



CEFET-MG

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS UNIDADE

ARAXÁ

ANDRÉ LUIZ PRADO PARREIRA

**CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE UM TALUDE MARGINAL À
BR146 NO MUNICÍPIO DE ARAXÁ – MG**

**ARAXÁ-MG
2022**

ANDRÉ LUIZ PRADO PARREIRA

**CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE UM TALUDE MARGINAL A BR
146 NO MUNICÍPIO DE ARAXÁ – MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Allan Erlichman Medeiros Santos.

Co-orientadora: Prof^a Me Bruna Letícia dos Santos

**ARAXÁ-MG
2022**

ANDRÉ LUIZ PRADO PARREIRA

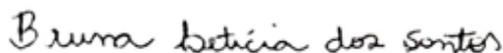
**CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE UM TALUDE MARGINAL A
BR 146 NO MUNICÍPIO DE ARAXÁ – MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

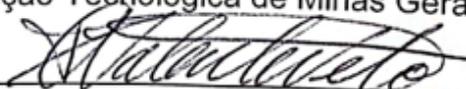
Data da Defesa: Araxá, 08 de Julho de 2022



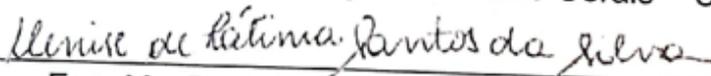
Orientador: Prof. Dr. Allan Erlichman Medeiros Santos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Unidade Araxá



Co-orientadora: Prof^a Me Bruna Letícia dos Santos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Unidade Araxá



Prof. Francisco de Castro Valente Neto
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Unidade Araxá



Eng. Me. Denise de Fátima Santos da Silva
Universidade Federal de Minas Gerais

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo que ele proporcionou na minha vida. Todas as minhas conquistas são para ele.

Agradeço a minha família, em especial, ao meu pai, Alberto Parreira Borges e a minha mãe Rosângela do Rosário Prado, por sempre estarem ao meu lado e por me ensinaram, além de muitas coisas, que o melhor caminho é a educação. Aos meus irmãos, que sempre acreditaram no potencial em ser o que eu quero ser.

Aos meus amigos, em especial para Renata Keila, Lorena Marielli, Iara Fernandes, Ítalo José, Carlos Eduardo e Rafael Araújo, meus eternos companheiros do CEFET e da vida. Eles sempre me deram a oportunidade de caminhar junto. Aprendi muito durante o percurso. Sem o conforto e o apoio para continuar lutando, tudo ficaria mais difícil para a realização desse trabalho.

Uma eterna gratidão ao CEFET-MG, que desde 2011 colaborou para meu crescimento pessoal e profissional. Me apresentou uma profissão na qual amo muito.

Aos meus professores do curso de Engenharia de Minas, que me ensinaram, corrigiram e me apoiaram durante todo o período que estive no CEFET. Um agradecimento especial para meu orientador, Allan Erlikhman, e para minha co-orientadora Bruna Santos, pela disponibilidade, paciência e profissionalismo em orientar todo esse trabalho.

Por fim, um agradecimento mais que especial para Camila Cristina Silva, meu braço direito, meu apoio maior, meu melhor amigo. Esteve presente em todas as situações da minha vida e foi testemunha de tudo que eu passei. Em todas etapas do trabalho ela esteve presente, de corpo e alma, pronta para ajuda. Sempre me ensina sobre os valores da vida que devemos carregar. Você é a melhor companheira que eu poderia ter em minha vida, amo você, minha querida namorada.

RESUMO

Com o crescimento populacional e a necessidade de adequações das estradas são necessárias obras de construção e manutenção de rodovias que possibilitam um melhor conforto e segurança à circulação da população. Dentre as obras que contribuem para tal melhorias se enquadram as atividades de retaludamento das encostas de ferrovias e rodovias. Esta prática requer níveis de segurança, com vistas ao fluxo de bens e serviço, além das estruturas do entorno. A falta de segurança em taludes, principalmente em perímetro urbano pode oferecer perdas imensuráveis à população, inclusive de vidas. A instabilidade de taludes pode ser causada pelo material (caso de solo, ou rochas extremamente fraturadas e/ou alteradas) ou estrutural no caso de formação e blocos pelas descontinuidades. A presente pesquisa realizou a caracterização geológica e geotécnica de um maciço em rocha/solo de um talude rodoviário na BR 146, no município de Araxá, estado de Minas Gerais. O talude em questão é fruto das obras da duplicação da rodovia e foi escolhido para o estudo devido a ele se localizar em uma região da cidade com bastante fluxo de pessoas e por apresentar características que podem colaborar para uma possível ruptura. A metodologia aplicada levou em consideração o referencial bibliográfico clássico, considerando livros e trabalhos que possuem relação com o objetivo principal, trabalhos de campo para mensuração e estimativa das características da rocha intacta e descontinuidades utilizando do teste de martelo de geólogo, caderneta de campo, bússola e análises visuais. Para alcançar os resultados foi aplicado o sistema de classificação dos maciços rochosos, especificamente o Q de Barton, GSI de Hoek e o *Rock Mass Rating de Bieniawski* com posterior análise cinemática para verificação de potenciais mecanismos de ruptura dos tipos planar e cunha. Utilizou-se o critério de resistência de Hoek-Brown generalizado para cálculos do parâmetro de resistência. O talude em questão foi considerado como sendo ruim de acordo com a classificação RMR, com padrão geomecânico ruim, conforme o Q de Barton e com condições razoáveis das descontinuidades, segundo a classificação de GSI de Hoek. Na análise cinemática, para o mecanismo de ruptura do tipo planar a probabilidade encontrada foi de 33,33% e para ruptura do tipo em cunha duas famílias foram responsáveis por 22,22% de probabilidade.

PALAVRAS-CHAVES: Segurança em Taludes. Caracterização Geológico-Geotécnica. Ruptura. Análise Cinemática. Classificação de Maciços Rochosos

ABSTRACT

With population growth and the need for road adjustments, construction and maintenance works are necessary for roads that allow for better comfort and safety for the population. Among the works that contribute to such improvements are the re-slopes of railways and highways. This practice requires levels of security, with a view to the flow of goods and services, in addition to the surrounding structures. The lack of safety on slopes, especially in urban areas, can cause immeasurable losses to the population, including lives. The instability of slopes can be conditioned by the material (in the case of soil, or extremely fractured and/or altered rocks) or structural in the case of formation and blocks by discontinuities. The present research carried out the geological and geotechnical characterization of a rock/soil mass of a road slope on BR 146, in the city of Araxá, state of Minas Gerais. The slope is the result of the road duplication works and was chosen for the study because it is located in a region of the city with a lot of people and because it presents characteristics that can collaborate for a possible rupture. The methodology applied took into account the classic bibliographic reference, considering books and works that are related to the main objective, field work to measure and estimate the characteristics of the intact rock and discontinuities using the geologist's hammer test, field notes camp, compass and visual analyses. To achieve the results, the rock mass classification system was applied, specifically Barton's Q, Hoek's GSI and Bieniawski's Rock Mass Rating with subsequent cinematic analysis to verify potential failure mechanisms of planar and wedge types. The generalized Hoek-Brown strength criterion was used for strength parameter calculations. The slope in question was considered to be poor according to the RMR classification, with a poor geomechanical pattern, according to Barton's Q, and with reasonable discontinuity conditions, according to Hoek's GSI classification. In the kinematic analysis, for the failure mechanism of the planar type, the probability found was 33.33% and for the failure of the wedge type, two families were responsible for 22.22% of probability.

KEYWORDS: Slope safety. Geological-geotechnical Characterization. Rupture. Cinematic Analysis. Rock Mass Classification.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1:(a) Representação esquemática da face de um maciço rochoso (b) representações das descontinuidades em duas regiões e (c) de um talude marginal à BR 146. (Autoria própria) .	16
Figura 2.2 :Medida de espaçamento de descontinuidades em face de rocha exposta. Adaptado Assis (2013).	21
Figura 2.3:Ilustração de ensaio de compressão uniaxial. Fonte: Bpiodi(2019).	22
Figura 2.4:Relação entre JRC e o grau de rugosidade. Fonte: Adaptado Barton & Choubey (1977) .	25
Figura 2.5:Ilustração esquemática mostrando a direção de mergulho e mergulho de um talude. Adaptado de Maia (2003).	27
Figura 2.6: Representação gráfica do critério de Hoek e Brown. Modificado de Assis (2013) .	36
Figura 2.7: Valores de m_i para diferentes rochas segundo Hoel (2000).	37
Figura 2.8: Seção longitudinal demonstrando a geometria do talude me planos formando uma ruptura planar. Campos (2020).	39
Figura 2.9:Representação estereográfica de uma análise cinemática de ruptura planar. Campos, 2020.	39
Figura 2.10: Ruptura em cunha encontrada no talude em estudo em diferentes escalas.	40
Figura 2.11: Condições geométrica para uma ruptura em cunha. (Campos, 2020).	40
Figura.2.12: Análise cinemática de ruptura em cunha.	41
Figura 3.1: Ruptura em cunha do talude em análise.	42
Figura 3.2: Região de retaludamento e ponto de análise.	42
Figura 3.3: Martelo de geólogo, caderneta de campo, bússola e prancheta com observações e tabelas de campo fixadas.	44
Figura 3.4: Trabalhos de campo referente a grau de rugosidade (a), escavação de rocha (b), preparação para técnica scanline(c), abertura das descontinuidades(d), espaçamento (e), persistência (f) e diferenciação de famílias de descontinuidades(g).	46
Figura 4.1:Face do talude da BR 146. Google Earth (2022).	48
Figura 4.2: Face do talude da BR 146 com veio de Anfibólito.	48
Figura 4.3: Veio de Anfibólito em evidência no talude da BR 146.	48
Figura 4.4:Famílias de descontinuidades. Fonte: Dips (2022)	49
Figura 4.5: Famílias de descontinuidades e foliação da rocha em região de maior alteração do talude.	50

