



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS CRATEÚS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

JOÃO PEDRO GONÇALVES SOARES

**CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE UM MACIÇO ROCHOSO EM CORTE DE
ESTRADA NO MUNICÍPIO DE BOA VIAGEM-CE.**

CRATEÚS

2022

JOÃO PEDRO GONÇALVES SOARES

CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE UM MACIÇO ROCHOSO EM CORTE DE
ESTRADA NO MUNICÍPIO DE BOA VIAGEM-CE.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Minas
do Campus Crateús da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Emanuel Itaquê
de Negreiros Moreira

Coorientador: Prof. Me. Agnaldo Fran-
cisco de Freitas Filho

CRATEÚS

2022

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

S654c Soares, João Pedro Gonçalves.
Caracterização geomecânica de um maciço rochoso em corte de estrada no Município de Boa Viagem-Ce. /
João Pedro Gonçalves Soares. – 2023.
99 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús,
Curso de Engenharia de Minas, Crateús, 2023.

Orientação: Prof. Me. . Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira.
Coorientação: Prof. Me. Agnaldo Francisco de Freitas Filho.

1. Taludes. 2. Descontinuidades. 3. Classificação geomecânica. I. Título.

CDD 622

JOÃO PEDRO GONÇALVES SOARES

CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE UM MACIÇO ROCHOSO EM CORTE DE
ESTRADA NO MUNICÍPIO DE BOA VIAGEM-CE.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Minas
do Campus Crateús da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia de Minas.

Aprovada em: 20 de Dezembro de 2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Emanuel Itaquê de Negreiros
Moreira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Agnaldo Francisco de Freitas
Filho (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Márcio Avelino de Medeiros
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Carlos Eduardo da Silva Araújo
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

À minha Mãe, por seu cuidado e dedicação que possibilitou minha chegada até aqui. E a todos os meus familiares e amigos que sempre me apoiaram e incentivaram a minha jornada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como universitário, mas que em todos os momentos, me forneceu saúde e sabedoria para enfrentar as dificuldades perante essa grande jornada conhecida como vida.

A minha mãe Osmarina Gonçalves Melo que sempre me incentivou nos estudos, e me aconselhou nas escolhas da vida, sempre visando o meu bem. Ao meu irmão Luiz Felipe Gonçalves Damasceno e familiares, que nos momentos de tristeza me alegraram e incentivaram a continuar nesta jornada, que na minha ausência dedicados ao estudo superior, sempre me apoiaram e incentivaram minha permanência na graduação e torceram pelo meu futuro. A minha madrinha Selma Bezerra, que em vários momentos de dificuldade me ajudou e rezou por minha saúde e desempenho acadêmico.

Ao Prof. Me. Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira por me orientar durante meu trabalho de conclusão de curso do bacharelado junto com o Prof. Agnaldo Francisco de Freitas, agradeço a ambos pelo suporte no pouco tempo que lhes coube, pelas suas correções e incentivos que foram bem aceitas e foram de extrema importância para chegar até aqui. Agradeço a todos os professores da área profissional e a coordenação do curso de Engenharia de Minas do Campus Crateús por me proporcionar o conhecimento para minha formação profissional, que me apoiaram, incentivaram e ajudaram nesta caminhada que está apenas começando.

Aos meus amigos e companheiros de graduação Alane Tomaz, Nathalia Veloso, Thalia Lopes, Harianne Ribeiro, Isadora Guerreiro, Luiz Felipe Alves, Vanessa Soares, Helena Maria Machado, Miranda e Maria das graças que em momentos de dificuldade, sempre me apoiaram e ajudaram na jornada para ser um Engenheiro de Minas. As minhas melhores amigas Elvira Carvalho, Iana Pereira e Luiza Lima que desde a infância compartilham comigo alegrias e risadas, que em momentos difíceis da vida e faculdade me deram conselhos e ofereçam um ombro amigo. Obrigado por tudo.

A Secretária de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Município de Independência pela oportunidade de estágio, a Engenharia Ambiental e Supervisora de estágio Helina Rodrigues, que é uma inspiração profissional, que aconselhou e aprimorou meu potencial durante o período que convivemos.

E por fim ao Doutorando em Engenharia Elétrica, Ednardo Moreira Rodrigues, e seu assistente, Alan Batista de Oliveira, aluno de graduação em Engenharia Elétrica, pela adequação

do *template* utilizado neste trabalho para que o mesmo ficasse de acordo com as normas da biblioteca da Universidade Federal do Ceará (UFC).

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor,
mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou
o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o
que era antes”

(Marthin Luther King)

RESUMO

Taludes de corte de estrada são obras comuns nas diversas estradas e rodovias do Brasil. Estes cortes, em muitas ocasiões, são executados em estruturas rochosas e sua realização efetua-se por meio de desmonte mecânico de rochas ou com auxílio de explosivos e, com o passar do tempo, esses maciços rochosos remanescentes tendem a sofrer alterações em sua estabilidade devido ao aparecimento ou alteração das descontinuidades. Desta forma a análise da estabilidade destes taludes se mostra de suma importância para a segurança daqueles que trafegam próximo aos mesmos, pois, dependendo de suas condições geomecânicas, podem ocorrer rupturas em cunha, planar, por tombamento ou circular. Para esta análise, se faz necessária a investigação em campo destas estruturas presentes no maciço rochoso, com auxílio de equipamentos como martelo geológico e bússola e, com a coleta destes dados e fundamentação na literatura, pode-se então classificar geomecanicamente o maciço rochoso. Este trabalho objetiva classificar geomecanicamente um maciço rochoso de talude em corte de estrada localizado no município de Boa Viagem, Estado do Ceará, visando a determinação de sua estabilidade, e recomendação de suportes em casos de resultado desfavorável. Para tal, baseando-se nas características de suas descontinuidades, como rugosidade, espaçamento das fraturas, presença de água, resistência à compressão das paredes e orientação, dados estes obtidos em campo através de bússolas, martelos geológicos, trenas e GPS, foi possível sua classificação segundo as metodologias de Q-Barton, RMR e SMR. Pelo RMR as áreas 1 e 2 obteve o valor de 71, sendo classificada como boas, a área 4 com valor de 80 também classificada como boa, já a área 3 com valor de 85 considerada como muito boa, seguindo o Q-Barton as descrições obtidas pelo método para a área 1 foi de 22,5 descrevendo o maciço como de boa qualidade, a área 2 com valor de 1 sendo um maciço de má qualidade, a área 3 com valor de 2 sendo descrita também como maciço de má qualidade e a área 4 com valor de 8 sendo assim descrita como maciço de qualidade regular. Para o SMR segundo a caracterização obteve-se para as áreas 1 e 2 o valor de 54 sendo então classificadas como parcialmente estáveis, dessa forma as medidas de estabilização sugeridas são proteção e reforços, para a área 3 com valor de 68 considerado estável não se faz necessária a utilização de medidas estabilizadoras, na área 4 com valor de 63 sendo considerado estável a recomendação indicada é a utilização de proteções e para a área 5 considerada instável faz-se necessário um retaludamento, devido à instabilidade do talude. Portanto, as medidas recomendadas têm como objetivo impedir que a queda de blocos não interfira no tráfego da rodovia, espera-se que com a

implementação desses tratamentos evitem possíveis incidentes e acidentes ligados a rupturas nestes taludes.

Palavras-chave: Taludes. Descontinuidades. Classificação geomecânica.

ABSTRACT

Road cut slopes are common works on the various roads and highways in Brazil. These cuts, on many occasions, are performed on rocky structures and are carried out through mechanical rock dismantling or with the aid of explosives and, over time, these remaining rock masses tend to undergo changes in their stability due to the appearance or alteration of discontinuities. In this way, the analysis of the stability of these slopes is of paramount importance for the safety of those who travel close to them, because, depending on their geomechanical conditions, wedge, planar, overturning or circular failures may occur. For this analysis, field investigation of these structures present in the rock mass is necessary, with the aid of equipment such as a geological hammer and compass and, with the collection of these data and foundation in the literature, the rock mass can then be classified geomechanically. This work aims to geomechanically classify a rocky mass of slope in a road cut located in the municipality of Boa Viagem, State of Ceará, aiming at determining its stability, and recommending supports in cases of unfavorable results. To this end, based on the characteristics of its discontinuities, such as roughness, spacing of fractures, presence of water, resistance to compression of the walls and orientation, data obtained in the field using compasses, geological hammers, measuring tapes and GPS, it was possible to classification according to Q-Barton, RMR and SMR methodologies. By RMR, areas 1 and 2 obtained a value of 71, being classified as good, area 4 with a value of 80 also classified as good, and area 3 with a value of 85 considered very good, following the Q-Barton description obtained by the method for area 1 was 22.5 describing the massif as of good quality, area 2 with a value of 1 being a massif of poor quality, area 3 with a value of 2 also being described as massif of poor quality and area 4 with a value of 8, thus being described as a massif of regular quality. For the SMR according to the characterization, a value of 54 was obtained for areas 1 and 2, being then classified as partially stable, thus the suggested stabilization measures are protection and reinforcements, for area 3 with a value of 68 considered stable, it is not it is necessary to use stabilizing measures, in area 4 with a value of 63 being considered stable, the recommendation is the use of protections and for area 5 considered unstable, re-sloping is necessary, due to the instability of the slope. Therefore, the recommended measures aim to prevent the fall of blocks from interfering with road traffic, it is expected that with the implementation of these treatments, possible incidents and accidents related to ruptures in these slopes will be avoided.

Keywords: Slopes. Discontinuities. Classification geomechanical.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização do Município de Boa Viagem-Ceará (CE).	25
Figura 2 – Mapa de localização do local de estudo.	25
Figura 3 – Ilustração de um maciço rochoso, indicando as características geomecânicas observadas nas descontinuidades.	29
Figura 4 – Representação dos planos das descontinuidades e suas orientações.	30
Figura 5 – Efeito da rugosidade e do esforço normal sob o ângulo de atrito da superfície de descontinuidade.	33
Figura 6 – Propriedades geométricas de descontinuidades(espaçamento e frequência). .	34
Figura 7 – Definição de resistência ao cisalhamento de uma superfície de descontinuidade com preenchimento:(a) ensaio de cisalhamento direto da descontinuidade, (b) diagrama de deslocamento de corte em função da tensão de cisalhamento, (c) diagrama de Mohr para a resistência de pico, (d) diagrama de Mohr para a resistência de pico e resistência residual.	36
Figura 8 – Ruptura por cunha na direção da interseção de duas descontinuidades. . . .	39
Figura 9 – Ruptura plana através de uma descontinuidade persistente, cujo mergulho é menor e em direção ao talude.	39
Figura 10 – Ruptura por tombamento, num maciço com descontinuidades de mergulho forte, em direção contrária à face do talude.	40
Figura 11 – Ruptura circular em rocha fraca, muito fraturada com descontinuidades aleatórias.	41
Figura 12 – Procedimento de determinação do RQD	48
Figura 13 – Correlação RQD e J_v	50
Figura 14 – Ilustração dos parâmetros utilizados para obtenção dos parâmetros F1, F2 e F3. .	52
Figura 15 – Descrição das classes de SMR.	53
Figura 16 – Martelo de Schmidt do tipo N.	55
Figura 17 – Representação esquemática de uma scanline.	57
Figura 18 – Mapa do Domínio Geológico do Ceará Central.	59
Figura 19 – Etapas metodológicas para composição da pesquisa.	67
Figura 20 – Vista do maciço analisado.	70
Figura 21 – Intrusões ígneas presentes, um dique de quartzo e feldspato de coloração alaranjada a roseada.	71

Figura 22 – Identificação de xisto de tonalidade escura e em algumas áreas a presença de anfíbolitos.	72
Figura 23 – Presença de algumas dobras menores em veios de quartzo.	73
Figura 24 – Área 1 no TL1.	76
Figura 25 – Área 2 no TL1.	77
Figura 26 – Área 3 no TL1.	78
Figura 27 – Área 4 no TL2.	79
Figura 28 – Área 5 no TL2.	80
Figura 29 – TL1 - Áreas 1 e 2.	91
Figura 30 – TL1 - Área 3.	91
Figura 31 – TL2 - Área 4.	92
Figura 32 – TL2 - Área 5.	92
Figura 33 – Amostra do TL1.	94
Figura 34 – Amostra do TL2	94
Figura 35 – Modelo de ficha de campo para coleta de dados in situ.	97
Figura 36 – Correlação para o número de rebotes do martelo de Schmidt.	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do espaçamento.	31
Tabela 2 – Caracterização da persistência ou extensão das descontinuidades.	32
Tabela 3 – Caracterização da abertura das descontinuidades.	35
Tabela 4 – Classificação do maciço rochoso conforme o número de famílias.	38
Tabela 5 – Classificação do maciço rochoso pelo valor do RMR.	43
Tabela 6 – Designação da qualidade da rocha (Fator 1).	44
Tabela 7 – J_n – índice das famílias de juntas (Fator 2).	45
Tabela 8 – J_w – Índice das condições hidrogeológicas (Fator 4).	45
Tabela 9 – Categorização do maciço rochoso de acordo com o valor de Q	47
Tabela 10 – Índice de qualidade do maciço.	48
Tabela 11 – Índice de recuperação do maciço.	49
Tabela 12 – Índice de fraturamento do maciço.	49
Tabela 13 – correlação do J_v com a equação do RQD.	49
Tabela 14 – Determinação de parâmetros SMR	52
Tabela 15 – Fatores de ajuste para métodos de escavação.	52
Tabela 16 – Passo a passo para a obtenção da densidade.	57
Tabela 17 – Inclinação do talude.	74
Tabela 18 – Medições com o martelo de Schmidt e média.	75
Tabela 19 – Valores da resistência a compressão uniaxial obtidos pela correlação.	75
Tabela 20 – Espaçamento entre descontinuidades da mesma família por área	81
Tabela 21 – Resultados do RQD	82
Tabela 22 – Resultados do RMR - Básico para as 4 áreas analisadas.	83
Tabela 23 – Valores dos parâmetros analisados e o resultado do Índice Q	84
Tabela 24 – Valores de SMR para as áreas analisadas no TL1.	85
Tabela 25 – Valor do SMR para o TL2.	86
Tabela 26 – Orientação das famílias de descontinuidade.	93
Tabela 27 – Ensaio 1 - TL1.	95
Tabela 28 – Ensaio 2 - TL1.	95
Tabela 29 – Ensaio 3 - TL1.	95
Tabela 30 – Ensaio 1 - TL2.	95
Tabela 31 – Ensaio 2 - TL2.	96

Tabela 32 – Ensaio 3 - TL2.	96
-------------------------------------	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Quadro da caracterização da presença de água nas descontinuidades.	37
Quadro 2 – Quadro da Classificação geomecânica de Bieniawski.	42
Quadro 3 – Quadro da classificação das descontinuidades.	43
Quadro 4 – Jr – índice de rugosidade das juntas (Fator 3).	45
Quadro 5 – Ja – índice de alteração das descontinuidades (Fator 5).	46
Quadro 6 – SRF - Fator de redução de stress (Fator 6).	47
Quadro 7 – Tipos de medidas de estabilização com base no índice SMR.	53
Quadro 8 – Classificação do estado de resistência da amostra de rocha.	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CE	Ceará
RMR	Rock Mass Rating
RQD	Rock Quality Designation
SMR	Slope Mass Rating
TL1	Talude 1
TL2	Talude 2

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Direção do mergulho
α_j	Direção das descontinuidades
α_s	Direção do talude
α_c	Correlação do martelo de Schmidt
β	(<i>dip</i>) mergulho
β_j	Mergulho das descontinuidades
β_s	Mergulho do Talude
δ	Deslocamento por cisalhamento
ϕ_b	Ângulo de ruptura
σ	Tensão normal
σ'	Tensão normal efetiva
ρ	Densidade
γ	Peso específico
τ	Tensão de corte/ ruptura
D	distância entre a origem da linha de amostragem e o traço da descontinuidade
E	Índice de esclerômetro
N_L	Número de ricochetes do martelo do tipo L
h	Altura do ressalto
H	Altura da Queda
Ed	Espaçamento médio das descontinuidades
f	Número de descontinuidades por metragem
F	Frequência
Fd	Frequência das descontinuidades
Hr_L	Número de rebotes de martelo do tipo L
Hr_N	Número de rebotes de martelo do tipo N
Ja	Índice de alteração das descontinuidades

<i>Jn</i>	Índice de famílias de juntas
<i>Jr</i>	Índice de rugosidade das descontinuidades
<i>Jv</i>	Índice volumétrico das juntas
<i>Jw</i>	Índice de condições hidrogeológicas
<i>JCS</i>	Resistência a compressão da rocha
<i>JRC</i>	Coefficiente de rugosidade
<i>l</i>	Comprimento da Linha de Varredura
<i>L</i>	semi-comprimento do traço da descontinuidade
<i>P</i>	Ruptura planar
<i>Rn</i>	Valor do número de rebotes do martelo
<i>RMRb</i>	RMR básico
<i>S</i>	comprimento total da linha de varredura
<i>Si</i>	Espaçamento das descontinuidades em metros
<i>T</i>	Ruptura por tombamento
<i>X1</i>	distância entre as descontinuidades medida na linha de amostragem
<i>X10</i>	distância perpendicular entre o traço de duas descontinuidades pertencentes à mesma família

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	Objetivo Geral	23
1.2	Objetivos Específicos	23
2	JUSTIFICATIVA	24
3	LOCALIZAÇÃO	25
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
4.1	Mecânica das rochas: Caracterização geomecânica	26
4.1.1	<i>Maçãos rochosos</i>	26
4.2	Características da rocha intacta	27
4.3	Características de maciços rochosos	27
4.3.1	<i>Descontinuidades</i>	27
4.4	Características das descontinuidades	28
4.4.1	<i>Orientação</i>	29
4.4.2	<i>Espaçamento ou frequência das descontinuidades</i>	30
4.4.3	<i>Persistência das descontinuidades</i>	31
4.4.4	<i>Rugosidade da descontinuidade</i>	32
4.4.5	<i>Abertura e preenchimento das fraturas</i>	34
4.4.6	<i>Resistência das paredes ao cisalhamento</i>	35
4.4.7	<i>Percolação de água</i>	36
4.4.8	<i>Número de famílias</i>	37
4.5	Tipos de Ruptura	38
4.5.1	<i>Ruptura em cunha</i>	38
4.5.2	<i>Ruptura planar</i>	39
4.5.3	<i>Ruptura por tombamento</i>	40
4.5.4	<i>Ruptura circular</i>	40
4.6	Sistema de classificação de maciços rochosos	41
4.6.1	<i>Classificação de Bieniawski (Sistema RMR - Básico)</i>	41
4.6.2	<i>Classificação Q de Barton (índice Q)</i>	43
4.6.3	<i>Classificação RQD</i>	48
4.6.4	<i>Classificação Jv</i>	49

