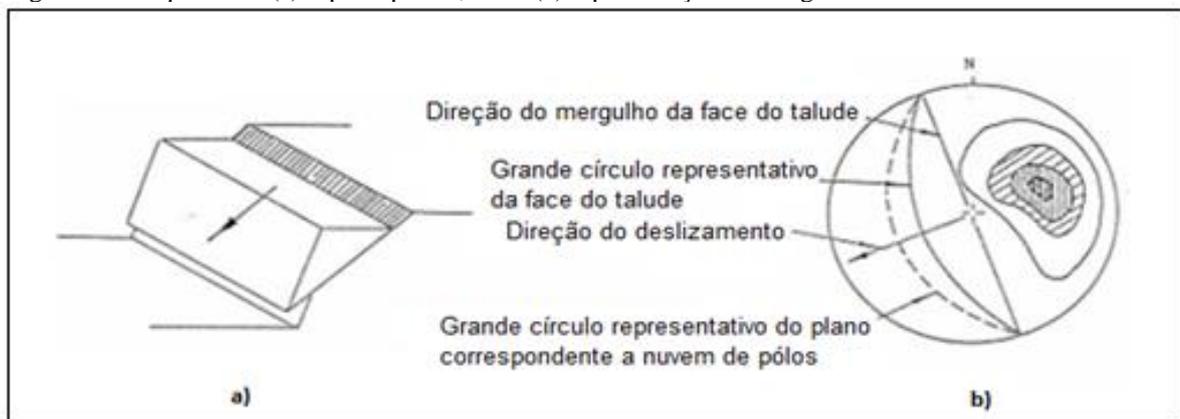
### 3.3.1 Ruptura planar

A ruptura planar, também denominada de deslizamento, envolve o deslocamento de massas rochosas ao longo de uma ou mais superfícies subparalelas entre si e ocorre, comumente, em rochas de estruturas bem orientadas, como ardósias, filitos, xistos, argilitos e folhelhos (FIORI, 2015). Para que ocorra esse tipo de ruptura são necessários os seguintes critérios (FIORI, 2016):

- a direção do plano de deslizamento deverá ser praticamente paralela à direção do plano do talude, com uma diferença máxima de  $20^\circ$  em relação à direção da face do talude;
- o plano de deslizamento deverá aflorar na face do talude;
- a inclinação do plano de deslizamento deverá ser inferior à inclinação do talude;
- a inclinação do plano de deslizamento deverá ser superior ao seu ângulo de atrito;
- o plano de escorregamento deverá aflorar na face da vertente, isto é, deverá interceptar a face superior do talude.

A Figura 13 ilustra o esquema de ruptura planar no talude e a representação das condições geométricas na projeção estereográfica.

Figura 13 - Esquema de (a) ruptura planar; e sua (b) representação estereográfica.



Fonte: adaptado de Pires (2009).

### 3.3.2 Ruptura em cunha

A ruptura em cunha é formada quando dois ou mais planos de descontinuidades isolam porções da rocha, ocasionando escorregamentos translacionais quando esses planos se interceptam em forma de cunha. Para que isso ocorra, faz-se necessário que a linha de intersecção dos dois planos aflore na superfície do talude com um ângulo de inclinação superior ao ângulo de atrito dos planos (FIORI, 2015, 2016). Esta ruptura é típica de maciços rochosos que apresentam muitas famílias de descontinuidades cuja orientação, espaçamento e continuidade determinam o volume e a forma da cunha (PIRES, 2009).

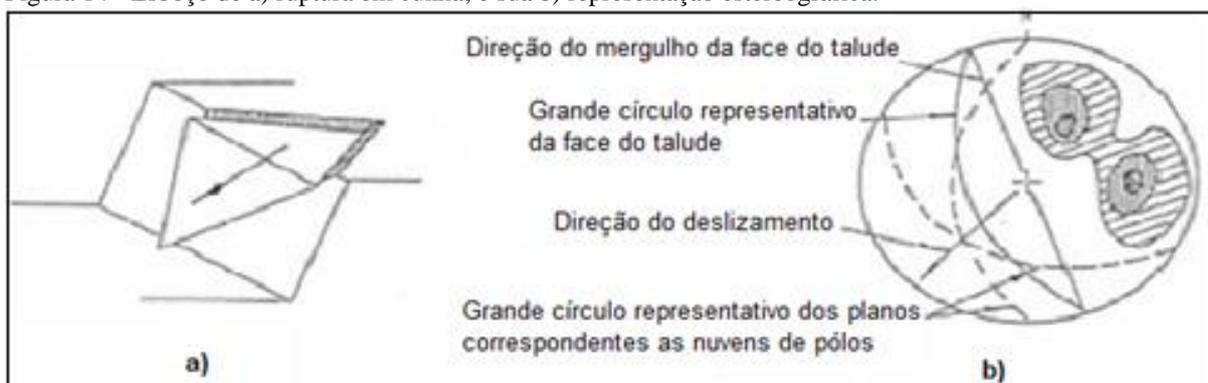
As condições necessárias para que ocorra o deslizamento em cunha são (FIORI, 2015, 2016; PIRES, 2009):

- a direção da linha de intersecção formada pelos dois planos deve ser paralela à direção de mergulho da face do talude, admitindo-se uma diferença angular de até  $20^\circ$  entre essas direções;

- a linha de interseção deve aflorar na face do talude;
- o mergulho da linha de interseção deve ser inferior ao mergulho da face do talude;
- o mergulho da linha de interseção deve ser superior aos ângulos de atrito dos planos que compõem a cunha.

A Figura 14 mostra o esboço da ruptura em cunha no talude e ilustra as condições geométricas para que ocorra esse tipo de ruptura na projeção estereográfica.

Figura 14 - Esboço de a) ruptura em cunha; e sua b) representação estereográfica.



Fonte: adaptado de Pires (2009).

### 3.3.3 Ruptura por tombamento (*toppling*)

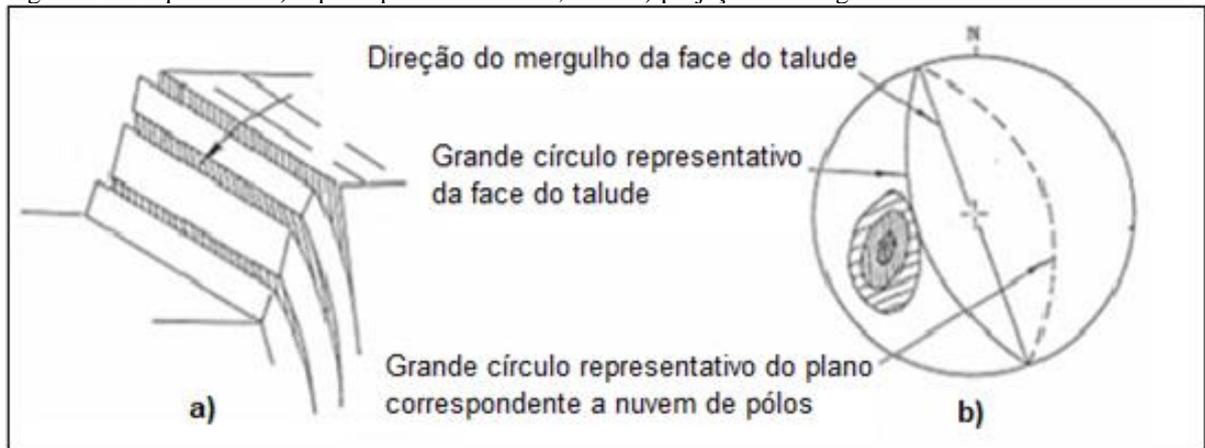
De acordo com Fiori (2015), para que ocorra esse tipo de ruptura, faz-se necessário que dois planos de descontinuidades, bem definidos, se interceptam: um deles mergulhando com elevado ângulo contra a vertente, face livre do talude, e o outro mergulhando no mesmo sentido do talude com baixo ângulo.

As condições necessárias para que ocorra ruptura por *toppling* são (FIORI, 2015):

- quando duas famílias de descontinuidades inclinadas que se interceptam, uma a favor e a outra contra a inclinação do talude;
- a família que mergulha contra a face do talude deverá ser inclinada em ângulos maiores que  $90^\circ$  menos o ângulo da face do talude e, a família que mergulha a favor deverá ter inclinação menor que o ângulo de atrito das descontinuidades;
- as direções dos dois planos das descontinuidades e da face do talude devem ser subparalelas ( $\pm 20^\circ$ ).

A Figura 15 ilustra, na projeção estereográfica, as condições geométricas para que ocorra a ruptura por tombamento.

Figura 15 - Esquema de a) ruptura por tombamento; e sua b) projeção estereográfica.

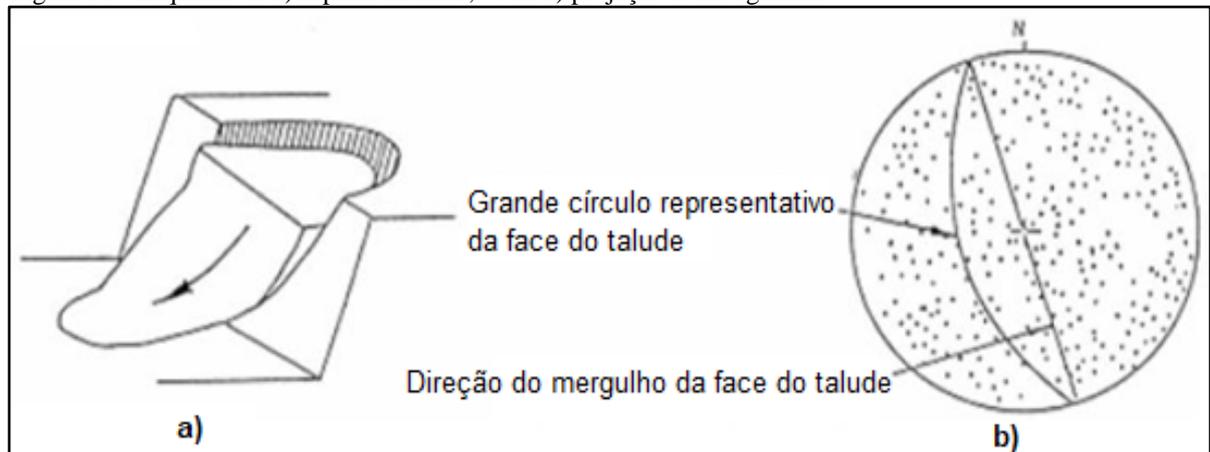


Fonte: adaptado de Pires (2009).

### 3.3.4 Ruptura circular

A ruptura circular ocorre em maciços rochosos muito fraturados ou em solos. As atitudes das discontinuidades presentes neste tipo de ruptura são muito variadas e apresentam comportamento isotrópico ao longo do maciço rochoso (FONTINHAS, 2012). O esquema de ruptura circular é mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Esquema de a) ruptura circular; e sua b) projeção estereográfica.



Fonte: adaptado de Pires (2009).

Após a compreensão da caracterização dos maciços rochosos e dos modelos de ruptura, torna-se oportuno avaliar as metodologias de classificações geomecânicas, com o intuito de quantificar e qualificar a estabilidade de um talude. Para tanto, o item 3.4 descreve estas classificações.

### 3.4 Classificações geomecânicas

As classificações geomecânicas são métodos empíricos, desenvolvidos para qualificar e quantificar os maciços rochosos por meio da realização de ensaios que podem ser

*in situ* e/ou em laboratório, tendo como resultado a atribuição de um índice de qualidade (ASSIS, 2016). De acordo com Azevedo e Marquês (2006), as classificações mais utilizadas e aceitas atualmente são o RMR – Rock Mass Rating (BIENIAWSKI, 1974), Q - BARTON (BARTON, 1974) e GSI – Geological Stress Index (HOEK, 1994). Isto posto, as classificações geomecânicas tem por objetivos (BIENIAWSKI, 1989):

- determinar os parâmetros mais importantes que influenciam o comportamento do maciço rochoso;
- classificar o maciço rochoso em grupos que possuem as mesmas características;
- oferecer uma base de informações das características de cada grupo do maciço rochoso;
- correlacionar experiências prévias referentes às características das rochas;
- providir procedimentos e dados quantitativos para projetos de engenharia;
- oferecer uma base comum de comunicação entre engenheiros e geólogos.

Como os parâmetros dos sistemas de classificação variam entre si e são passíveis das análises subjetivas dos observadores, faz-se necessário utilizar, ao menos, dois métodos de classificação e comparar os resultados (BIENIAWSKI, 1989). A seguir serão descritos os principais sistemas de classificações geomecânicas.

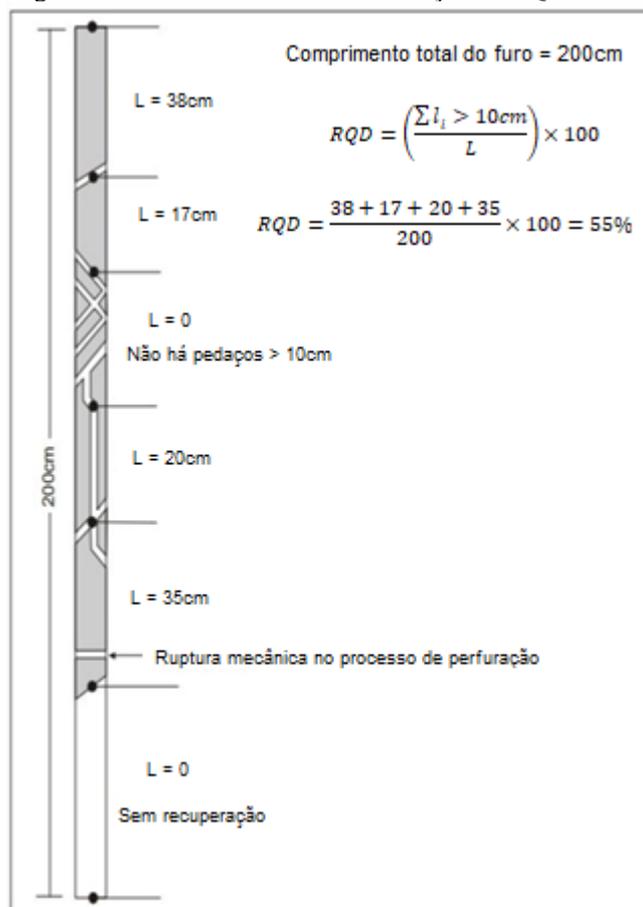
### **3.4.1 Rock Quality Designation (RQD)**

O RQD foi desenvolvido inicialmente por Deere (1963 *apud* DEERE; DEERE, 1988) para descrever os furos dos testemunhos de sondagem em rocha nos projetos de engenharia civil. Posteriormente, em 1967, o RQD foi modificado e ampliado para avaliar a qualidade dos maciços rochosos na estabilidade de taludes (DEERE; DEERE, 1988). O método consiste em determinar numericamente a análise da recuperação da integridade dos testemunhos de sondagem, como indicado pela Equação 4 a seguir (DEERE, 1989). A Figura 17 ilustra o procedimento de determinação do RDQ.

$$RQD = \left( \frac{\sum l_i > 10cm}{L} \right) \times 100 \quad (4)$$

Onde:  $l_i$  corresponde as porções dos testemunhos maiores que 10 cm; e L remete ao comprimento total do testemunho recuperado.

Figura 17 - Procedimento de determinação do RQD.



Fonte: adaptado de Palmstrom (2005).

A partir do valor numérico atribuído ao RQD, o maciço rochoso pode ser classificado em cinco classes, conforme mostra a Tabela 11.

Tabela 11 - Classificação do maciço rochoso mediante o valor do RQD.

RQD (%)	Qualidade do maciço
0 – 25	Muito ruim
25 – 50	Ruim
50 – 75	Regular
75 – 90	Bom
90 – 100	Excelente

Fonte: transposto de Deere e Deere (1989).

Palmstrom (1982) sugeriu uma metodologia para calcular o RQD quando não há disponibilidade de testemunhos de rocha de furos de sonda. Para tanto, a determinação do RQD,

pode ser feita por meio da avaliação local do índice  $J_v$  do maciço rochoso, como mostra a Equação 5 a seguir.