Figura 4.6: Famílias 1, 2 e 3 mais a foliação da rocha em região menos alterada do talude. ...	50
Figura 4.7: Descontinuidade da família 1 e 2. Fonte: Autoria Própria.....	51
Figura 4.8: Valores de espaçamento médio em centímetros das famílias de descontinuidades e foliação de rocha.....	52
Figura 4.9: Valores máximos e mínimos de persistência encontrados no talude por família de descontinuidades e foliação da rocha.	53
Figura 4.10: Resultado da classificação GSI.	60
Figura 4.11: Resultados do critério Hoek e Brown.	61
Figura 4.12: Resultados do critério de Barton e Bandis.	62
Figura 4.13: Probabilidade de mecanismos de ruptura planar.....	64

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1: Classificação da qualidade da rocha de acordo com o valor de RQD em %.....	19
Tabela 2: Relação entre valor do índice volumétrico de juntas com a qualidade do maciço, quanto ao numero de descontinuidades.	19
Tabela 3: Espaçamento das descontinuidades.	21
Tabela 4: Grau de resistência do maciço rochoso.	22
Tabela 5: Classificação do maciço rochoso referente a sua alterabilidade.....	23
Tabela 6: Abertura de descontinuidades.....	26
Tabela 7: Classes de maciços rochosos de acordo com o sistema Q de Barton.	32
Tabela 9: Atitudes média das famílias de descontinuidades.	51
Tabela 10: Condições das descontinuidades.	53
Tabela 4: Grau de resistência do maciço rochoso.	54
Tabela 11: Grau de Resistência da rocha intacta.	54
Tabela 1: Classificação da qualidade da rocha de acordo com o valor de RQD em %.....	56
Tabela 12: Valores da classificação RMR do maciço	57
Tabela 13: Resultado do valor de RMR, classe, coesão e ângulo de atrito.	58
Tabela 14: Resultados do sistema de classificação Q.....	58
Quadro 1:Relação de coesão e ângulo de atrito como a classe RMR.....	30

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Fórmula para cálculo de RQD pelo comprimento de testemunho de sondagem de acordo com Deere (1967).	18
Equação 2.2: Fórmula para cálculo do RQD segundo Hudson & Harrison (1997).	19
Equação 3: Equação proposta por Barton et. al. (1974) para cálculo de índice Q.	31
Equação 4: Relação entre os sistemas RMR de Bieniawski e sistema Q de Barton. Fonte: Singh e Goel (1999).....	32
Equação 5: Relação de GSI e RMR, usada para valores de RMR maior ou igual a 23.	33
Equação 6: Relação de GSI e Q de Barton, usada para valores de RMR menores que 23.	33
Equação 7: Critério de Barton e Bandis.	34
Equação 8: Curva envoltória de Hoek e Brown para rocha intacta.....	35
Equação 9: Equação geral de Hoek e Brown.	36
Equação 10: Definição de m_i segundo o critério de Hoek e Brown.....	37
Equação 11: Definição de s segundo o critério de Hoek e Brown.	37
Equação 12: Definição de a segundo o critério de Hoek e Brown.	37

LISTA DE SIMBOLOS

RQD – Rock Quality Designation.

Jv – Índice volumétrico de juntas.

λ – Quantidade de descontinuidades por unidade de metro.

t – Tamanho do fragmento da rocha intacta.

S_i – Espaçamento entre as juntas em unidade de metro.

J_n – Número de família de juntas.

J_r – Grau de rugosidade das paredes da descontinuidade.

J_w – Índice do caudal afluyente.

SRF – Condições de tensão do maciço rochoso.

J_a – Grau de alteração das paredes das descontinuidades.

RMR – Rock Mass Rating.

Q – Valor obtido com o sistema de classificação Q de Barton.

φ – Ângulo de atrito.

GSI - Geological Strength Index.

r_p – Resistência ao cisalhamento.

J_{RC} - Coeficiente de rugosidade das juntas

JCS - Resistência à compressão das juntas.

φ_r - Ângulo de atrito residual.

σ_c - Resistência à compressão uniaxial.

α - Ângulo do mergulho do talude.

FS e F – Fator de segurança do talude.

φ_b – Ângulo de atrito entre duas superfícies que foram cortadas ou serradas.

r – Resistência à compressão superficial presente na descontinuidade alterad.

R – Resistência presente na descontinuidade alterada.

σ_{ks} – Tensão normal.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Definição de Maciço Rochoso	15
2.2	Parâmetros Geomecânicos	17
2.2.1	<i>Rock Quality Designation:</i>	18
2.2.2	Espaçamento Entre Descontinuidades	20
2.2.3	Resistência a Compressão Uniaxial:	21
2.2.4	Condições das Descontinuidades:	23
	<i>Alterabilidade do Maciço Rochoso:</i>	23
	<i>Rugosidade:</i>	24
	<i>Preenchimento</i>	25
	<i>Persistência</i>	25
	<i>Abertura</i>	26
2.2.5	Orientação das Descontinuidades:	27
2.3	Classificação dos Maciços Rochosos	28
2.3.1	Sistema de Classificação RMR de Bieniawski	28
2.3.2	Q de Barton	30
2.3.3	<i>Geological Strength Index – GSI</i>	32
2.4	Critério de Resistência	33
2.4.1	Critério de Barton e Bandis	34
2.4.2	Critério de Hoek e Brown	34
2.5	Mecanismo De Ruptura – Análise Cinemática	38
2.5.1	Ruptura Planar	38
2.5.2	Ruptura em Cunha	39
3.	METODOLOGIA	41
3.1	Área de Estudo	41
3.2	Materiais e Métodos:	43
3.3.1	Trabalho de Campo:	44
3.3.2	Classificação Geomecânica, parâmetros de resistência e mecanismo de ruptura:	46
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1	Geologia Local:	47
4.2	Teste do martelo de Geólogo – Resistência da Rocha Intacta:	54

4.3	Classificação Geomecânica:	55
	4.3.1 RQD.....	56
	4.3.2 RMR	57
	4.3.3 Q de Barton.....	58
	4.3.4 GSI.....	59
4.4	Estimativa do parâmetro de resistência:	61
4.5	Análise Cinemática:	63
5.	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
	REFERENCIAS	67
	ANEXO A – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR	70
	ANEXO B – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA Q DE BARTON	71
	ANEXO C – CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA GSI DE HOEK	74

1. INTRODUÇÃO

A construção de pontes, túneis subterrâneos, barragens, taludes de mina e rodovia são alguns dos inúmeros exemplos de obras de engenharia. Essas obras possuem como semelhança a relação direta com serviços geotécnicos, principalmente na etapa inicial de confecção da obra e para controle e estabilidade da obra. Dentre os serviços geotécnicos destaca-se a caracterização geológica-geotécnica de maciços rochosos.

De acordo com Amaral (2019), a caracterização de maciços rochosos engloba estudos de descrição geológica do maciço e caracterização por meio do levantamento de parâmetros referentes à rocha intacta e às descontinuidades do maciço. Ainda de acordo com o autor o objetivo da caracterização geológica-geotécnica do maciço rochoso é determinar os parâmetros de resistência do maciço que servirão para estudos de mecanismos de rupturas que posteriormente irão colaborar para análise de estabilidade de acordo com os mecanismos de ruptura.

Classificações geomecânicas foram propostas para estimativa de propriedades de resistência de maciços e das descontinuidades. O conhecimento sobre a classificação dos maciços rochosos é importante para estimativa da qualidade e prever possíveis movimentos de massa tanto em taludes urbanos como em taludes de mina. Conforme afirmado por Santos (2015) o estudo de formas de obtenção de parâmetros geomecânicos apresenta relevância por ser um tema atual. A explicação se fundamenta na dificuldade de obtenção de resultados confiáveis que em muitas ocasiões não condiz com o maciço estudado.

Para um talude às margens da BR 146, que é a obra de engenharia em estudo dessa pesquisa, a caracterização geológica-geotécnica contribui para posterior análise de talude que irão garantir níveis de segurança adequados. A caracterização garante melhor conhecimento sobre as características do maciço rochoso, que são utilizadas para afirmação de nível de segurança. O talude em estudo localiza-se na cidade de Araxá, em perímetro urbano e faz parte de um trecho rodoviário de muita circulação de pedestres, automóveis e caminhões. Sendo assim, o estudo de caracterização geológica-geotécnica do maciço rochoso irá contribuir para futuros estudos de estabilidade de talude.

Em termos de segurança, um talude que se rompe pode trazer consequências imensuráveis à população. A ruptura de um talude rodoviário pode afetar a economia, pois aumenta o atraso de entregas de produtos, e consequentemente perda de recursos. Além disso, poderá haver gastos para reconstrução da via, interrupção do fornecimento de energia e ainda,

geração de impactos ambientais que devem ser controlados ou sanados da melhor maneira possível.

Para a população, uma ruptura pode ocasionar em risco de sobrevivência e pode até ocasionar a morte. Nos diversos meios de comunicação como em jornais e sites de jornalismo e notícias, vê-se sobre os acontecimentos gerados pela chuva no ano de 2022 que prova a importância de conhecer sobre acidentes com rupturas de taludes. Noticiou-se em telejornais, que na região sudeste por exemplo, em poucos dias de chuvas acontecimentos geológicos tais como enchentes, rupturas e deslizamentos de terra que determinou a morte de centenas de pessoas, fora os inúmeros feridos e as perdas materiais que milhares de pessoas tiveram. Além disso, um caso específico ocorrido em Capitólio, Minas Gerais, neste mesmo ano, onde houve uma ruptura de uma escarpa rochosa que culminou em vítimas com ferimentos leves, graves e até mesmo vítimas fatais.