4.6.5	<i>Classificação SMR</i>	50
4.7	Teste do martelo geológico	54
4.8	Martelo de Schmidt	55
4.9	Picnometria	56
4.10	Scanline	57
4.11	Geologia da área de estudo	58
4.11.1	<i>Complexo Cruzeta</i>	58
4.11.2	<i>Hidrogeologia</i>	62
4.12	Estado da arte	63
4.12.1	2015	63
4.12.2	2016	63
4.12.3	2018	64
4.12.4	2022	65
5	MATERIAIS E MÉTODOS	67
5.1	Materiais	67
5.2	Métodos	68
5.2.1	<i>Revisão literária dos métodos de avaliação de maciços rochosos</i>	68
5.2.2	<i>Coleta de dados</i>	68
5.2.3	<i>Análise dos dados coletados</i>	69
6	RESULTADOS	70
6.1	Caracterização geológica-geotécnica	70
6.1.1	<i>Caracterização geológica</i>	71
6.1.2	<i>Caracterização geotécnica</i>	73
6.1.2.1	<i>Área 1</i>	76
6.1.2.2	<i>Área 2</i>	76
6.1.2.3	<i>Área 3</i>	78
6.1.2.4	<i>Área 4</i>	79
6.1.2.5	<i>Área 5</i>	79
6.2	Classificação geomecânica	81
6.2.1	<i>Classificação RQD</i>	81
6.2.2	<i>Classificação RMR - Básico</i>	82
6.2.3	<i>Classificação Q-Barton</i>	83

6.2.4	<i>Classificação SMR</i>	84
7	CONCLUSÃO	87
	REFERÊNCIAS	88
	APÊNDICES	91
	ANEXOS	91
	ANEXO A – Imagens de campo	91
	ANEXO B – Ensaio de picnômetria	94
	ANEXO C – Ficha de Campo	97

1 INTRODUÇÃO

Em obras de engenharia que envolvam a escavação de taludes ou aberturas subterrâneas em maciços rochosos se faz necessária uma investigação de campo para reconhecimento e caracterização estrutural destes maciços. Essa investigação é realizada através de classificações geomecânicas que permitem descrever e quantificar o maciço rochoso quanto ao seu grau de estabilidade, efetuada através de trabalhos em campo, que buscam identificar as descontinuidades presentes no maciço e classificá-las por meio de suas características como espaçamento, rugosidade, preenchimento, presença de água, grau de meteorização e resistência à compressão da superfície da fratura. Após essa caracterização, pode-se classificar o maciço ou escavação quanto a sua estabilidade e recomendar suportes para sua melhor estabilização, garantindo uma melhor segurança no local, evitando possíveis riscos de desabamento, queda de blocos ou ruptura do talude. Essas classificações são bastante utilizadas nas fases iniciais de projetos na área da Engenharia e Geologia, auxiliando na tomada de decisões em obras que envolvem construções em taludes rochosos (BIENIAWSKI, 1989).

Neste contexto, inserem-se os maciços rochosos e taludes presentes em cortes de estrada. Esses taludes são provenientes da abertura do maciço rochoso por meio de desmonte mecânico de rochas ou com uso de explosivos, viabilizando o desenvolvimento e a construção de estradas e rodovias. O maciço rochoso é aquele que inclui além da rocha intacta, as descontinuidades, blocos, água e estados de tensão (JAQUES, 2014).

Dessa forma, é de suma importância analisar e caracterizar os maciços rochosos e taludes, com intuito de verificar o risco de tombamentos ou rupturas que possam vir a causar danos à estrutura ou acidentes envolvendo o tráfego de veículos que transitam pelo local. Portanto, o presente trabalho aplica as classificações geomecânicas Rock Mass Rating (RMR), Q-Barton e Slope Mass Rating (SMR) para caracterizar um maciço rochoso em corte de estrada na BR-226 trajeto de Boa Viagem ao Distrito de Cruzeta, Município de Pedra Branca-CE, classificá-los quanto à sua estabilidade e indicar possíveis medidas de estabilização através de suportes para o mesmo caso necessário. Os capítulos que se seguem se estruturarão da seguinte forma: será explanado sobre os objetivos e a justificativa deste trabalho. Após isto, será localizado o maciço rochoso objeto de estudo. Em seguida, será feita uma explanação a respeito das características das descontinuidades de maciços rochosos, modos de ruptura de taludes e os métodos de classificação geomecânica destes maciços. Depois, será demonstrada a metodologia proposta para o trabalho em questão. Logo após, serão demonstrados os resultados obtidos através da execução da

metodologia e, por fim, os resultados obtidos já tratados e a conclusão deste trabalho.

1.1 Objetivo Geral

Caracterizar geomecanicamente o maciço rochoso objeto de estudo, avaliando sua estabilidade por meio de classificações geomecânicas RMR, Q-Barton e SMR.

1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar geologia regional e local onde maciço rochoso está incluído;
- Analisar as famílias de descontinuidades, rugosidade, preenchimento, espaçamento;
- Sugerir suportes no talude segundo caracterização geomecânica.

2 JUSTIFICATIVA

A caracterização de taludes em corte de estrada se mostra de suma importância para a segurança dos veículos que trafegam nas adjacências dos mesmos. Estes taludes, sem intervenções adequadas de engenharia com o decorrer do processo erosivo do solo e maciços rochosos, podem vir a se tornar instáveis, havendo a possibilidade de rupturas dos mesmos.

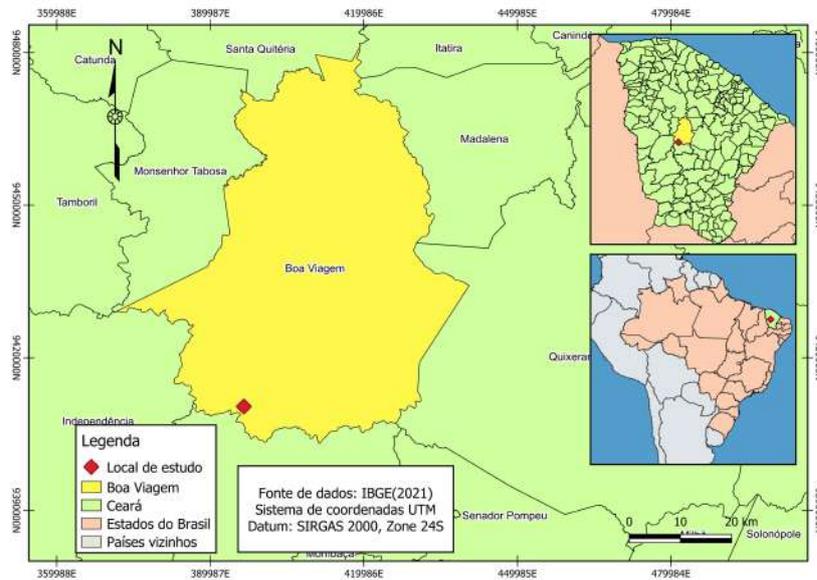
O talude de corte de estrada estudado é localizado na BR-226, uma via bastante movimentada, que liga o Distrito de Cruzeta a Boa Viagem e demais municípios da região, sendo uma zona com várias encostas e morros, deslizamentos são comuns devido ao estado de erosão das rochas, podendo vir a causar acidentes ou inviabilizar o tráfego de veículos.

Desta forma, caracterizar geomecanicamente este talude em corte de estrada será de grande valia para se ter informações a respeito de suas condições de estabilidade e, recomendar tratativas para o mesmo, em caso de instabilidade, além de aconselhar ou não uma necessidade de estudos mais abrangentes futuramente, visando a redução de riscos de acidentes relacionados a rupturas de taludes na região.

3 LOCALIZAÇÃO

O Distrito de Cruzeta no Estado do Ceará situa-se entre os Municípios de Pedra Branca e Independência como indica a Figura 1. O maciço rochoso objeto de estudo deste trabalho está localizado na BR-226 no percurso de Cruzeta para Boa Viagem com coordenadas (X: 386.282.98 m, Y: 9.410.404.92 m) com uma altura em relação ao nível do mar de 595 m como mostra a Figura 2.

Figura 1 – Mapa de localização do Município de Boa Viagem-CE.



Fonte: autoria própria.

Figura 2 – Mapa de localização do local de estudo.



Fonte: autoria própria.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos sobre a ciência da mecânica de rochas aplicada para caracterização de maciços rochosos. Serão explanados métodos diferentes para esta caracterização, em que se baseiam, quais informações são relevantes e suas recomendações para os suportes de escavações, visando sua estabilidade.

4.1 Mecânica das rochas: Caracterização geomecânica

A avaliação e descrição de maciços rochosos é de suma importância para estudos geotécnicos que visam analisar seu comportamento e estruturas presentes. Assim, quando se avalia a estabilidade de um maciço rochoso, deve-se considerar sua deformabilidade e a presença de descontinuidades na estrutura do mesmo. Esta caracterização pode ser realizada através de um conjunto de técnicas com base teórica e ensaios realizados em campo e laboratório, que visam a classificação do corpo, com o intuito de aprofundar o conhecimento relacionado à sua estabilidade (FIORI, 2015). No âmbito da mineração, estes são fatores que influenciam tomadas de decisões antes, durante e após as operações de lavra, podendo impactar o método de lavra, dimensionamento de equipamentos, tráfegos de veículos, estrutura da mina e a segurança dos trabalhadores expostos ao risco (CURI, 2014).

4.1.1 Maciços rochosos

Para Fiori (2015), a mecânica das rochas tem como base o estudo do comportamento mecânico dos maciços rochosos e rochas de acordo com forças que atuam no mesmo. Um maciço é um conjunto de blocos discretos de rocha intacta que apresenta descontinuidades dos tipos falhas, juntas e contatos litológicos. Estas descontinuidades podem ocorrer em qualquer escala, os maciços são tipicamente mais heterogêneos e anisotrópicos que uma rocha intacta. As características de um maciço rochosos definem como o maciço rochoso responde aos esforços quando submetido (BRADY; BROWN, 2006).

Dentre as características de um maciço rochoso destacam-se as descontinuidades quem possuem influência direta em sua estabilidade. A presença de descontinuidades, bem como a alteração mecânica das rochas por processos de intemperismo são os principais fatores no controle de sua resistência mecânica e deformação (PINOTTI; CARNEIRO, 2013).

4.2 Características da rocha intacta

A rocha intacta pode ser compreendida como um corpo sólido e natural, formado por um conjunto de grãos de um ou mais minerais que resultaram de processos geológicos sob determinadas condições de pressão e temperatura (MESQUITA, 2008). Outra definição para a rocha seria um material sólido consolidados que compõem um maciço rochoso, podendo ser formada por um conjunto de minerais em grande massa ou fragmentos (AZEVEDO; MARQUES, 2006).

4.3 Características de maciços rochosos

Em consonância com Fiori (2015), os maciços rochosos são formados por blocos de rochas. Estes, por sua vez, são constituídos de aglomerados de minerais. Suas características diferenciais são:

- Resistência mecânica;
- Porosidade da rocha intacta;
- Permeabilidade;
- Grau de liberação;
- Descontinuidades de ocorrência natural e composição espacial.

Essas características aliadas às obtidas através de ensaios como: grau de alteração, grau de fracturação, Rock Quality Designation (RQD), espessura das camadas, resistência à compressão e ângulo de atrito entre as fraturas são usadas para a classificação geomecânica dos maciços rochosos (HOEK, 2000).

4.3.1 Descontinuidades

As descontinuidades podem ser então definidas como superfícies de fraqueza presentes em maciços rochosos que estabelecem separações na continuidade física da rocha intacta (KLICHE, 1999). A relevância da investigação dos parâmetros relacionados às descontinuidades, se dá pelo fato de as mesmas formarem planos de fraqueza entre a rocha intacta, influenciando diretamente na sua resistência e comportamento geomecânico (HUDSON, 1989). Segundo Fiori (2015) os principais tipos de descontinuidades presentes em maciços rochosos são:

- Planos de acamamento: são formados por rochas sedimentares através da deposição de sedimentos em forma de camadas, onde cada camada do estrato apresenta

propriedades físicas diferentes;

- Planos de juntas: são estruturas de carácter planar criadas pelo alívio ou aumento de tensões, ocorrendo em todos os tipos de rochas e normalmente se apresenta em forma de famílias distribuídas ao longo de uma superfície;
- Planos de falha: são caracterizados pela movimentação relativa das paredes da descontinuidade seguindo uma direção preferencial, paralelamente ao plano de falha, sendo menos frequentes que as juntas. Podem, em certos casos formar zonas de falhas com uma série de superfícies de deslocamento, onde os falhamentos ocasionam planos de fraqueza de carácter contínuo e persistente ao longo do corpo do maciço;
- Foliação Metamórfica: é formada quando o protólito sofre algum grau de metamorfismo, facilitando a formação de lâminas que podem ser paralelas ou subparalelas ao longo de uma direção preferencial na rocha;
- Discordâncias ou Inconformidades: são estruturas na superfície em forma de quebras no processo de sedimentação, apresentando mudanças nas propriedades geotécnicas das rochas no maciço;
- Margens de intrusões ígneas: determinam quando rochas ígneas cortam de forma concordante ou discordante o acamamento de sequências sedimentares;
- Planos de cisalhamento e fendas de tração: são os planos de cisalhamento (referente às falhas) produzidos por movimentos tanto antigos quanto novos de rochas, e as fendas (juntas) decorrem de feições recentes associadas à presença de água.

4.4 Características das descontinuidades

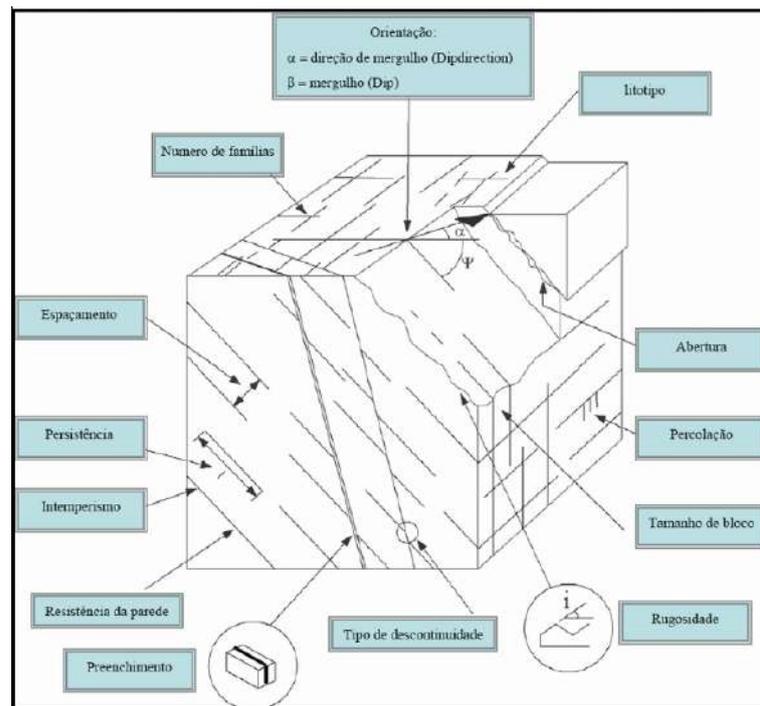
As propriedades geométricas das descontinuidades possuem grande importância para estudos geotécnicos (HATHEWAY, 2009). As principais características das descontinuidades são:

- Orientação;
- Espaçamento ou frequência das descontinuidades;
- Persistência das descontinuidades;
- Rugosidade da descontinuidade;
- Abertura e preenchimento das fraturas;

- Resistência das paredes ao cisalhamento;
- Percolação de água;
- Número de famílias de descontinuidades.

Estas características podem ser observadas na Figura 3. São objeto de estudo na caracterização geomecânica de um maciço rochoso.

Figura 3 – Ilustração de um maciço rochoso, indicando as características geomecânicas observadas nas descontinuidades.



Fonte: Wyllie(1999).

4.4.1 Orientação

A orientação espacial de cada descontinuidade é expressa em relação a seu mergulho ou dip (β) e direção, (AZEVEDO; MARQUES, 2006):

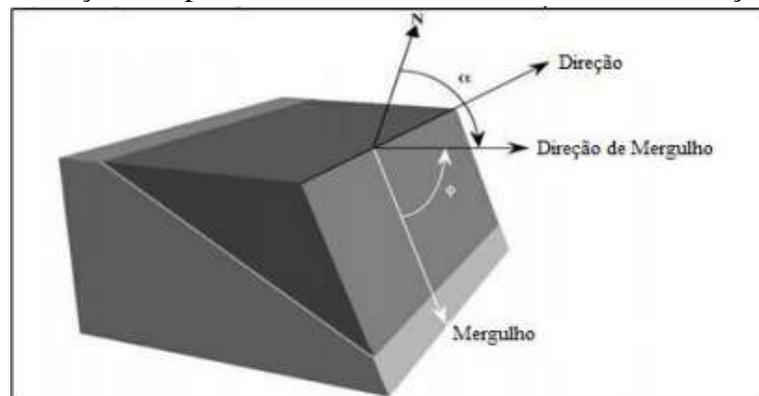
- o dip (β) representa a máxima inclinação do plano da descontinuidade em relação à horizontal;
- a direção de mergulho ou azimute (α do dip) corresponde a direção que segue as projeções da linha de maior inclinação do plano;
- o strike (direção) é o ângulo entre a direção Norte e a linha de intersecção entre um plano horizontal, formando um ângulo reto com a direção de mergulho.

O dip (β), e o strike podem ser observados na Figura 4. O grau da orientação das

juntas dentro de um maciço rochoso também influencia a anisotropia mecânica e a resistência da rocha. Maciços com juntas irregulares apresentam um maior grau de interligação entre os blocos e menor anisotropia mecânica que aqueles com juntas regularmente espaçadas. Fatores que influenciam a orientação das juntas em vertentes de rocha conforme Fiori (2015) são:

- Se as juntas, ou as intersecções de juntas, afloram na vertente a um ângulo igual ou menor que a inclinação da vertente do talude;
- Se o ângulo de inclinação das juntas ou o caimento das intersecções de juntas excede o ângulo de atrito ao longo das superfícies.

Figura 4 – Representação dos planos das discontinuidades e suas orientações.