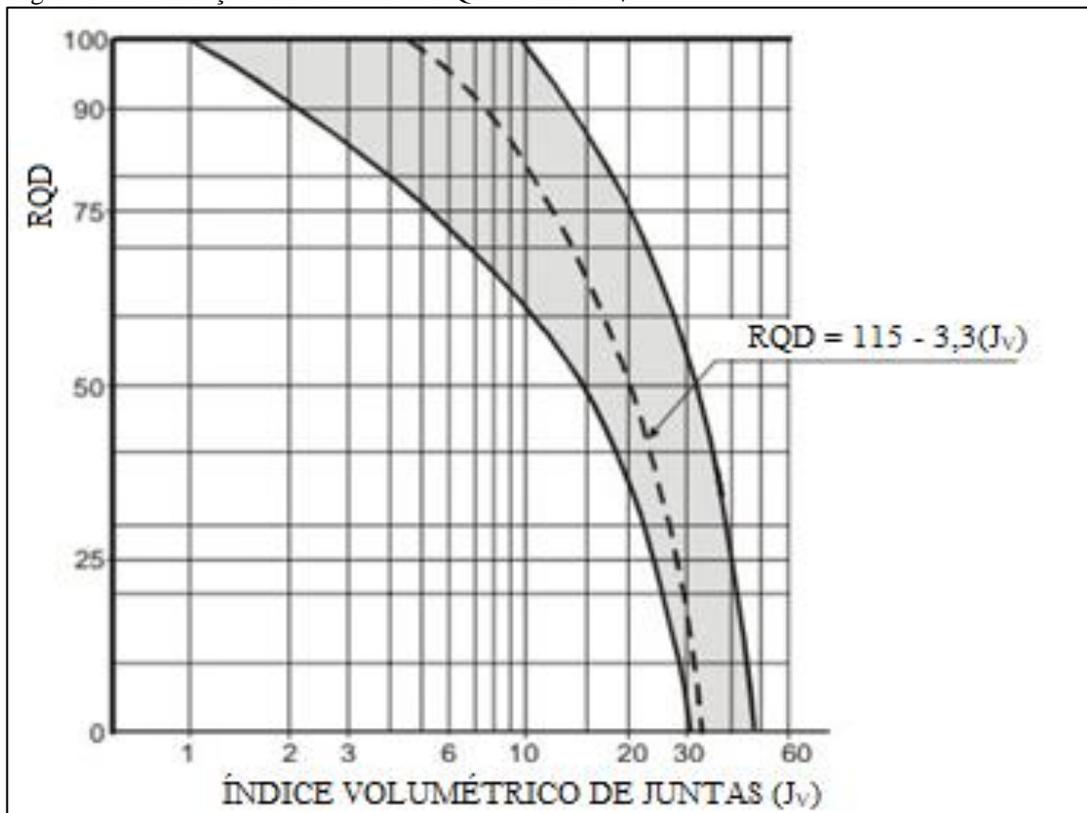
$$\begin{aligned} \text{RQD} &= 115 - 3.3(J_v) && \text{para } J_v > 4.5 \\ \text{RQD} &= 100 && \text{para } J_v \leq 4.5 \end{aligned} \quad (5)$$

Em que o  $J_v$  corresponde ao índice volumétrico de juntas, conforme descrito na seção 3.2.2. Assim sendo, o  $J_v$  pode ser determinado mediante a Equação 6.

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \dots + \frac{1}{S_n} \quad (6)$$

Onde  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  e  $S_n$  são os espaçamentos médios das juntas de cada família de descontinuidades presentes no maciço rochoso. Com o propósito de tornar a correlação entre o índice  $J_v$  e o índice RQD contínua, Palmstrom (1982) desenvolveu o ábaco mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Correlação entre o valor do RQD e o índice  $J_v$ .



Fonte: adaptado Palmstrom (1982).

Por outro lado, Hudson e Priest (1979 *apud* PALMSTROM, 2005) desenvolveram uma equação matemática que correlaciona o RQD e a frequência de juntas em um bloco de rocha, Equação 7.

$$RQD = 100e^{-0,1f} \cdot (0,1f + 1) \quad (7)$$

Onde: f corresponde ao número de descontinuidades por unidade de comprimento medido no bloco de rocha.

A avaliação geomecânica do RQD não perfaz uma análise descritiva detalhada do maciço rochoso, considerando que informações quantitativas e qualitativas não são consideradas, tais como: a resistência da rocha, as características das juntas, as condições de água no maciço e outros parâmetros. Portanto, não é recomendável utilizá-lo como único sistema de classificação de maciços rochosos, mas integrá-lo em combinação com outros métodos de avaliação (AZEVEDO; MARQUÊS, 2006).

### **3.4.2 Rock Mass Rating (RMR)**

O sistema de avaliação geomecânica RMR foi desenvolvido em 1973 por Bieniawski com base em estudos de casos de obras subterrâneas. Durante os anos seguintes, o sistema de classificação foi sendo modificado até sua última versão, publicada em 1989. Apesar das modificações, o autor ressalta que o princípio do sistema é essencialmente o mesmo, portanto quaisquer extensões e modificações não devem ser interpretadas como novos sistemas, mas como consequência do mesmo método básico. Inicialmente, o RMR foi criado para obras civis em túneis para determinar a relação entre a abertura livre da escavação e o tempo de sustentação das paredes e do teto do vão. Posteriormente, a metodologia foi ampliada para outras obras de engenharia como taludes, minas e fundações de barragens (BIENIAWSKI, 1989). O RMR utiliza os seguintes parâmetros para classificar o maciço rochoso (BIENIAWSKI, 1989):

- I. resistência à compressão da rocha intacta;
- II. *Rock Quality Designation* (RQD);
- III. espaçamento das juntas;
- IV. característica das juntas;
- V. condições de percolação de água no maciço rochoso;
- VI. orientações das descontinuidades.

Os cinco primeiros parâmetros caracterizam o RMR básico e o sexto é um fator de ajuste da relação entre a orientação das descontinuidades e a obra de engenharia. O valor do RMR é obtido pelo somatório dos diversos pesos (valores) atribuídos aos seis parâmetros, conforme mostrado nas Tabelas 12 a 19.

Tabela 12 - Valores relativos à resistência à compressão da rocha intacta.

<b>Resistência à compressão uniaxial (MPa)</b>	<b>Resistência à compressão puntiforme (MPa)</b>	<b>Faixa de valores</b>
> 10	> 250	15
4 – 10	100 – 250	12
2 – 4	50 – 100	7
1 – 2	25 – 50	4
Para valores menores, utilizar ensaio de compressão Uniaxial	5- 25	2
	1 – 5	1
	<1	0

Fonte: transposto de Bieniawski (1989).

Tabela 13 - Valores relativos ao RQD.

<b>RQD (%)</b>	<b>Faixa de valores</b>
100 – 90	20
5 – 90	17
50 – 75	13
25 – 50	8
< 25	3

Fonte: transposto de Bieniawski (1989).

Tabela 14 - Valores relativos ao espaçamento das juntas.

<b>Espaçamento</b>	<b>Faixa de valores</b>
> 2 m	20
0,6 – 2 m	15
200 – 600 mm	10
60 – 200 mm	8
< 60 mm	5

Fonte: transposto de Bieniawski (1989).

Os valores atribuídos às condições gerais das descontinuidades podem ser determinados por meio da Tabela 15. Todavia, pode-se utilizar a Tabela 16 para discretizar as faixas de valores pelo detalhamento das características identificadas nas descontinuidades.

Tabela 15 - Valores relativos às condições das descontinuidades.

<b>Condição geral das descontinuidades</b>	<b>Faixa de valores</b>
Superfície muito rugosa; descontínua; sem abertura; Paredes duras.	30
Superfície levemente rugosa; Separação < 1 mm; Paredes duras	25
Superfície levemente rugosa; separação < 1 mm; Paredes macias	20
Preenchimento < 5 mm de largura ou juntas abertas 1 – 5 mm; contínuas	10
Preenchimento macio > 5 mm ou juntas abertas > 5 mm; contínuas	0

Fonte: transposto de Bienaiwski (1989).

Tabela 16 - Valores relativos às características individuais das descontinuidades para o RMR.

<b>Parâmetros</b>	<b>Características das descontinuidades</b>				
Persistência	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	>20 m
Valor	6	4	2	1	0
Abertura	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1 – 1 mm	1 – 5 mm	>5 mm
Valor	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Levemente rugosa	Suave	Espelhada
Valor	6	5	3	1	0
Preenchimento	Nenhum	Duro com espessura < 5 mm	Duro com espessura > 5 mm	Mole com espessura < 5 mm	Mole com espessura > 5 mm
Valor	6	4	2	2	0
Alteração	Sem alteração	Pouco alteradas	Moderadamente alterada	Muito alterada	Em decomposição
Valor	6	5	3	1	0

Fonte: transposto de Bieniawski (1989).

Tabela 17 - Faixa de valores para presença de água subterrânea no RMR.

<b>Presença de água subterrânea</b>			
Fluxo por 10 m de comprimento de túnel	Razão entre a pressão de água na junta e a tensão principal maior	Condições Gerais	Faixa de valores
Nulo	0	Completamente seco	15
> 10 litros/min	< 0,1	Molhado	10
< 25 litros/min	0,1 – 0,2	Úmido apenas	7
25 – 125 litros/min	0,2 – 0,5	Água sob pressão moderado	4
> 125 litros/min	> 0,5	Grande quantidade de água	0

Fonte: transposto de Bieniawski (1989).

A Tabela 18 faz menção à análise qualitativa atribuída ao efeito da inclinação da escavação em relação à orientação das descontinuidades no sistema RMR. Por outro lado, a Tabela 19 mostra a atribuição quantitativa dos efeitos da inclinação do eixo da escavação de acordo com o tipo de obra executada.

Tabela 18 - Efeito da orientação da escavação no sistema RMR.

<b>Direção perpendicular ao eixo da escavação</b>				<b>Direção paralela ao eixo de escavação</b>		Mergulho 0° – 20°  Independente da direção
Escavação a favor do mergulho		Escavação contra o mergulho				
Mergulho 45° – 90°	Mergulho 20° - 45°	Mergulho 45° - 90°	Mergulho 20° - 45°	Mergulho 45° - 90°	Mergulho 20° - 45°	
Muito favorável	Favorável	Regular	Desfavorável	Muito desfavorável	Regular	Desfavorável

Fonte: transposto de Bieniawski (1989).

Tabela 19 - Valores de correção relativos à obra utilizada.

Orientação das juntas	Valores		
	Túneis e minas	Fundações	Taludes
Muito favorável	0	0	0
Favorável	-2	-2	-5
Regular	-5	-7	-25
Desfavorável	-10	-15	-30
Muito desfavorável	-12	-25	-60

Fonte: transposto de Bieniawski (1989).

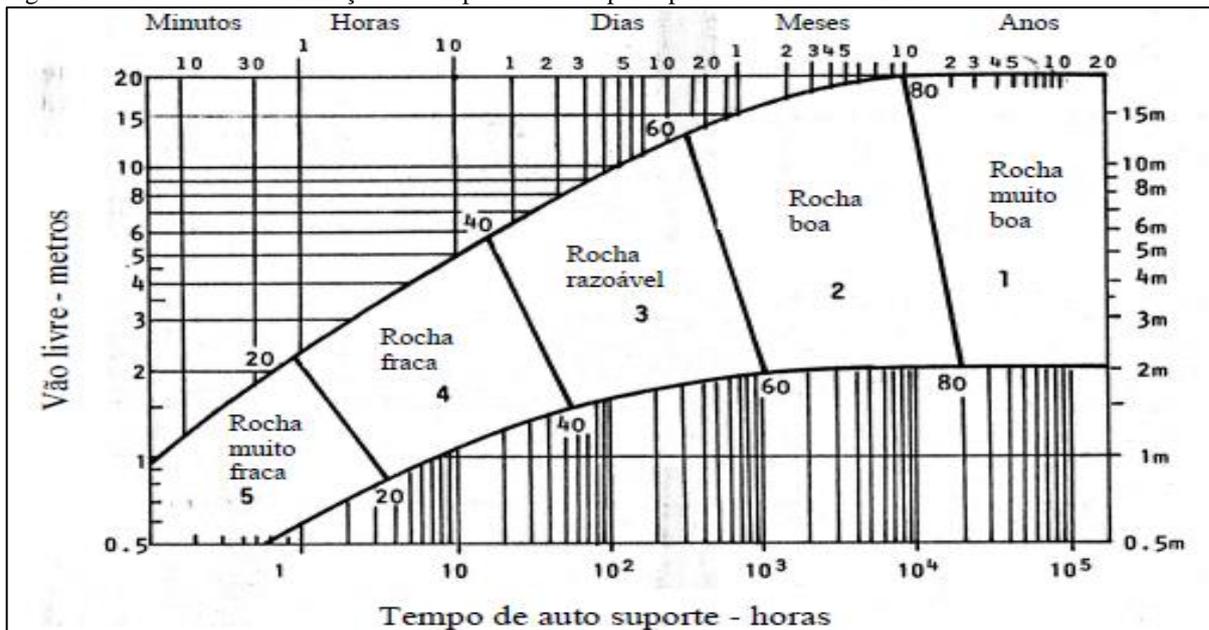
Baseado nos valores do RMR, torna-se possível avaliar o maciço rochoso em cinco classes e estimar os valores de coesão e ângulo de atrito, Tabela 20. Além disso, a atribuição do maciço a uma classe permite estimar o tempo de autossuporte nas aberturas de túneis em relação à dimensão do vão livre, Figura 19.

Tabela 20 – Propriedades do maciço de acordo com o valor do RMR.

Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Muito bom	Bom	Regular	Ruim	Muito ruim
Faixa de valores	100 – 81	61 – 80	41 – 60	21 - 40	< 21
Coesão (KPa)	>300	200 – 300	150 – 200	100 – 150	<100
Ângulo de atrito	>45°	40° - 45°	35° - 40°	30° – 35°	<30°

Fonte: transposto de Bieniawski (1989).

Figura 19 - Ábaco de determinação do tempo de auto-suporte para aberturas de túneis.



Fonte: adaptado de Bieniawski (1989).

Vale salientar que, para realizar uma classificação geomecânica, é imprescindível que seja efetuado, preliminarmente, um zoneamento no maciço rochoso em regiões estruturais que possuem aproximadamente as mesmas particularidades, para depois classificá-las individualmente (BIENIAWSKI, 1989).

### 3.4.3 Rock Quality Tunnel - Q - Barton

Comumente designado por Q – Barton, ou simplesmente Sistema Q, o índice de qualidade de túneis (*Tunneling Quality Index*) foi desenvolvido por Barton, Lien e Lunde (1974) com base na avaliação de escavações subterrâneas para auxiliar no suporte de projetos de túneis. O Sistema Q utiliza seis parâmetros que caracterizam o comportamento do maciço rochoso:

- I. RQD;
- II. Índice do número de juntas,  $J_n$ ;
- III. Índice de rugosidade das juntas,  $J_r$ ;
- IV. Índice de alteração das paredes das juntas,  $J_a$ ;
- V. Índice do fluxo de água,  $J_w$ ;
- VI. Índice do estado de tensões do maciço rochoso, SRF.

O valor numérico, adimensional, do índice Q varia em uma escala logarítmica de 0,001 a 1000, sendo determinado pela Equação 8 (BARTON; LIEN; LUNDE, 1989):

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (8)$$

Cada quociente da Equação 8 assume os seguintes significados geomecânicos (BIENIAWSKI, 1989):

- $RQD/J_n$  - representa o tamanho dos blocos;
- $J_r/J_a$  - representa a resistência ao cisalhamento do maciço rochoso entre os blocos;
- $J_w/SRF$  - caracteriza o estado de tensões do maciço rochoso.

Os valores dos parâmetros utilizados na Equação 8 são dimensionados por meio da Tabela 13 concernente ao RQD e das Tabelas 21 a 25 referentes aos índices  $J_n$ ,  $J_r$ ,  $J_a$ ,  $J_w$  e SRF, respectivamente.

Tabela 21 - Valores correspondentes ao índice  $J_n$ .

<b>Número de famílias de juntas – <math>J_n</math></b>	
Designação	Valores
A – Maciço sem ou poucas juntas	0,5 - 1
B – Uma família de juntas	2
C – Uma família de juntas com outras juntas aleatórias	3
D – Duas famílias de juntas	4
E – Duas famílias de juntas com outras juntas aleatórias	6
F – Três famílias de juntas	9
G – Três famílias de juntas com outras juntas aleatórias	12
H – Quatro ou mais famílias de juntas, juntas aleatórias e muito fraturado	15
I – Rocha muita fraturada	20

Fonte: transposto de Barton, Lien e Lunde (1974).

Tabela 22 - Valores adotados para o índice  $J_r$ .