Posto isto, o objetivo geral do trabalho foi realizar a caracterização geológica-geotécnica de um maciço em rocha/solo que forma um talude rodoviário na BR 146, no município de Araxá no estado de Minas Gerais. Para alcançar objetivo principal do presente trabalho, foi necessário obter os seguintes objetivos específicos:

- Revisão bibliográfica do tema abordado
- Descrição litológica do maciço rochoso
- Caracterização das descontinuidades
- Levantamento das atitudes das famílias de descontinuidades do talude
- Classificação segundo Q de Barton, GSI de Hoek e o *Rock Mass Rating de Bieniawski*.
- Análise cinemática do maciço rochoso para ruptura planar e cunha.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico será abordada a revisão bibliográfica que irá apresentar os principais conceitos sobre os maciços rochosos, os principais parâmetros geomecânicos para rocha intacta e descontinuidades, as classificações dos maciços rochosos e os critérios de resistências com foco nos métodos aplicados a essa pesquisa. Por fim os mecanismos de ruptura, principalmente no que diz respeito às rupturas planar e cunha serão tratados.

Importante destacar o foco do estudo na análise cinemática para as rupturas planares e cunha. Isto foi determinado através de uma análise visual do talude onde foram identificadas várias regiões do mesmo talude em tamanhos que variam de centímetros a alguns metros, e assim, decidiu-se focar nesses dois mecanismos de ruptura.

2.1 Definição de Maciço Rochoso

O maciço rochoso é um meio descontínuo formado pelo material rocha intacta e descontinuidades que o atravessam, como é inferido por Azevedo & Marques (2002). Adiante, os autores afirmam também que as descontinuidades são representadas por todos os tipos de fraturas, independentemente da escala, que indicam que o maciço rochoso não é contínuo. De acordo com Jacques (2014) as descontinuidades irão limitar um maciço rochoso e são definidas como sendo planos de fraquezas que apresentam quebra do padrão de propriedades mecânicas e que poderão controlar o comportamento do maciço rochoso conforme mostra Assis (2013).

As descontinuidades que seguem um padrão no que se refere às atitudes e origem, dentro de certos limites, dispostas de forma paralelas, predominantemente, formam as famílias de descontinuidades (Amaral, 2019). Na Figura 2.1 é possível aplicar os conceitos de maciço rochoso, família de descontinuidade e rocha intacta. Uma rocha intacta é a parte do maciço rochoso que não possui descontinuidades em uma escala macro. De acordo com Azevedo & Marques (2002) corresponde ao material que se encontra entre as fraturas formando a matriz rochosa. O comportamento de um maciço rochoso será função da rocha intacta e das descontinuidades (Assis, 2013).

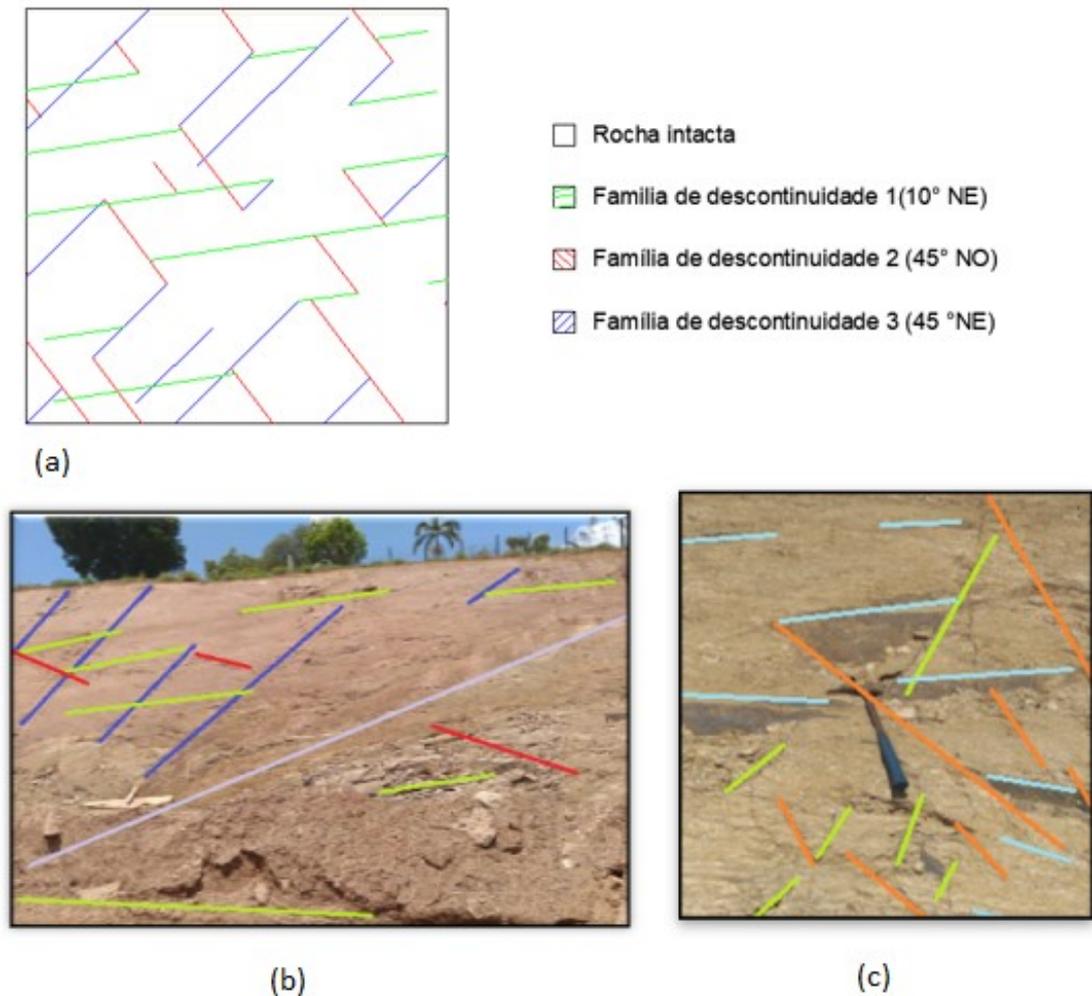


Figura 2.1:(a) Representação esquemática da face de um maciço rochoso (b) representações das discontinuidades em duas regiões e (c) de um talude marginal à BR 146. (Autoria própria)

Como mostra a ISRM (1981), a orientação, o espaçamento, a persistência, a rugosidade, o preenchimento e as aberturas, são as principais características das discontinuidades com implicações no comportamento geotécnico dos maciços rochosos. Além dessas características, Santos (2015) enfatiza que devem ser considerados a influência da água que pode percolar nas discontinuidades e o estado de alteração do maciço rochoso.

O estudo das famílias de discontinuidades assim como da rocha intacta, pode sugerir possíveis formas de rupturas e contribuir para métodos de contenção de massas. Contudo, consoante a Assis (2013), realizar a caracterização e classificação de um maciço rochoso significa inferir sobre o seu comportamento quando sujeito às tensões com auxílio dos parâmetros geomecânicos, caracterizando, portanto, o conceito de mecânica das rochas.

Santos (2015) explica que os maciços podem ser classificados como sendo competentes ou brandos. Afirmar que o maciço é mais competente do que outro, implica dizer que sua resistência mecânica é maior. Maciços competentes possuem ainda menores dificuldades quanto ao levantamento de suas propriedades geomecânicas, o que facilita a sua classificação. Em contrapartida, maciços brandos são rochas que possuem menor resistência mecânica, quanto mais alterada a rocha, menor será sua resistência mecânica. A observação das suas propriedades geomecânicas são mais difíceis de ser mensurada, principalmente para as rochas que já estão em um grau de alteração tão elevado a ponto de ser considerada como solo.

2.2 Parâmetros Geomecânicos

Amaral (2019) afirma que os parâmetros geomecânicos estão relacionados às características do maciço rochoso. Eles são observados de acordo com as discontinuidades que contribuem para o comportamento e classificação do maciço rochoso.

Azevedo & Marques (2002) citam que: A natureza, localização e orientação das discontinuidades afetaram profundamente a maioria das propriedades dos maciços rochosos, como a deformabilidade, resistência e permeabilidade, e, portanto, afetam diretamente às aplicações da engenharia das rochas.

Além disso, boa parte das rupturas acontecem ao longo dos planos de fraqueza dos maciços rochosos, conforme Jaques (2014).

De acordo com Oliveira e Brito (1998) as propriedades de maior relevância são orientação espacial das discontinuidades, persistência da estrutura, quantidade volumétrica das discontinuidades, morfologia presente na superfície de cada discontinuidade, características dos preenchimentos e das aberturas, e, por fim, a conectividade entre as aberturas.

Os parâmetros analisados neste trabalho estão relacionados a três sistemas de classificações de maciços rochosos, o *Rock Mass Rating* (RMR), sistema Q de Barton e o GSI de Hoek. Para tanto, não serão explorados todos os parâmetros geotécnicos e sim àqueles que correspondem a cada sistema de classificação.

Neste trabalho foram avaliados os parâmetros Rock Quality Designation (RQD), espaçamento das discontinuidades, resistência à compressão uniaxial, condições das discontinuidades e a orientação da discontinuidade para o sistema de classificação RMR. Para o sistema Q de Barton, além do RQD, serão discutidos os seguintes índices relativos:

- ao número de famílias de descontinuidades;
- à influência rugosidade das descontinuidades;
- à alteração das paredes das descontinuidades;
- à ação de água subterrânea e
- ao estado de tensões do maciço.

Para a classificação segundo o sistema de GSI de Hoek são utilizados os parâmetros de condições de superfície e a estrutura que o maciço rochoso apresenta. Tanto os parâmetros para as classificações de maciços rochosos pelos sistemas Q de Barton e o GSI de Hoek serão explicados nos itens 2.3.

2.2.1 *Rock Quality Designation:*

Traduzido para o português, o Índice de Qualidade da Rocha, RQD foi desenvolvido em 1964 com uma forma de avaliação da qualidade da rocha de testemunho de sondagem (GOEL & SING,2011). O testemunho por sua vez deve possuir comprimento de rocha intacta de pelo menos 10 cm por 54,7 mm de diâmetro para ser considerada para o cálculo do RQD. Por muito tempo, foi considerado como sendo um sistema de classificação dos maciços rochosos.