Fonte: transposto de Azevedo e Marquês(2020).

4.4.2 Espaçamento ou frequência das descontinuidades

O espaçamento ou frequência são determinados pelo número de descontinuidades por metro presentes no bloco estudado (PRIEST; HUDSON, 1976) . Onde a medição dos espaçamentos entre descontinuidades deve ser executado com auxílio de uma fita graduada, as distâncias então serão medidas através da método da linha de varredura, onde esta linha deve ser posicionada perpendicularmente à família de juntas estudada (BRADY; BROWN, 2006). O espaçamento entre as descontinuidades vai condicionar fortemente o comportamento geomecânico de taludes rochosos.

Segundo Fiori (2015) a frequência das descontinuidades afeta a qualidade e resistência do maciço rochoso, já o espaçamento afeta o maciço rochoso quando em grande escala, influenciando as propriedades da rocha intacta. O espaçamento também impacta na permeabilidade e percolação do maciço rochoso, sendo a condutividade hidráulica de um sistema de descontinuidades inversamente proporcional ao espaçamento, dependendo assim do tamanho

das aberturas das descontinuidades. A frequência (Fd), expressa em número de juntas por metro de linha de varredura, sendo definida segundo Fiori (2015) como:

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

Sendo N o número de traços de descontinuidades intersectadas pela linha de varredura e L o comprimento da linha de varredura (m). O espaçamento médio (Ed) é igual o inverso da frequência expresso pela seguinte relação:

$$Ed = \frac{1}{F} \quad (2)$$

De modo geral a frequência de juntas não é constante em todo o maciço rochoso para um dado conjunto de juntas, já que as mesmas se agrupam de modo irregular ou aleatório em relação ao espaçamento, assim, o espaçamento das juntas deve aumentar com a profundidade, exceto em casos onde o maciço rochoso fora afetado por falhamentos (KOVARI *et al.*, 1983). Na Tabela 1 podemos ver a classificação descritiva do espaçamento médio entre as descontinuidades.

Tabela 1 – Classificação do espaçamento.

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

Fonte: transposto de ISRM(1983).

4.4.3 Persistência das descontinuidades

A persistência ou extensão é definida como a extensão em área ou dimensão de uma descontinuidade (AZEVEDO; MARQUES, 2006). Em linha com Fiori (2015) a persistência de uma descontinuidade é expressão de sua continuidade ininterrupta ao longo da extensão na vertical e horizontal. Continuidades de um sistema particular terão frequentemente maior ou menor continuidade do que aquelas de outro sistema no mesmo maciço rochoso, como apresentado na Figura 3. A persistência é um importante parâmetro, porém é difícil de ser obtida

especialmente se o fraturamento é pequeno em comparação com o comprimento das juntas mais bem desenvolvidas (FIORI, 2015). Em função da persistência as descontinuidades podem ser classificadas como:

- persistentes: que se estendem além da exposição;
- subpersistentes: que visivelmente terminam no maciço rochoso exposto;
- não persistentes: sendo àquelas que terminam de encontro com outras descontinuidades.

A caracterização dessas persistências pode ser realizada através de avaliação macroscópica dos maciços rochosos de acordo com a medição de seu comprimento, classificadas segundo a Tabela 2.

Tabela 2 – Caracterização da persistência ou extensão das descontinuidades.

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

Fonte: transposto de ISRM (1981).

4.4.4 Rugosidade da descontinuidade

As superfícies de descontinuidade, normalmente, apresentam irregularidades e ondulações, que por sua vez condicionam o comportamento de resistência tangencial do material. A rugosidade presente nas superfícies das descontinuidades condiciona a resistência ao corte das mesmas, a influência na resistência ao corte das descontinuidades diminui com o alargamento da abertura e/ou do enchimento (FERRER; VALLEJO, 2007). Dois fatores importantes no estudo dessa propriedade são sua ondulação na superfície, que resulta em variações na orientação ou atitude ao longo de uma dada descontinuidade, e sua rugosidade da superfície, de menor escala que a anterior, sendo responsável pelo atrito entre os blocos adjacentes consoante a (FIORI, 2015).

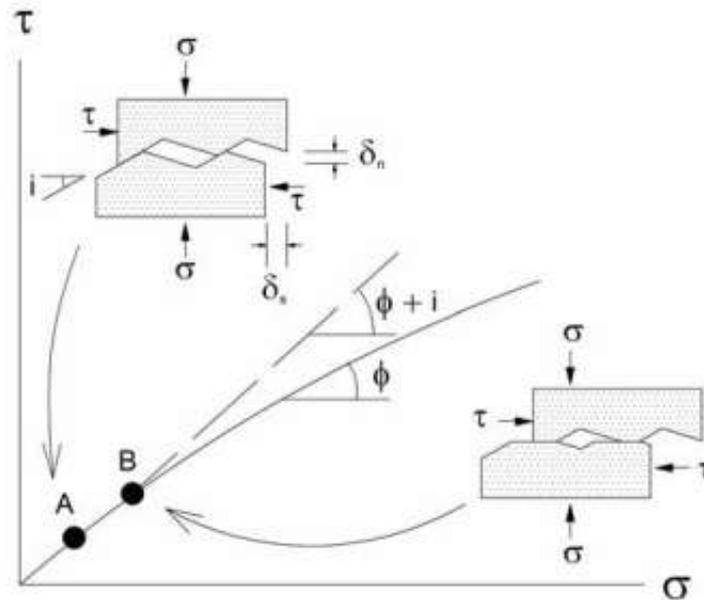
Os termos rugosidade e ondulação foram inseridos, levando em conta as irregularidades de primeira e segunda ordem, respectivamente (DEERE *et al.*, 1966). Assim podemos definir a rugosidade como sendo as irregularidades e ondulações contidas nas superfícies e paredes das

descontinuidades sendo classificadas pelo seu tamanho, como indica (FIORI, 2015):

- Ondulação de superfície: atinge até dezenas de metros, geram variações de atitude em relação a descontinuidade;
- Rugosidade de superfície: atinge pequenos metros, são responsáveis pelo atrito entre os blocos contíguos de uma descontinuidade.

O cisalhamento das descontinuidades é dependente dos efeitos combinados da rugosidade, resistência da rocha na superfície, da tensão normal aplicada e de seu deslocamento, assim as descontinuidades respondem ao cisalhamento gerando uma dilatação e aplainamento progressivo das asperezas (BARTON, 1976). A Figura 5 ilustra um ensaio de transição do modo de dilatação ao modo de cisalhamento das asperezas.

Figura 5 – Efeito da rugosidade e do esforço normal sob o ângulo de atrito da superfície de descontinuidade.



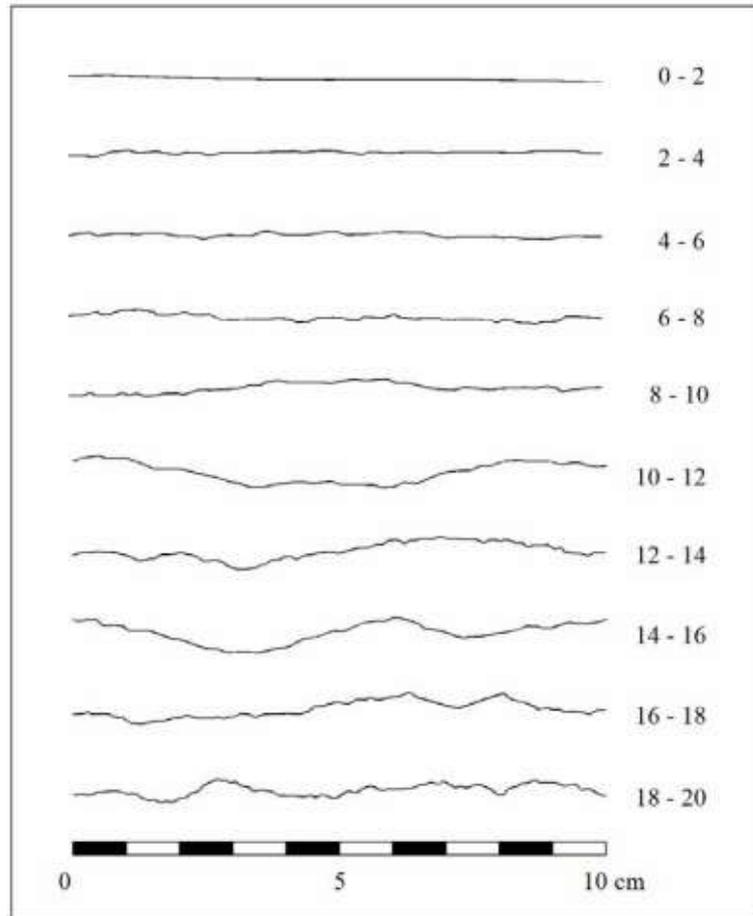
Fonte: Wyllie & Mah, (2004).

Para superfícies rugosas artificiais limpas o fenômeno de cisalhamento pode ser expresso pela equação empírica de (BARTON, 1976):

$$\tau = \sigma' \tan \left(\phi_b + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma'} \right) \right) \quad (3)$$

Onde o valor de JRC é o coeficiente de rugosidade de junta, JCS a resistência à compressão da rocha na superfície de fratura e σ' a tensão normal efetiva. Os perfis de rugosidade podem ser vistos na Figura 6 .

Figura 6 – Propriedades geométricas de descontinuidades(espaçamento e frequência).



Fonte: Barton & Choubey (1976).

4.4.5 Abertura e preenchimento das fraturas

A abertura das descontinuidades diferenciam-se em função das distintas zonas do maciço rochoso, eventualmente pode-se encontrar uma descontinuidade que apresente abertura de alguns centímetros à superfície e em profundidade estar completamente fechada. Quanto ao preenchimento podem ser classificadas como vazias, parcialmente preenchidas e totalmente preenchidas. A caracterização dessas estruturas é importante já que o tamanho e a largura da abertura influenciam diretamente a resistência ao cisalhamento ao longo da descontinuidade do maciço rochoso (FERRER; VALLEJO, 2007). A Tabela 3 mostra a classificação da abertura de descontinuidades descrita por ISRM(1981). O efeito do preenchimento na resistência ao cisalhamento depende da espessura e propriedades do material de preenchimento, se a espessura é maior que 25 - 50% da amplitude das asperezas, o contato entre as paredes da descontinuidade pode ser ausente, e as propriedades de resistência da fratura serão consideradas como as do material de preenchimento (GOODMAN *et al.*, 1989).

Tabela 3 – Caracterização da abertura das discontinuidades.

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

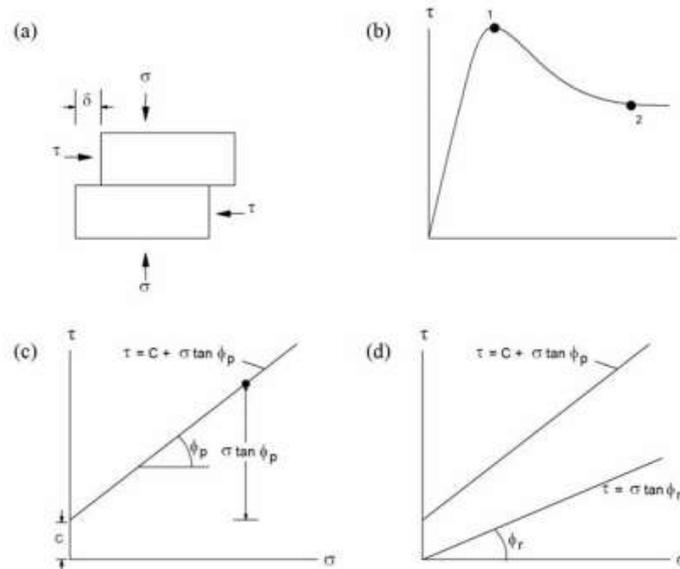
Fonte: transposto de ISRM (1981).

4.4.6 Resistência das paredes ao cisalhamento

Este parâmetro compreende a resistência à compressão das paredes das discontinuidades, sendo um fator importante para determinar a resistência ao cisalhamento e a deformabilidade dos maciços rochosos (FIORI, 2015). A Figura 7 ilustra o comportamento de uma discontinuidade preenchida submetida a uma série de ensaios de cisalhamento direto. Em cada ensaio, a tensão normal é considerada constante (σ), a tensão de corte é incrementada (τ), enquanto os deslocamentos por cisalhamento (δ) são mensurados (NEYRA, 2006).

O critério de ruptura de Moh-Coulomb demonstra a resistência ao cisalhamento em função das tensões normais no plano de ruptura, sendo apresentado graficamente na Figura 7. O conceito de Mohr-Coulomb pode ser usado para expressar os critérios em termos das tensões principais atuantes.

Figura 7 – Definição de resistência ao cisalhamento de uma superfície de descontinuidade com preenchimento:(a) ensaio de cisalhamento direto da descontinuidade, (b) diagrama de deslocamento de corte em função da tensão de cisalhamento, (c) diagrama de Mohr para a resistência de pico, (d) diagrama de Mohr para a resistência de pico e resistência residual.



Fonte: Wyllie & Mah, 2004.

4.4.7 Percolação de água

Percolação de água, também chamada de condições de fluxo, corresponde à passagem de água às descontinuidades abertas (AZEVEDO; MARQUES, 2006). Sendo a água um dos principais fatores no processo de erosão de solos, no intemperismo de solos e rochas e na estabilidade de taludes através do gradiente hidráulico ao longo de suas descontinuidades (FREITAS, 2011). A análise da percolação de água no interior de uma descontinuidade, permite realizar uma estimativa da influência da percolação na resistência mecânica do maciço rochoso, e para tal, deve-se levar em consideração as condições climáticas do local de estudo e do nível do lençol freático no maciço rochoso (FONTINHAS, 2012). A classificação qualitativa da percolação de água ao longo de uma descontinuidade com preenchimento e sem preenchimento, conforme o Quadro 1 (MATULA, 1981).

Quadro 1 – Quadro da caracterização da presença de água nas discontinuidades.

Classe	Designação	Descontinuidades sem preenchimento	Descontinuidades 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).

4.4.8 Número de famílias

Família refere-se ao conjunto de discontinuidades que apresentam superfícies aproximadamente paralelas entre si (AZEVEDO; MARQUES, 2006). A identificação das famílias é realizada com o auxílio de bússola geológica, clinômetro ou por análise visual. O maciço rochoso pode ser caracterizado de acordo com o número de famílias (MATULA, 1981), como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação do maciço rochoso conforme o número de famílias.

Tipo de maciço rochoso	Número de famílias
I	Maciço compacto, apresenta descontinuidades casuais.
II	1 família de descontinuidades
III	1 família de descontinuidades, apresenta 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).

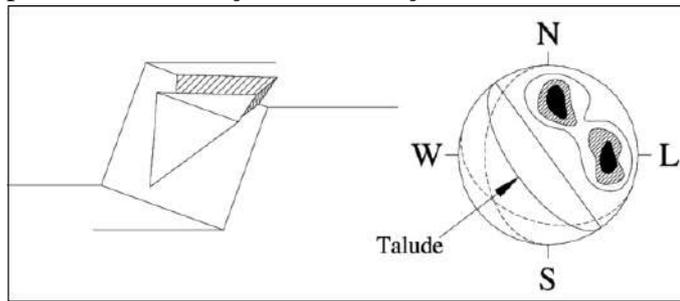
4.5 Tipos de Ruptura

As descontinuidades afetam a estabilidade do maciço rochoso causando zonas de fraqueza, essas zonas podem vir a colapsar causando rupturas no mesmo, desta forma dependendo do tipo e quantidade de descontinuidades essas rupturas podem ser classificadas (HOEK, 2000). A orientação das descontinuidades pré-existentes em relação à orientação do talude pode ter impacto no comportamento dos taludes em rocha (PAN; HUDSON, 1988). Baseando-se no fato de que as descontinuidades são os planos de fraqueza no maciço rochoso, a descrição dos taludes de forma macroscópica em relação a sua geometria de ruptura e ao mecanismo de ruptura refere-se à descrição do processo físico que acontece em diferentes pontos do maciço rochoso, tal como o início da ruptura através da rocha, que eventualmente conduz ao colapso do talude (SJÖBERG, 1999). Em taludes escavados em solos e rochas, a superfície de ruptura não se desenvolve ao mesmo tempo em toda sua extensão, necessitando haver um desenvolvimento progressivo da superfície de ruptura, o que conduz o talude ao colapso, eventualmente (BISHOP, 1967).

4.5.1 Ruptura em cunha

A ruptura em cunha é formada quando dois ou mais planos de descontinuidades separam porções de rocha, gerando escorregamentos translacionais quando esses planos se interceptam formando uma cunha, como indica Fiori (2015). Para que haja formação de cunhas, a linha de interseção entre as famílias de descontinuidades devem possuir caimento menor que o mergulho do talude, como mostra a Figura 8.

Figura 8 – Ruptura por cunha na direção da interseção de duas descontinuidades.



Fonte: Hoek e Bray (1981).

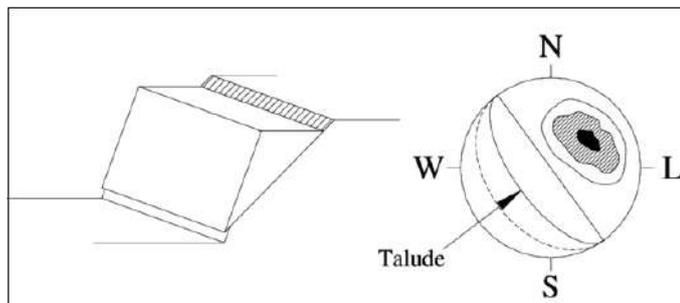
As condições necessárias para um deslizamento em cunha são:

- a direção da linha de interseção gerada pelos dois planos deve ser paralela à direção do mergulho da face do talude, com uma diferença angular de até 20° entre as duas direções;
- a linha da interseção deve iniciar-se na face do talude;
- o mergulho gerado na interseção deve ser inferior ao mergulho da face do talude;
- o mergulho da linha gerada de interseção deve ser superior aos ângulos de atrito entre os planos que compõem a cunha.

4.5.2 Ruptura planar

Segundo Fiori (2015), a ruptura planar ou deslizamento, envolve o movimento de massas rochosas ao longo de uma ou mais superfícies subparalelas entre si e ocorre geralmente em rochas de estruturas bem orientadas, como mostra a Figura 9.

Figura 9 – Ruptura plana através de uma descontinuidade persistente, cujo mergulho é menor e em direção ao talude.



Fonte: Hoek e Bray (1981).