<b>Rugosidade das juntas – <math>J_r</math></b>	
<b>a – Há contato rocha-rocha entre as paredes das juntas e não houve deslocamentos relativos entre as fraturas.</b>	
Designação	Valores
A – Fraturas descontínuas	4
B – Fraturas ásperas ou irregulares, onduladas	3
C – Fraturas lisa, onduladas	2
D – Fraturas polidas, onduladas	1,5
E – Fraturas ásperas ou irregulares, planas	1,5
F – Fraturas lisas, planas	1
G – Fraturas polidas, planas	0,5
<b>b - Não há contato rocha-rocha entre as paredes das juntas e houve deslocamentos relativos entre as fraturas.</b>	
Designação	Valores
H - Fraturas com minerais argilosos	1
I – Zonas esmagadas	1

Fonte: transposto de Barton, Lien e Lunde (1974) e Bieniawski (1989).

Tabela 23 - Valores adotados para o índice  $J_a$ .

<b>Índice de alteração das paredes das juntas – <math>J_a</math></b>		
<b>a – Há contato rocha-rocha entre as paredes das juntas e não houve deslocamentos relativos entre as fraturas.</b>		
Designação	Valores	Ângulo de atrito ( $\phi$ )
A – Paredes duras; compactas; preenchimentos impermeáveis	0,75	-
B – Paredes sem alteração; somente leve descoloração	1	25° - 35°
C – Paredes levemente alteradas; com partículas arenosas e rochas desintegradas não brandas	2	25° - 35°
D – Paredes com películas siltosas ou areno-argilosas	3	20° - 25°
E – Paredes com películas de materiais moles ou baixo ângulo de atrito (talco, grafite etc.) e pequenas quantidades de minerais expansivos	4	8° - 16°
<b>b – Há contato rocha-rocha entre as paredes das juntas e houve deslocamentos relativos entre as fraturas (&lt; 10 cm).</b>		
Designação	Valores	Ângulo de atrito ( $\phi$ )
F – Paredes com películas de areia e rochas desintegradas; sem argilas	4	25° - 30°
G – Fraturas com preenchimento argiloso sobre-consolidado (espessura 5 mm)	6	16° - 24°
H – Fraturas com preenchimento argiloso sub consolidado (espessura 5 mm)	8	12° - 16°
I – Fraturas com preenchimento argiloso expansivo (espessura 5 mm)	8 – 12	6° - 12°
<b>c – Não há contato rocha-rocha entre as paredes das juntas e houve deslocamentos relativos entre as fraturas.</b>		
Designação	Valores	Ângulo de atrito ( $\phi$ )
J, K, L – Zonas com rochas desintegradas ou esmagadas, com argila (veja G, H e I para as condições do material argiloso)	6 – 8 8 – 12	6° - 24°
M – Zonas siltosas ou areno-argilosas, com pequena quantidade de argila	5	-
N, O, P – Zonas contínuas de argila (veja G, H e I para as condições do material argiloso)	10 – 13 13 – 20	6° - 24°

Fonte: transposto de Barton, Lien e Lunde (1974) e Bieniawski (1989).

Tabela 24 - Valores adotados para o índice  $J_w$ .

<b>Índice do fluxo de água - <math>J_w</math></b>	
Designação	Valores
A – Sem fluxo de água ou gotejamento (<5 l/min); pressão de água aproximada < 1.0 kg/cm <sup>2</sup>	1
B – Fluxo de água médio ou pressão que ocasionalmente arrasta o preenchimento das fraturas. P = 1 a 2,5 kg/cm <sup>2</sup>	0,66
C – Fluxo de água grande ou alta pressão em rocha competente, com fraturas sem preenchimento. P = 2,5 a 10,0 kg/cm <sup>2</sup>	0,5
D – Fluxo de água grande ou alta pressão; considerável arrastamento do preenchimento. P = 2,5 a 10,0 kg/cm <sup>2</sup>	0,33
E – Fluxo de água excepcionalmente grande ou pressão explosiva, decaindo com o tempo. P > 10 kg/cm <sup>2</sup>	0,2 – 0,1
F – Fluxo de água excepcionalmente grande ou pressão contínua; sem decaimento notável. P > 10 kg/cm <sup>2</sup>	0,1 – 0,05

Fonte: transposto de Barton, Lien e Lunde (1974).

Tabela 25 - Valores adotados para o índice SRF.

<b>Índice do estado de tensões do maciço rochoso – SRF</b>	
<b>a) Zonas alteradas</b>	
Designação	Valores
A – Múltiplas ocorrências de zonas alteradas, com argila ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade qualquer)	10
B – Zona alterada contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada com profundidade de escavação $\leq 50\text{m}$	5
C – Zona alterada contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade de escavação $> 50\text{ m}$ )	2,5
D – Múltiplas zonas esmagadas em rocha competente; sem argila (profundidade qualquer)	7,5
E = Zona esmagada em rocha competente e sem argila: profundidade de escavação $\leq 50\text{m}$	5
F – Zona esmagada em rocha competente e sem argila (profundidade de escavação $> 50\text{ m}$ )	2,5
G – Fraturas abertas e fraturamento muito intenso (profundidade qualquer)	5
<b>b) Rochas competentes – Problemas de tensões de rocha</b>	
Designação	Valores
H – Tensões baixas, próximo à 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 rocha ( $\sigma_c / \sigma_1 = 2,5$ )	10 – 20
<b>c) Rochas não competentes, característica plástica devido a influência de altas pressões</b>	
Designação	Valores
M – Pressão moderada	5 – 10
N – Pressão elevada	10 – 20
<b>d) Rochas expansíveis em presença de água</b>	
Designação	Valores
O – Pressão de expansão moderada	5 – 10
P – Pressão de expansão elevada	10 – 15

Fonte: transposto de Barton, Lien e Lunde (1974) e Bieniawski (1989).

A Tabela 26, mostra os procedimentos adicionais que devem ser considerados na determinação dos parâmetros da Equação 8, quando não se dispõe de todos os testemunhos de sondagens, ensaios de laboratórios da resistência a compressão uniaxial e em relação aos parâmetros das discontinuidades.

Tabela 26 - Procedimentos a serem seguidos para a determinação dos parâmetros RQD,  $J_n$ ,  $J_a$ ,  $J_r$ ,  $J_w$  e SRF.

<b>Notas adicionais para a aplicação das Tabelas 13 e 21 a 25</b>
1. Quando o testemunho de sondagem não está disponível, o RQD pode ser estimado pelo índice volumétrico de juntas, $J_v$ , por meio das Equações 5 ou 7.
2. O número de famílias de juntas, $J_n$ , será constantemente afetado pela presença de foliação, xistosidade, clivagem ardósiana ou acamamento etc. Se essas feições são fortemente desenvolvidas, devem, portanto, ser consideradas como uma única família de juntas. Entretanto, se existirem poucas juntas visíveis, ou se apenas ocasionalmente ocorrerem quebras no testemunho de rocha devido a essas feições, então deve-se considerá-las como juntas aleatórias.
3. Os índices $J_r$ e $J_a$ devem ser referentes à família de fraturas mais fraca ou à descontinuidade preenchida por argila na região analisada. Entretanto, se a família de juntas com valor mínimo de $J_r/J_a$ possui orientação favorável para a estabilidade, então uma segunda família menos favorável pode, algumas vezes, ser mais significativa, e seu maior valor da razão ( $J_r/J_a$ ) deve ser utilizado para avaliar o Q. O valor de $J_r/J_a$ deve se relacionar com a superfície mais provável a se gerar uma ruptura.
4. As resistências à compressão e a tração ( $\sigma_c$ e $\sigma_t$ ) da rocha intacta deve ser avaliada em condições saturadas se isto for apropriado para as condições presentes ou futuras <i>in situ</i> . Uma estimativa muito conservadora da resistência deve ser feita para as rochas que deterioram quando expostas a condições saturadas.

Fonte: adaptado de Bieniawski (1989).

Após quantificação dos valores atribuídos aos parâmetros da equação 8, o maciço rochoso pode ser categorizado em nove classes de acordo com valor de Q, conforme apresentado na Tabela 27.

Tabela 27 - Caracterização do maciço rochoso consoante o valor de Q.

<b>Classe</b>	<b>Designação</b>	<b>Valor</b>
I	Maciço de excepcional qualidade	>400
II	Maciço de extrema qualidade	400 – 100
III	Maciço de muito boa qualidade	100 – 40
IV	Maciço de boa qualidade	40 – 10
V	Maciço de qualidade regular	10 – 4
VI	Maciço de má qualidade	4 – 1
VII	Maciço de muito má qualidade	1 - 0,1
VIII	Maciço de extrema má qualidade	0,1 - 0,01
IX	Maciço de excepcional má qualidade	0,01 - 0,001

Fonte: transposto de Bieniawski (1989).

### 3.4.4 Slope Mass Rating (SMR)

Na *seção 3.4.2*, observou-se que o RMR foi inicialmente proposto para aberturas de túneis e, posteriormente, utilizado em outras obras de engenharias, com destaque para análise da estabilidade de taludes pela introdução do fator de ajuste entre a atitude das descontinuidades e orientação das escavações. Todavia, a falta de critério prático para determinar este fator em obras envolvendo taludes, além da elevada pontuação atribuída a este parâmetro (ver tabela 20), tornou seu uso difícil de ser aplicado ou mesmo arbitrário para avaliação de taludes (ROMANA; TOMÁS; SERÓN, 2015; ROMANA; SERÓN; MONTALAR, 2003).

Diante disso, Romana, em 1985, apresentou o sistema de classificação *Slope Mass Rating* (SMR), que consiste em uma adaptação do RMR para avaliar a estabilidade de taludes rochosos (ROMANA; TOMÁS; SERÓN, 2015; ROMANA; SERÓN; MONTALAR, 2003). O índice SMR consiste da correção do RMR por meio da adição de dois fatores de ajuste: o primeiro fator (subdividido em  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$ ) representa a relação entre a orientação das descontinuidades e a face do talude e o segundo fator ( $F_4$ ) depende do método de escavação utilizado, sendo definido pela Equação 9 abaixo (ROMANA; SERÓN; MONTALAR, 2003).

$$SMR = RMR_b + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad (9)$$

Onde:

$RMR_b$  (RMR básico) corresponde ao somatório dos cinco primeiros parâmetros do RMR de Biniavswky (1989): Resistência à compressão da rocha intacta, RQD, espaçamento das descontinuidades, características das juntas e condições de percolação de fluidos (ver *seção 3.4.2*);  $F_1$  representa a relação entre a direção das descontinuidades e a face do talude;  $F_2$  refere-se ao mergulho das descontinuidades;  $F_3$  representa o paralelismo entre o mergulho das descontinuidades e a face do talude;  $F_4$  corresponde ao fator empírico de correção para o método de escavação utilizado.

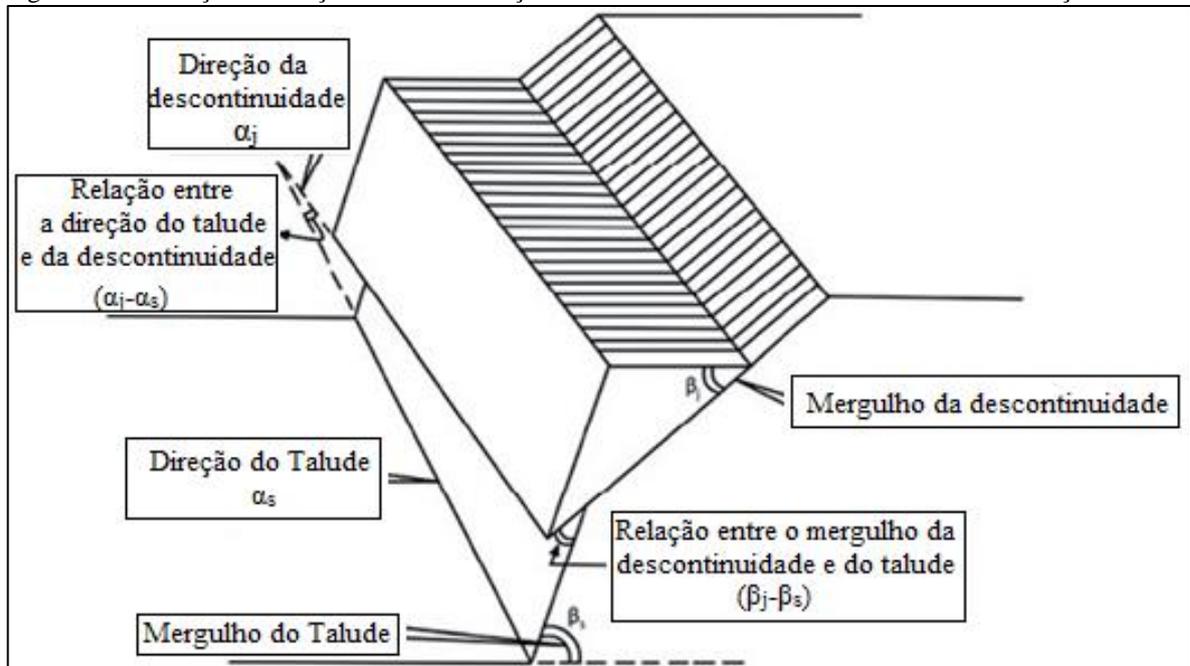
De forma descritiva, para dimensionar os parâmetros  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$  torna-se necessário utilizar os subfatores ( $\alpha_j$ ,  $\alpha_s$ ,  $\beta_j$  e  $\beta_s$ ) apresentados na Figura 20.

#### 3.4.4.1 Fator $F_1$

O fator de ajuste  $F_1$  depende do paralelismo entre a direção das juntas ( $\alpha_j$ ) e a face do talude ( $\alpha_s$ ), Figura 20. Esse fator varia de 1, quando as duas direções são aproximadamente paralelas entre si, a 0,15, menor valor adotado na classificação que corresponde ao ângulo maior que  $30^\circ$  da relação entre as duas direções  $|\alpha_j - \alpha_s|$  para ruptura planar e  $|\alpha_j - \alpha_s - 180^\circ|$  para ruptura

por tombamento) (ROMANA; SERÓN; MONTALAR, 2003). Esses valores podem ser determinados discretamente por meio da Tabela 28.

Figura 20 - Ilustração da relação entre a orientação de descontinuidades e a face do talude no maciço rochoso.



Fonte: adaptado de Maion (2019).

Tabela 28 – Valores adotados para fator  $F_1$ .

Tipo de ruptura		Muito favorável	Favorável	Normal	Desfavorável	Muito desfavorável
Planar	$ \alpha_j - \alpha_s $	$>30^\circ$	$30^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 5^\circ$	$<5^\circ$
Tombamento	$ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ $					
$F_1$		0.15	0.4	0.7	0.8	1

Fonte: transposto de Romana, Tomás e Serón (2015).

Para tornar os valores de  $F_1$  contínuo, Romana (1993 *apud* ROMANA; TOMÁS; SERÓN, 2015) propôs a Equação 10 com o intuito de auxiliar na determinação desse parâmetro:

$$F_1 = (1 - \text{Sen}|A|)^2 \quad (10)$$

Em que:

- $A = |\alpha_j - \alpha_s|$  para ruptura planar;
- $A = |\alpha_j - \alpha_s - 180^\circ|$  para ruptura por tombamento.

#### 3.4.4.2 Fator $F_2$

O fator de ajuste  $F_2$  refere-se ao mergulho das descontinuidades  $\beta_j$ . Quando este parâmetro se relaciona a ruptura planar, Figura 20, a superfície de ruptura da junta poderá

desenvolver força de cisalhamento entre as paredes. À vista disso, o valor numérico pode variar de 1, para descontinuidades com mergulho superior a 45° suscetível à ruptura por tombamento, a 0,15, para descontinuidades com inclinação inferior a 20° (ROMANA; TOMÁS; SERÓN, 2015). O parâmetro  $F_2$  pode ser determinado de forma empírica por meio da Tabela 29 ou por intermédio de uma função contínua proposta por Romana na Equação 11 (ROMANA 1993 apud ROMANA; TOMÁS; SERÓN, 2015).

Tabela 29 - Valores correspondentes ao fator  $F_2$ .

Tipo de ruptura		Muito favorável	Favorável	Normal	Desfavorável	Muito desfavorável
$\beta_j$		<20°	20° - 30°	30° - 35°	35° - 40°	>45°
Planar	$F_2$	0,15	0,4	0,7	0,85	1
Tombamento		1				

Fonte: transposto de Romana, Tomás e Serón (2015).

$$F_2 = \operatorname{tg}^2 \beta_j \quad (11)$$

Em que  $\beta_j$  corresponde ao ângulo de mergulho da descontinuidade.