A obtenção do índice é calculada, quando se faz a sondagem, sobre a porcentagem dos pedaços intactos mensurados em relação ao comprimento total do furo de sondagem, respeitando assim, a Equação 1, em que L corresponde ao comprimento do maciço rochoso.

$$RQD (\%) = \frac{\sum L > 10CM}{\sum L} \times 100$$

Equação 1: Fórmula para cálculo de RQD pelo comprimento de testemunho de sondagem de acordo com Deere (1967).

O método pelo testemunho de sondagem é conhecido como sendo o método mais prático para cálculo do RQD, porém oneroso. No entanto é possível mensurar tal parâmetro sem que seja necessário realizar a sondagem por meio da fórmula de Palmström (1982) e Hudson & Harrison (1997) que estabelecem uma correlação entre a frequência das descontinuidades e o RQD, conforme ilustra a

Equação 2.1, em que Si refere-se ao espaçamento das juntas em metros para uma referida família de juntas. Ainda sobre a

Equação 2.1 o termo $\sum 1/S_i$ é comumente substituído na literatura pelo índice volumétrico de juntas (J_v), que representa o número de juntas existentes por metro cúbico de maciço rochoso. Sobre a Equação 2.2 afere-se que o RQD pode ser mensurado pela frequência

de descontinuidades presentes em uma unidade de comprimento. Segundo Santos (2015), o mínimo valor de f aconselhado é de 5 metros.

$$RQD (\%) = 115 - 3,3 \sum \frac{1}{S_i}$$

Equação 2.1: Fórmula para cálculo do RQD segundo Palmström (1982)

$$RQD(\%) = 100e^{-0,1f} x(0,1f + 1)$$

Equação 2.2: Fórmula para cálculo do RQD segundo Hudson & Harrison (1997).

Deere (1967) relacionou a qualidade da rocha com seu valor de RQD (Tabela 1). Segundo o autor, a qualidade do maciço rochoso poderá variar de “muito fraco” a “excelente”.

Tabela 1: Classificação da qualidade da rocha de acordo com o valor de RQD em %.

RQD(%)	Qualidade do Maciço	Índice de qualidade
0 – 25	Muito fraco	A
25 – 50	Fraco	B
50 – 75	Regular	C
75 – 90	Bom	D
90 – 100	Excelente	E

Fonte: adaptado de Deere et al. (1967).

Palmström em 2005 também conseguiu classificar através de uma tabela a relação entre o índice volumétrico de juntas com um termo qualitativo para a descontinuidade, podendo variar de “sem descontinuidade” até “extremamente descontínuo”. A Tabela 2 representa o que foi proposto por Palmström, indicando que quanto maior o valor do índice J_v mais descontínuo tende a ser o maciço rochoso.

Tabela 2: Relação entre valor do índice volumétrico de juntas com a qualidade do maciço, quanto ao numero de descontinuidades.

Termo para J_v	Valor de J_v	Termo para descontinuidade
Extremamente Baixo	<0,3	Sem descontinuidade
Muito baixo	0,3 – 1,0	Muito pouco descontínuo
Baixo	1,0 – 3,0	Pouco descontínuo
Moderadamente baixo	3,0 – 10,0	Moderadamente descontínuo
Alto	10,0 – 30,0	Muito descontínuo
Muito alto	30,0 – 100	Bastante descontínuo
Extremamente alto	>100	Extremamente descontínuo

Fonte: Adaptado de Palmström, 2005

2.2.2 Espaçamento Entre Descontinuidades

Segundo Amaral (2019) o espaçamento é a distância perpendicular entre duas descontinuidades da mesma família, ou seja, é a menor distância possível entre descontinuidades de mesma família que podem ser expressadas em centímetros e/ou em metros. Amaral (2019) afirma que descontinuidades mais distantes indicam blocos de maiores dimensões e também um número menor de descontinuidades ao comparar a um ambiente com valor de espaçamento menor. O espaçamento médio das descontinuidades segue um padrão e seu valor deve ser devidamente guardado e pode ser definido como a distância média entre as descontinuidades de uma mesma família.

Espaçamentos menores condicionam um comportamento próximo dos materiais granulares, o que modifica, conforme Assis (2013), o modo de ruptura de translacional para circular e representam, de certa forma, menor qualidade do maciço rochoso. Consoante a Oliveira e Brito (1998), este parâmetro tem a finalidade de exprimir a quantidade relativa encontrada de descontinuidades. A qualidade do maciço é decrescida com menores espaçamentos, pois pode-se concluir que o maciço rochoso é mais fraturado e sua resistência ao cisalhamento, reduzida, em contrapartida, indica um aumento de permeabilidade.

O espaçamento pode ser obtido medindo-se a distância perpendicular entre duas descontinuidades de uma mesma família ou pela técnica de scanline. Nesta técnica, introduz-se uma linha contida na superfície do maciço, em que os valores de espaçamento obtidos na superfície desse maciço irão interceptar a scanline durante o seu comprimento (AMARAL,2019).

A forma de medição, mostrada por Assis (2013) é através da trena, que deve ser colocada perpendicularmente ao traço exposto da família de descontinuidades, na medida do possível.

A Figura 2.2 ilustra como são medidos os espaçamentos com a trena. É possível observar três famílias de descontinuidades, representadas pelos sistemas S1, S2 e S3. A trena em questão está medindo a distância entre as descontinuidades da família S3. O mesmo instrumento faz um ângulo de 90° (noventa graus) com a descontinuidade. Na prática, quando não é possível orientar a trena em ângulo reto, deve-se aferir o ângulo entre o instrumento e as descontinuidades para realizar as correções por meios de artifícios trigonométricos.

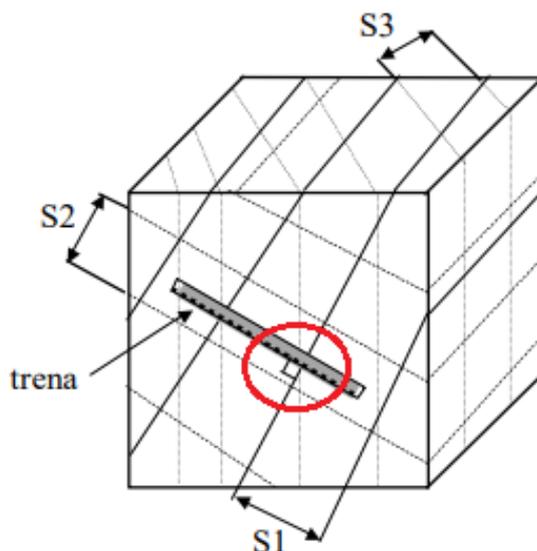


Figura 2.2 :Medida de espaçamento de descontinuidades em face de rocha exposta. Adaptado Assis (2013).

Assis (2013) argumenta que os dados obtidos sobre o espaçamento devem ser tratados estatisticamente para uma melhor interpretação dos dados. A Tabela 3: Espaçamento das descontinuidades. mostra como pode ser descrito o espaçamento das descontinuidades, que podem variar de extremamente pequeno, menores que 20 mm, a extremamente grandes, maiores que 6000mm.

Tabela 3: Espaçamento das descontinuidades.

Intervalo de espaçamento (mm):	Valor qualitativo do espaçamento:
< 20	Extremamente pequeno
20 a 60	Muito pequeno
60 a 200	Pequeno
200 a 600	Moderado
600 a 2000	Grande
2000 a 6000	Muito Grande
>6000	Extremamente grande

Fonte: Adaptado de Assis, 2013.

2.2.3 Resistência a Compressão Uniaxial:

Em concordância com Amaral (2019), quanto maior a resistência do maciço rochoso mais eficientemente ele suporta as tensões que a ele são aplicadas o que resulta em um comportamento mais estável de um talude. Existem formas mais precisas para determinação da resistência mecânica do maciço rochoso, como por exemplo pelo ensaio de compressão uniaxial (Figura 2.3) e triaxial, que são testes em que uma amostra é submetida a cargas de prensas até o seu colapso.

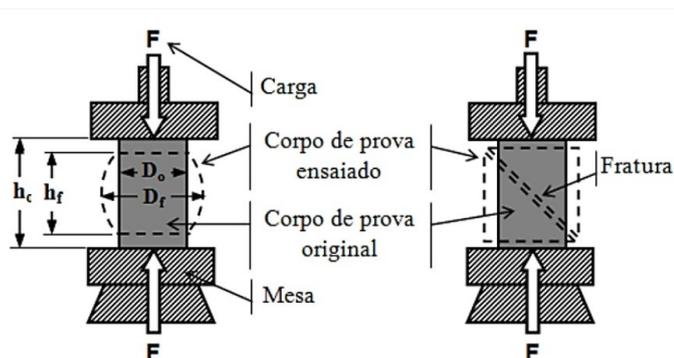


Figura 2.3: Ilustração de ensaio de compressão uniaxial. Fonte: Bpiodi(2019)

Na impossibilidade de determinação da resistência por meio dos ensaios, é possível aplicar outras técnicas, como o teste de martelo de geólogo e o teste por meio do Esclerômetro de Schmidt, como é abordado por Santos (2015). O teste do martelo de geólogo é mais simples em termos de aplicação, apresenta resultados imediatos e coerentes com a realidade, e esta técnica será a única usada nesse trabalho. O resultado da resistência no martelo teste do martelo é obtido em faixas e relacionado com a característica do material em resposta a aplicações de golpes do martelo de geólogo.

A Tabela 4: Grau de resistência do maciço rochoso apresenta os seis graus de resistência principais para o maciço rochoso, que são medidos partir de 0,25 Mpa, segundo a ISRM (1981). O material de grau seis (R6) são os de maiores valores de resistência, enquanto que o de grau zero (R0) apresenta menor valor. Determinando o grau de resistência, é possível estimar uma faixa de valores de resistência do maciço rochoso.

Tabela 4: Grau de resistência do maciço rochoso.