Para que a ruptura planar ocorra, são necessárias as seguintes condições:

- a direção do plano de deslizamento deve ser paralela a direção do plano do talude, com uma diferença angular de 20° no máximo, entre a direção de face do talude;

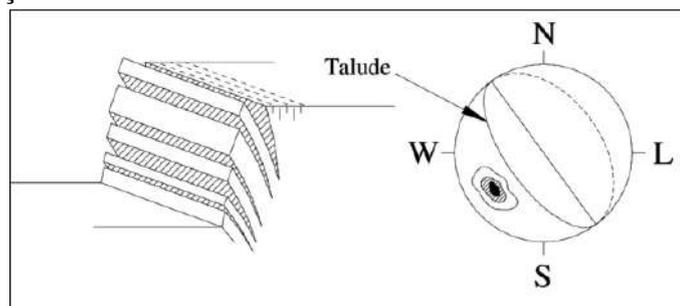
- o plano de deslizamento deve iniciar-se no talude;
- a inclinação do plano de deslizamento deve ser inferior a inclinação do talude;
- a inclinação do plano de deslizamento deve ser superior ao ângulo de atrito;
- o plano de escorregamento deve iniciar-se na face da vertente e deve interceptar a face superior do talude.

4.5.3 Ruptura por tombamento

Fiori (2015) sugere que as rupturas por tombamento ocorrem quando dois planos de descontinuidades bem definidos se interceptam, sendo que um deles mergulha com elevado ângulo contra a vertente, a face livre do talude. A Figura 10 demonstra uma ruptura por tombamento, sendo que as condições para esse tipo de ruptura são:

- duas famílias de descontinuidades inclinadas se interceptam, uma a favor e outra contra a inclinação do talude;
- a família que mergulha contra a face deve ser inclinada em ângulos maiores que 90° menos o ângulo da face do talude, e a família de descontinuidade que mergulha a favor deve possuir uma inclinação menor que o ângulo de atrito das descontinuidades;
- As direções dos dois planos e a face do talude devem ser subparalelas, ou seja, possuir uma diferença de mais ou menos 20° .

Figura 10 – Ruptura por tombamento, num maciço com descontinuidades de mergulho forte, em direção contrária à face do talude.



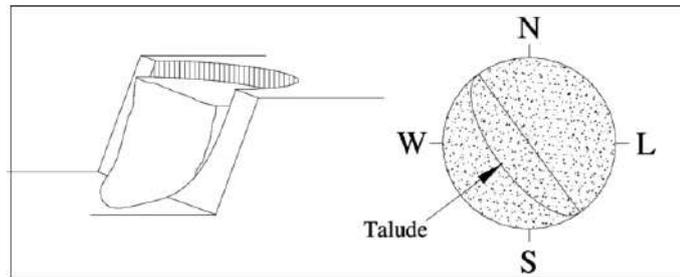
Fonte: Hoek e Bray (1981).

4.5.4 Ruptura circular

Esse tipo de ruptura ocorre em maciços rochosos muito fraturados ou em solos (FONTINHAS, 2012). As atitudes das descontinuidades presentes nesse tipo de ruptura tendem

a variar e apresentam comportamento isotrópico ao longo do maciço, como mostra a Figura 11.

Figura 11 – Ruptura circular em rocha fraca, muito fraturada com descontinuidades aleatórias.



Fonte: Hoek e Bray (1981).

4.6 Sistema de classificação de maciços rochosos

Hoek (2000), indica que a classificação de maciços rochosos se mostra de extrema importância para definir as características geotécnicas do mesmo, sendo obtida através dos valores e padrões obtidos nos ensaios realizados em campo e em laboratório. Dentre as classificações geomecânicas, temos o sistema RMR de Bieniawski, o Q de Barton (sistema Q), o RQD de Deere e o SMR de Romana. Para realizar essas classificações é necessário:

- realizar o mapeamento geológico da área a ser classificada;
- observar e elaborar estudos sobre as descontinuidades presentes in situ;
- caracterizar o maciço mecanicamente, tanto in situ como em laboratório;
- definir suas propriedades físicas.

Com esses dados obtidos é possível então determinar o grau de alteração do maciço, grau de fraturamento e resistência mecânica e, a partir dessas propriedades, utilizar os métodos para definir a classe do maciço (HOEK, 2000).

4.6.1 Classificação de Bieniawski (Sistema RMR - Básico)

O Rock Mass Rating, classificação criada por (BIENIAWSKI, 1989), é baseado no princípio da atribuição de pesos aos seis critérios significativos para o comportamento dos maciços rochosos, com um foco principal para obras de caráter subterrâneo (HOEK, 2000). O somatório dos critérios designa o maciço em uma das cinco classes de qualidades consideradas pelo autor. Os critérios são:

- resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;
- RQD;

- espaçamento das descontinuidades;
- condição das descontinuidades;
- influência da água;
- orientação das descontinuidades.

A aplicação do método se dá pela divisão do maciço em várias regiões (zonas), que devem ser classificadas separadamente. O Quadro 2 permite determinar os pesos relativos à condição das descontinuidades.

Quadro 2 – Quadro da Classificação geomecânica de Bieniawski.

Classificação geomecânica de Bieniawski									
Parâmetros			Coeficientes						
1	Resistência da rocha Intacta	Point Load	> 10 MPa	4 - 10 Mpa	2 - 4 Mpa	1 - 2 Mpa	Ver compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial	> 250 Mpa	100 - 250 Mpa	50 - 100 Mpa	25 - 50 Mpa	5-25 Mpa	1-5 Mpa	< 1 Mpa
	Pesos		15	12	7	4	2	1	0
2	R.Q.D		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	< 25%		
	Pesos		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		> 2 m	06-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm		
	Pesos		20	15	10	6	5		
4	Condição das descontinuidades		Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes ligeiramente alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou enchimento com espessura < 5 mm ou juntas contínuas com separação 1-5 mm	Enchimento mole com espessuras > 5 mm ou juntas contínuas com separação > 5mm		
	Pesos		30	25	20	10	0		
5	Presença de água	Caudal por 10 m de comprimento do túnel	nenhum	< 10 l/mln	10-25 l/mln	25-125 l/mln	> 125 l/mln		
		Relação pressão da água vs tensão principal máxima	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
	Pesos		15	10	7	4	0		

Fonte: transposto de Bieniawski(1989).

Caso ocorra uma descrição mais detalhada das juntas presentes no maciço, pode-se utilizar o Quadro 3, assim o critério será o somatório dos parâmetros referidos nesta. Caso não haja valores disponíveis para a utilização desta tabela, deverá ser feita a escolha da descrição que melhor se enquadre na realidade.

Quadro 3 – Quadro da classificação das descontinuidades.

Classificação das descontinuidades de Bieniawski					
Comprimento da descontinuidade (persistência)	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Peso	6	4	2	1	0
Separação (abertura)	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Quase liso	Liso
Peso	6	5	3	1	0
Enchimento	Nenhuma	Duro com espessura < 5 mm	Duro com espessura > 5 mm	Mole com espessura < 5 mm	Mole com espessura > 5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Grau de alteração	Não alteradas	Ligeiramente alteradas	Moderadamente alteradas	Muito alteradas	Em decomposição
Peso	6	5	3	1	0

Fonte: transposto de Bieniawski(1989).

Baseado nos valores obtidos pelo RMR Bieniawski (1989), propôs também a possibilidade de avaliar o maciço rochoso em cinco classes, e estima dessa forma sua coesão e ângulo de atrito, na Tabela 5 pode-se observar então a classificação.

Tabela 5 – Classificação do maciço rochoso pelo valor do RMR.

Classes	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	150-100	<100
Ângulo de atrito (°)	>45	40-45	35-40	30-35	<30

Fonte: transposto de Bieniawski(1989).

4.6.2 Classificação Q de Barton (índice Q)

O Q de Barton se baseia na análise de 6 fatores considerados relevantes para caracterizar o comportamento de maciços rochosos, proposto por (BARTON, 1976), Lien e Lund do

Norwegian Geotechnical Institute. O valor numérico do Índice Q apresenta um largo campo de variação entre 10^{-3} e 10^3 , determinado pela expressão abaixo:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF} \quad (4)$$

De acordo com Hoek (2000) os três quocientes que compõem a expressão correspondem a três aspectos relativos ao maciço rochoso, onde:

- RQD/ J_n caracteriza a estrutura do maciço rochoso e constitui uma medida do bloco unitário do maciço, seu valor varia entre 20 e 0,5 que demonstra de forma genérica a dimensão dos blocos, valores podem ser obtidos nas Tabelas 6 e 7.
- J_r/J_a caracteriza as descontinuidades e enchimentos sob o aspecto da rugosidade, como mostra o Quadro 4. E do grau de alteração do maciço, demonstrado no Quadro 5, sendo crescente com o incremento da rugosidade e diminuindo com o grau de alteração das paredes de contato direto.
- J_w/SRF representa o estado de tensão do maciço rochoso, (o fator SRF caracteriza o estado de tensão no maciço rochoso, em profundidade, ou as tensões de expansibilidade em formações incompetentes de comportamento plástico), sendo avaliada a partir de evidências de libertação de tensões, que formam zonas de escorregamento ou de alteração localizada como indica o Quadro 6; o fator J_w representa a medida da pressão da água, e sua resistência ao escorregamento das descontinuidades, como mostra a Tabela 8.

Tabela 6 – Designação da qualidade da rocha (Fator 1).

RQD - Rock Quality Designation		
Descrição do parâmetro		Valor
A	Muito mau	0-25
B	Mau	25-50
C	Médio	50-75
D	Bom	75-90
E	Muito Bom	90-100

Notas

1. Quando o RQD for <10 (com o valor de 0 incluso), considera-se um valor nominal de 10 para os cálculos de Q;
2. Intervalos de 5 no RQD tem precisão suficiente (100, 95, 90, ...).

Fonte: transposto de Hoek (2007).

Tabela 7 – Jn – índice das famílias de juntas (Fator 2).

Joint set number(Número de juntas)		
	Descrição do parâmetro	Valor (Jn)
A	Nenhuma ou poucas descontinuidades presentes	0.5-1.0
B	Uma família de descontinuidades	2
C	Uma família de descontinuidades aleatórias	3
D	Duas famílias de descontinuidades	4
E	Duas famílias de descontinuidades aleatórias	6
F	Três famílias de descontinuidades	9
G	Três famílias de descontinuidades aleatórias	12
H	Quatro ou mais famílias, descontinuidades aleatórias, maciços muito fraturados	15
I	Rocha esmagada, tipo terroso	20

Notas

1. Nas intersecções utilizar 3 x Jn;
2. Nas embocaduras utilizar 2 x Jn.

Fonte: transposto de Hoek (2007).

Quadro 4 – Jr – índice de rugosidade das juntas (Fator 3).

Joint roughness number- Número de rugosidade presente nas juntas			
	Descrição do parâmetro	Valor (Jr)	Notas
a)	Contato entre as paredes de rocha das descontinuidades		1. As descrições das linhas a) e b) são referentes a escalas de amostragem de pequena e média dimensão, respectivamente;
b)	Contato entre as paredes de rocha antes de 10 cm de escorregamento		
A	Juntas descontinuas	4	2. Adicionar 1.0 se o espaçamento médio da família de descontinuidades mais relevante for maior que 3 m.
B	Descontinuidades rugosas, irregulares, onduladas	3	
C	Descontinuidades suaves e onduladas	2	
D	Descontinuidades polidas e onduladas	1.5	
E	Descontinuidades rugosas, irregulares, planas	1.5	3. Jr igual a 0,5 pode ser usado para descontinuidades polidas e planas contendo lineações, se essas lineações estiverem orientadas na direção de menor resistência.
F	Descontinuidades lisas, planas	1	
G	Descontinuidades polidas, planas	0.5	
c)	Não há contato entre as paredes de rocha no escorregamento		
H	Zonas contendo minerais argilosos e suficientemente espessa de modo a impedir o contato entre as paredes	1	
I	Zonas esmagadas contendo areias de modo a impedir o contato entre as paredes	1	

Fonte: transposto de Hoek (2007).

Tabela 8 – Jw – Índice das condições hidrogeológicas (Fator 4).

Joint water reduction - Alterações hidrogeológicas			
	Descrição do parâmetro	Jw	Pressão da água aprox. (Mpa)
A	Escavações secas ou caudal afluído pequeno, sendo <5 l/min localmente	1	<0,1
B	Caudal médio ou pressão que ocasionalmente arraste o preenchimento das descontinuidades	0.66	0,1-0,25
C	Caudal ou pressão elevada em rochas competentes sem preenchimento	0.5	0,25-1
D	Caudal ou pressão elevada, com considerável arrastamento do preenchimento das descontinuidades	0.3	0,25-1
E	Caudal excepcionalmente elevado ou pressão explosiva, decaindo com o tempo	0.2-0.1	>1
F	Caudal excepcionalmente elevado ou pressão continua, sem decaimento	0.1-0.05	>1

Notas

1. Os fatores nos casos C a F são estimados para condições naturais; o parâmetro Jw deverá ser aumentado caso sejam efetuadas drenagens
2. Os problemas especiais relacionados com a formação de gelo não são considerados

Fonte: Hoek (2007)

Quadro 5 – Ja – índice de alteração das descontinuidades (Fator 5).

Joint alteration number - Número de alteração nas descontinuidades		Valor	
	Descrição do parâmetro	Ja	0, (%)
a)	Contato entre paredes de rocha das descontinuidades		
A	Paredes duras, compactas, preenchimentos impermeáveis (quartzo ou epibólito)	0.75	-
B	Paredes não alteradas, somente com leve descoloração	1	25 a 35
C	Paredes ligeiramente alteradas, com partículas arenosas e rochas desintegradas não brandas	2	25 a 30
D	Paredes com partículas siltosas ou areno-argilosas	3	20 a 25
E	Paredes com partículas de matérias moles ou baixo ângulo de atrito, tais como caulinite, mica, gesso, talco, clorite, grafite, etc., e pequenas quantidades de argilas expansivas	4	8 a 16
b)	Contato entre as paredes de rocha das descontinuidades antes de 10 cm de escorregamento		
F	Paredes com partículas de areia e rochas desintegradas, etc	4	25 a 30
G	Descontinuidades com preenchimento argiloso sobreconsolidado (contínuo, mas com espessura < 5 mm)	6	16 a 24
H	Descontinuidades com preenchimento argiloso subconsolidado (contínuo, mas com espessura < 5 mm)	8	12 a 16
I	Descontinuidades com enchimento argiloso expansivo, como por exemplo montmorilonite (contínuo, mas com espessura < 5 mm); o valor de Ja depende da percentagem de partículas de argila expansiva e do acesso da água, etc	8 a 12	6 a 12
c)	Não há contato entre as paredes de rocha das descontinuidades		
J	Zonas ou bandas com rochas desintegradas ou esmagadas com argila (ver G, H e I para condições de material argiloso).	6.8 ou 8 a 12	6 a 24
K	Zonas ou bandas siltosas ou areno-argilosas, com pequena fração de argila	5	-
L	Zonas contínuas de argila (ver G, H e I para condições de material argiloso).	10.13, 13 a 20	6 a 24

Fonte: Hoek (2007).

Para o Quadro 6 do SRF existe duas notas sobre casos especiais quando:

- reduzir o índice SRF de 25 a 50 % se as zonas de corte influenciarem a escavação sem a atravessarem;
- No caso de maciços rochosos contendo argila, é conveniente obter o índice SRF para as cargas de descompressão. A resistência da matriz rochosa é então pouco significativa. Em maciços muito pouco fracturados e sem argila.

Bieniawski (1989), realizou a categorização do maciço rochoso com relação ao Índice Q, a Tabela 9 demonstra essa categorização.

Quadro 6 – SRF - Fator de redução de stress (Fator 6).

SRF - Stress Reduction Factor		Valor		
	Descrição do parâmetro	SRF		
a)	Zonas de fraqueza intersectando as escavações, causando descompressão do maciço rochoso durante sua abertura			
A	Zonas de fraqueza frequentes, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente; maciço rochoso envolvente muito descomprimido	10		
B	Zonas de fraqueza individuais, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidade da escavação <=50 m)	5		
C	Zonas de fraqueza individuais, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidade da escavação >50 m)	2.5		
D	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)	7.5		
E	Zonas individuais de corte em rocha competente, sem argila (profundidade da escavação <= 50 m)	5		
F	Zonas individuais de corte em rocha rígida, sem argila (profundidade da escavação > 50 m)	2.5		
G	Juntas abertas, rocha muito fracturada e descomprimida (todas as profundidades)	5		
b)	Rochas competente, problemas de tensões na rocha		σ_c / σ_1	σ_t / σ_1
H	Tensões baixas, proximo da superfície	2.5	> 200	> 13
I	Tensões médias	1	200 a 10	13 a 0.66
J	Tensões altas, estrutura rochosa muito fechada (usualmente favorável para estabilidade; pode ser desfavorável para estabilidade de paredes)	0.5 a 2	10 a 5	0.66 a 0.33
K	Explosões moderadas de rochas (rocha maciça)	5 a 10	5 a 2.5	0.33 a 0.16
L	Explosões intensas de rochas (rocha maciça)	10 a 20	< 2.5	< 0.16
c)	Rochas esmagadas; plastificação de rochas incompetentes sob influência de altas pressões de rocha			
M	Pressão moderada de rocha esmagada	5 a 10		
N	Pressão elevada de rocha esmagada	10 a 20		
d)	Rochas expansivas; atividade química expansiva devido à pressão da água			
O	Pressão de expansão moderada	5 a 10		
P	Pressão de expansão elevada	10 a 15		

Fonte: Hoek (2007).

Tabela 9 – Categorização do maciço rochoso de acordo com o valor de Q.