#### 3.4.4.3 Fator $F_3$

Este parâmetro relaciona o paralelismo entre o mergulho das descontinuidades ( $\beta_j$ ) e a face do talude ( $\beta_s$ ) (Figura 20) e expressa, para casos envolvendo ruptura planar, a probabilidade de as descontinuidades aflorarem na superfície do talude. Para rupturas planares este fator varia de 0, quando o resultado de  $\beta_j - \beta_s$  for superior a 10°, a -60 quando este resultado for inferior a -10°. Já para rupturas por tombamento, o parâmetro varia de 0, quando o resultado de  $\beta_j + \beta_s$  for inferior a 110°, a -25, quando este resultado for superior a 120°, Tabela 30 (ROMANA; TOMÁS; SERÓN, 2015). Os valores deste parâmetro são os mesmos propostos para o fator de ajuste de Bieniawski (1989).

Tabela 30 - Valores relativos ao fator  $F_3$ .

Tipo de ruptura		Muito favorável	Favorável	Normal	Desfavorável	Muito desfavorável
Planar	$\beta_j - \beta_s$	>10°	10°-0°	0	0-(-10°)	< (-10°)
Tombamento	$\beta_j + \beta_s$	<110°	110°-120°	>120°	-	-
$F_3$		0	-6	-25	-50	-60

Fonte: transposto de Romana, Tomás e Serón (2015).

#### 3.4.4.4 Fator $F_4$

O parâmetro de correção  $F_4$  relaciona-se aos diferentes métodos de escavação utilizados na execução do talude e é determinado de forma empírica por meio da Tabela 31, variando de 15, para taludes naturais, a -8, para detonações deficientes.

Tabela 31 - Valores correspondentes ao fator  $F_4$ .

Método de escavação	Valor de $F_4$
Talude natural	15
Pré-corte	10
Detonação suave	8
Detonação normal ou desmonte mecânico	0
Detonação deficiente	-8

Fonte: transposto de Romana, Tomás e Serón (2015).

Com base no valor calculado do SMR por meio da Equação 9, o maciço rochoso pode ser caracterizado em 5 (cinco) classes. Além disso, a análise qualitativa do SMR permite classificar a estabilidade do talude, o tipo e a probabilidade de ocorrência de rupturas, conforme apresentado na Tabela 32.

Tabela 32 - Caracterização do talude consoante o valor do SMR.

Classes	I	II	III	IV	V
SMR	0 – 20	21 – 40	41 – 60	61 -80	81 – 100
Descrição	Muito ruim	Ruim	Normal	Bom	Muito bom
Estabilidade	Completamente instável	Instável	Parcialmente estável	Estável	Completamente estável
Tipo de fraturas	Ruptura planar ou circular	Ruptura Planar ou em cunha em grandes proporções	Algumas rupturas planares ou muitas rupturas em cunha	Alguns blocos	Nenhuma
Probabilidade de ruptura	0,9	0,6	0,4	0,2	0

Fonte: transposto de Romana, Tomás e Serón (2015).

A Tabela 33 mostra possíveis medidas que podem ser utilizadas para estabilizar taludes instáveis, assim como as técnicas a serem utilizadas conforme o valor do SMR. De acordo com Romana, Tomás e Serón (2015), para valores de SMR inferiores a 20, as rupturas ocorrem de forma abrupta e não há registros de taludes com valores de SMR menores que 10.

Tabela 33 - Tipos de suporte recomendados conforme o valor do SMR.

Classe do SMR	Medidas de estabilização	Técnicas de contenção
65 – 100	Sem suporte	Nenhuma (retirar blocos instáveis)
45 – 70	Proteção	Redes metálicas, valas no pé dos taludes
30 – 75	Reforço	Pregagens e ancoragens
20 – 60	Concreto	Concreto projetado
10 – 40	Drenagem	Drenagem superficial ou profunda
10 – 30	Reescavação	Modificação na geometria do talude

Fonte: transposto de Romana, Tomás e Serón (2015).

A classificação SMR não considera modelos de rupturas em cunhas, sendo assim, para casos em que há presença desse tipo de ruptura, deve-se recorrer a metodologias utilizadas na literatura. Duas comumente recomendadas são descritas tal e qual como se segue:

- obter o índice SMR para cada uma das duas famílias de juntas que formam a cunha, considerando que cada descontinuidade se comporta cinematicamente como ruptura planar, em que é tomado o valor mais crítico como representativo do talude rochoso (FREITAS, 2011);
- realizar a classificação SMR tomando como orientação a linha de interseção entre os dois planos da cunha, a saber: direção (*Strike*) e caimento (ângulo de mergulho) (HICKEL, 2020).

### 3.5 Teste do martelo geológico

A resistência à compressão de uma amostra de rocha do maciço rochoso pode ser determinada de forma qualitativa e quantitativa por meio de ensaios em laboratório (compressão uniaxial e carga pontual) ou *in situ* (martelo de Schmidt). No entanto, quando não se dispõe desses ensaios, pode-se determinar a resistência do maciço rochoso de maneira discreta por meio do teste do martelo geológico. Este teste baseia-se no uso de um martelo geológico e/ou de um canivete para determinar a resistência da rocha. A técnica consiste em realizar impactos sucessivos a um fragmento de rocha sã, até alcançar o fraturamento, todavia em formações brandas utiliza-se o canivete para determinar o grau de dureza da rocha (FIORI, 2015). Diante disso, para estimar a resistência da rocha com base nos dados coletados, usa-se a Tabela 34.

Tabela 34 - Classificação do estado de resistência da amostra de rocha.

Classificação	Identificação de Campo	Descrição	Resistencia à compressão uniaxial (Mpa)
R0	Marcada com a unha	Rocha extremamente fraca	0,25 – 1
R1	Fragmentada com golpes firmes percutidas com a ponta do martelo de Geólogo. Pode ser raspada com o canivete.	Rocha muita Fraca	1 – 5
R2	Pode ser raspada com o canivete com dificuldade; Marcas superficiais obtidas com a ponta do martelo.	Rocha Fraca	5 – 25
R3	Não pode ser raspada ou riscada pelo canivete, mas as amostras podem ser fraturadas com simples golpes de martelo.	Rocha medianamente resistente	25 – 50
R4	As amostras podem necessitar de mais de um golpe com martelo para fraturar.	Rocha Resistente	50 – 100
R5	As amostras necessitam de muitos golpes com martelo para romperem-se.	Rocha muito resistente	100 – 200
R6	As amostras podem somente ser lascadas com o uso do martelo.	Rocha extremamente resistente	<250

Fonte: adaptado de Fiori (2015).

### 3.6 Geologia da área de estudo

O município de Crateús localiza-se na porção centro-oeste do domínio Ceará Central. Este domínio pertence à subprovíncia setentrional da Província Borborema. Porquanto, a região que pertence a área do presente estudo é composta por 4 (quatro) domínios geológicos distintos (COSTA, 2007):

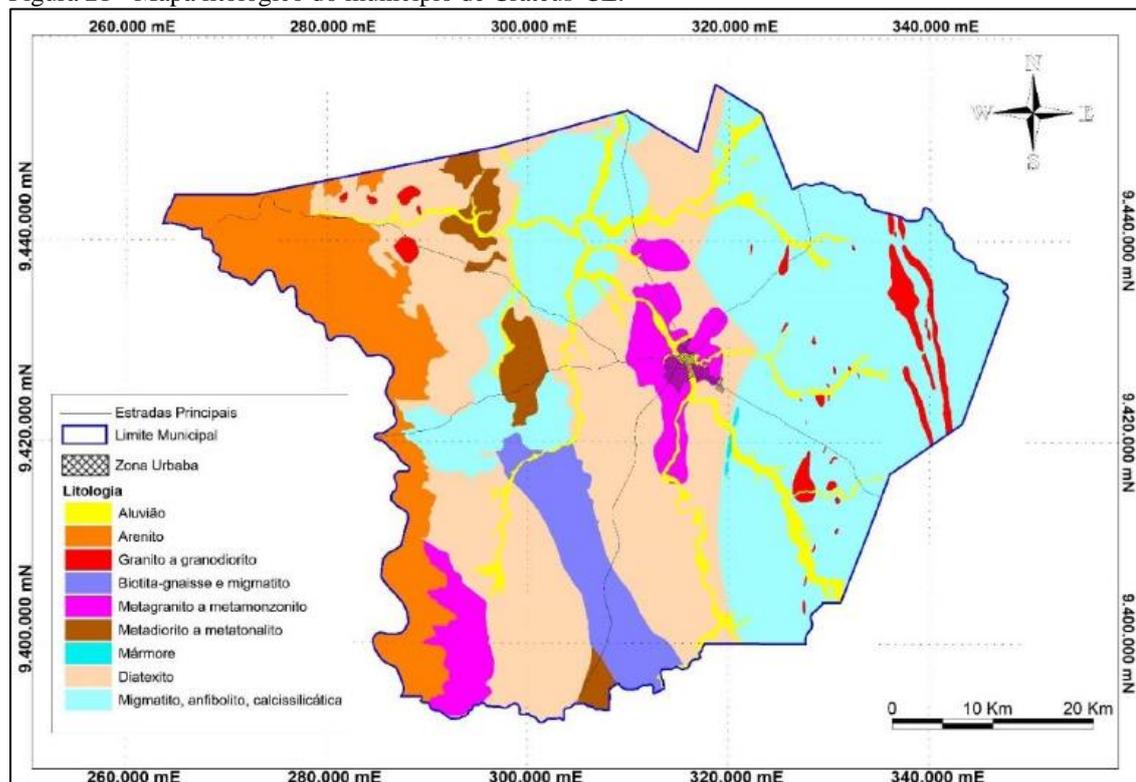
- Embasamento Arqueano pertencente ao Complexo Cruzeta: compreende as unidades Mombaça e Pedra Branca, compostas por rochas do tipo gnaiss cinza; e a unidade Tróia, formada por rochas máficas e ultramáficas (metagabros, metabasaltos e cromititos);
- Embasamento Paleoproterozóico: compreende o complexo Canindé Ceará, o qual é constituído por duas sequências de rochas. A primeira é formada por biotita-gnaiss, e a segunda é constituída por ortognaisses granodioríticos/tonalíticos;
- Supracrustais Meso-Neoproterozóicas: compreende o complexo Ceará, dividido nas unidades Canindé, Independência, Quixeramobim e Arneiroz. Esses complexos são constituídos por uma sequência metassedimentar de metapelitos

em associação com camadas de rochas anfibolitos, calcissilicáticas, quartzitos e mármore;

- Neoproterozóico pertencente ao Complexo Tamboril-Santa Quitéria: constituído por granito-migmatítico em associação com gnaisses, granitoides e migmatitos. Estes granitóides constituem intrusões sin a tardi magmática com feições de mistura de magmas.

De acordo com o mapeamento geológico do município de Crateús, Figura 21, realizado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, CPRM, a classificação litológica da região é constituída por rochas metamórficas paraderivadas, biotita gnaisses e migmatitos, formados, majoritariamente, por minerais de feldspatos, quartzo e biotita; rochas metamórficas ortoderivadas, metadioritos e metatonalitos; arenitos cinza-esbranquiçados de granulação média provenientes da porção leste da Bacia do Parnaíba; depósitos Aluvionares heterogêneos ao longo do rio Poty formados por sedimentos de granulometria média a grossa, areia e cascalho, e depósitos de granulometria fina, argilas; migmatitos em estágio avançado de fusão parcial, os diatexitos (COSTA, 2007). A sede municipal do município é constituída, predominantemente, por rochas ígneas plutônicas metamorfizadas, metagranito e metamonzonito, intercaladas por rochas fragmentadas, milonitos (SOUSA; TEXEIRA; SOUSA, 2019).

Figura 21 - Mapa litológico do município de Crateús-CE.



Fonte: Sousa, Teixeira e Sousa (2019).

#### 4 MATERIAIS

Para realizar a coleta dos dados referentes ao mapeamento geológico-geotécnico dos taludes de rocha situados no corte ferroviário nas proximidades do centro da cidade de Crateús-CE, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Bússola geológica, tipo Brunton;
- GPS de mão da marca Garmin, modelo Map 64S;
- Trena curta de 10 metros;
- Martelo geológico da marca Estwing e Canivete Suíço; e
- Lupa de bolso com ampliação de 20x.

Vale salientar que os materiais utilizados para a coleta dos dados em campo foram disponibilizados pela Universidade Federal do Ceará (UFC), *Campus* de Crateús.

## 5 MÉTODOS

Para efetuar a avaliação geomecânica dos taludes da área em estudo, o presente trabalho foi dividido em três etapas complementares, apresentadas nos itens 5.1, 5.2 e 5.3.

### 5.1 Revisão na literatura dos métodos de avaliação geomecânica em taludes

Inicialmente, realizou-se uma detalhada revisão na literatura para compreender e selecionar os métodos de avaliações geomecânicas que foram utilizados neste trabalho. Para tanto, utilizou-se de livros, estudos de casos, dissertações de mestrado, teses de doutorado e artigos científicos referentes às classificações geomecânicas de maciços rochosos, em especial na aplicação de estabilidade de taludes rochosos, os quais foram essenciais para a compreensão do tema abordado e definições expressas neste trabalho.

### 5.2 Coleta das informações geológicas e geotécnicas em campo

A segunda etapa do trabalho iniciou-se com a coleta das informações concernentes às características geológico-geotécnicas dos taludes rochosos da área em estudo. Essa etapa foi subdividida em três partes complementares: primeiramente, realizou-se uma classificação litológica das rochas que compõem os taludes do corte ferroviário; em seguida, os taludes estudados foram zoneados em regiões que apresentaram as mesmas propriedades geológica-geotécnicas em uma faixa de 30 metros de extensão, conforme recomendado por Bieniawski (1989); e, seguidamente, efetuou-se as coletas das informações estruturais e geotécnicas das discontinuidades presentes nas zonas previamente definidas. Apresenta-se a seguir, a descrição das principais características que foram avaliadas e coletadas nas discontinuidades dos taludes em questão:

- orientação das discontinuidades: dados que foram coletados com auxílio da bússola geológica;
- espaçamento entre discontinuidades: este parâmetro foi determinado pela distância média entre as discontinuidades de uma mesma família que atravessam a linha de varredura, caracterizada conforme a Tabela 1, ver *seção 3.2.1.2*;
- persistência: este parâmetro foi avaliado por meio de uma média do comprimento longitudinal das discontinuidades mais visíveis em cada família presente nos taludes, conforme a Tabela 2, *seção 3.2.1.3*;

- rugosidade das paredes: essa característica foi determinada com o auxílio da Figura 8, ver *seção 3.2.1.4*;
- abertura das paredes: esse parâmetro foi medido pela distância entre as paredes de cada descontinuidade de uma mesma família para calcular a média simples de todas as aberturas para cada família, de acordo com a Tabela 3, *seção 3.2.1.5*;
- preenchimento: esta propriedade foi determinada por meio da observação tátil-visual do material que preenche a abertura das descontinuidades, para então ser categorizado de acordo com a Tabela 4 da *seção 3.2.1.6*;
- percolação de água: este parâmetro foi medido pela observação *in loco* da presença de água nas descontinuidades do talude, conforme a Tabela 5, *seção 3.2.1.8*;
- alteração do maciço rochoso: foi classificada a partir do estado de meteorização do maciço rochoso, conforme a Tabela 6 da *seção 3.2.1.9*.

A resistência à compressão da rocha intacta *in situ*, foi realizada por meio do método do martelo geológico, conforme descrito na *seção 3.5*.

### 5.3 Análise e refinamento dos dados coletados para avaliação geomecânica dos taludes

Nesta etapa, foi realizado o tratamento dos dados coletados em campo, conforme descrito a seguir:

- para facilitar a análise das atitudes das descontinuidades coletadas *in situ*, as medidas em Brunton foram convertidas para notação em clar e, posteriormente, utilizadas no *software Stereonet 11*;
- os valores do RQD para cada zoneamento dos taludes estudados foram determinados pela Equação 5, da *seção 3.4.1*, proposta por Palmstrom (1982), por meio do índice  $J_v$ , que corresponde ao índice volumétrico de juntas;
- a classificação RMR foi realizada pela quantificação dos cinco primeiros parâmetros, Tabelas 12 a 17, conforme a *seção 3.4.2*, caracterizando o RMR básico. Posteriormente, efetuou-se a correção do RMR para taludes pelo fator de ajuste do sexto parâmetro, que corresponde à relação entre a orientação das descontinuidades e a obra de engenharia executada, por meio do uso das Tabelas 18 e 19 da mesma seção;
- para determinar o sistema de classificação Q - Barton, desenvolvido por Barton, foi realizada uma análise das condições das descontinuidades de cada talude estudado por meio das Tabelas 21 a 24, adicionando os valores do RQD e do

Índice do estado de tensões do maciço rochoso, SRF, Tabela 25, conforme proposto na *seção 3.4.3*. Para os valores encontrados na Equação 8, foi atribuída uma das nove classes para os taludes, por meio da Tabela 27;

- utilizando os dados que foram obtidos pelo *software Stereonet* e os dados do levantamento de campo, determinou-se a classificação SMR por meio da equação 9 da *seção 3.4.4*.