Grau	Resistência (Mpa)	Descrição	Aspectos observados
R0	0,25 – 1,00	Extremamente branda	Marcada pela unha
R1	1,00 – 5,00	Muito branda	Esmigalha-se com um golpe de martelo. Raspada com canivete.
R2	5,00 – 25,0	Branda	Marcada com a ponta do martelo em golpe firme. Raspada com dificuldade com o canivete.
R3	25,0 – 50,0	Resistência média	Amostras fraturadas com único golpe de martelo. Não risca com canivete.
R4	50,0 – 100	Resistente	Mais de um golpe de martelo para fraturar a rocha.
R5	100 – 250	Muito resistente	Muitos golpes de martelo para fraturar a rocha.
R6	> 250	Extremamente resistente	Amostras somente lascadas com golpes de martelo.

Fonte: Adaptado do ISRM (1981).

2.2.4 Condições das Descontinuidades:

As descontinuidades podem estar presentes de várias formas, formando os limites da rocha intacta. Falhas, juntas, planos de acamamento, planos de foliação, veios, diques e fendas de tração são exemplos de tipos de descontinuidades. Os parâmetros que vão definir as condições das descontinuidades são: o grau de alteração do maciço rochoso, a rugosidade das descontinuidades, o preenchimento, a persistência e a abertura da descontinuidade.

Alterabilidade do Maciço Rochoso:

Sobre a alteração, ou alterabilidade dos maciços rochosos, ou ainda, graus de alterabilidade, Jacques (2014) define ser a maior ou menor capacidade dos minerais de resistirem às transformações de suas propriedades, sendo elas física e químicas quando expostos a ambientes diferentes daqueles em que foram formados.

Tabela 5: Classificação do maciço rochoso referente a sua alterabilidade.

SIGLA	INTITULAÇÃO	EXPLICAÇÃO
W1	Sem alteração (rocha sã).	Alteração mineralógica nula ou incipiente. Minerais preservam brilho original, cor e clivagem. Foliação visível e selada. Resistência original da rocha não afetada pela alteração.
W2	Pouca alteração.	Leve descoloração e alteração na matriz e ao longo das descontinuidades. Foliação visível e selada. Juntas fechadas, paredes ligeiramente alteradas. Resistência original da rocha parcialmente.
W3	Alteração moderada.	Matriz descolorida, com evidências de oxidação. Juntas abertas (<1.00 mm) e oxidadas, podendo ocorrer material mais alterado ao longo das descontinuidades. Foliação realçada pelo intemperismo. Resistência afetada.
W4	Muita alteração.	Alteração acentuada, alguns materiais parcialmente decompostos. Matriz totalmente oxidada e cores muito alteradas. Fraturas abertas (2 <e <5 mm) e oxidadas. Foliação realçada pelo intemperismo. Deslocamentos ao longo da foliação.
W5	Alteração extrema.	Material completamente alterado para solo estruturado. Extremamente descolorido, minerais resistentes quebrados e outros transformados em argilominerais. Foliação preservada. Juntas não discerníveis.
W6	Solo residual.	Material totalmente transformado em solo.

Fonte: Adaptada de ISRM (1981).

Em seus trabalhos, Amaral (2019) destaca que a alteração das rochas ocorre através de agentes endógenos e exógenos. Para o primeiro agente destaca-se a dependência de atividades magmáticas, já o segundo agente prevalece a ação do intemperismo sobre as

rochas e são os responsáveis pela garantia da queda de resistência mecânica do maciço rochoso, a variação da deformabilidade, da porosidade/permeabilidade nos vários níveis do perfil que caracteriza o intemperismo.

A Tabela 5 retrata como as rochas são classificadas quanto a sua alterabilidade, segundo a ISRM. Uma rocha sã, que teve alteração praticamente nula e/ou que não teve sua resistência original afetada pela alteração, é classificada como W1. Em contrapartida, solos residuais, que são materiais resultante de intensa alteração das rochas, recebe sigla W6.

Rugosidade:

Para Amaral (2019) a rugosidade é a propriedade que indica a irregularidade ou aspereza da parede da descontinuidade. O grau de rugosidade é organizado pelo coeficiente de rugosidade das juntas (JRC) e irá variar de 0 até 20, o JRC igual a 20 significa uma rugosidade elevada enquanto a de menor JRC (0 a 2), representam paredes de descontinuidades extremamente lisas, conforme é mostrado na Figura 2.4.

A rugosidade também deve ser analisada em um estudo geológico – geotécnico do local. Ela representa o quanto a parede da descontinuidade possui aspecto liso e uniforme ou o quanto sua superfície se desvia em relação a esse aspecto. O ângulo da rugosidade é chamado de dilatância. (AMARAL, 2019)

Importante salientar que o valor de JRC é considerado como sendo um valor de caráter intuitivo, o que implica dizer que ao realizar a análise da superfície da descontinuidade muitos profissionais podem ter opiniões diferentes. Tais opiniões não costumam ter diferenças tão discrepantes em relação a determinação.

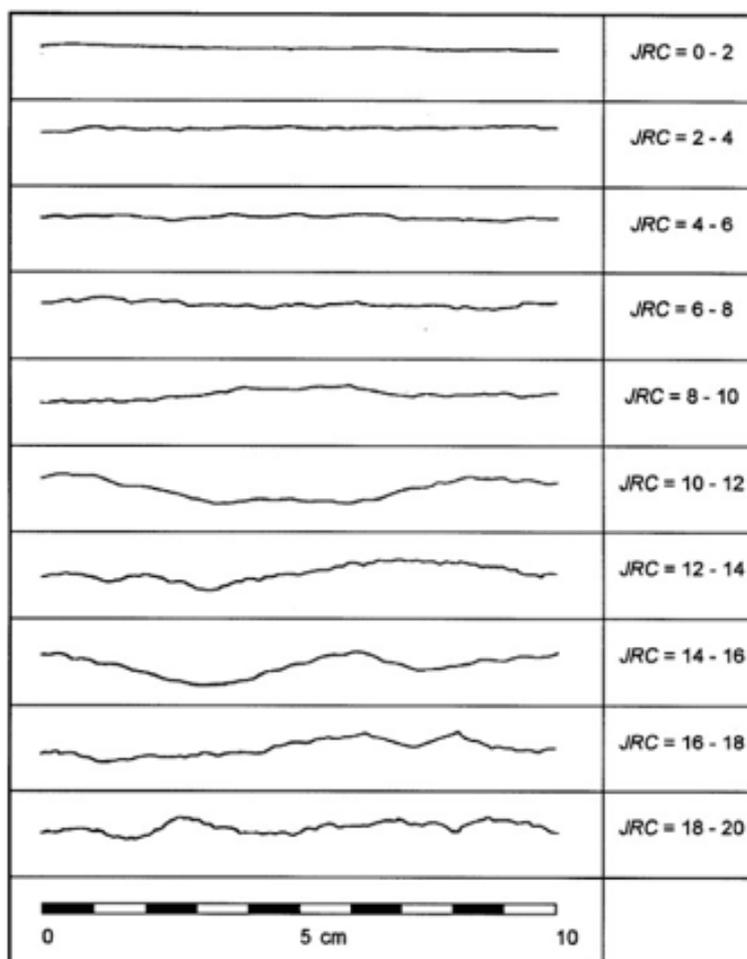


Figura 2.4:Relação entre JRC e o grau de rugosidade. Fonte: Adaptado Barton & Choubey (1977)

Preenchimento

As discontinuidades podem ou não ter material entre suas paredes, o preenchimento é quando algum tipo de material ocupa as aberturas entre as paredes de uma mesma discontinuidade. Para Guidicini e Nieble (1983), discontinuidades existentes no interior de um maciço rochoso, originadas de processo de alteração diferencial são elementos estruturais que possuem enorme controle sobre as condições de estabilidade de maciços e encostas. O preenchimento está relacionado com a abertura das discontinuidades e com a resistência da rocha. De acordo com Oliveira e Brito (1998) as aberturas preenchidas são importantes por afetar a resistência ao cisalhamento das discontinuidades e a sua condutividade hidráulica.

Persistência

A persistência de uma família de discontinuidades é o comprimento médio da soma de cada discontinuidade pertencente aquela família. A persistência reflete, portanto, a magnitude e o controle das discontinuidades no maciço rochoso.

Segundo Oliveira e Brito (1998), trata-se de um parâmetro geométrico (em termos estruturais) e dimensional de uma geologia a ser analisada.

É bastante influenciado pela orientação espacial e pela dimensão superficial da rocha onde a persistência está exposta. Existe a possibilidade da forma, assim como a dimensão de uma descontinuidade, serem controladas determinadas características da geometria do maciço rochoso analisado.” (AMARAL,2019)

Abertura

De forma simples a abertura de uma descontinuidade é definida como sendo a distância média entre as paredes das descontinuidades. A abertura irá controlar outros parâmetros, como a percolação de fluidos, o preenchimento e a interconexão entre as superfícies (OLIVEIRA & BRITO,1998)

Assis (2013) afirma que descontinuidades que foram preenchidas, mas que tiveram seu preenchimento levado localmente são caracterizadas como aberturas. Segundo o mesmo autor, grandes aberturas indicam mais deslocamentos cisalhantes de descontinuidades com apreciável rugosidade e ondulação.

As aberturas são medidas com auxílio de trenas, lâminas padrões e régua graduada. São descritas como, bem fechada, fechada, parcialmente aberta, aberta, moderadamente larga, larga, extremamente larga e cavernosa, que estão ligadas a feições fechadas, falhadas e abertas, como é mostrado na Tabela 6 segundo Assis (2013).

Tabela 6: Abertura de descontinuidades.