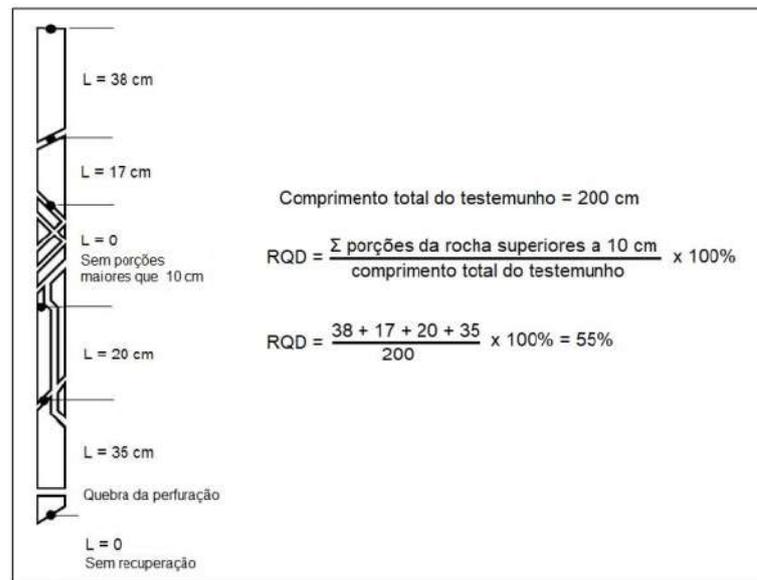
Classe	Descrição	Valor
I	Maciço de excepcional qualidade	>400
II	Maciço de extrema qualidade	400-100
III	Maciço de muito boa qualidade	100-40
IV	Maciço de boa qualidade	40-10
V	Maciço de qualidade regular	10-4
VI	Maciço de má qualidade	4-1
VII	Maciço de muito má qualidade	1-0,1
VIII	Maciço de extrema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

Fonte: transposto por Bieniawski (1989).

4.6.3 Classificação RQD

Desenvolvido por (DEERE *et al.*, 1966) o RQD – índice de qualidade de rocha é calculado através de testemunhos de sondagem (com diâmetro mínimo de 48 mm). Representa a relação entre a soma de todos os tarolos de material maiores que 10 cm e o comprimento total do furo (x100) como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Procedimento de determinação do RQD



Fonte: Hoek e Bray (1981).

Onde através do valor do somatório obtido pelo testemunho de sondagem pode-se obter a qualidade da rocha (Tabela 10). Na Tabela 11 pode-se obter o índice de recuperação do maciço rochoso.

Tabela 10 – Índice de qualidade do maciço.

Qualidade da rocha	RQD(%)
Muito ruim	<25
Ruim	25 - 50
Média	50 - 75
Boa	75 - 90
Muito Boa	90 - 100

Fonte: transposto de Deere e Deere (1989).

Tabela 11 – Índice de recuperação do maciço.

Qualidade da rocha	% de rec.
Maciço muito alterado	<50
Maciço medianamente alterado	50 - 80
Maciço pouco alterado	>80

Fonte: transposto de Deere e Deere (1989).

Com relação ao fraturamento, pode-se classificá-lo com relação aos intervalos das fraturas no testemunho de sondagem (Tabela 12).

Tabela 12 – Índice de fraturamento do maciço.

Intervalos (cm)	Simbolo	Designação
>200	F1 F1-2	Muito afastadas
60 a 200	F2 -	Afastadas
20 a 60	F3 F3	Medianamente afastadas
6 a 20	F4 F4-5	Proximas
<6	F5 -	Muito proximas

Fonte: transposto de Deere e Deere (1989).

4.6.4 Classificação J_v

Na ausência de testemunhos de sondagem para realizar o RQD, outros autores desenvolveram outra forma de calcular o Índice de qualidade da rocha. Utilizando a frequência de descontinuidades pode-se realizar uma correlação com a equação do RQD a correlação que está expressa na Tabela 13 (PALMSTROM, 1982).

Tabela 13 – correlação do J_v com a equação do RQD.

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

Fonte: Palmström (1982).

Na primeira equação o f é o número de descontinuidades por unidade de comprimento, e na segunda equação o J_v é o contador volumétrico de juntas. Para calcular o valor de f é definida uma linha de no mínimo 5 metros, na qual se realiza o processo de varredura, assim a razão entre o número de descontinuidades e o comprimento total da linha fornece o valor de f .

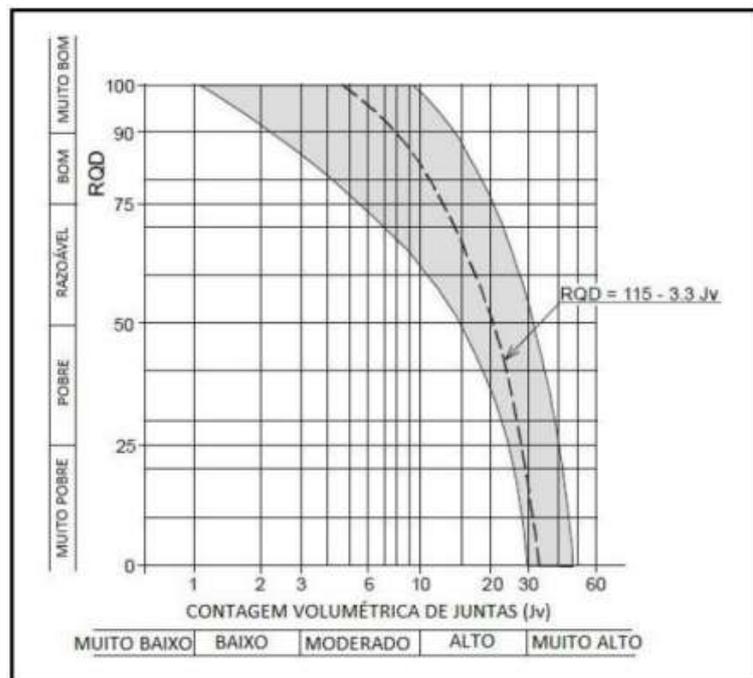
O contador volumétrico de juntas (J_v) é medido através do número de juntas dentro

de uma unidade de volume do maciço rochoso, definido pela equação:

$$J_v = \sum \frac{i}{S_i} \quad (6)$$

Em que S_i é o espaçamento das descontinuidades em metros. Como o RQD é um parâmetro que depende da direção, diferentes orientações do furo de sondagem podem produzir valores distintos. Assim, consoante a Hoek (2000) o uso do J_v apresenta uma grande vantagem por reduzir os problemas relacionados à dependência direcional. A Figura 13 apresenta o ábaco da correlação entre o J_v e o RQD.

Figura 13 – Correlação RQD e J_v .



Fonte: Palmström (1982).

4.6.5 Classificação SMR

O índice SMR desenvolvido por (ROMANA, 1985) é calculado através de quatro fatores empíricos de ajustes adicionados ao índice RMR básico proposto por (BIENIAWSKI, 1989) e modificado ao passar dos anos. Os fatores dependem da relação entre as descontinuidades presentes no talude e do método utilizado para a escavação. Assim para obter o SMR aplica-se a equação:

$$SMR = RMR_b + (F1 \times F2 \times F3) + F4 \quad (7)$$

onde:

- o RMR_b é obtido pela soma dos pesos atribuídos pelos cinco parâmetros: resistência à compressão uniaxial, RQD, espaçamento das descontinuidades e condições das descontinuidades;
- F1 - parâmetro que depende do paralelismo entre as direções das descontinuidades (α_j) e a direção do talude (α_s), como mostra a Figura 14. O valor deste parâmetro varia entre 1 (quando as descontinuidades e o talude forem paralelos entre si) e 0,15 (valor mínimo adotado por Romana). Utilizando a Tabela 14 pode-se estabelecer o parâmetro ou adotando a equação abaixo:

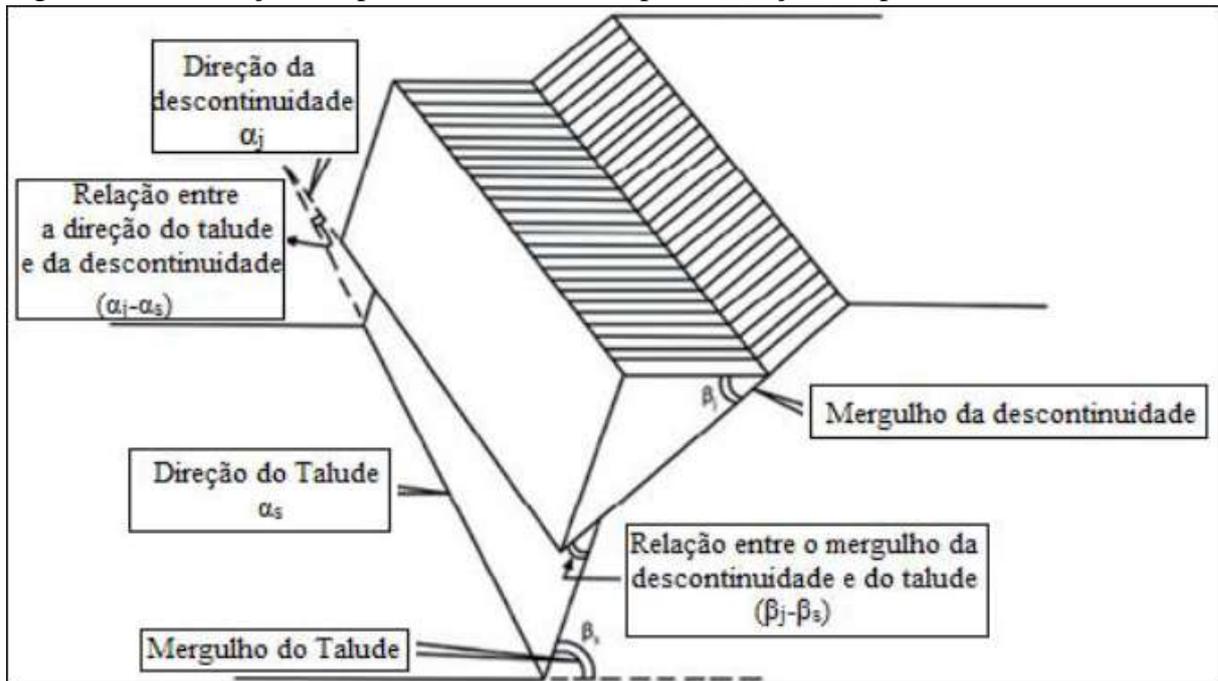
$$F1 = (1 - \text{sen}(\alpha_j - \alpha_s))^2 \quad (7.1)$$

- F2 - este parâmetro está relacionado com a probabilidade da ocorrência de cisalhamento na descontinuidade no caso de rupturas planares. O parâmetro pode ser obtido em função do mergulho da descontinuidade (β_j), como vê-se na Figura 14. Seus valores variam de 1, quando as descontinuidades possuem mergulho 45° , a 0,15, para descontinuidades com mergulho inferior a 20° . Podendo ser determinado através da equação abaixo ou da Tabela 14. Para rupturas por tombamento, o valor convencionado para F2 é 1;

$$F2 = \text{tag}^2 \beta_j \quad (7.2)$$

- F3 - baseado no ajuste de classificação para orientações de descontinuidades para taludes, definido por Bieniawski (1989), busca retratar a relação entre a face do talude e o mergulho da descontinuidade. Este parâmetro correlaciona o ângulo de mergulho da face do talude (β_s), com o mergulho da descontinuidade (β_j), para medir a possibilidade da descontinuidade aflorar na face do talude;
- F4 - é o fator empírico da correção para o método de escavação empregado, pode ser determinado através da Tabela 15.

Figura 14 – Ilustração dos parâmetros utilizados para obtenção dos parâmetros F1, F2 e F3.



Fonte: Singh e Goel, (1999).

Tabela 14 – Determinação de parâmetros SMR

Casos	Muito Favorável	Favorável	Aceitável	Desfavorável	Muito desfavorável
Pj-x	>30°	30-20°	20-10°	10-5°	<5°
Tj-x-180					
P/T F1	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
PBj	<20°	20-30°	30-35°	35-45°	>45°
P F2	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
T F2	1	1	1	1	1
P Bj-Bx	>10°	10-0°	0°	0 - -10°	<-10°
T Bj+Bx	<110°	110-120°	>120°	-	-
P/T F3	0	-6	-25	-50	-60

Fonte: transposto de Romana(1985).

Onde P é a ruptura planar, T o tombamento, α_j a direção do mergulho da junta, α_x a direção de mergulho do talude, β_j mergulho da junta e β_x mergulho do talude.

Tabela 15 – Fatores de ajuste para métodos de escavação.

Método	Talude natural	Pré-splitting	Detonação suave	Detonação ou Mecânico	Detonação deficiente
F4	15	10	8	0	-8

Fonte: transposto de Romana(1985).

O valor final resultante da fórmula será o SMR, indicará qual a classe do maciço

rochoso, segundo suas descrições da correlação do maciço com o tipo de ruptura (ROMANA, 1985), sendo descritos no Quadro 15.

Figura 15 – Descrição das classes de SMR.

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

Fonte: Palmström (1982).

sendo as classes:

- Classe I - sem rupturas;
- Classe II - alguns blocos;
- Classe III - poucas formações de cunha;
- Classe IV - rupturas planares e cunhas grandes;
- Classe V - rupturas planares grandes.

Baseado no comportamento do maciço rochoso, Romana (1985) propôs para diferentes intervalos de SMR, possíveis técnicas de contenção agrupadas em seis tipos distintos de estabilização listadas no Quadro 7.

Quadro 7 – Tipos de medidas de estabilização com base no índice SMR.

SMR	Medidas de estabilização	Técnicas de contenção
65-100	Sem suporte	Nenhuma
45-70	Proteção	Redes metálicas, valas no pé dos taludes
30-75	Reforço	Pregagem 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(1985).

4.7 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.

Utilizando, assim, para o referido teste, de um martelo geológico e/ou um canivete para determinar a resistência à compressão uniaxial da rocha. A técnica consiste em realizar impactos sucessivos a um fragmento de rocha sã, até alcançar o fraturamento como indica Fiori (2015). Assim, para estimar a resistência da rocha com base nos dados coletados, usa-se o Quadro 8.

Quadro 8 – Classificação do estado de resistência da amostra de rocha.

Classificação	Identificação em 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 muito fraca	1,0 - 5
R2	Pode ser raspada com o canivete com dificuldade; Marcas superficiais obtidas com a ponta do martelo.	Rocha fraca	5,0 - 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 muito 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).

4.8 Martelo de Schmidt

O Esclerômetro ou martelo de Schmidt como mostra a Figura 16, foi projetado inicialmente para a realização de medidas da resistência de corpos de provas de concreto, e posteriormente seu uso foi difundido e adaptado para outras áreas, sendo adaptado então para teste de resistência em rochas, e por meio de correlações pode fornecer valores aproximados da resistência a compressão uniaxial e módulo de elasticidade de rochas sãs (CARMIGNANI; FIORI, 2009).

Figura 16 – Martelo de Schmidt do tipo N.



Fonte: Fiori & Carmignani (2009).

O princípio de funcionamento do equipamento consiste em aplica-lo ortogonalmente à superfície, assim o êmbolo do Esclerômetro é disparado e parte da energia é consumida pela absorção de impacto e transformação em som. A energia remanescente representa a resistência à penetração da superfície em relação ao êmbolo (AYDIN; BASU, 2005). A resistência é representada pelo número de rebotes do martelo (R). Quanto maior a resistência da rocha maior será o valor de R .

A equação abaixo, proposita por Aydin Basu (2005), traz a correlação entre o número de rebotes para o martelo N (Hr_N) e martelos do tipo L (Hr_L). Esses tipos de equações são muito utilizados tendo em vista que os martelo do tipo L não são mais fabricados.

$$R_n = 1,064R_L + 6,3673 \quad (8)$$

Onde o R_n é a relação do número de rebotes do martelo do tipo N e L , o R_L é a

média dos valores obtidos pelo martelo.

Em referência a correlação do número de rebotes e sua inclinação durante os ensaios, pode-se obter através da tabela de correlação do número de rebotes de Schmidt em relação à compressão e resistência uniaxial, disponível no Anexo X. Desta forma, a correlação utilizada foi a de (DEERE *et al.*, 1966). A escolha desta equação se dá em função dos valores reais de resistência à compressão uniaxial de 28 tipos de litologias de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, com um coeficiente de correlação de 0,94, e com intervalo de resistência de 22 a 358 Mpa, e para a equação necessita-se apenas do número de rebotes do martelo de tipo *L* (R_L) e do peso específico da rocha (γ).

$$\alpha_c = 9,97^{(0,02)Lp} \quad (9)$$

4.9 Picnometria

A picnometria é um ensaio de laboratório utilizado para a obtenção da densidade de materiais e determinação de seus pesos específicos. Para a execução deste método utiliza-se uma balança calibrada para obtenção da massa do material que se deseja descobrir a densidade (ATKINS *et al.*, 2018). A realização dos ensaios procede a partir dos seguintes passos:

- amostras com temperatura ambiente variando entre 20° a 25° C;
- picnômetros secos e limpos;
- determinação do peso do picnômetro vazio com tampa (Valor de P1);
- enchimento do picnômetro com água destilada (valor de P2);
- enchimento do picnômetro com o material que se deseja determinar a densidade e pesagem (valor de P3);
- enchimento do picnômetro com água destilada, tampamento do picnômetro de modo a transbordar o excesso;
- com o picnômetro limpo e seco externamente pesagem com água e o material (Valor de P4).

Determine a densidade absoluta seguindo o passo a passo como demonstrado na Tabela 16, que demonstra de forma simples as etapas.

Tabela 16 – Passo a passo para a obtenção da densidade.

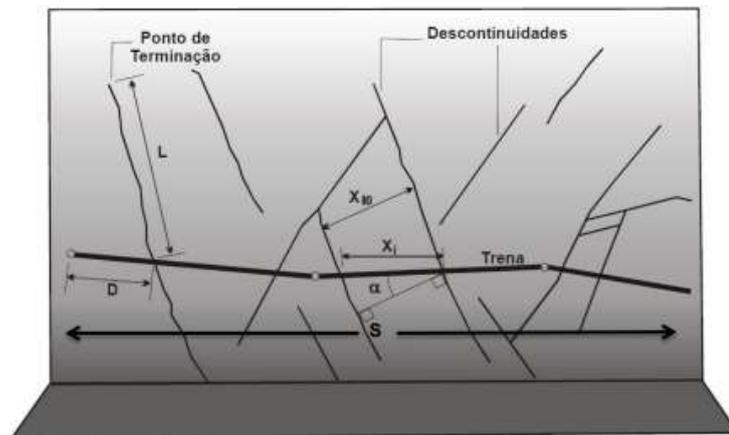
Massa do picnômetro seco (P1)
Massa do picnômetro com água destilada (P2)
Volume do picnômetro (P2 – P1) = VE
Massa do material (P3)
Massa do material + água destilada (P4)
Volume da água destilada (P4-P1-P3) = VI
Volume do material (VE-VI) = V
Densidade (P3/V)

Fonte: transposta de Atkins (2018).

4.10 Scanline

A linha de Varredura ou *scanline* consiste na escolha de locais que contenham feições de interesse, posteriormente é realizada a demarcação de uma linha contínua no afloramento, para caracterizar todas as descontinuidades que “cortam” este traçado (CARMIGNANI; FIORI, 2009). Este método é considerado por Fiori (2015) como o de melhor detalhamento da densidade e variedade das atitudes das descontinuidades, como mostra a Figura 17.