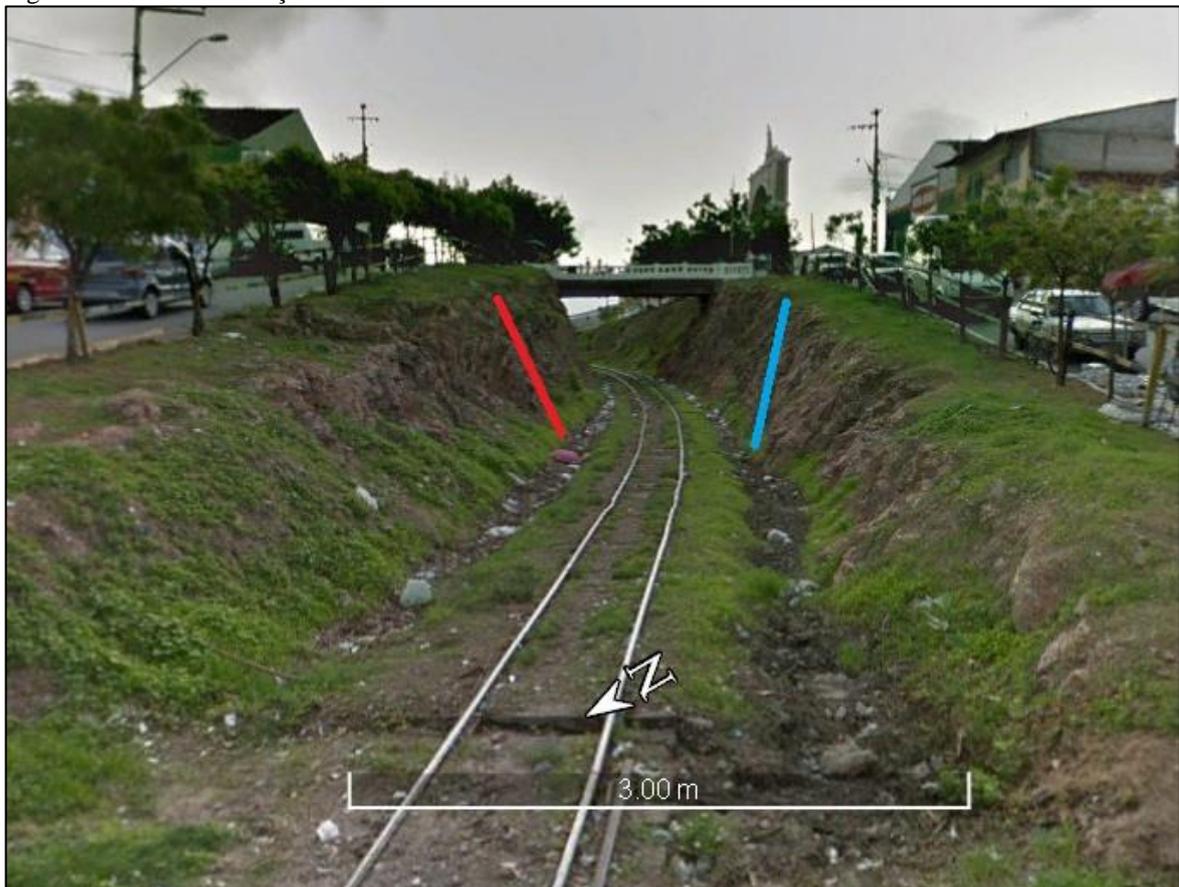
## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentadas as análises feitas referentes às informações sobre a descrição geológico-geotécnica, a análise cinemática e as classificações geomecânicas coletadas dos taludes rochosos estudados.

### 6.1 Caracterização geológico-geotécnica dos taludes estudados

A área em estudo está localizada na Rua Almirante Tamandaré no Centro da cidade de Crateús – CE. O corte ferroviário é formado por dois taludes rochosos paralelos T1 (direção da vertente voltada para SW) e T2 (direção da vertente orientada para NE), Figura 22, que foram construídos para a passagem da linha férrea por meio de operações de desmonte de rochas. O corte apresenta aproximadamente 168 metros de comprimento e 6,5 metros de altura no ponto mais alto com coordenadas geográficas de  $05^{\circ}10'42.10''\text{S}$  e  $40^{\circ}40'09.02''\text{W}$ . A inclinação média dos taludes é de  $68^{\circ}$ , com azimute de  $200^{\circ}$  para o T1 e  $20^{\circ}$  para o T2 e direção no sentido NW – SE.

Figura 22 – Individualização dos Taludes em T1 – vermelho e T2 – azul.



Fonte: transposto do Google Earth (acesso em 21/03/2021).

De modo a efetuar a caracterização geotécnicas das juntas, os taludes foram estudados seguindo uma extensão de 30 (trinta) metros, apêndices I e II, subdividida em intervalos de 5 (cinco) metros para locação da *Scanline*.

Como os taludes apresentaram grandes regiões intemperizadas e cobertas por solo (Figura 23), o que dificultou a caracterização visual, e manifestaram, praticamente, a mesma variabilidade estrutural e geomecânica, se optou a realizar a análise geotécnica em apenas uma região da *Scanline* do talude T1, como mostrado na Figura 24, devido a maior presença de fraturas por metro linear.

Figura 23 - Porções dos taludes bastante intemperizadas.



Fonte: Google Earth (acesso em 21/03/2021).

Figura 24 – Região no qual foi empregado o método da *Scanline* utilizado para determinar as propriedades das discontinuidades em uma extensão de 5 (cinco) metros.



Fonte: do próprio autor.

### 6.1.1 Caracterização geológica

A descrição petrográfica da rocha que forma os taludes foi realizada a partir de observações a olho nu e conforme os estudos de Costa (2007). A rocha identificada nos taludes foi o Ortognaisse, ortoderivado de um protólito ígneo plutônico, granito ou granodiorito. A rocha apresentou coloração, predominantemente, vermelha a marrom, apresentando textura fanerítica fina a média e estrutura compacta, Figura 25. Os principais minerais identificados foram quartzo e feldspato potássico, Figura 26, além de outros minerais acessórios como biotita e anfibólios.

Figura 25 - Rocha formadora dos taludes, Ortognaisse.



Fonte: do próprio autor.

Verificou-se a presença de material argiloso na face dos taludes situados abaixo do pontilhão que, provavelmente, decorreu de processos intempéricos, conforme mostrado na Figura 27.

Figura 26 – Presença de minerais félsicos, quartzo e feldspato potássico, no Ortognaisse.



Fonte: do próprio autor.

Figura 27 - Presença de material argiloso no talude T2.



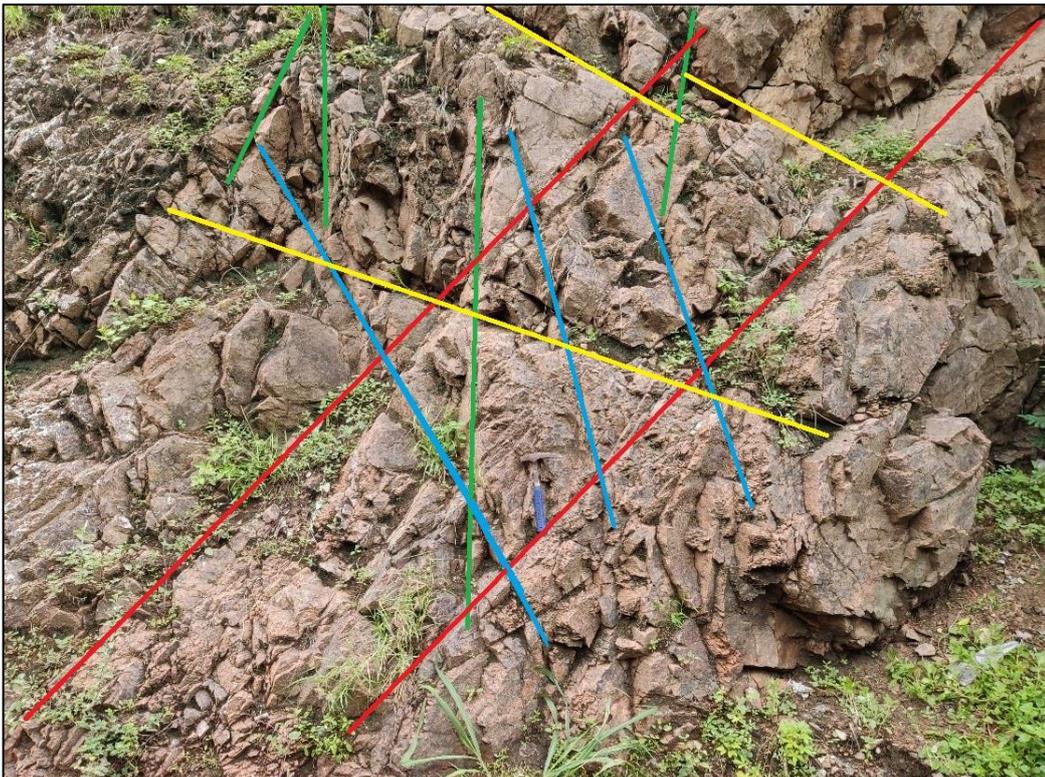
Fonte: do próprio autor.

### 6.1.2 Caracterização geotécnica

Os dados estruturais levantados em campo compreenderam basicamente as medidas das atitudes das discontinuidades com uso da bússola Brunton. Como as características geomecânicas dos dois taludes são similares, o levantamento das características estruturais pelo método da *Scanline* se resumiu apenas a uma região de 5 (cinco) metros de comprimento do Talude T1, já que nessa região o maciço rochoso se apresenta de maneira mais evidente e de forma geotecnicamente mais crítica, vide Figura 24. Assim, o levantamento dos dados estruturais consistiu em dois métodos: preliminarmente, o levantamento constituiu-se na determinação das famílias de fraturas em campo por meio da identificação visual no intervalo da extensão da *Scanline*; e posteriormente, com o intuito de corroborar a análise subjetiva da inspeção visual, as famílias foram definidas estatisticamente com produção de diagramas estereográficos utilizando o *software Stereonet 11*.

Assim sendo, no primeiro método foram definidas e individualizadas as principais famílias de discontinuidades presentes nos taludes, Figura 28, o que representaram 4 (quatro) planos de fraturas distintas, codificadas como F1, F2, F3 e F4. A Tabela 35 mostra a média preliminar das atitudes dessas famílias de discontinuidades aferidas visualmente no levantamento estrutural dos taludes.

Figura 28 – Distinção das famílias de juntas presentes no maciço rochoso: F1 – vermelho, F2 – verde, F3 – amarelo e F4 – azul.



Fonte: do próprio autor.

Tabela 35 - Média preliminar das atitudes das famílias de fraturas presentes nos taludes, aferidas manualmente.

<b>Família</b>	<b>Inclinação</b>	<b>Azimute</b>
F1	69°	328°
F2	64°	259°
F3	19°	155°
F4	67°	164°

Fonte: do próprio autor.

Para analisar a periodicidade dessas famílias de descontinuidades ao longo da extensão de 30 (trinta) metros nos 2 (dois) taludes, foram plotadas, no *software Stereonet*, as atitudes de 15 (quinze) descontinuidades coletadas aleatoriamente em cada talude, T1 e T2. A Tabela 36 mostra esses dados das descontinuidades coletadas em campo.

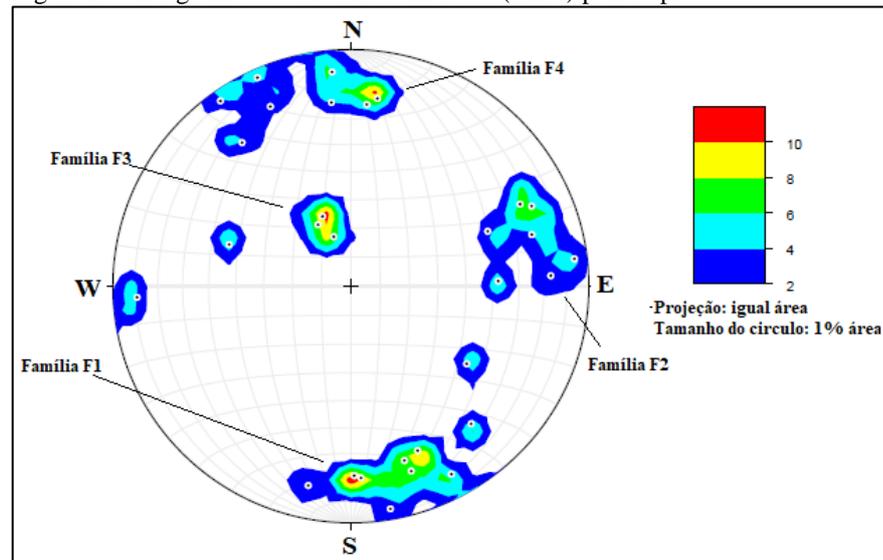
Tabela 36 - Atitudes das descontinuidades levantadas aleatoriamente em campo.

<b>Talude T1</b>			<b>Talude T2</b>		
<b>Ponto coletado</b>	<b>Inclinação</b>	<b>Azimute</b>	<b>Ponto coletado</b>	<b>Inclinação</b>	<b>Azimute</b>
<b>P1</b>	71°	342°	<b>P16</b>	68°	244°
<b>P2</b>	66°	343°	<b>P17</b>	26°	158°
<b>P3</b>	72°	246°	<b>P18</b>	79°	332°
<b>P4</b>	65°	143°	<b>P19</b>	80°	175°
<b>P5</b>	85°	145°	<b>P20</b>	24°	152°
<b>P6</b>	66°	319°	<b>P21</b>	85°	350°
<b>P7</b>	69°	359°	<b>P22</b>	52°	248°
<b>P8</b>	84°	263°	<b>P23</b>	52°	268°
<b>P9</b>	73°	267°	<b>P24</b>	18°	161°
<b>P10</b>	68°	254°	<b>P25</b>	64°	338°
<b>P11</b>	79°	87°	<b>P26</b>	70°	357°
<b>P12</b>	45°	109°	<b>P27</b>	86°	156°
<b>P13</b>	49°	304°	<b>P28</b>	69°	188°
<b>P14</b>	67°	174°	<b>P29</b>	75°	12°
<b>P15</b>	72°	156°	<b>P30</b>	66°	185°

Fonte: do próprio autor.

A compilação das atitudes das descontinuidades permitiu a elaboração de um diagrama de contorno de planos e polos, como mostrado na Figura 29. Verifica-se no diagrama 4 (quatro) densidades de polos que representam, estaticamente, as mesmas 4 (quatro) famílias definidas visualmente. Para os casos de pequenas densidades de polos que se observa no diagrama, trata-se de descontinuidades isoladas presentes nos taludes, descrição que se observa *in loco*.

Figura 29 - Diagrama de contorno com os 30 (trinta) pontos plotados.



Fonte: do próprio autor.

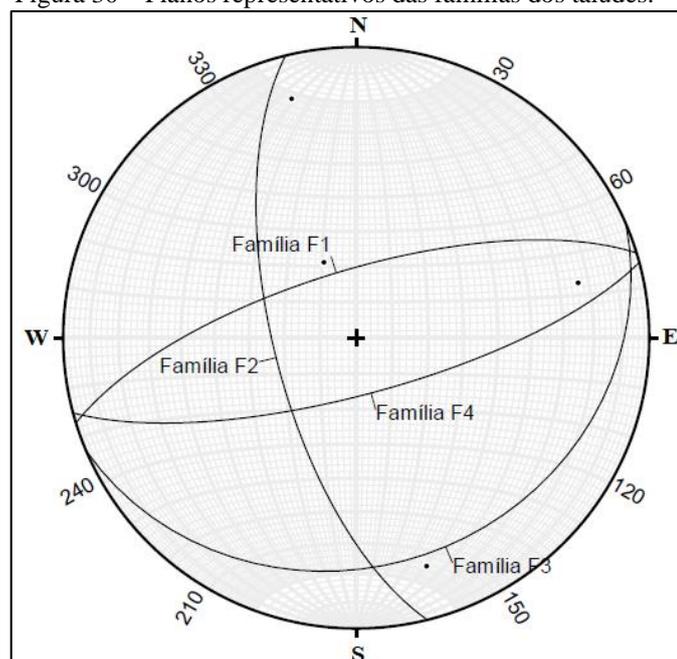
A Tabela 37 apresenta a orientação média de cada família de fraturas obtida no diagrama de contorno. Estes dados estão representados no estereograma de planos e polos da Figura 30.