Abertura (mm)	Descrição	Feição
<0,1	Bem fechada	
0,1 A 0,25	Fechada	Feições Fechadas
0,25 A 0,5	Parcialmente aberta	
0,5 A 2,5	Aberta	
2,5 A 10	Moderadamente larga	Feições Falhadas
10	Larga	
10 A 100	Muito larga	
100 A 1000	Extremamente larga	Feições Abertas
>1000	Cavernosa	

Fonte: Adaptado de Assis, 2013

2.2.5 Orientação das Descontinuidades:

A orientação da descontinuidade é conhecida como sendo sua atitude no espaço através de uma direção do mergulho e pelo mergulho da linha de maior inclinação sobre o plano da descontinuidade. Sua orientação pode ser apresentada através de rumo, que representa o ângulo no quadrante geográfico de referência, ou pelo azimute, que é representada o ângulo em relação ao norte. Para ambos os casos são medidos os ângulos de interseção entre o plano de descontinuidade com o plano de afloramento. (ASSIS,2013)

O mergulho é representado, segundo Assis (2013), perpendicularmente à direção no plano da descontinuidade em relação a um plano horizontal. Em mecânica das rochas, a orientação da descontinuidade é feita pelo ângulo de mergulho (que varia de 0 a 90 graus) seguido do azimute do vetor mergulho (que varia de 0 a 360 graus). A Figura 2.5 ilustra quais os ângulos de mergulho (β) e direção do mergulho (α) de um talude qualquer. Nota-se ainda, pela mesma figura a necessidade de mensuração da direção do mergulho ser feita em relação ao Norte Magnético.

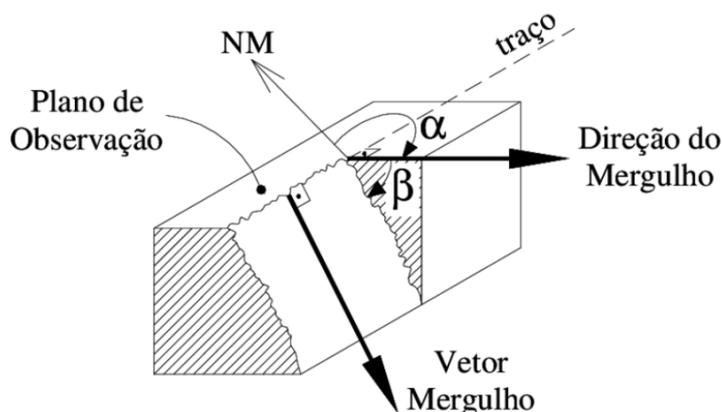


Figura 2.5: Ilustração esquemática mostrando a direção de mergulho e mergulho de um talude. Adaptado de Maia (2003)

Na determinação de ambos valores podem ser utilizados as bússolas e os clinômetros, que possuem precisão relacionadas às acessibilidades ao plano de interesse, extensão em área do plano exposto, grau de regularidade do plano e rugosidade. Não se pode esquecer, portanto, que bússolas funcionam por mecanismo magnético, sendo assim, anomalias magnéticas também irão contribuir para a imprecisão das medições.

Para Assis (2013), o estudo da orientação das descontinuidades cresce quando condições para escorregamento possuem grande probabilidade de ocorrer. Tais condições estão interligadas a baixa resistência ao cisalhamento e ao número de família e/ou

descontinuidades presentes no meio que podem ocasionar uma ruptura. Sendo assim, a orientação das descontinuidades irá controlar os possíveis modos de instabilidades e desenvolvimentos de deformações excessivas.

Hoek & Brown (1981) ensinam que a representação sistemática desses dados pode ser apresentada através de diagramas de blocos, diagramas de roseta ou projeção esférica, o que facilita bastante a visualização das feições estruturais e posterior análise de estabilidade. Completam ainda que o método de projeção esférica apresenta de melhor forma os dados geológicos por possibilitar realizar a estatística da distribuição das descontinuidades por métodos gráficos, que por sua vez podem ser realizados também em softwares específicos.

2.3 Classificação dos Maciços Rochosos

A natureza do maciço rochoso é muito complexa, o que explica a necessidade de uso de ferramentas teóricas que possibilitam analisar o controle de seu comportamento (ASSIS,2013). A fim de analisar o processo num espaço de tempo e espaço, foram criadas as classificações de maciços rochosos. Existiram inúmeras classificações de maciços rochosos, como é mostrado por Azevedo e Marques (2002), todas tinham o consenso em julgar a estabilidade em que se encontra o maciço rochoso aumentando o grau de confiança em um projeto. De acordo com Amaral (2019), três sistemas de classificação se destacam são eles: o RMR de Bieniawski (1973, revisado em 1984), o Q de Barton (1974) e o *Geological Strength Index* (GSI) de Hoek (1995) que tenta fundir os dois sistemas anteriores para obtenção de parâmetros de deformabilidade e resistência do maciço rochoso.(ASSIS,2013)

Da classificação de maciços rochosos retiram-se inúmeras informações. Bieniawski (1989) mostra que dentre outras tarefas, é possível identificar quais são os parâmetros que mais influenciam o comportamento relativo a um maciço, distinguir e classificar formações encontradas no maciço rochoso por conjuntos ou famílias de descontinuidades e interpretar o que representa cada classe em que o maciço se encontra.

2.3.1 Sistema de Classificação RMR de Bieniawski

A classificação geomecânica RMR foi desenvolvida para aplicação em projetos em túneis por Bieniawski em 1974 (AZEVEDO & MARQUES, 2002; ASSIS, 2013). Os parâmetros analisados para a classificação são o índice RQR, a resistência a compressão

uniaxial do material de rochas, espaçamento das descontinuidades, condições das descontinuidades, condições de saturação do maciço rochoso e a orientação da descontinuidade.

Para se utilizar os sistemas RMR, a área do maciço em análise deve ser delimitada em unidades estruturais no conceito geológico. Amaral (2019) afirma que cada classe de maciço rochoso deve ser apresentada por meio de uma unidade estrutural geológica. Essas unidades são divididas por características estruturais maiores, a exemplo pode-se citar as falhas abertas, mudanças de litologias e mudanças bruscas de espaçamento das descontinuidades (ASSIS,2013).

O sistema foi calibrado em túneis rasos em maciços de boa qualidade e não considera o estado de tensões do meio rochoso. Assim, sua aplicação em maciços pouco resistentes e com comportamento mecânico dominado pelo estado de tensões é limitado. (...)Uma classificação modificada do RMR apropriada para a engenharia de minas deve levar em conta as tensões in-situ, as tensões induzidas aplicadas pela mina, os efeitos da escavação a fogo e o grau de alteração ou intemperismo. (ASSIS,2013).

O sistema RMR é feito seguindo tabelas que relacionam cada parâmetro a um peso. Por fim, todos são somados para obtenção do valor de RMR, que não poderá passar de 100. Amaral (2019) afirma que, quando mais próximo do índice 100 maior será a qualidade do maciço rochoso. O ANEXO A – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR ilustra as tabelas que organizam todos os pesos e parâmetros para o sistema RMR.

O peso da resistência a compressão uniaxial, de acordo com Azevedo e Marques (2002), pode variar de 0 a 15. Valores mais elevados de resistência a compressão uniaxial e índice de carga puntiforme, recebem maiores valores em peso. Para valores de índice de carga puntiforme menores 1 o peso pode variar de 0 a 2, pois corresponde a maciços pouco resistentes.

Azevedo e Marques (2002) afirmam que o RQD pode ser utilizado como parâmetro único para classificar o maciço rochoso. Vale lembrar que quanto maior o índice maior será a qualidade da rocha e por tanto maior o peso RQD do maciço.

O espaçamento é o terceiro parâmetro a receber peso, sendo que maiores espaçamentos recebem maiores peso. O máximo valor para o espaçamento é de 20 e corresponde para distâncias entre paredes de descontinuidades acima de 2 metros. Em caso de maciços com mais de uma família de descontinuidade, deve-se considerar, para fins de cálculos, aquela que for mais crítica, com menor valor de espaçamento.

A análise das condições das discontinuidades, pode ser realizada através da consulta nas tabelas disponíveis no ANEXO A – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR. Além do guia para a classificação das discontinuidades, as correções que devem ser feitas para o sistema de classificação RMR segundo Bieniawski (1989) são mostrados no ANEXO A – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR. O máximo valor de peso referente as condições das discontinuidades são iguais a 30, que corresponde a superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, com paredes de rocha não alterada. A orientação das discontinuidades, são dadas por Assis (2013) como sendo parâmetro de ajuste e correção.

Sobre a ação da água subterrânea, o peso pode chegar a um valor máximo igual a 15 que corresponde a um maciço completamente seco, conseqüentemente não sofre com pressão de água nas juntas e não possui vazão de infiltração. Para este trabalho foi feita a classificação básica de RMR, desconsiderando assim a ação da água subterrânea.

Sobre as aplicações do RMR, Amaral (2019) instrui que é útil na determinação de algumas propriedades mecânicas do maciço rochoso, nos valores de coesão e módulo de deformabilidade. O Quadro 1 mostra como Bieniawski (1989) consegue estipular o valor de coesão e ângulo de atrito em função da classe de RMR do maciço rochoso.

Quadro 1:Relação de coesão e ângulo de atrito como a classe RMR.

Classificação do maciço rochoso de acordo com o RMR					
Valor	100-81	80-61	60-41	40-21	< 21
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição da rocha	Muito boa	Boa	Razoável	Pobre	Muito pobre

Fonte: Bieniawski (1989).

2.3.2 Q de Barton

Em 1974, Barton, propôs um novo sistema de classificação Geomecânica intitulado de *Tunnelling Quality Index I*, que seria utilizado para determinação de um índice para determinação das características do maciço rochoso e o suporte de túnel requerido, esse índice é chamado de Qualidade Q e sua classificação é chamada de Q de Barton.

O valor do índice Q varia de 0,001 a 1000 em uma faixa logarítmica(ASSIS,2013). A Equação 3: Equação proposta por Barton et. al. (1974) para cálculo de índice Q. mostra como é determinado o valor de Q, sua análise é importante pois refere-se a análise de parâmetros geomecânico e que irão influenciar no comportamento do maciço rochoso.

$$Q = \left[\frac{RQD}{J_n} \right] \times \left[\frac{J_r}{J_a} \right] \times \left[\frac{J_w}{SRF} \right]$$

Equação 3: Equação proposta por Barton et. al. (1974) para cálculo de índice Q.

Em conformidade com Assis (2013), o índice RQD da Equação 1 e Equação 3 se refere ao mesmo índice de qualidade da rocha utilizado na classificação RMR, J_n representa o número de famílias de juntas. A razão RQD por J_n representa a estrutura do maciço rochoso, em outras palavras, representam grosseiramente o tamanho dos blocos. É de observação, que rochas com maiores índices de qualidades e menores números de juntas irão contribuir para um maior valor de Q. Sing e Goel (1999) afirmam que o parâmetro J_n é geralmente correlacionado ao número de foliação, xistosidade, clivagem ou acamamentos existentes no maciço rochoso.