Figura 17 – Representação esquemática de uma scanline.



Fonte: Brown e Brady (2004).

Sendo X_i a distância entre as descontinuidades medida na linha de amostragem, X_{10} é a distância perpendicular entre o traço de duas descontinuidades pertencentes à mesma família, α é o ângulo entre a linha imaginária perpendicular ao traço da descontinuidade com a linha de amostragem, o S é o comprimento total da linha de varredura considerada, D é a distância entre a origem da linha de amostragem e o traço da descontinuidade e L é o semi-comprimento do traço da descontinuidade.

4.11 Geologia da área de estudo

As informações presentes nesta seção são referentes a Folha de Boa Viagem SB.24-V-D-II, elaborada por (PARENTE *et al.*, 2008).

4.11.1 Complexo Cruzeta

Na Folha de Boa Viagem SB.24-V-D-II onde se localiza o local de estudo, as informações presentes no relatório da folha foram realizadas no Programa de Geologia do Brasil Levantamentos Geológicos Básicos pela CPRM em parceria com a Universidade Federal do Ceará - UFC. O termo Complexo Cruzeta foi utilizado em substituição ao termo Complexo Pedra Branca usado para caracterizar a associação polimetamórfica de formato elipsoidal, cujo eixo maior, na opinião destes autores, (CAVALCANTE *et al.*, 2003), estende-se desde as proximidades de Tauá ao distrito de Ibuçu, 30 km a oeste da cidade de Madalena, a Figura 18 ilustra o Domínio Geológico do Ceará Central. O contato entre o Complexo Cruzeta e o Complexo Ceará é representado por um cisalhamento de baixo ângulo, marcado por um pacote pouco expressivo de blastomilonítos (ARTHAUD *et al.*, 1998).

à formação de milonitos retromórficos. Litologicamente é constituído, nas folhas Itatira e Boa Viagem, por gnaisses migmatíticos apresentando bandamento complexo, alternando níveis de composição variável, com predomínio de componentes granodioríticos sobre os componentes tonalíticos a graníticos.

São frequentes intercalações boudinadas de rochas máficas e ultramáficas que representam restos dilacerados de complexos acamadados. Também são comuns mobilizados de composição quartzo-feldspática, pegmatíticos ou não, intercalados na foliação. Em certos afloramentos, estes mobilizados representam mais de 50 % das rochas expostas. Nas Folhas Boa Viagem e Itatira rochas metassedimentares são raras e ocorrem geralmente na forma de formações bandadas ferríferas associadas a anfibolitos e turmalinitos.

Na Folha Quixeramobim, o Complexo Cruzeta é caracterizado por um pacote expressivo e monótono de rochas metassedimentares psamíticas variavelmente metamorfizadas na fácies anfibolito, alcançando a fusão parcial. De maneira geral são metatexitos bandados (biotita-gnaisses e hornblenda-biotita-gnaisses ambos para-derivados), e migmatitos heterogêneos e nebulíticos. O neossoma é, em geral, de granulação grossa (pegmatítica), o mesmo ocorrendo com os núcleos nebulíticos. Meta-hornblenditos e para-anfibolitos, que podem ocorrer em um mesmo corpo, formações ferríferas bandadas (fácies óxido e silicática), turmalinitos, quartzitos micáceos e gnaisses quartzo-feldspáticos são observados intercalados nesta sequência.

As principais ocorrências de rochas metaultramáficas do Complexo Cruzeta ocorrem na Folha Boa Viagem e podem ser agrupadas em dois conjuntos distintos:

- actinolititos, resultado de hidratação de piroxenitos, que ocorrem em forma de pequenos corpos lenticulares ou tabulares, boudinados de dimensões métricas a decamétricas, em meios às rochas gnáissicas migmatíticas;
- um complexo máfico-ultramáfico diferenciado (PRC-1422E, PRC-1422f). Este tem forma grosseiramente elipsoidal, com eixo maior em torno de 2 km e o menor de 1 km, que aflora em forma de pequenos lajedos, blocos e matacões, orientados ao longo da foliação regional (NE-SW), ocorrendo nas imediações da sede de Boa Viagem.

É composto basicamente por metapiroxenitos de granulação fina a grossa (>1cm), os primeiros localizando-se de preferência nas bordas, enquanto os últimos na parte central, representando provavelmente cumulos. Ocorrem ainda metanoritos com flogopita e brechas magmáticas contendo fragmentos sub-angulosos a subarredondados de metapiroxenitos de granu-

lação fina em meio a matriz de granulação média de rochas gabróicas. Vale ressaltar, entretanto, o expressivo número de corpos metaultramáficos boudinados que ocorre imediatamente abaixo do limite sul desta folha, contendo importantes ocorrências de cromita estratiforme, representando restos dilacerados de complexos acamadados.

É provável que grande parte destas metaultramáficas seja oriunda de transformação de piroxenitos. Os anfibolitos ocorrem principalmente em forma de corpos lenticulares ou tabulares, em parte boundinados, de dimensões reduzidas, que variam de escala métrica a decamétrica, em meio aos terrenos granítico-gnáissicos migmatítico, podendo tratar-se originalmente de diques e/ou derrames básicos. Uma hipótese que parte dos anfibolitos possa ser de origem paraderivada não é descartada. Os anfibolitos são em geral maciços, bandados e/ou foliados, estes marcados pela alternância milimétrica a centimétrica de níveis ricos em plagioclásio e anfibólio fortemente orientados.

Dada a importância das rochas máfica-ultramáficas no contexto geotectônico e, sobretudo como potenciais rochas geradoras de metais básicos (Ni, Cu, Cr, PGE, V, Ti), mesmo não tendo registro em campo de tais ocorrências desses metais, buscou-se por meio da geoquímica a identificação da filiação magmática, dos ambientes tectônicos dessas rochas bem como discutir sua vocação metalogenética. Assim dessa forma as rochas metamáficas do Complexo Cruzeta, representadas pelos anfibolitos, têm ampla distribuição geográfica nas três folhas e embora estejam associadas aos terrenos granito-gnáissicos migmatíticos atribuídos ao Complexo Cruzeta seu posicionamento estratigráfico é ainda impreciso, dada a tectônica pronunciada que afetou esta região. Assim, objetivando uma melhor compartimentação e caracterização do Complexo Cruzeta agrupou-se as metabásicas por folha.

Na porção sudoeste da folha Quixeramobim predominam os paragnaisses do Complexo Cruzeta já tratados anteriormente. São gnaisses arcoseanos, com biotita essencial a acessória, derivados de sedimentos semi-pelíticos/psamíticos, encontrando-se frequentemente intercalados com anfibolitos, calcissilicáticas e mais raramente com quartzitos, hornblenditos e xistos pelíticos. Quando a biotita é acessória, podem ser classificados de metarenitos arcoseanos. Em lâmina esta rocha é de granulação média, é constituída de plagioclásio (60%), quartzo (32%). A biotita varia de acessória a essencial (8% numa das lâminas) e os outros acessórios são opacos, apatita e minerais do grupo do epidoto. Os cristais de quartzo são anédricos subangulosos de vários tamanhos (0,1-0,7 mm), mostram extinção ondulante e, por vezes, resíduos de dissolução por pressão que é uma das características das rochas paraderivadas de protólito semi-pelítico. O

plagioclásio ocorre também em cristais anédricos na mesma faixa de granulação que o quartzo. Localmente a microclina está presente. A biotita ocorre em finas lamelas (0,05 mm) ou, menos frequentemente, na forma de agregados lamelares.

Na porção do Complexo Cruzeta localizada no quadrante NW da Folha Quixeramobim ocorrem principalmente ortognaisses bandados e rochas meta ígneas variadamente deformadas, intrudidos em paragnaisses. O Complexo Cruzeta difere da Unidade Quixeramobim tanto em termos litológicos (raros são os xistos pelíticos no primeiro) quanto em termos estruturais. O complexo apresenta-se muito mais deformados, com dobras sinformes e antiformes cujos eixos mergulham em vários sentidos. História deformacional mais complexa é consequência natural de uma idade mais antiga e evolução geológica também mais complexa. No contexto estrutural o Complexo Cruzeta presente na Folha Boa Viagem é constituído principalmente por ortognaisses bandados apresentando uma xistosidade de alta temperatura. Dobras intrafoliais centimétricas a métricas são comuns, resultado de uma intensa transposição. Na porção sul da folha, a foliação apresenta uma direção geral em torno de NNE, com mergulhos para ESSE. As lineações de estiramento (minerais) tendem a ser paralelas a direção da foliação, indicando um transporte tectônico quase transcorrente (é provável que a geometria atual da foliação do Complexo Cruzeta não representa a situação da época da sua gênese, o que impede interpretações mais consistentes).

4.11.2 Hidrogeologia

Sobre a parte hidrogeológica tem-se que a rede de drenagem é constituída por cursos d'água intermitentes sazonais de pequena energia, formando vales largos e configurando um padrão de drenagem predominantemente dendrítico, localmente estruturado, em zonas de cisalhamento e áreas mais fraturadas. A área compreendida pelas Folhas Itatira, Boa Viagem e Quixeramobim inclui o médio a alto curso dos rios Quixeramobim e Banabuiú que integram o Sistema Jaguaribe, bem como, as nascentes dos rios Groaíras e Curu, ao norte da cidade de Itatira. Na região de Itatira, próximo à Serra do Céu, o mais importante divisor de águas das bacias hidrográficas dos rios Curu, Groaíras e Quixeramobim, os tributários de primeira e segunda ordem caracterizam-se pelo caráter temporário, regime de enxurras e ausência de aluviões expressivos, em função das maiores amplitudes locais do relevo e declividade. Em direção aos médio e baixo curso, referidos rios são caracterizados por amplas planícies de inundação e depósitos aluvionares.

4.12 Estado da arte

4.12.1 2015

No estudo intitulado “ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE PARÂMETROS DE QUALIDADE DE MACIÇO PARA PROPOSIÇÃO DE MODELO GEOMECÂNICO”, realizado por (ABICHEQUER *et al.*, 2015), percebe-se que as características de um maciço rochoso são de extrema importância para estimar a qualidade de um pacote rochoso. Os sistemas de classificação são utilizados para caracterizar um determinado maciço rochoso através de suas propriedades identificadas por observação direta ou realizadas *in situ*. O estudo citado acima tem por finalidade propor um modelo geomecânico utilizando parâmetros de qualidade do maciço rochoso, segundo o RMR.

Como resultado o modelo geomecânico demonstrou a qualidade do maciço rochoso em geral, porém sendo necessária a realização de estudos mais detalhados. Uma possibilidade citada, seria chegar aos valores de RMR através da estimativa de alguns parâmetros como o RQD e Sistema Q, resistência da rocha intacta, entre outros, e comparar os resultados, verificando se ocorre alguma mudança no modelo.

4.12.2 2016

No estudo com título de “ESTABILIDADE DE TALUDES POR MEIO DE ANÁLISE CINEMÁTICA E CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS AO LONGO DA RODOVIA GOVERNADOR MÁRIO DE COVAS (BR 101), MUNICÍPIO DE SÃO SEBASTIÃO - SP” (SEVERINO, 2016), teve como objetivo a realização das classificações geomecânicas e análise cinemática nos taludes em rocha localizados ao longo da rodovia Governador Mário Covas (BR-101), entre os km 115 e 121, com finalidade de indicar regiões onde o maciço está em boas ou más condições geotécnicas e que carecem ou não de métodos de remediação e contenção. Assim, os fenômenos de instabilidade citados pelo autor, como queda de blocos e escorregamentos, podem ser evitados. Os estudos sobre o comportamento dos maciços rochosos são fundamentais na resposta das rochas perante os campos de força que a mesma está sujeita em ambiente físico. A classificação técnica é fundamental para o comportamento geotécnico do maciço, a qual permite identificar o material e estrutura.

Na análise cinemática realizada nos pontos estimados, foi possível determinar locais favoráveis para deslizamentos planares, deslizamentos em cunha e tombamento de blocos.

Os métodos de classificação geomecânica utilizados no trabalho (RMR e Q), não apresentam correlação satisfatória entre si, por motivos de incompatibilidade de pesos e parâmetros e por cada um focar em uma determinada questão física do maciço, o que acaba gerando uma divergência nas notas. Entretanto, os resultados das classificações foram mantidos na integração para permitir a análise de qual método é melhor aplicado em rodovias. Através da análise cinemática e classificação geomecânica foi possível determinar os pontos de importância e suas propostas de solução.

Recomendação para trabalhos futuros: realização de uma investigação mais ampla, na qual seria ideal abranger todo o maciço e não só limitar-se aos contornos da rodovia; ampliação da área de estudo, abrangendo melhor compreensão sobre taludes escavados e taludes naturais; recomendação de uma melhor precisão na coleta de dados para a classificação geomecânica, com a utilização de um Esclerômetro (martelo de Schmidt), muito utilizado para estimar a resistência à compressão uniaxial da rocha.

4.12.3 2018

No estudo com título de “ERODIBILIDADE DE SOLOS EM TALUDES DE CORTE DE ESTRADA NÃO PAVIMENTADA”, (SOARES *et al.*, 2018) viu-se que os taludes que são escavados sem técnicas adequadas para a construção dessas estradas, pode ocorrer progressiva intensificação do processo erosivo superficial, que muitas vezes pode levar a geração de feições erosivas. As estradas construídas através de cortes profundos podem expor os horizontes menos instáveis, provocando uma zona de instabilidade decorrente do material de transição formada entre o solo até a rocha (GRIEBELER, 2002).

Os cortes de perfis de solos residuais, em estradas não pavimentadas, a erosão hídrica tem provocado a instabilidade e a degradação dos taludes (BASTOS, 1999). A erodibilidade pode causar ou acelerar o processo erosivo e é influenciada por fatores físicos, químicos, biológicos, mineralógicos e mecânicos, dos solos (AVILA *et al.*, 2009). Assim o estudo tem por finalidade estudar a erodibilidade de perfil de solos em taludes de corte de estrada não pavimentada no Município de Bom Jardim, no Estado do Rio de Janeiro.

De maneira geral, independente dos critérios utilizados para a avaliação dos solos, todos os horizontes B (latossolo e argilosolo), possuem boa resistência à erosão. Através do estudo, com análises laboratoriais e observações em campo, os cortes de taludes devem obedecer a alguns critérios referentes às características geotécnicas dos solos e deve-se evitar que os cortes

atingam os solos residuais jovens. A avaliação da erodibilidade dos diversos solos expostos pelo corte de talude é importante para medidas de prevenção à erosão hídrica em taludes de corte.

4.12.4 2022

No estudo de (DUARTE, 2022) com título de "ANÁLISE CINEMÁTICA E APLICAÇÃO DO MÉTODO Q-SLOPE EM MACIÇO ROCHOSO MARGINAL À RODOVIA ES-482", é ressaltada a importância de conhecer a estabilidade de um talude, e que vários fatores vêm a alterar sua estabilidade, já que as consequências dos movimentos de massa ocasionados por rupturas de taludes podem variar, tanto para acidentes naturais quanto para os resultantes da ação antrópica.

Dentre essas consequências, temos os custos diretos, relacionados à remoção do material movimentado e o retrabalho de um novo projeto de estabilização; e os custos indiretos, relacionados a perdas e/ou danos materiais (WYLLIE; MAH, 2004).

Ressaltam a importância do diagnóstico de áreas de risco e aplicação de métodos de prevenção e contenção, visto o grande número de acidentes e vítimas envolvendo movimentos de massa nas últimas décadas no Brasil. Para identificar essas áreas de risco, os estudos geotécnicos são indispensáveis (PINOTTI; CARNEIRO, 2013).

Esses estudos são realizados por meio do levantamento dos parâmetros relevantes para a estabilidade, auxiliando na previsão de possíveis movimentos gravitacionais de massa e indicando a necessidade ou não de suportes ou obras de contenção que dependem do tipo de atividade realizada no maciço. Um dos principais parâmetros é referente às descontinuidades presentes e as suas propriedades geométricas e de resistência, onde por meio desses, conseguimos identificar áreas críticas no maciço (WYLLIE; MAH, 2004). Com a quantificação desses parâmetros, diversos métodos podem ser aplicados para a análise de estabilidade.

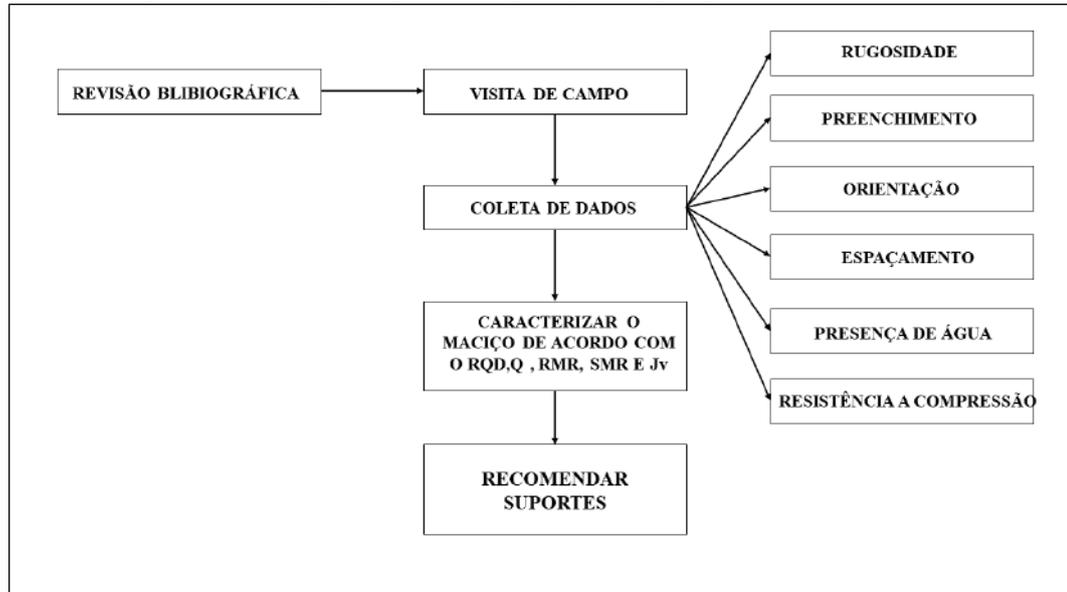
Como objetivos específicos da pesquisa tem-se a realização do levantamento em campo das propriedades do maciço, com finalidade de recolher dados para a aplicação do método Q-Slope, quantificar as famílias de descontinuidades e verificar as possíveis rupturas e a realização da análise de estabilidade pelo método, definindo o ângulo para o talude onde não necessite a utilização de um suporte. Como resultados obtidos pela amplificação do método, tem-se uma recomendação de 53° de mergulho do talude para que este não necessite de suporte (uma suavização de 17°, já que o talude possui 70° de mergulho medido). Sobre a aplicação do método Q-Slope, foi salientado que o mesmo apresenta facilidade e certa rapidez em sua

execução.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 19 apresenta um fluxograma das etapas realizadas ou a se realizarem neste estudo de forma que se atinjam os objetivos deste trabalho dentro do cronograma previsto.