Tabela 37 - Atitudes representativas das famílias de fraturas.

Família	Inclinação	Azimute
F1	71°	343°
F2	67°	256°
F3	23°	157°
F4	74°	165°

Fonte: do próprio autor.

Figura 30 – Planos representativos das famílias dos taludes.



Fonte: do próprio autor.

A análise das características geomecânicas das 4 (quatro) famílias de descontinuidades são descritas a seguir.

#### 6.1.2.1 Família F1

As descontinuidades da Família F1 são facilmente visíveis nos taludes T1 e T2, Figura 28. Essa descontinuidade é recorrente em toda a extensão dos dois taludes rochosos, e registrou uma direção média em torno de N73°E e mergulho médio de 71° para NW. A Tabela 38 mostra as atitudes das descontinuidades, na notação clar (azimute e mergulho), representativas dessa família, em conformidade com os dados das Tabelas 36 e 37. No estereograma da Figura 31 estão plotados os planos e polos das descontinuidades da Família F1. Nota-se uma pequena variabilidade das atitudes em relação à média apresentada, demonstrando assim, valores próximos e consistentes para cada descontinuidade.

Tabela 38 – Atitudes, na notação clar, representativas da Família F1.

<b>Família F1</b>
332/79
350/85
338/64
357/70
342/71
343/66
319/66
359/69

Fonte: do próprio autor.

As características geomecânicas dessa família foram obtidas no intervalo da *Scanline*. Verificou-se que a persistência das descontinuidades da Família F1 foi de, aproximadamente, 6,3 metros, caracterizando-a como extensa, de acordo com a Tabela 2; o espaçamento foi calculado por meio da Equação 1 e registrou um comprimento de 0,5 metros, classificando-a como moderada, conforme a Tabela 1.

Em relação à rugosidade, os planos das descontinuidades foram classificados comparando-os com a Figura 8, sendo consideradas como planas e levemente rugosas. Observou-se que as mesmas não possuem espaço entre as paredes, sendo classificadas como aberturas muito fechadas e sem preenchimento, de acordo com as Tabelas 3 e 4. Não foi identificado a presença de água nas descontinuidades, mas um pouco de umidade devido a ocorrências de chuvas nos dias anteriores ao levantamento de campo e, sem possibilidade de

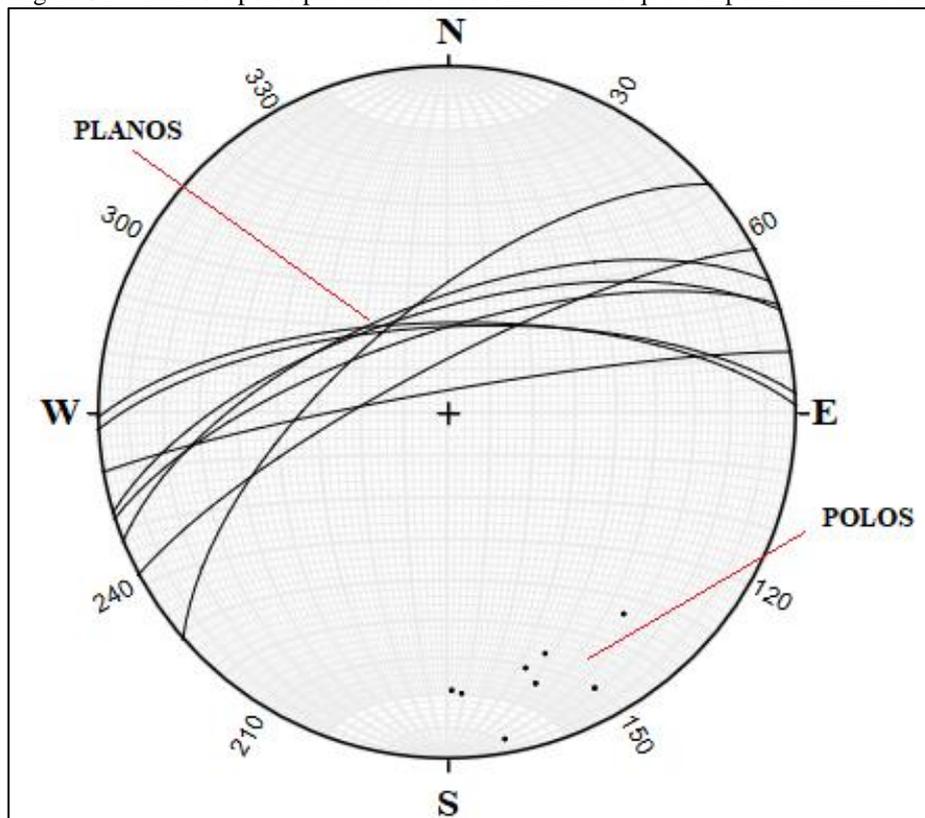
percolação de água nessa família, classificando-a como seca, conforme a Tabela 5. De modo geral, a rocha encontra-se com descolamento, indicando alteração, caracterizando-a, com base na Tabela 6, como pouco alterada. A Tabela 39 resume as informações das características geomecânicas dessa família obtidas em campo.

Tabela 39 – Características geotécnicas da Família F1.

<b>Família F1</b>	
Espaçamento	0,5 m
Persistência	6,3 m
Rugosidade	Plano lisa
Abertura	0 cm
Preenchimento	Nenhum
Percolação	Seco
Alteração	Pouca alterada

Fonte: do próprio autor.

Figura 31 – Planos e polos plotados das discontinuidades que compõem a Família F1.



Fonte: do próprio autor.

#### 6.1.2.2 Família F2

A Família F2 é constituída por fraturas praticamente verticais a face do talude e compreende planos que se apresentam com elevada frequência, Figura 28. No entanto, ao

contrário da Família F1, as discontinuidades são menos evidentes nos dois taludes. Esta família apresenta direção média de N14°W e mergulho médio de 67° SW. A Tabela 40 apresenta as atitudes representativas dessa família em consonância com os dados das Tabelas 36 e 37.

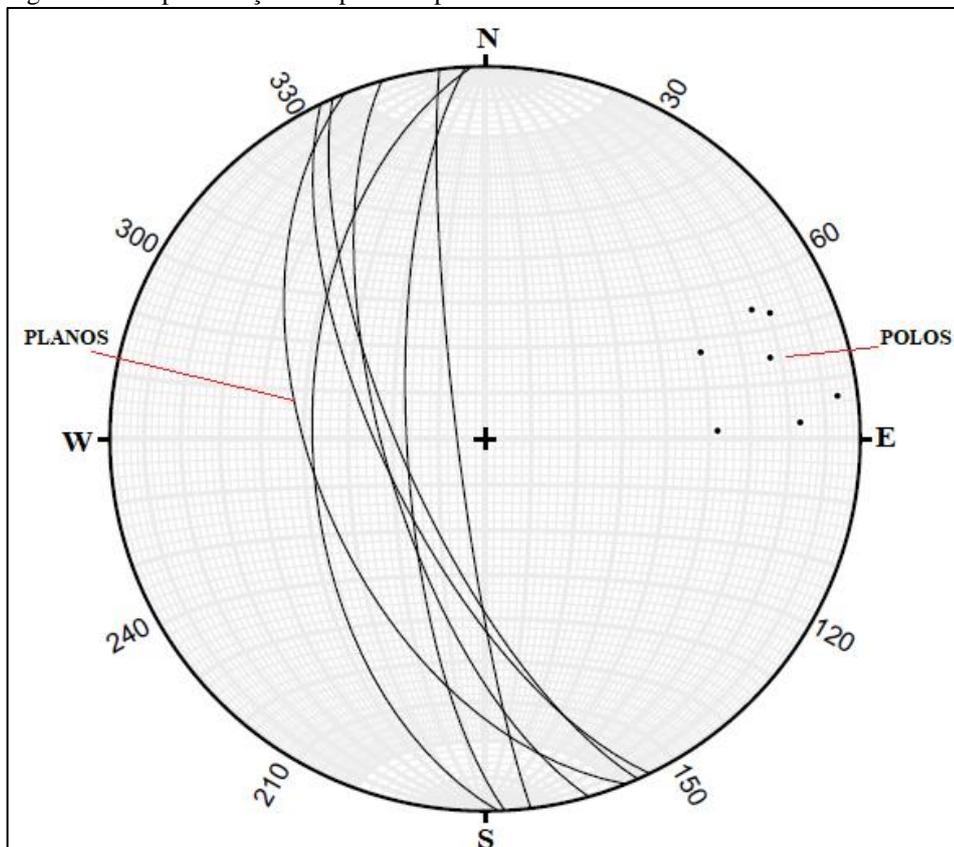
Tabela 40 – Atitudes, na notação clar, representativas da Família F2.

Família F2
244/68
248/52
268/52
246/72
263/84
267/73
254/68

Fonte: do próprio autor.

A Figura 32 mostra o estereograma de planos e polos das sete discontinuidades aferidas para esta família nos dois taludes. Nota-se que a variabilidade das atitudes é semelhante a Família F1, denotando consistência na classificação dessa família.

Figura 32 – Representação dos planos e polos das discontinuidades da Família F2.



Fonte: do próprio autor.

A Tabela 41 mostra os dados geotécnicos da Família F2. Nota-se que os parâmetros de persistência, rugosidade, abertura, preenchimento, percolação e alteração são similares a Família F1, com exceção da caracterização do espaçamento, que registrou um comprimento de 0,31 metros, visto que esta família possui uma maior frequência de fraturas por metro linear, classificando-a como moderada, consoante a Tabela 1.

Tabela 41 - Propriedades geotécnicas da Família F2.

<b>Família F2</b>	
Espaçamento	0.31 m
Persistência	6.3 m
Rugosidade	Plano lisa
Abertura	0 cm
Preenchimento	Nenhum
Percolação	Seco
Alteração	Pouca alterada

Fonte: do próprio autor.

### 6.1.2.3 Família F3

Este conjunto de descontinuidades constitui a família de fraturas mais proeminente nos taludes estudados, Figura 28. Compreende planos sub-horizontais e com baixa frequência. Inicialmente, foi formulado que estas fraturas resultaram do desmonte da rocha com o uso de explosivos, uma vez que se mostraram com pouca intensidade e uma grande abertura nos taludes, no entanto, essa família é recorrente em toda a extensão dos dois taludes rochosos, T1 e T2, vide Anexos I e II, e não apenas na extensão da *Scanline*. No geral, essas fraturas apresentam direção média de N67°E e mergulho médio de 23° SE. A Tabela 42 lista as atitudes representativas da Família F3, na notação clar, em conformidade com os dados das Tabelas 36 e 37.

Tabela 42 – Atitudes, na notação clar, representativas da Família F3.

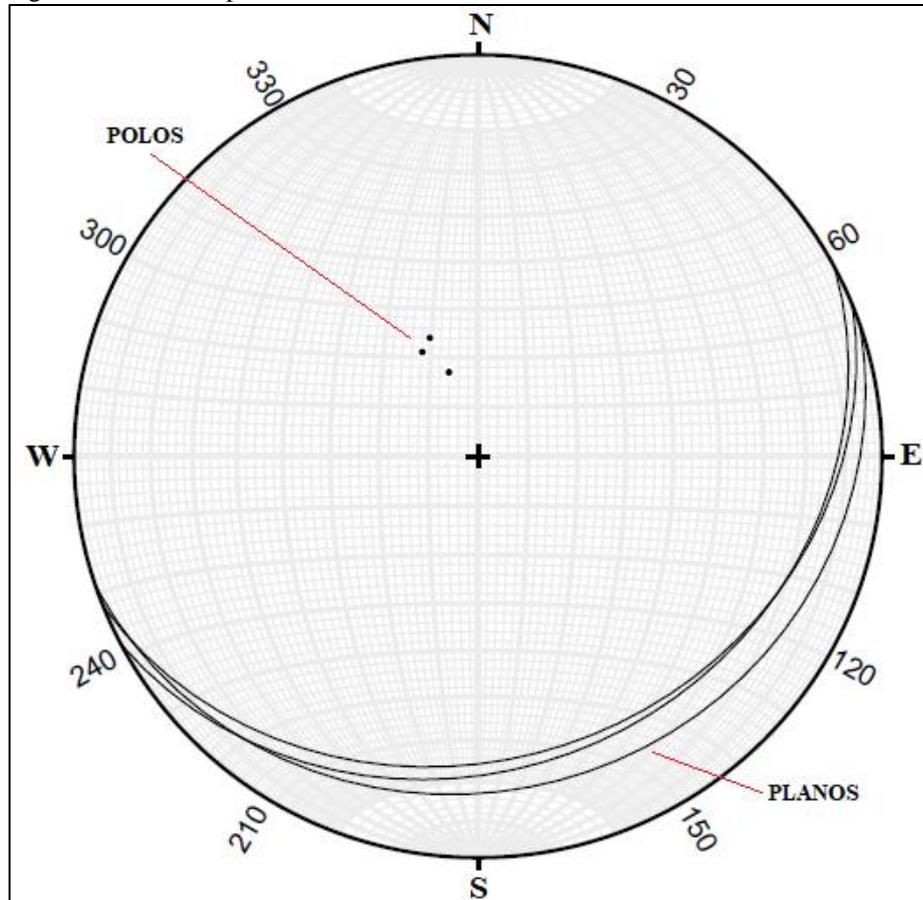
<b>Família F3</b>
158/26
152/24
161/18

Fonte: do próprio autor.

No estereograma da Figura 33 são mostrados os planos e os polos dos dados coletados para esta família. Apesar da baixa quantidade de descontinuidades, a variabilidade

das atitudes com relação à média é nítida, demonstrando consistência na individualização dessa família.

Figura 33 - Planos e polos referentes à Família F3.



Fonte: do próprio autor.

Quanto aos parâmetros geomecânicos, verificou-se que a persistência das descontinuidades da Família F3 foi de, aproximadamente, 3,3 metros, caracterizando-a como extensa; o espaçamento registrou um comprimento de 1 (um) metro, sendo classificada como descontinuidade afastada. Os planos que constituem essa família foram classificados como superfícies planas e rugosas.

Observou-se também que as paredes destas descontinuidades possuem espaço entre as paredes de 4,3 centímetros, sendo classificadas como juntas muito largas, conforme a Tabela 3, e ocorre sem material de preenchimento entre as suas paredes. Não foi identificada a presença de água nas descontinuidades, mas um pouco de umidade devido a ocorrências de chuvas nos dias anteriores ao levantamento de campo e, sem possibilidade de percolação de água nessa família, o que a identifica como seca. De modo geral, a rocha encontra-se com descolamento, o que indicou alteração, o que caracterizou a Família F3 como pouco alterada. A Tabela 43 mostra os dados das características geomecânicas dessa família, obtidas nos taludes estudados.

Tabela 43 - Características geomecânicas da Família F3.

<b>Família F3</b>	
Espaçamento	1 m
Persistência	3,3 m
Rugosidade	Plano rugosa
Abertura	4,3 cm
Preenchimento	Nenhum
Percolação	Seco
Alteração	Pouca alterada

Fonte: do próprio autor.

#### 6.1.2.4 Família F4

A Família F4 é constituída por fraturas com planos sub-horizontais a face do talude, Figura 28, tal como a Família F3, no entanto, apresenta atitude espelhada em relação ao plano desta família, além do que os planos se apresentam com elevada frequência e formam as descontinuidades menos evidentes nos taludes T1 e T2. A Família F4 apresenta direção média de N75°E e mergulho médio de 74° SE. A Tabela 44 mostra as atitudes representativas dessa família em consonância com as Tabelas 36 e 37.