Ainda de acordo com a Equação 3, as parcelas J_r e J_a representam, respectivamente, o grau de rugosidade e de alteração das paredes da descontinuidade. Assis (2013), afirma que juntos formam a parcela de rugosidade e características de atrito das paredes das descontinuidades, que é computada a favor da resistência, não alteradas e em contato direto. Sing e Goel (1999) ensinam que os parâmetros J_r e J_a são obtidos para o conjunto crítico mais fraco ou para a descontinuidade preenchida com argila em uma determinada região. Amaral (2019) completa que em “(...) caso que o conjunto de descontinuidades ou a descontinuidade com o valor mínimo de (J_r/J_a) for orientado favoravelmente para estabilidade, então um segundo conjunto de descontinuidade pode ser de maior importância e seu valor de (J_r/J_a) deve ser utilizado ao avaliar Q.” Singh e Goel (1999) apontam que as descontinuidades paralelas entre si bem desenvolvidas devem ser consideradas como um conjunto completo de descontinuidades. Em caso de poucas descontinuidades visíveis ou somente rupturas ocasionais, então deve-se considerá-las como “um conjunto de junções aleatórias”.

Azevedo e Marques (2002) mostram que a terceira parcela da Equação 3 mostra relação do fator de redução da água (J_w) e o SRF, que indica o índice das condições de tensões do maciço rochoso. Assis (2013) afirma que a razão entre essas duas grandezas representa a tensão ativa no maciço rochoso. Essa parcela, segundo o mesmo autor, é formada por dois parâmetros de agentes externos, a água e tensões. O SRF é a medida de perda da capacidade de resistência no caso de escavações através de zonas de cisalhamento e maciços rochosos moles, tensões em maciço rochoso componente e efeito de expansão lateral no caso de maciço rochoso plástico incompetente.

A ponderação dos parâmetros não pode ser mensurada da mesma forma que é feita no RMR, sendo assim, o ANEXO B – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA Q DE BARTON mostra o peso que é recebido para cada um dos parâmetros analisados. O valor do RQD é calculado da mesma maneira para essa classificação, para tanto a Tabela 1 servirá de auxílio para o cálculo do índice Q. Assis (2013) afirma que para valores de RQD menores que 10 deve-se assumir valor nominal igual a 10 para o cálculo e que intervalos de 5 em 5 no valor de RQD são considerados de boa acurácia.

$$RMR = 9 \ln Q + 44$$

Equação 4: Relação entre os sistemas RMR de Bieniawski e sistema Q de Barton. Fonte: Singh e Goel (1999)

É possível definir o sistema de classificação Q de Barton por classes, a Tabela 7: Classes de maciços rochosos de acordo com o sistema Q de Barton. indica como esta definição ocorre, indicando que quanto menor a classe maior o valor de Q, melhor o padrão geomecânico do maciço.

Tabela 7: Classes de maciços rochosos de acordo com o sistema Q de Barton.

Classe	Padrão geomecânico do maciço	Valores de Q
I	Excelente	>400
II	Ótimo	100 a 400
III	Muito Bom	40 a 100
IV	Bom	10 a 40
V	Regular	4 a 10
VI	Ruim	1 a 4
VII	Muito ruim	0,1 a 1
VIII	Extremamente ruim	0,01 a 0,1
IX	Péssimo	0,001 a 0,01

Fonte: Barton et. al., 1974

O sistema Q de Barton pode ser aplicado de diversas formas, dentre elas como meio de estimar o módulo de deformabilidade pertencente ao maciço rochoso, assim como meio de se obter o ângulo de atrito pertencente à descontinuidade. (Amaral, 2019). Palmström (2001) mostra que ao dividir os parâmetros J_r e J_a , nessa ordem, obtém-se o valor da tangente do ângulo de atrito.

2.3.3 Geological Strength Index – GSI

O GSI é um sistema de classificação considerado subjetivo, podendo assumir valores de 5 a 100 (AMARAL, 2019). Hoek (1995) introduziu o índice de resistência geológica do inglês,

Geological Strength Index, que é um sistema para estimar a resistência de um maciço rochoso sujeito a diferentes condições geológicas. Para Maia (2011) o GSI não se trata de um parâmetro exato e muito menos preciso, no entanto é o método de classificar a rocha de maneira mais prática. É um sistema de classificação que irá depender muito do olhar crítico do profissional que realiza a classificação. Para tanto, seus parâmetros são de qualidade superficiais do maciço, assim como o grau de fraturamento. O ANEXO C – CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA GSI DE HOEK. ilustra o ábaco para classificação do maciço rochoso através do GSI.

Maia (2011) diz que o valor de 25 atribuído ao GSI representa a transição existente para os critérios classificados em original e modificado. Um maciço de boa qualidade terá valor acima de 25. Para os maciços rochosos de baixa qualidade, de acordo com Amaral (2019) se torna complicado realizar a determinação do valor e da classe do RMR, o que faz a relação entre o GSI e RMR perder a confiabilidade. O sistema RMR e sistema se correlacionam com o sistema GSI conforme as Equação 5 e Equação 6. De acordo com a Equação 5, é possível dizer que sua eficácia é comprovada para valores de RMR igual ou superior a 23 enquanto que a Equação 6 já se torna mais confiável para valores de RMR menores do que 23. Valores de RMR menores que 23 entram para classes de rochas brandas, para tanto essas não devem ser estimadas. A validação para rochas consideradas brandas deve ser tomada em campo.

$$GSI = RMR - 5$$

Equação 5: Relação de GSI e RMR, usada para valores de RMR maior ou igual a 23.

$$GSI = \ln Q + 44$$

Equação 6: Relação de GSI e Q de Barton, usada para valores de RMR menores que 23.

2.4 Critério de Resistência

Um critério de resistência, são relações entre as tensões correspondentes ao estado de ruptura de um material.

Em rochas é difícil definir o que seja um estado de ruptura, mas que é comum associar este estado às tensões correspondentes ao pico da curva tensão-deformação. Após o pico da curva tensão-deformação a rocha não perde completamente sua capacidade de resistência, podendo atingir um estado de tensão chamado de residual. (ASSIS,2013)

De acordo com Amaral (2019), trata-se de uma relação matemática entre as componentes de tensão que permite determinar os valores máximos as quais um material poderá ser submetido sem que seja comprometido a sua integridade. Alguns critérios de resistência

foram propostos por inúmeros autores dentre eles destacam o critério de resistência de Mohr-Coulomb (1776), o critério de Barton & Choubey (1982) e o critério de Hoek e Brown (1980).

Amaral (2019) afirma que de todos os critérios, o mais usado pela simplicidade é o de Mohr-Coulomb, proposto em 1776. Neste critério a resistência ao cisalhamento de uma rocha é composta de duas parcelas, a constante coesiva e uma componente de atrito que é dependente da tensão normal. Uma envoltória de ruptura linear em relação a todos os círculos de Mohr é feita para indicar combinações críticas ligadas às tensões principais. Aplicados neste trabalho o critério de Barton & Bandis e o critério de Hoek-Brown serão descritos com mais detalhes no subitem 2.4.1 e 2.4.2.

2.4.1 Critério de Barton e Bandis

O critério de Barton e Bandis foi criado em 1982 em meio as diversas tentativas de representar um comportamento mais realista da resistência ao cisalhamento de descontinuidades rugosas (AZEVEDO & MARQUES, 2002). Tal critério toma como referência uma equação obtida empiricamente visando obter a resistência ao cisalhamento de picos das descontinuidades (AMARAL, 2019). A Equação 7 relaciona o coeficiente de rugosidade das juntas (JRC), correspondente à resistência a compressão das juntas (JCS), o ângulo de atrito residual (ϕ_r) e o correspondente à resistência à compressão uniaxial (σ_c).

$$|\tau_p| = \sigma \tan \left[\left(JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma} \right) \right) + \phi_r \right]$$

Equação 7: Critério de Barton e Bandis.

Fonte: Azevedo e Marques (2002)

Os valores de JRC pode ser calculado segundo a Figura 2.4, em que se apresenta a escala natural e os perfis com os tipos de rugosidades predominantes. Barton e Bandis (1990) sugerem que o JRC seja estimado com um simples ensaio de escorregamento numa superfície inclinada.

Originalmente os ensaios de Barton foram realizados com esforços normais extremamente pequenos, o que torna sua equação mais apropriada para valores de σ/σ_j entre 0,01 e 0,3. Como a maior parte dos esforços normais existentes em taludes rochosos se encontram neste intervalo, a equação é de grande ajuda na análise da estabilidade de taludes rochosos. (ASSIS, 2013).

2.4.2 Critério de Hoek e Brown

De acordo com Assis (2013) a lei de Coulomb não se mostra muito aplicável para maciços rochosos e para uma grande variedade de tipos de rocha, por não existir linearidade

para o gráfico tensão versus deformação. Hoek & Brown (1980) sugeriram uma curva para a envoltória de ruptura de rochas intactas definida por uma função potencial. Essa envoltória foi baseada em resultados experimentais de uma série de ensaios sobre rochas, a curva está descrita na Equação 8: Curva envoltória de Hoek e Brown para rocha intacta..

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \cdot \sigma_3 \cdot \sigma_c + s \cdot \sigma_c^2}$$

Equação 8: Curva envoltória de Hoek e Brown para rocha intacta.

Fonte: Hoek (2007)

A Equação 8 mostra que a tensão principal maior na ruptura (σ_1) e a tensão principal menor na ruptura (σ_3) são as tensões responsáveis pela ruptura em ensaios triaxiais. Ainda sobre as simbologias da presente equação tem-se que σ_c é a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta; m , a e s são parâmetros de resistência de Hoek e Brown relacionadas ao GSI. m é o valor da constante m do maciço, uma redução do valor da constante referente ao material intacto m_i , é um fator obtido a partir de tabelas, a é uma constante que depende das características da rocha.