Figura 19 – Etapas metodológicas para composição da pesquisa.



Fonte: Autoria Própria.

5.1 Materiais

Para a coleta e análise dos dados foram utilizados os seguintes materiais:

- Bússola geológica;
- GPS de mão;
- Martelo geológico;
- Perfilometro de Barton;
- Canivete;
- Martelo de Schmidt;
- Celular com câmera de 108 megapixels;
- Prancheta;
- Caderneta de campo;
- Trena;
- Picnômetro;
- Balança calibrada.

5.2 Métodos

Para efetuar a caracterização geomecânica do maciço rochoso na área em estudo, o presente trabalho foi dividido em três etapas complementares, apresentadas nos itens 5.2.1, 5.2.2 e 5.2.3.

5.2.1 *Revisão literária dos métodos de avaliação de maciços rochosos*

Primeiramente foi realizada uma revisão bibliográfica sobre caracterização geomecânica, visando compreender e selecionar os melhores métodos para a caracterização do maciço rochoso. Para tanto, utilizaram-se livros, estudos de caso, normas, dissertações de mestrado, artigos científicos referentes às classificações geomecânicas de maciços rochosos.

5.2.2 *Coleta de dados*

Para esta etapa do estudo realizou-se uma visita de campo para análise in loco do maciço rochoso objeto de estudo, visando a coleta de dados para posterior análise das suas descontinuidades presentes no maciço rochoso segundo os parâmetros:

- rugosidade;
- preenchimento;
- espaçamento;
- orientação;
- presença de água;
- resistência à compressão.

Com o auxílio da bússola pode-se obter sua orientação, mergulho, strike; utilizando o GPS se torna possível obter as coordenadas do local e sua elevação em relação ao nível do mar; o teste de martelo geológico é capaz de inferir a resistência à compressão da rocha; com o martelo de Schmidt pode-se obter o valor de compressão uniaxial; sua rugosidade pode ser observada através de um perfilometro de Barton e; com auxílio da trena pode-se então, em conjunto com o método da linha de varredura, a obtenção de seus espaçamentos e medição do seu preenchimento. A coleta de dados geológicos será executada através de reconhecimento visual, revisão na literatura e análise petrográfica.

5.2.3 Análise dos dados coletados

Nesta etapa, com os dados obtidos em campo pode-se então ser feita a caracterização geológica do maciço rochoso em questão, assim como a classificação geomecânica, segundo as metodologias RMR, Q, RQD, Jv e SMR, de acordo com os tópicos 4.6.1, 4.6.2, 4.6.3, 4.6.4 e 4.6.5 deste trabalho e, com estas, recomendar suportes para o maciço rochoso estudado.

6 RESULTADOS

6.1 Caracterização geológica-geotécnica

O local de estudo encontra-se no quilometro 170 da BR-226 com coordenadas X: 386282.98 m; Y: 9410404.92 m, no trajeto que liga o Distrito de Cruzeta ao Município de Boa Viagem no Estado do Ceará, o talude estudado em corte de estrada se estender nos dois lados da rodovia como apresenta a Figura 28, onde sua abertura dar-se passagem para uma rodovia, o método de abertura foi com uso de explosivos e segundo análise em campo a detonação não foi 100 % efetiva. Para a realização da caracterização dos taludes, dividiu-se o mesmo em 5 seções com comprimento de 7,5 metros para locação da Scanline onde o talude que se encontra no lado direito (Talude 1 (TL1)) possui altura de 6,7 metros com uma inclinação média de 84° e azimuth médio de 308° e no lado esquerdo (Talude 2 (TL2)) com altura de 4,46 metros com inclinação 78° e azimuth de 141° .

Figura 20 – Vista do maciço analisado.



Fonte: Transposto do Google Earth (acesso em 17/11/2022).

Pela extensão do talude e pelo fato de algumas áreas do mesmo estarem muito intemperizadas, ou cobertas de solo, selecionou-se, então, cinco áreas para a realização da coleta de dados, tendo em vista que o talude em sua extensão apresenta praticamente a mesma variabilidade de estruturas e características geológicas. Desta forma as áreas escolhidas foram

estudadas dando um panorama geral do talude. No Anexo A encontra-se fotos dos taludes.

6.1.1 Caracterização geológica

A área de estudo localiza-se na porção do complexo cruzeta, dentro do estado do Ceará, com boa parte da sua extensão no município de Boa Viagem, o talude encontra-se num corte de estrada a partir de observações a olho nu. Os taludes estudados apresentam-se bastante fraturados e com a presença de intrusões ígneas, um dique de quartzo e feldspato de coloração alaranjada a roseada, cortava boa parte do TL1, como mostra a Figura 21.

Figura 21 – Intrusões ígneas presentes, um dique de quartzo e feldspato de coloração alaranjada a roseada.



Fonte: Autoria Própria.

Foi possível observar o resultado de uma metamorfização, sendo grande parte do corpo do talude constituído de gnaiss e anfibolito, que são rochas metamórficas, com sua coloração variando de cinza a cinza-escuro e algumas porções pretas devido o acúmulo de minerais máficos representado na Figura 22, em algumas locais do talude eram visíveis os acamamentos provenientes de processos sedimentares, e mudança de direção destes acamamentos

devido ações tectônicas. Em algumas regiões do talude foi possível identificação de xisto de tonalidade máfica e em algumas áreas a presença de anfibólitos.

Figura 22 – Identificação de xisto de tonalidade escura e em algumas áreas a presença de anfibólitos.



Fonte: Autoria Propria.

A área 4 presente no TL2 em sua grande parte enquadra-se como um anfibolito, todo fraturado preenchido por líquidos magmáticos, com vários veios de pegmatitos na área 4 tratada apresentando algumas dobras menores como mostra a Figura 23.

Figura 23 – Presença de algumas dobras menores em veios de quartzo.



Fonte: Autoria Própria.

6.1.2 Caracterização geotécnica

Nessa seção os dados obtidos através da vista de campo, são referentes as características tanto do maciço rochoso como de suas descontinuidades, características essas abordadas

anteriormente no Capítulo da Fundamentação Teórica.

Os dados obtidos pelo levantamento em campo compreendem basicamente características das discontinuidades, como orientação das estruturas através da bússola, a rugosidade com o Perfilômetro de rugosidade, persistência e frequência das discontinuidades com o método da Scanline. Para a coleta de dados estruturais foram analisadas as famílias de fraturas em campo por análise visual, e as características geomecânicas foram analisadas em quatro áreas, pois a área 5 apresentava bastante instabilidade e para garantir a segurança na coleta dos dados a análise desta área foi realizada através de inspeção visual por meio de descrições. Inicialmente analisou a angulação da face do talude em termos de sua inclinação e direção de inclinação, como mostra a Tabela 17; após essa etapa verificou-se a presença das famílias de discontinuidade na face dos taludes, juntos com outras características como rugosidade com ajuda do rugosímetro e resistência com o Martelo geológico e Martelo de Schmidt.

Tabela 17 – Inclinação do talude.

Talude	Inclinação (°)	Azimute (°)	Altura (m)
Área 1	87	300	6.7
Área 2	87	300	6.7
Área 3	81	316	6.7
Área 4	78	141	4.46
Área 5	-	-	-

Fonte: Autoria Própria.

Nas três áreas presentes no TL1, foi coletada sua resistência a compressão uniaxial com o auxílio do Martelo de Schimdt. No TL2 apenas à área 4 teve seu valor adquirido através do martelo de Schmidt, ja que a área 5 teve sua resistência aferida pelo martelo geológico. Os valores podem ser observados na Tabela 18, onde em cada área foi realizada uma série de 10 medições e efetuada a média. Para obter o valor da resistência uniaxial da rocha com a utilização do martelo de Schmidt em Mpa é necessário realizar uma conversão por meio de correlações, e para essa conversão faz-se necessário saber a densidade da rocha. Dessa forma foram coletadas amostras de ambos os taludes e, posteriormente em laboratório, realizado ensaios para obter a densidade do maciço rochoso. A densidade foi obtida através do ensaio de picnometria. O picnômetro utilizado possuía um volume de 50 mL, e foram realizados 3 testes para obter um valor mais fiel a realidade.

Tabela 18 – Medições com o martelo de Schmidt e média.

Número de ensaios											
Área	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MÉD.
1	47	54	43	52	52	42	54	54	51	58	52
2	47	54	53	52	52	42	54	54	51	58	52
3	53	52	60	38	47	60	61	61	59	53	56
4	57	45	44	45	44	49	60	54	50	60	49,5
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autoria Própria.

Para os ensaios de densidade, utilizou o pó de amostras dos 2 taludes, o pó foi adquirido com o auxílio de uma serra mármore, gerando então 100 g de cada amostra que foram utilizadas para os ensaios de picnometria. Assim, com os valores de densidade (em Anexo) e da média dos valores do Martelo de Schmidt (na Tabela 18), pode-se então, calcular a resistência à compressão da rocha utilizando as equações 8 e 9.

$$R_n = 1,064R_L + 6,3673 \therefore R_L = \frac{R_n - 6,3673}{1,064}$$

$$R_L = \frac{52 - 6,3673}{1,064} = 42,88$$

$$\alpha_c = 9,97e^{(0,02)L\rho} = 9,97e^{(0,02)*42,88*2,46} = 82,2\text{Mpa}$$

Tabela 19 – Valores da resistência a compressão uniaxial obtidos pela correlação.

Área	Méd	Densidade	RL	$\alpha_c(\text{Mpa})$
1	52	2.46	42.86	82.14
2	52	2.46	42.86	82.14
3	56	2.46	46.62	98.82
4	49.5	2.54	40.52	78.08
5	0	0	0	0

Fonte: Autoria própria.

6.1.2.1 Área 1

Na área 1, contendo 7,5 metros de comprimento, foi identificada a presença de uma única família de descontinuidades, com espaçamento de 0,04 m entre elas, um espaçamento considerado muito pequeno, onde as fraturas apresentam-se com aberturas de 1 cm, sendo consideradas descontinuidades moderadamente abertas, sem a presença de preenchimento, com uma rugosidade variando entre 8 a 10 cm caracterizando-se moderadamente lisas. A presença de água foi identificada através de indícios de percolação de água nas fraturas sendo categorizadas como moderadamente seco e a persistência das descontinuidades ultrapassa a face do talude, desta forma, classificadas como muito extensas.

Figura 24 – Área 1 no TL1.



Fonte: Autoria Própria.

6.1.2.2 Área 2

Na área 2 próxima fronteira com a área 1, foram identificadas quatro famílias de descontinuidade ou mais, sendo que o espaçamento médio entre as famílias é de 0,045 m, um

espaçamento considerado muito pequeno. As discontinuidades ultrapassam a face visível do talude, podendo ser consideradas como uma persistência muito grande e extensa. As aberturas das fraturas presentes possuíam valor de 1 cm, assim sendo categorizadas como discontinuidades fechadas moderadamente abertas, sem preenchimentos, com uma rugosidade classificada como moderadamente lisa variando de 4 a 6 cm. A presença de água foi identificada através das manchas de percolação de água presente nas fraturas sendo tipificada como moderadamente seco.

Figura 25 – Área 2 no TL1.



Fonte: Autoria Própria.

6.1.2.3 Área 3

A terceira área analisada ainda no TL1, feitas através de inspeção visual em uma área bastante fraturada e intemperizada, sendo a seção próxima do solo mais coesa, seção essa onde foi feita a caracterização. Assim foram identificadas 4 famílias de descontinuidades ou mais, com um espaçamento médio entre as famílias de 0,7 m, um espaçamento considerado grande, as fraturas presentes apresentavam aberturas muito largas com cerca de 7 cm, sem a presença de preenchimento nas fraturas. A persistência das descontinuidades é categorizada como muito grande extensa ultrapassando a face visível do talude analisado. Sua rugosidade variou de 18 a 20 cm considerada como muito rugosa, a presença de água foi analisada a partir dos indícios de percolação de água nas fraturas, dessa forma, sendo considerada como moderadamente seca.

Figura 26 – Área 3 no TL1.



Fonte: Autoria Própria.

6.1.2.4 Área 4

A área 4 encontra-se na face do TL2, sendo essa face de menor altura que a do TL1. Na análise fora identificada a presença de quatro famílias de descontinuidade ou mais, com um espaçamento médio entre as famílias de 0,25 m o que se considera um espaçamento moderado. As fraturas presentes não possuíam preenchimento e suas aberturas variavam de 1 a 7 cm sendo categorizadas como descontinuidade entreabertas que variam de abertas até largas, e que se estendem além da face visível do talude. A rugosidade varia entre 14 e 16 cm, sendo considerada moderadamente rugosa, e a presença de água foi analisada através dos indícios de percolação nas fraturas, sendo então classificada como moderadamente seco.

Figura 27 – Área 4 no TL2.



Fonte: Autoria Própria.

6.1.2.5 Área 5

A área 5 se encontra no TL2 e, devido seu alto grau de alteração estrutural, foi inviável realizar a coleta de dados nesta área do talude. Porém, mostrou se a área de maior

instabilidade no mesmo, carecendo também de análise. As características para determinação de sua instabilidade, então, foram realizadas através de análise visual descritiva. O número de famílias identificado é da classe IX, categorizada como uma brecha ou maciço fraturado, os espaçamentos podem ser classificados como grandes, a persistência muito extensa, as aberturas não possuíam preenchimento e podem ser descritas como descontinuidades abertas variando entre extremamente largas e cavernosas, moderadamente rugosa, e a presença de água, assim como nas áreas anteriores, foi classificada como moderadamente seco, pelas evidências de percolação de água nas fraturas.

Figura 28 – Área 5 no TL2.



Fonte: Autoria Própria.

6.2 Classificação geomecânica

Nesta seção serão apresentados os resultados da caracterização geomecânica realizada em corte de estrada, os resultados foram obtidos por meio de teste de Martelo de Schmidt e Martelo geológico e pelos sistemas de classificação RQD, RMR - Básico, Q-Barton e SMR para TL 1 e TL2.

6.2.1 Classificação RQD

Para o cálculo do RQD foi realizada a correlação como proposta por Palmstron (1982). Dessa forma o RQD foi obtido através do Índice de juntas volumétricas J_v com auxílio da equação 6 e classificado de acordo com a Tabela 10. Assim o cálculo foi realizado para as 4 áreas com valores de espaçamento obtidos na Tabela 20.

Tabela 20 – Espaçamento entre descontinuidades da mesma família por área

Área	Espaçamento (m)
1	0,04
2	0,02
2	0,06
2	0,03
2	0,9
3	0,93
3	0,7
3	0,095
3	0,8
3	0,6
3	0,7
3	0,11
4	0,09
4	0,49
4	0,25

Fonte: Autoria própria.

$$J_v = \sum \frac{1}{S_i} \therefore J_v = \frac{1}{0,04} = 25$$

$$RQD = 115 - 3,3 * J_v \therefore RQD = 115 - 3,3 * 25 = 32,5$$

Tabela 21 – Resultados do RQD

RQD			
Área	Jv	RQD	Classificação
1	25	32.5	Ruim
2	101.1	-218.7	Muito ruim
3	26.5	27.7	Ruim
4	17.2	58.4	Média
5	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

Os valores obtidos do RQD a partir do Jv, classificam as áreas como demonstra a Tabela 21. Neste caso, o valor de RQD será utilizado como base para as demais classificações aplicadas neste trabalho. Na área 2 realizando o cálculo tanto do Jv quanto a definição do RQD através da equação de Hudson e Harrison (1997) propostas na tabela 13, na seção 4.6.4 o valor de RQD obtido sempre é baixo ou negativo.

6.2.2 Classificação RMR - Básico

O sistema de classificação de Bieniawski foi realizado para as 4 áreas de estudo, levando em consideração os fatores abordados na seção 4.6.1. Como o RMR é um somatório de pesos para cada descontinuidade, e com esses resultados foram calculados posteriormente os demais fatores de classificação como o índice Q e o SMR. Os valores apresentados na Tabela 22 são os pesos atributos por Bieniaswki nos Quadros 2 e 3.

Tabela 22 – Resultados do RMR - Básico para as 4 áreas analisadas.

Parâmetros	RMR			
	Valores Ponderados			
	Áreas			
	1	2	3	4
Resistência	7	7	12	7
RQD	8	3	8	13
Espaçamento	5	10	15	10
Condição	25	25	25	25
Presença de água	10	10	10	10
Persistência	0	0	0	0
Abertura	4	4	1	1
Rugosidade	1	1	3	3
Preenchimento	6	6	6	6
Grau de Alteração	5	5	5	5
RMR Básico	71	71	85	80
Classe	II	II	I	II

Fonte: Autoria própria.

De acordo com o valor do RMR-Básico as áreas analisadas são descritas a partir da Tabela 5 da seção 4.6.1. Desta forma, as áreas 1, 2 e 4 foram classificadas como boas, definido desta forma, o maciço como de boa qualidade e na área 3 a classificação obtida foi como muito boa, categorizando assim, o maciço como de muito boa qualidade. Vale ressaltar que a classificação RMR foi desenvolvida principalmente para áreas subterrâneas, dessa forma, o valor do RMR-Básico neste trabalho será utilizado então como um fator para o cálculo do SMR, que é o mais indicado para obras a céu aberto.

6.2.3 Classificação Q-Barton

Para a obtenção do Q - Barton realizou a análise da característica das descontinuidades descritas na seção 4.2.3. A Tabela 23 abaixo, os resultados obtidos de cada parâmetro que são utilizados para o cálculo do Índice-Q através da equação 4 proposta por Barton:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF}$$

$$Q = \frac{30}{2} \frac{1.5}{1} \frac{1}{1} = 22.5$$

Tabela 23 – Valores dos parâmetros analisados e o resultado do Índice Q.