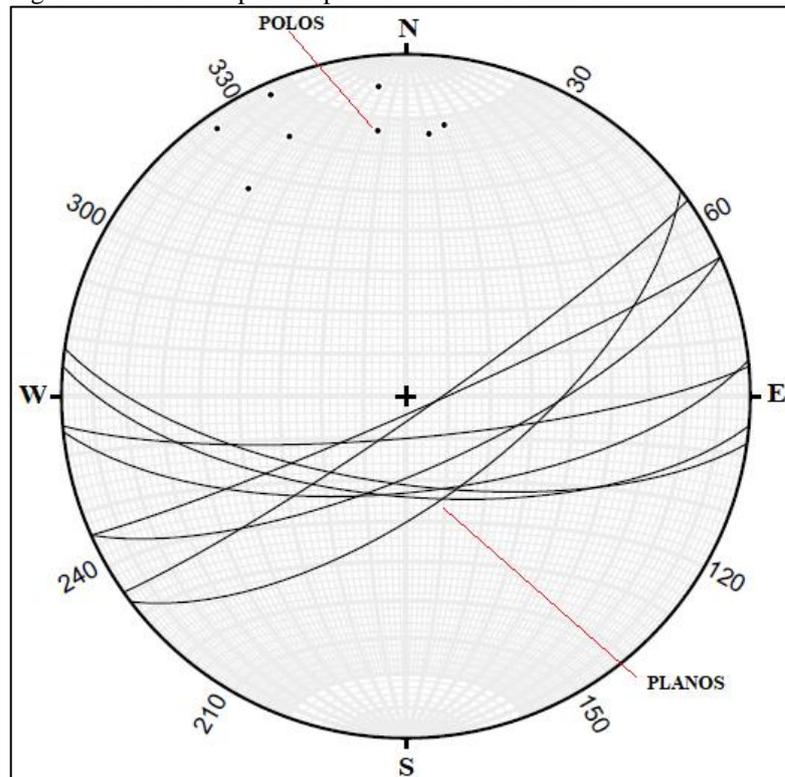
Tabela 44 – Atitudes, na notação clar, das fraturas que compõem a Família F4.

<b>Família F4</b>
175/80
156/86
188/69
185/66
143/65
145/85
174/67
156/72

Fonte: do próprio autor.

A Figura 34 mostra o estereograma representativo da Família F4. Verifica-se uma maior dispersão das atitudes com relação à média no que concerne às famílias anteriormente descritas. Por conseguinte, identificou-se descontinuidades pertencentes a esta família com maior variabilidade de atitudes que podem ser classificadas como subfamílias, conforme foi observado no diagrama da Figura 29. Para simplificar na análise cinemática e na avaliação geomecânica, as subfamílias foram consideradas como pertencentes somente a uma única família principal, a Família F4.

Figura 34 - Planos e polos representativos da Família F4.



Fonte: do próprio autor.

As características geomecânicas da Família F4 são similares as das Famílias F1 e F2, vide Tabela 45, a única exceção se deve ao espaçamento de 6,3 metros, o que classificou as descontinuidades desta família como afastadas.

Tabela 45 – Propriedades geomecânicas da Família F4.

<b>Família F4</b>	
Espaçamento	0.16 m
Persistência	6.3 m
Rugosidade	Plano lisa
Abertura	0 cm
Preenchimento	Nenhum
Percolação	Seco
Alteração	Pouca alterada

Fonte: do próprio autor.

A seguir foi realizado a verificação das condições de estabilidade do maciço rochoso por meio da análise cinemática.

## 6.2 Análise cinemática

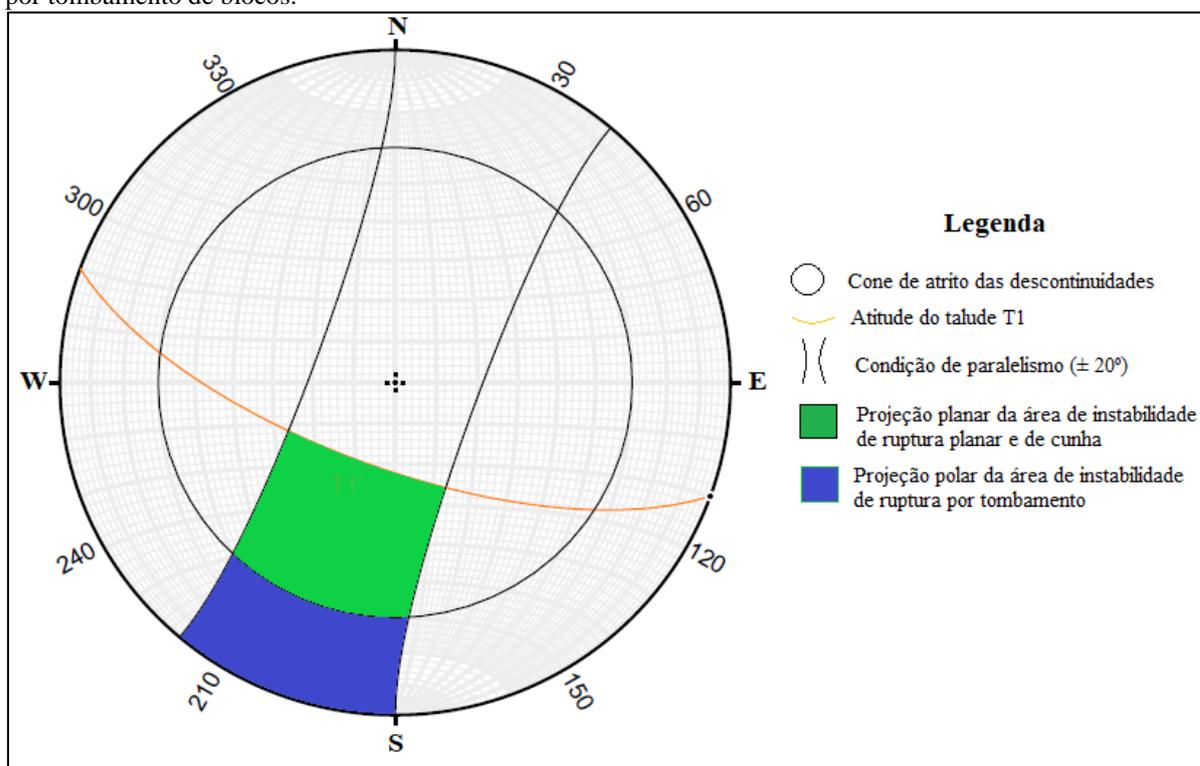
A avaliação dos mecanismos de rupturas dos blocos de rocha por meio da análise cinemática foi realizada para o Talude T1 do maciço rochoso estudado, uma vez que este foi objeto de determinação dos parâmetros geotécnicos para a classificação geomecânica. A

metodologia utilizada para análise cinemática foi tal e qual o método descrito na *seção 3.3*. Para tanto, utilizou-se os planos representativos das famílias de discontinuidades obtidas no estereograma da Figura 30.

O valor do ângulo de atrito das famílias de fraturas ( $\phi$ ) utilizado para esta análise foi obtido por meio do parâmetro de caracterização do grau de alteração das paredes das discontinuidades, conforme as informações listadas na Tabela 7, e quantificado pelo índice de alteração das paredes das juntas,  $J_a$ , apresentado na Tabela 23. À vista disso, as paredes das 4 (quatro) famílias de fraturas foram caracterizadas como sendo praticamente sãs, no qual não há alteração da superfície das discontinuidades e observa-se somente pouca descoloração de suas superfícies. Porquanto, denotando um ângulo de atrito entre  $25^\circ$  a  $35^\circ$ . Assim, considerou-se o valor médio desse intervalo, ângulo de atrito igual a  $30^\circ$ .

Com os valores do ângulo de atrito e da orientação do talude T1 (mostrada no início da seção 6.1) foi criado um *overlay* no *Stereonet*, Figura 35, no qual consiste na representação geométrica de todos os requisitos estabelecidos na seção 3.3 para determinar o tipo de ruptura que pode ocorrer no talude (CARDOZO; ALLMENDINGER, 2012).

Figura 35 – Representação geométrica das condições estruturais para que ocorram rupturas em cunha, planar e por tombamento de blocos.

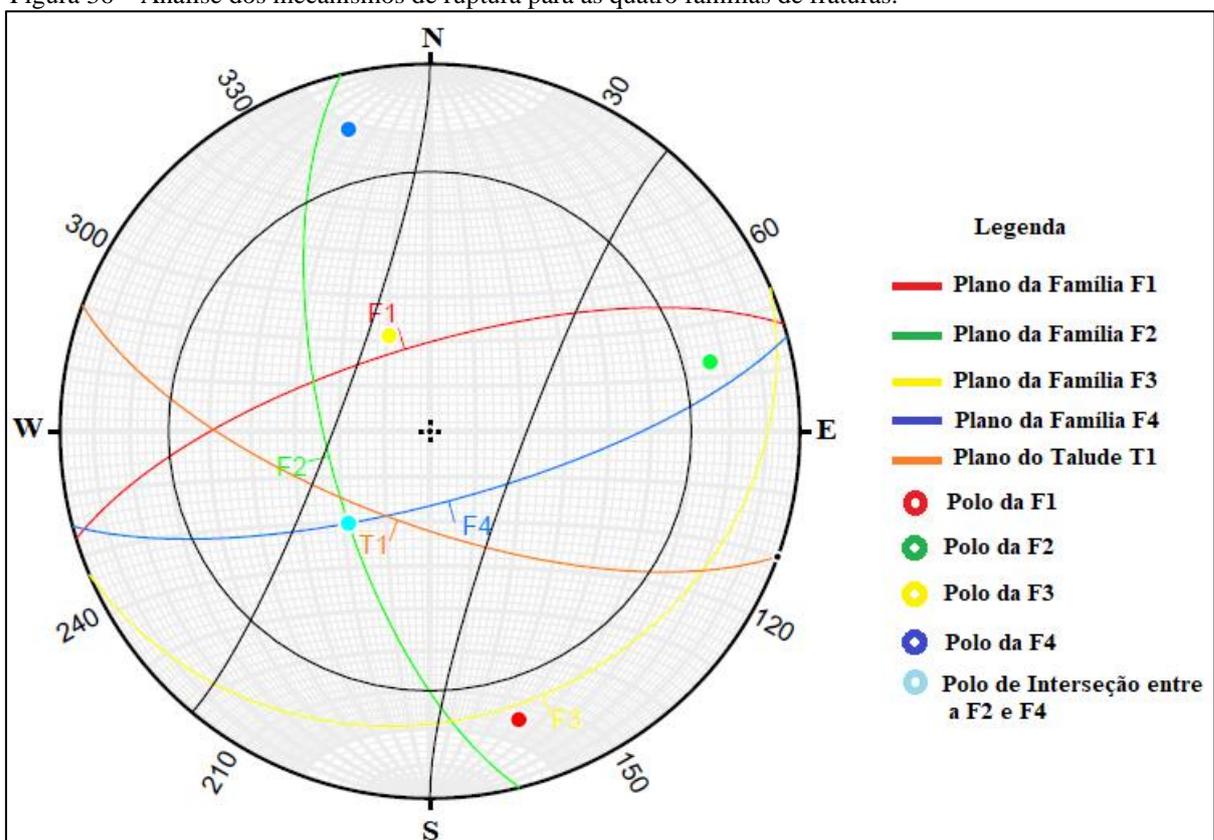


Fonte: do próprio autor.

No estereograma da Figura 36 foram realizadas as análises cinemáticas para os três tipos de rupturas, a saber: planar, tombamento de blocos e em cunha. Para o presente estudo,

não se considerou a ruptura circular, pois se trata de um talude bem estruturado e com pouca descoloração do estado de alteração da rocha e das paredes das discontinuidades. A análise da Figura 36 permitiu identificar que o talude T1 não apresenta nenhuma possibilidade de ruptura planar para as Famílias F1, F2 e F3, porém para a Família F4, a possibilidade é mínima, uma vez que a atitude média da família não satisfaz todas as condições prescritas na *seção 3.3.1*, visto que não há paralelismo entre as direções da Família F4 e o talude T1, e também, o mergulho da família é maior que o do talude, promovendo assim uma condição de não instabilidade.

Figura 36 – Análise dos mecanismos de ruptura para as quatro famílias de fraturas.



Fonte: do próprio autor.

Com relação à ruptura em cunha, é possível concluir que existem condições cinemáticas para que ocorra esse mecanismo de deslizamento, dado que a linha de interseção (polo) em forma de cunha entre os planos F2 e F4 decai dentro da zona de instabilidade para que ocorra esse escorregamento translacional, satisfazendo as seguintes condições:

- a linha de interseção entre F2 e F4 possui direção em torno de  $N50^{\circ}W$ , ocasionado paralelismo com o talude T1 (direção  $N70^{\circ}W$ );

- o mergulho da linha de interseção entre F2 e F4 é de  $63^\circ$ , no qual é inferior ao mergulho do talude estudado ( $68^\circ$ ) e maior que o ângulo de atrito das descontinuidades ( $30^\circ$ );

Em campo foi possível observar as ocorrências de rupturas em cunha, tanto para o talude T1 como para o talude T2, Figura 37.

Figura 37 - Ocorrência de ruptura em cunha no talude T1.



Fonte: do próprio autor.

No que se refere à ruptura por tombamento de blocos, notou-se que as Famílias F1 e F3 apontaram algumas condições para a formação deste tipo de ruptura, visto que estas famílias apresentaram o mergulho contrário e favorável à vertente do talude, respectivamente. No entanto, as descontinuidades de F1 e F3 não denotaram paralelismo em relação à direção dos taludes estudados, o que impossibilita grandes possibilidades de tombamento de blocos. Vale salientar que nos taludes estudados foi possível verificar a formação de blocos de vários tamanhos em decorrência da presença de muitas descontinuidades das quatro famílias de fraturas, Figura 38. Isso representa um significativo problema, pois a depender das condições estruturais do talude e do avanço do intemperismo, estes blocos podem desprender-se.

Figura 38 - Formação de blocos de rocha no talude T1 devido a presença de um elevado número de descontinuidades.



Fonte: do próprio autor.

### 6.3 Classificação geomecânica

Nesta seção estão apresentados os resultados da caracterização geomecânica que foram obtidas por meio do teste do martelo geológico e pelos sistemas RQD, RMR, Q – BARTON e SMR para o Talude T1 na zona da *Scanline*.

#### 6.3.1 Resistência da rocha intacta pelo ensaio do martelo geológico

O cálculo da resistência à compressão uniaxial do maciço rochoso foi realizado através do método do martelo geológico, conforme a metodologia apresentada na *seção 3.5*. O método consiste de um ensaio básico e subjetivo, em que é passível de erros, no entanto apresenta faixas de valores que são congruentes para aplicação. Utilizou-se esse método pela impossibilidade de realizar outros ensaios quantitativos, como o ensaio de resistência à compressão puntiforme e o ensaio de resistência com esclerômetro de Schmidt.

O ensaio foi realizado nos blocos de rocha sã de dimensões aproximadamente retangulares, Figura 39. Foram realizados dois testes com o martelo geológico petrográfico *Estwing*, nos quais determinou-se a quantidade média de golpes necessários para fraturar a amostra de rocha, caracterizando-a conforme a Tabela 35. Para fraturar a amostra submetida ao ensaio, foram necessários uma média de 5 (cinco) golpes com o martelo, o que classificou a rocha como muito resistente, estabelecendo resistência à compressão uniaxial na faixa de valores de 100 – 200 MPa. O teste com o canivete suíço permitiu identificar a predominância de minerais abrasivos, como quartzo e feldspato alcalino.

Figura 39 – Amostra utilizada no teste do martelo geológico.



Fonte: do próprio autor.

### 6.3.2 Cálculo do RQD

Foi utilizado o método proposto por Palmstrom (1982), Equações 5 e 6, para calcular o RQD a partir da contagem do índice volumétrico de juntas ( $J_v$ ) e classificado de acordo com a Tabela 11. À vista disso, os valores dos espaçamentos das Famílias F1, F2, F3 e F4, mostrados nas tabelas 39, 41, 43 e 45 respectivamente, permitiu calcular o RQD de 73,8%, classificando a qualidade do maciço rochoso como regular, como mostrado na Tabela 46.

Tabela 46 - Classificação do talude T1 pelo índice RQD.

<b>Talude T1</b>		
$J_v$	RQD	Classificação
12,48	73,8%	Regular

Fonte: do próprio autor.

### 6.3.3 Classificação RMR

O sistema de classificação de Bieniawski foi realizado para as 4 (quatro) famílias de descontinuidades, em consonância com a *seção 3.4.2*. Como se trata de um somatório de pesos para cada descontinuidade, foi adotada aquela que apresentou o pior cenário como representativo do índice de qualidade do talude estudado. Quanto aos parâmetros das características das juntas do maciço, empregou-se a Tabela 16 para a ponderação dos valores individuais das propriedades das descontinuidades. Os valores ponderados dos parâmetros e o resultado da classificação do RMR básico encontram-se discriminados na Tabela 47. Verificou-se nesta Tabela que os *scores* para o RMR básico apresentaram uma variação discreta, variando de 72 para as Famílias F1 e F2, 73 para a Família F3 e 70 para a Família F4.