Índice Q				
Valores				
Parâmetro	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4
RQD	30	10	30	60
Jn	2	15	15	15
Jr	1.5	1.5	2	2
Já	1	1	2	1
Jw	1	1	1	1
SRF	1	1	1	1
Q	22.5	1	2	8

Fonte: Autoria própria.

Com os valores obtidos do Índice Q pode-se então realizar uma categorização das áreas estudadas de acordo com a Tabela 9 presente na seção 4.6.3. Desta forma, tem-se como resultado a descrição de cada uma das áreas:

- A Área 1 foi categorizada como maciço de boa qualidade;
- a Área 2 foi categorizada como maciço de má qualidade, mesmo as áreas 1 e 2 sendo próximas. Esta variação em sua categorização se dá em sua grande parte, pela quantidade de famílias de descontinuidades identificadas;
- acerca da Área 3 obteve uma descrição de maciço de má qualidade;
- já em relação a Área 4 a sua categorização se deu como maciço de qualidade regular.

6.2.4 Classificação SMR

Para o cálculo do SMR é necessário o valor do RMR-Básico, calculado anteriormente e um conjunto de quatro fatores abordados na seção 4.6.5. Com o valor do SMR pode-se classificar o talude e sugerir tratamentos para sua estabilização se necessário. Na Tabela 24 estão presentes os resultados do SMR das áreas presentes no TL1 obtidos através da equação 7.

$$SMR = RMR_b + (F1 \times F2 \times F3) + F4$$

$$SMR = 71 + (1 \times 1 \times (-25)) + 8 = 54$$

Tabela 24 – Valores de SMR para as áreas analisadas no TL1.

Fator	SMR do TL1		
	Área		
	1	2	3
RMRb	71	71	85
F1	1	1	1
F2	1	1	1
F3	-25	-25	-25
F4	8	8	8
SMR	54	54	68

Fonte: Autoria Própria.

Com os valores obtidos do SMR pode-se então classificar o talude e se necessário realizar a recomendação de tratamentos de estabilização. Para a Área 1 e 2 o valor de SMR obtido foi de 54. Assim, a descrição do talude se dá como normal, considerado parcialmente estável, com a possibilidade de ocorrência de rupturas dos tipos planares ou muitas rupturas em cunha. Com uma probabilidade de 0,4 de ocorrer alguma ruptura, como medida estabilizadora pelo SMR recomenda-se proteção e/ou reforços. O talude encontra-se parcialmente estável, com chance de ocorrer rupturas, bem como a possibilidade de formação de blocos soltos. Recomenda-se, dessa forma, redes metálicas cobrindo a crista do talude, para evitar possíveis deslizamentos, reforços como pregagens e ancoragens, com concreto projetado, com a finalidade de evitar as rupturas, e no pé do talude recomenda-se uma vala para, caso algum bloco solto venha a cair, não chegar ao trajeto da rodovia. Para a Área 3 o valor obtido de SMR foi de 68. Dessa forma, pode-se descrever o talude como bom e estável, a possibilidade de ocorrer rupturas se dá pela queda de alguns blocos soltos com uma probabilidade de 0,2. Como O Valor de SMR foi acima de 65, não há a necessidade de medidas de estabilização ou contenção, já que o talude foi considerado estável.

Para o TL2 apenas fora levando em conta os valores da área 4, já que a área 5 se encontrava bastante instável para coleta de dados e visando a segurança essa área foi avaliada apenas visualmente. Na Tabela 25 os valores obtidos da área 4 através da equação 7.

Tabela 25 – Valor do SMR para o TL2.

SMR do TL2	
Fator	àrea 4
RMRb	80
F1	1
F2	1
F3	-25
F4	8
SMR	63

Fonte: Autoria Própria.

Dessa forma para a área 4 o valor de SMR obtido foi de 63, descrito como bom, e estável, com a possibilidade de rupturas por meio de blocos soltos, com uma probabilidade de 0,2. Sobre medidas de estabilização recomenda-se a utilização de proteções para melhor estabilidade. As técnicas de contenção recomendadas seria uma rede metálica na crista do talude, na parte do pé do talude faz-se necessária a criação de uma vala para a queda dos blocos não alcançarem a rodovia. Já na área 5, não foi possível a coleta de dados para a classificação em si, porém pela análise visual desta área, identificou-se sua falta de estabilidade. Desta forma, para essa área recomenda-se um retaludamento, pois a rocha é extremamente fraturada e ao pé do talude foi possível verificar vários blocos de rocha já caídos.

7 CONCLUSÃO

Os sistemas de classificação geomecânicos aplicados possibilitaram quantificar e qualificar a estabilidade dos dois taludes estudados. o RMR-Básico e o Q-Barton apresentaram resultados um pouco divergentes, variando para o Q-Barton (Índice Q) de maciço de muito má qualidade a maciço de qualidade regular, e para o RMR variando entre bom e muito bom. Já para a classificação do SMR de Romana caracterizaram-se as áreas como parcialmente estável e estável, com a necessidade de estabilização, segundo o SMR, para 4 das 5 áreas analisadas. As contenções indicadas foram redes metálicas, ancoragens e pregagens e valas ao pé dos taludes. Para a classificação de taludes em corte de estrada o Índice mais adequado é o SMR, já que o Q-Barton e RMR são voltados para maciços e taludes em obras subterrâneas. Porém é importante utilizá-los como comparativo para se ter uma melhor base e julgamento da estabilidade do talude.

Por meio da caracterização geológica dos taludes, foi possível identificar a variedade litológica, sendo formados por gnaiss, anfíbolitos e xistos. Desta forma, os taludes analisados (TL1 e TL2) apresentam rochas e estruturas típicas de áreas metamorfizadas, a resistência à compressão uniaxial estimada pelo martelo geológico e esclerômetro variaram de 80 - 250 Mpa.

Diante da análise realizada, sugere-se/recomenda-se para trabalhos futuros a análise cinemática dos taludes e um estudo da vibração gerada pelos caminhões que passam na rodovia, tendo em vista que diariamente passam veículos de carga pesada no local, e de que forma esta vibração poderia afetar a estabilidade dos taludes em sua volta.

REFERÊNCIAS

- ABICHEQUER, L. A.; SOUZA, L. E. de; NETO, R. O.; FABRÍCIO, J. F. Análise e interpretação de parâmetros de qualidade de maciço para proposição de modelo geomecânico. **Revista Monografias Ambientais**, p. 62–79, 2015.
- ARTHAUD, M.; VASCONCELOS, A.; OLIVEIRA, F. d. As seqüências metassedimentares do ceará central. In: **Congresso Brasileiro de Geologia**. [S.l.: s.n.], 1998. v. 40, p. 16.
- ATKINS, P.; JONES, L.; LAVERMAN, L. **Princípios de Química-: Questionando a Vida Moderna e o Meio Ambiente**. [S.l.]: Bookman Editora, 2018.
- AVILA, L. O. d. *et al.* Erosão na microbacia do arroio sarandi: voçoroca do buraco fundo, santa maria/rs. Universidade Federal de Santa Maria, 2009.
- AYDIN, A.; BASU, A. The schmidt hammer in rock material characterization. **Engineering Geology**, Elsevier, v. 81, n. 1, p. 1–14, 2005.
- AZEVEDO, I. C. D.; MARQUES, E. A. G. Introdução à mecânica das rochas. **Cadernos Didáticos**, v. 85, p. 11–15, 2006.
- BARTON, N. The shear strength of rock and rock joints. In: ELSEVIER. **International Journal of rock mechanics and mining sciences & Geomechanics abstracts**. [S.l.], 1976. v. 13, n. 9, p. 255–279.
- BASTOS, C. A. B. Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados. 1999.
- BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1989.
- BISHOP, E. Foundations of constructive analysis. 1967.
- BRADY, B. H.; BROWN, E. T. **Rock mechanics: for underground mining**. [S.l.]: Springer science & business media, 2006.
- CARMIGNANI, L.; FIORI, A. P. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes. rev. e ampl. **Curitiba: Ed. UFPR**, 2009.
- CAVALCANTE, J. C.; VASCONCELOS, A. M.; MEDEIROS, M. d. F.; PAIVA, I. G. Mapa geológico do estado do ceará. CPRM, 2003.
- CURI, A. **Minas a Céu Aberto: planejamento de lavra**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2014. 39–127 p.
- DEERE, D.; HENDRON, A.; PATTON, F.; CORDING, E. Design of surface and near-surface construction in rock. In: ONEPETRO. **The 8th US symposium on rock mechanics (USRMS)**. [S.l.], 1966.
- DUARTE, R. S. Análise cinemática e aplicação do método q-slope em maciço rochoso marginal à rodovia es-482. Cachoeiro de Itapemirim, 2022.
- FERRER, M.; VALLEJO, L. I. G. de. **Manual De Campa Para La Descripcion Y Caracterizacion De Macizos Rocosos En Afloramientos**. [S.l.]: Igme, 2007. v. 4.

- FIORI, A. P. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2015. 334–356 p.
- FONTINHAS, A. M. P. **Aplicação do SMR na avaliação da estabilidade de taludes de escavação em grauaques da Formação de Mértola**. Tese (Doutorado) — Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2012.
- FREITAS, S. B. N. **Caracterização geomecânica e classificações RMR (Bieniawsky) e SMR (Romana) de maciços rochosos em taludes do Funchal**. Tese (Doutorado) — Universidade da Madeira (Portugal), 2011.
- GOODMAN, R. E. *et al.* **Introduction to rock mechanics**. [S.l.]: Wiley New York, 1989. v. 2.
- GRIEBELER, N. P. Modelo para o dimensionamento de redes de drenagem e de bacias de acumulação de água em estradas não pavimentadas. Universidade Federal de Viçosa, 2002.
- HATHEWAY, A. W. **The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring; 1974–2006**. [S.l.]: Association of Environmental & Engineering Geologists, 2009.
- HOEK, E. Practical rock engineering. **Internet reference: www.rocscience.com**, 2000.
- HUDSON, J. A. **Rock mechanics principles in engineering practice**. [S.l.: s.n.], 1989.
- JAQUES, D. S. Caracterização e classificação de maciços rochosos da mina de volta grande, nazareno, minas gerais. Universidade Federal de Viçosa, 2014.
- KLICHE, C. A. Rock slope stability. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Littleton, CO (US), 1999.
- KOVARI, K.; TISA, A.; EINSTEIN, H.; FRANKLIN, J. Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression: revised version. **Intl J of Rock Mech & Mining Sci & Geomechanic Abs**, v. 20, n. 6, 1983.
- MATULA, M. Rock and soil description and classification for engineering geological mapping report by the iaeg commission on engineering geological mapping. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur**, Springer, v. 24, n. 1, p. 235–274, 1981.
- MESQUITA, J. B. d. Maciços rochosos em projetos hidrelétricos: proposta de classificação geomecânica. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2008.
- NEYRA, A. F. M. Caracterização das estruturas geológicas e estimativa da resistência ao cisalhamento das descontinuidades na mineração de cobre de tintaya, perú. 2006.
- PALMSTROM, A. The volumetric joint count—a useful and simple measure of the degree of rock mass jointing. In: **International Association of Engineering Geology. International congress. 4**. [S.l.: s.n.], 1982. p. 221–228.
- PAN, X.; HUDSON, J. A simplified three dimensional hoek-brown yield criterion. In: **ONEPETRO. ISRM International Symposium**. [S.l.], 1988.
- PARENTE, C. V.; ALMEIDA, A. R. d.; ARTHAUD, M. H. Geologia da folha boa viagem sb. 24-vd-ii. CPRM, 2008.

PINOTTI, A. M.; CARNEIRO, C. D. R. Geologia estrutural na previsão e contenção de queda de blocos em encostas: aplicação no granito santos, sp. **Terrae didática**, v. 9, n. 2, p. 132–168, 2013.

PRIEST, S. D.; HUDSON, J. Discontinuity spacings in rock. In: ELSEVIER. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**. [S.l.], 1976. v. 13, n. 5, p. 135–148.

ROMANA, M. New adjustment ratings for application of bieniawski classification to slopes. In: **Proceedings of the international symposium on role of rock mechanics, Zacatecas, Mexico**. [S.l.: s.n.], 1985. p. 49–53.

SEVERINO, P. R. A. Estabilidade de taludes por meio de análise cinemática e classificação de maciços rochosos ao longo da rodovia governador mário covas (br 101), município de são sebastião-sp. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2016.

SJÖBERG, J. **Analysis of large scale rock slopes**. Tese (Doutorado) — Luleå tekniska universitet, 1999.

SOARES, D. L.; POLIVANOV, H.; BARROSO, E. V.; MOTTA, L. M. G. da; SOUZA, C. C. de. Erodibilidade de solos em taludes de corte de estrada não pavimentada. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 1, p. 179–193, 2018.

WYLLIE, D. C.; MAH, C. **Rock slope engineering**. [S.l.]: CRC Press, 2004.

ANEXO A – IMAGENS DE CAMPO

Figura 29 – TL1 - Áreas 1 e 2.



Figura 30 – TL1 - Área 3.



Figura 31 – TL2 - Área 4.



Figura 32 – TL2 - Área 5.



Tabela 26 – Orientação das famílias de descontinuidade.

Área	Orientação (°)	
	Dip (β)	Azimute(α)
1	69	8
2	68	19
2	63	22
2	39	320
2	45	179
2	29	75
2	86	58
2	87	286
2	85	144
2	83	293
3	8	186
3	90	226
3	90	170
3	90	234
3	50	70
3	79	340
3	2	234
3	14	46
3	35	300
3	74	160
4	84	160
4	87	122
4	69	196
4	89	108
4	27	35
4	60	246
4	81	168
4	88	258
4	89	100
4	46	0

ANEXO B – ENSAIOS DE PICNÔMETRIA

Figura 33 – Amostra do TL1.



Figura 34 – Amostra do TL2



Tabela 27 – Ensaio 1 - TL1.

Massa picnômetro seco (P1)	30,71
Massa picnômetro com água destilada (P2)	80,64
Volume do picnômetro (P2-P1=VE)	49,93
Massa do material (P3)	9,35
Massa do material+ água destilada (P4)	86,13
Volume da água destilada (P4-P1-P3=VI)	46,07
Volume do material (VE- VI=V)	3,86
Densidade(P3/V)	2,42

Tabela 28 – Ensaio 2 - TL1.

Massa picnômetro seco (P1)	30,77
Massa picnômetro com água destilada (P2)	80,64
Volume do picnômetro (P2-P1=VE)	49,87
Massa do material (P3)	9,43
Massa do material+ água destilada (P4)	86,24
Volume da água destilada (P4-P1-P3=VI)	46,04
Volume do material (VE- VI=V)	3,83
Densidade(P3/V)	2,46

Tabela 29 – Ensaio 3 - TL1.

Massa picnômetro seco (P1)	30,74
Massa picnômetro com água destilada (P2)	80,64
Volume do picnômetro (P2-P1=VE)	49,9
Massa do material (P3)	9,77
Massa do material+ água destilada (P4)	86,49
Volume da água destilada (P4-P1-P3=VI)	45,98
Volume do material (VE- VI=V)	3,92
Densidade(P3/V)	2,49

Tabela 30 – Ensaio 1 - TL2.

Massa picnômetro seco (P1)	31,14
Massa picnômetro com água destilada (P2)	81,76
Volume do picnômetro (P2-P1=VE)	50,62
Massa do material (P3)	9,61
Massa do material+ água destilada (P4)	87,64
Volume da água destilada (P4-P1-P3=VI)	46,89
Volume do material (VE- VI=V)	3,72
Densidade(P3/V)	2,57

Tabela 31 – Ensaio 2 - TL2.

Massa picnômetro seco (P1)	31,19
Massa picnômetro com água destilada (P2)	81,76
Volume do picnômetro (P2-P1=VE)	50,57
Massa do material (P3)	9,65
Massa do material+ água destilada (P4)	87,65
Volume da água destilada (P4-P1-P3=VI)	46,81
Volume do material (VE- VI=V)	3,76
Densidade(P3/V)	2,56

Tabela 32 – Ensaio 3 - TL2.

Massa picnômetro seco (P1)	31,18
Massa picnômetro com água destilada (P2)	81,76
Volume do picnômetro (P2-P1=VE)	50,58
Massa do material (P3)	9,39
Massa do material+ água destilada (P4)	87,38
Volume da água destilada (P4-P1-P3=VI)	46,81
Volume do material (VE- VI=V)	3,77
Densidade(P3/V)	2,49

Figura 36 – Correlação para o número de rebotes do martelo de Schmidt.

Equação	Litologia	Referência
$\sigma_c = 9,97e^{(0,02R_L\rho)}$ $E = 0,19\rho^2R_L - 7,87$	28 litologias	Deere & Miller (1966)
$\sigma_c = 0,33(R_L\rho)^{1,35}$ $E = 4911,84(R_L\rho)^{1,06}$	25 litologias	Aufmuth (1973)
$\sigma_c = 2R_L$	30 litologias de rochas sedimentares	Singh et al. (1983)
$\sigma_c = 0,4R_N - 3,6$	20 litologias	Shorey et al. (1984)
$\sigma_c = 0,994R_L - 0,383$	10 litologias	Haramy & DeMarco (1985)
$\sigma_c = 0,88R_L - 12,11$	Carvão	Ghose & Chakraborti (1986)
$\sigma_c = 4,85R_L - 76,18$	Arenito, siltito, anidrito	O'Rourke (1989)
$\sigma_c = 2,98 \cdot e^{0,06R_L}$ $E = 1,77 \cdot e^{(0,07R_L)}$	Mica-xisto	Xu et al. (1990)
$\sigma_c = 4,29R_L - 67,52$ $E = 1,94R_L - 33,93$	33 litologias de carbonatos	Sachpazis (1990)
$\sigma_c = 0,0001R^{3,2658}$	Marga	Gökçeoglu (1996)
$\sigma_c = 4,5 \times 10^{-4} (R_N\rho)^{2,46}$	10 litologias	Kahraman (1996)
$\sigma_c = 6,97 \cdot e^{(0,014\rho R_N)}$	Carbonatos	Kahraman (2001)
$\sigma_c = 1,45e^{0,07R_L}$ $E = 1,04e^{0,06R_L}$	Granito	Aydin and Basu (2005)
$\sigma_c = 3,201R_L - 46,59$	Xisto	Shalabi et. al. (2007)
$\sigma_c = 0,0028R^{2,584}$ $E = 0,0987R^{1,5545}$	Calcário e xisto	Yagiz (2008)
$\sigma_c = \frac{1}{-0,022 + \frac{1,41}{R_L}}$	Rochas sedimentares carbonáticas	Bruno et al. (2012)