Tabela 47 - Classificação RMR do talude T1.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores ponderados</b>			
	<b>Família</b>			
	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>	<b>F4</b>
Resistência à compressão uniaxial	12	12	12	12
RQD	13	13	13	13
Espaçamento	10	10	15	8
Persistência	2	2	2	2
Abertura	6	6	0	6
Rugosidade	3	3	5	3
Preenchimento	6	6	6	6
Alteração	5	5	5	5
Presença de água	15	15	15	15
<b>RMR básico</b>	<b>72</b>	<b>72</b>	<b>73</b>	<b>70</b>
<b>Classe RMR</b>	<b>II</b>	<b>II</b>	<b>II</b>	<b>II</b>

Fonte: do próprio autor.

A obtenção dos parâmetros apresentados na Tabela 47 permitiu realizar a correção da orientação das descontinuidades para obtenção do valor numérico que condiciona o comportamento do maciço rochoso, Tabela 48. Diante dos dados desta Tabela, verificou-se que o talude tem um índice de qualidade de rocha ruim, classe quatro. Nota-se que o principal fator responsável pelo baixo valor do RMR, relaciona-se a presença desfavorável das orientações das descontinuidades da Família F3 em relação ao eixo do talude, constituindo um fator instável para o talude T1. Também é possível estimar, a partir dos resultados, duas propriedades do maciço rochoso, a coesão e ângulo de atrito por meio da Tabela 20. Assim, a estimativa de coesão é de 150 a 200 KPa e do ângulo de atrito é de 35° a 40° para o talude T1.

Tabela 48 - RMR corrigido pela relação entre as orientações das descontinuidades e do talude.

Correção	Família			
	F1	F2	F3	F4
Característica	Muito favorável	Muito favorável	Desfavorável	Regular
Fator de ajuste	0	0	- 50	-25
<b>RMR</b>	<b>72</b>	<b>72</b>	<b>23</b>	<b>45</b>
<b>Classe RMR</b>	<b>II</b>	<b>II</b>	<b>IV</b>	<b>III</b>

Fonte: do próprio autor.

#### 6.3.4 Classificação Q – Barton

Para a classificação Q - Barton, realizou-se a análise das condições dos parâmetros descritos na seção 3.4.3. A Tabela 49 mostra as condições e os valores encontrados de cada parâmetro e, também, o valor final da classificação, que foi determinado pela Equação 8. Por meio da Tabela 27, o índice Q-Barton permitiu caracterizar o maciço rochoso dos taludes estudados como de muito má qualidade, de acordo com o que foi proposto por Barton *et al.* (1974 *apud* BIENIAWSKI, 1989). Fazendo um comparativo entre os sistemas RMR e Q-Barton, percebeu-se que os resultados são razoavelmente consistentes, ou seja, a classificação foi mantida independentemente do método utilizado. Nos sistemas aplicados, o resultado obtido para o talude T1 foi o mesmo, sendo classificado com qualidade ruim. Dessa forma, ainda que os dois sistemas possuam abordagens diferentes dos parâmetros das descontinuidades - no método do RMR as descontinuidades são averiguadas separadamente, enquanto no Q – Barton, elas são analisadas conjuntamente - pode-se afirmar que os dois critérios foram coerentes na classificação do maciço estudado.

Tabela 49 – Determinação da classificação Q - Barton.

Parâmetro	Descrição em campo	Valor relacionado
RQD	73,8%	73,8
$J_n$	Quatro famílias de fraturas	15
$J_r$	Fraturas lisas e/ou planas	1
$J_a$	Paredes sem alteração, apenas leve descoloração	1
$J_w$	Descontinuidades sem presença de água	1
SRF	Zonas bastante esmagadas e sem presença de argila	7,5
	<b>Valor Q – Barton</b>	<b>0,65</b>
	<b>Classe</b>	<b>VII</b>

Fonte: do próprio autor.

### 6.3.5 Classificação SMR

Com os resultados obtidos pela análise cinemática, Figura 36, e pelo índice RMR básico, Tabela 47, prosseguiu-se com a determinação do valor do índice SMR, referente a zona da *Scanline* do talude T1, por meio da Equação 9 e, subsequentemente, com a especificação das possíveis técnicas de proteção e estabilização que poderão ser utilizadas no talude estudado. Assim, para efeito do cálculo do SMR, considerou-se: a Equação 10 na determinação contínua do fator de ajuste  $F_1$ , a Equação 11 na determinação contínua do fator de ajuste  $F_2$  e a Tabela 30 na elaboração do fator de ajuste  $F_3$ . Já para a terminologia do parâmetro  $F_4$ , adotou-se a detonação normal como o método de escavação utilizada na execução da abertura do maciço rochoso, no qual foi ponderado pela Tabela 31.

De acordo com análise cinemática, o talude T1 possui probabilidade de ruptura em cunha formada pela interseção entre os planos das Famílias F2 e F4, conforme observadas nas Figuras 37 e 38. Neste caso, em conformidade a *seção 3.4.4*, determinou-se o índice SMR tanto pelo método utilizado por Freitas (2011) quanto método recorrido por Heckel (2020), sendo que se considerou o valor do SMR como sendo representativo do maciço rochoso aquele mais crítico entre os métodos empregados.

Em relação ao primeiro método, ressaltando que foi considerado que os dois conjuntos de fraturas se comportaram como rupturas planares, as análises de SMR foram feitas separadamente para cada uma das duas famílias. Deste modo, tomou-se como índice representativo do talude aquele que apresentou a pior condição de instabilidade. A Tabela 50 mostra os valores dos coeficientes contínuos para Famílias F2 e F4 e seus respectivos valores de SMR. O valor de SMR obtido com coeficientes contínuos foi de 64,5 para a Família F2 e 69,1 para a Família F4, caracterizando, para ambos os casos, o talude à classe IV, sendo designado como um talude estável, correspondendo ao tipo de fraturas de alguns blocos, conforme proposto por Romana, Tomás e Serón (2015), vide Tabela 32. Esses resultados são equivalentes com o resultado apresentado pela análise cinemática, haja vista a *seção 6.2*, para a qual as referidas famílias apresentaram pouca probabilidade de ocorrência de ruptura planar.

Tabela 50 - Cálculo do índice SMR para as Famílias F1 e F2.

Parâmetros	Valores	
	F2	F4
Família		
Tipo de Ruptura	Planar	Planar
RMR básico	72	70
F <sub>1</sub>	0,15	0,15
F <sub>2</sub>	1	1
F <sub>3</sub>	-50	-6
F <sub>4</sub>	0	0
<b>SMR</b>	<b>64,5</b>	<b>69,1</b>
<b>Descrição</b>	<b>Bom</b>	<b>Bom</b>

Fonte: do próprio autor.

A Tabela 51 apresenta os resultados do segundo método de análise do SMR, ou seja, considerando a orientação média - direção de mergulho e caimento (mergulho) - da linha de interseção entre as Famílias F2 e F4 (polo), obtida pela Figura 36. Os valores dos parâmetros utilizados foram: direção do mergulho 310°, caimento de 63° e o RMR básico de 70. Dessa forma, o valor de SMR obtido foi de 48,5, o qual pertence a classe III, caracterizando a estabilidade do talude como parcialmente estável, ocorrendo algumas rupturas planares e muitas em cunha (Tabela 32), que foram identificadas nas Figuras 37 e 38, conforme proposto por Romana, Tomás e Serón (2015).

Tabela 51 - Cálculo do índice RMR para a linha de intersecção entre os planos F2 e F4.

<b>Linha de intersecção entre as Famílias F2 e F4</b>	
<b>Parâmetros</b>	<b>Coefficientes</b>
Tipo de Ruptura	Planar
RMR básico	70
F <sub>1</sub>	0,43
F <sub>2</sub>	1
F <sub>3</sub>	-50
F <sub>4</sub>	0
<b>SMR</b>	<b>48,5</b>
<b>Descrição</b>	<b>Normal</b>

Fonte: do próprio autor.

Portanto, o índice final representativo dos taludes T1 e T2 correspondeu ao valor do SMR de 48,5. De acordo com essa classificação foi possível indicar a condição de estabilidade do talude, via Tabela 32, e propor as medidas mitigadoras a ser executadas para assegurar a estabilidade do talude, conforme a Tabela 33. Lista-se abaixo uma síntese dos resultados obtidos com a análise da estabilidade dos taludes, propostos por Romana, Tomás e Serón (2015):

- **Descrição:** normal;
- **Estabilidade:** parcialmente estável;
- **Probabilidade de ruptura:** 40% de chance de ocorrer várias rupturas em cunha ou alguns deslizamentos;
- **Possíveis rupturas:** pode ocorrer pequenas rupturas planares ou muitas rupturas em cunha;
- **Medida estabilizadora:** necessidade de medidas de proteção e/ou reforço;
- **Técnicas de contenção:** como o talude encontra-se parcialmente instável, com elevado potencial de rupturas em cunha, bem como a formação de vários blocos soltos, nos quais se observam no local de estudo, Figura 38, recomenda-se: redes metálicas cobrindo a crista do talude, coibindo o deslizamento desses blocos que estão se soltando; reforço com inclusões (pregagens e ancoragens) ou reforço com concreto projetado, afim de impedir o desprendimento de cunhas; e o uso de um muro de suporte ao longo do pé do talude de modo a evitar que os blocos de rochas atinjam a linha férrea.

## 7 CONCLUSÃO

A caracterização geológica dos taludes T1 e T2 permitiu identificar a variedade litológica como sendo um Ortognaisse parcialmente alterado, com resistência a compressão uniaxial estimada pelo método do martelo geológico entre 100-200 MPa. Além disso, identificou-se quatro famílias de descontinuidades que foram caracterizadas por meio das propriedades geotécnicas.

A análise cinemática das famílias de descontinuidades identificou a possibilidade geométrica de formação de cunhas entre as Famílias F2 e F4 que foram comprovadas pela observação *in situ* dos taludes estudados. Verificou-se também que não há possibilidade de ruptura por tombamento. Para o mecanismo de ruptura planar, há uma pequena probabilidade de ocorrência para a Família F4.

Os sistemas de classificação geomecânicas possibilitaram quantificar e qualificar a estabilidade dos taludes estudados. O RMR de Bieniawski e o Q - Barton apresentaram resultados equivalentes, caracterizando o maciço rochoso dos taludes como rocha ruim e de muito má qualidade, respectivamente. Por outro lado, a classificação SMR de Romana caracterizou o maciço como classe regular (normal), com pequena probabilidade de rupturas planares e contínuas rupturas em cunha, sendo necessário propor técnicas de contenção, como redes metálicas e concreto projetados. À vista disso, o índice SMR mostrou-se o mais adequado para este estudo, visto que se trata de um sistema idealizado exclusivamente para avaliação de estabilidade de taludes rochosos.

## REFERÊNCIAS

- ÁVILA, C. R. **Determinação das propriedades mecânicas de maciços rochosos e/ou descontinuidades utilizando classificações geomecânicas uma comparação entre os diversos métodos de classificação.** 2012. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.
- AZEVEDO, I. C. D.; MARQUÊS, E. A. G. **Introdução à Mecânica de Rochas.** Viçosa/MG: Editora UFV, 2006. 11-15 p.
- AZEVEDO, I. C. D.; MARQUÊS, E. A. G. **Introdução à Mecânica de Rochas.** Viçosa/MG Editora UFV, 2020.
- BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. **Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support.** Rock Mechanics 6, 1974. 189 – 236 p.
- BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering Rock Mass Classification: a complete manual for Engineers and Geologists in mining, civil, and petroleum engineering.** New York: a wiley-interscience, 1989. 251 p.
- CARDOZO, N.; ALLMENDINGER, R.W. **Spherical projections with OSXStereonet:** Computers & Geosciences. 2013. v. 51, p. 193 – 205, doi:10.1016/j.cageo.2012.07.021.
- COSTA, F. G. **Geologia e recursos minerais da folha Crateús.** SB.24-V-C-III: estados do Ceará e Piauí. Escala 1:100.000. Fortaleza: CPRM, 2007. 117 p.
- COSTA, A. C. R. **Avaliação da estabilidade de taludes em rochas de resistência elevada – um contributo.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica - Geotecnia) - Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade de Nova Lisboa, Lisboa, 2015.
- CRATÉUS, Município de Crateús, CE. **Estações Ferroviários do Brasil.** Disponível em: <[http://www.estacoesferroviarias.com.br/ce\\_sobral/crateus.htm](http://www.estacoesferroviarias.com.br/ce_sobral/crateus.htm)>. Acesso em: 19 de out. de 2020.
- D’ALEXANDRO, J. R. P. **Análise de estabilidade do maciço rochoso da Mineração Casa de Pedra, Congonhas-Minas Gerais.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil – Concentração em geotecnia) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- DEERE, D. U. **Rock Quality Designation (RQD) After Twenty Years.** Gainesville, Florida: National Technical Information Service, 1989. 67 p.
- DEERE, D. U.; DEERRE, D. W. **The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice.** Rock classification. Systems for Engineering Purposes, ASTM STP 984. Philadelphia: Louis KirkaIdie, Ed. American Society for Testing and Materials, 1988. 91 – 101 p.
- FIORI, A. P. **Estabilidade de taludes: exercícios práticos.** São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 173 p.

FIORI, A. P. **Fundamentos de mecânicas dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes.** São Paulo: Oficina de Textos, 2015, 476 p.

FONTINHAS, A. M. P. **Aplicação do SMR na avaliação da estabilidade de taludes de escavação em grauaques da formação de Mértola.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica - Geotecnia) - Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade de Nova Lisboa, Lisboa, 2012.

FREITAS, S. B. N. **Caracterização Geomecânica e Classificações RMR (Bieniawsky) e SMR (Romana) de Maciços Rochosos em Taludes do Funchal.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira, Funchal, 2011.

GOMES, G. J. C. **A avaliação do perigo relacionado à queda de blocos em rodovias.** 2009. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Nucleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade de Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

GONCALVES, C. F. F. **Caracterização e classificação geomecânica de taludes rochosos. Aplicação a caso de estudo.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira, Funchal, 2016.

GOOGLE. **Google Earth.** Versão 7.3. Disponível em: <<https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>>. Acesso em: 22 de mar. de 2021.

HICKEL, V. F. **COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO SMR E SSPC EM UM TALUDE DE SILTITO BRANDO DA BACIA DO ITAJAÍ EM GASPAR – SC.** 2020. Monografia (Graduação em Geologia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. **Rock and Soil Description for Engineering Geological Mapping.** Bull. Int. Assoc. Eng. Geol., 1981.

MAION, A. V. **Proposta de correlação entre os índices SMR e Q-slope.** 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências – Concentração em geotecnia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

PALMSTROM, A. **The volumetric joint count - a useful and simple measure of the degree of rock mass jointing.** New Delhi: Proc. IV Int. Congr. IAEG, 1982. 8 p.

PALMSTROM, A. **Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD).** Norconsult as, Norway Published in Tunnels and Underground Space Technology 20, 2005.

PIRES, D. F. C. **Taludes rochosos reforçados - comparação de modelos numéricos com soluções analíticas explícitas.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil – especialização em geotecnia) – Faculdade de Engenharia, universidade do Porto, Porto, 2009.

ROMANA, M.; SERÓN, J.B.; MONTAIAR, E. **SMR Geomechanics classification: Application, experience and validation.** ISRM. Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003.

ROMANA, M.; TOMÁS, R.; SERÓN, J. B. **Slope Mass Rating (SMR) geomechanics classification: thirty years review.** Quebec, Canada: ISRM Congress Proceedings - International Symposium on Rock Mechanics, 2015. 10 p.

SANTOS, T. B. **Aplicabilidade das classificações geomecânicas e retroanálises para estimação de propriedades dos maciços rochosos.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

SOUSA, S. R. C.; TEIXEIRA, P. G. F.; SOUSA, F. J. B. **Contribuição para a caracterização geológica e classificação geomecânica dos maciços rochosos na cidade de Crateús – CE.** Revista Estudos Geológicos, v. 29, n. 2, 2019. 95-107 p.

ZENÓBIO, Â. A. **Avaliação geológica-geotécnica de encontros naturais rochosos: área urbana de Ouro Preto (MG) escala 1:5000.** 2000. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

**ANEXO I - PERFIL INVESTIGADO DO TALUDE T1**





ANEXO II – PERFIL INVESTIGADO DO TALUDE T2