Segundo Assis (2013), a obtenção dos parâmetros de resistência de Hoek e Brown para maciços rochosos fraturados é feita através de classificações geomecânicas destes maciços e correlações com dados já existentes. Hoek (1985) revisou o critério de Hoek e Brown (1980) de forma a possibilitar a sua aplicação para maciços rochosos fraturados. No entanto se deparou com o problema do efeito escala que o tornou praticamente impossível a realização dos testes em laboratório e em campo.

Assis (2013) ensina que o critério de Hoek e Brown é válido somente para tensões efetivas e que ele fornece bons resultados para determinadas rochas consideradas frágeis. A exemplo, pode-se citar gnaisse, anfíbolitos, doleritos, gabros, granitos, noritos e quartzodioritos. Completando, uma maior dispersão é observada na previsão da ruptura, com este critério, em rochas dúcteis, como calcários e argilitos. Na Figura 2.6 é representado, graficamente, o critério de Hoek e Brown.

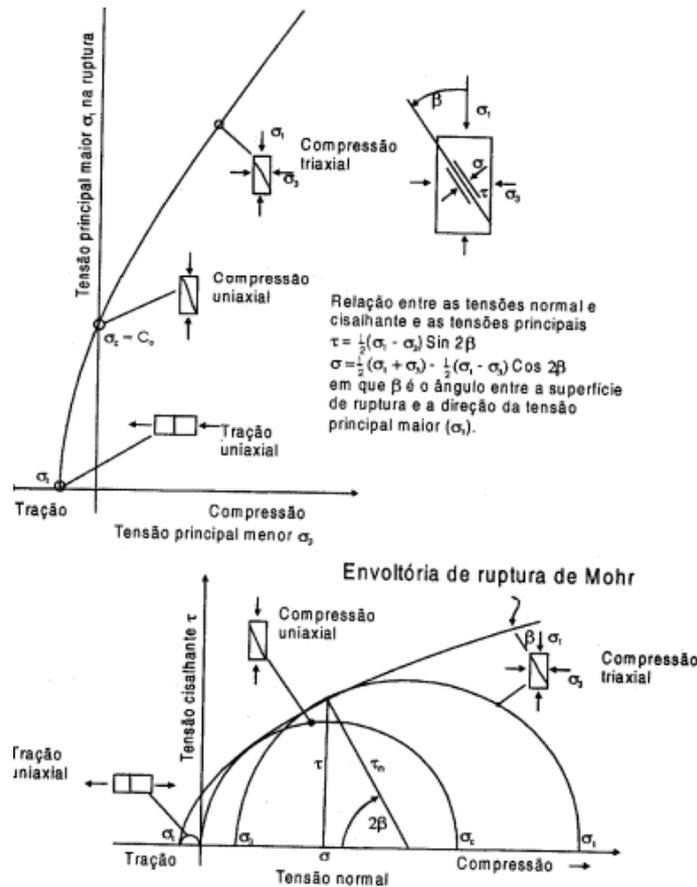


Figura 2.6: Representação gráfica do critério de Hoek e Brown. Modificado de Assis (2013)

O critério de ruptura mais geral de Hoek e Brown é dado em função de três constantes, mb , s e a que são o valor da constante m para o maciço rochoso e as constantes que estão relacionadas com as características do maciço rochoso, respectivamente. Como é mostrado na Equação 9: Equação geral de Hoek e Brown..

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left[mb \left(\frac{\sigma_3'}{\sigma_c} \right) + s \right]^a$$

Equação 9: Equação geral de Hoek e Brown.

Fonte: Hoek(2007)

Para maciços de boa qualidade, descontinuidades fechadas, pouco alterado, blocos angulares, o valor de “ a ” é assumido igual a 0,5 ($a = 0,5$). No caso de maciços de qualidade ruim, muito alterado ou intemperizado, descontinuidades cisalhadas, onde a resistência à tração é assumida nula, o valor de “ s ” é assumido igual a zero ($s = 0$). (ASSIS,2013).

Os valores de mb , s e a são obtidos através das equações Equação 10, Equação 11 e Equação 12 respectivamente. Sobre as equações repara-se que todas elas dependem do valor obtido pela classificação do GSI e também pelo fator D que indica o grau de perturbação da rocha, que irá variar de 0, não perturbado, a 1, muito perturbado.

$$mb = mi \times e^{\frac{GSI-100}{28-14D}}$$

Equação 10: Definição de mi segundo o critério de Hoek e Brown.

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}}$$

Equação 11: Definição de s segundo o critério de Hoek e Brown.

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right)$$

Equação 12: Definição de a segundo o critério de Hoek e Brown.

O valor de a podem variar de 0 a 1 sendo a titulação maior quanto maior for a perturbação. A obtenção do parâmetro de mi ocorre por ensaios triaxiais e são considerados igual a mb quando se trata de rocha intacta. Os valores de mi são tabelados de acordo com o tipo de rocha quando não possível realizar os ensaios, conforme é mostrado na Figura 2.7.

Tipo de rocha		Rocha e valores de mi			
Ígneas	Intrusiva	Granito: 32±3 Granodiorito: 29±3	Diorito: 25±5 Dolerito: 16±5	Gabro: 27±3 Norito: 22±5	Peridotito: 25±5
	Extrusiva	Riolito: 16±5	Andesito: 25±5	Basalto: 16±5 Diabásio: 16±5	Pórfiros: 20±5
	Vulcânica		Aglomerado: 19±3	Tufos: 13±5	
Sedimentares	Clástica	Conglomerado: 4±18 Brecha: 4±16	Arenito: 17±4	Siltito: 7±2 Margas: 7±2	Argilito: 4±2 Folhelho: (6±2)
	Carbonática	Calcário cristalino: 12±3	Calcário Esparítico: 10±2	Calcário Micrítico: 9±2	Dolomito: 9±3
	Química		Gipso: 8±2 Anidrito: 12±2		
	Orgânica			Carvão: 8±12	Giz: 7±2
Metamórficas	Foliada	Gnaise: 28±5	Xisto: 12±3	Filito: 7±3	Ardósia: 7±4
	Levemente foliada	Migmatito: 29±3	Anfibolito: 26±6		
	Sem foliação	Quartzito: 20±3	Metarenito: 19±3	Hornfels: 19±4	Mármore: 9±3

Figura 2.7: Valores de mi para diferentes rochas segundo Hoel (2000).

2.5 Mecanismo De Ruptura – Análise Cinemática

Os tipos de rupturas existentes devido ao grau de instabilidade do talude rochoso e das condições geológicas e geotécnicas podem ser principalmente: planar, cunha, circular, tombamento de blocos e tombamento flexural. Para esse trabalho as rupturas que foram observadas em campo foram as planares e em cunha.

As rupturas por tombamento de blocos e flexural e rupturas circular não foram levadas em consideração para o trabalho. Para a ruptura circular, Amaral (2019) afirma que é presente em solos em que não se faz possível definir as famílias de descontinuidades e depende ainda da escala do problema. Sobre ruptura por tombamento de blocos e flexural, para ambos os casos irão depender, segundo mesmo autor, das características da rocha, especificamente para tombamento de blocos um plano de descontinuidade é orientado no sentido para “dentro da face do talude” e com forte inclinação, o que não acontece no talude em estudo.

2.5.1 Ruptura Planar

A ruptura do tipo planar, segundo Amaral (2019) ocorre em apenas um plano de superfície. Já para Campos (2020), a ruptura planar ocorre em situações em que uma família de descontinuidades do maciço rochoso possui mergulho predominantemente paralelo a direção da face do talude. Singh (2011) afirma que a orientação das famílias pode possuir uma diferença de aproximadamente 15° em relação à atitude do talude.

Guidicini e Nieble (1983) ensinam que o principal requisito para que ocorra a ruptura planar é o plano apresentar direção paralela, dentro de certos limites, em relação a face do talude. No entanto a direção de mergulho do plano de ruptura deve ser menor que a direção de mergulho da face do talude, assim como a direção de mergulho do plano onde ocorre ruptura precisa ser superior em relação ao ângulo de atrito obtido no plano e as superfícies de alívio precisam conter de maneira desprezível as resistências laterais em relação ao escorregamento.

A Figura 2.8 mostra que, Ψ_s corresponde ao ângulo da face superior do talude, Ψ_f representa o ângulo de mergulho do talude, Ψ_p indica o ângulo de mergulho do plano de ruptura, e Φ condiz com o ângulo de atrito.

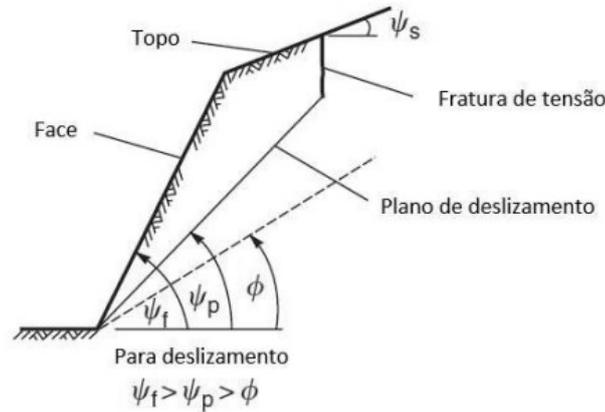


Figura 2.8: Seção longitudinal demonstrando a geometria do talude me planos formando uma ruptura planar. Campos (2020).

Uma possível ruptura do tipo planar pode ser identificada através de uma análise cinemática por projeções estereográficas. A zona crítica para ruptura planar é definida pela interseção entre as representações gráficas dos limites laterais, o cone manifestado pelo ângulo de atrito, e o envoltório gerado pela projeção dos possíveis planos capazes de aflorar no talude. Essa região delimita o setor onde todos os polos de descontinuidades contidos em seu interior apresentam risco de ruptura. (CAMPOS, 2020).

Uma representação estereográfica de uma análise cinemática de ruptura planar pode ser observada na Figura 2.9.

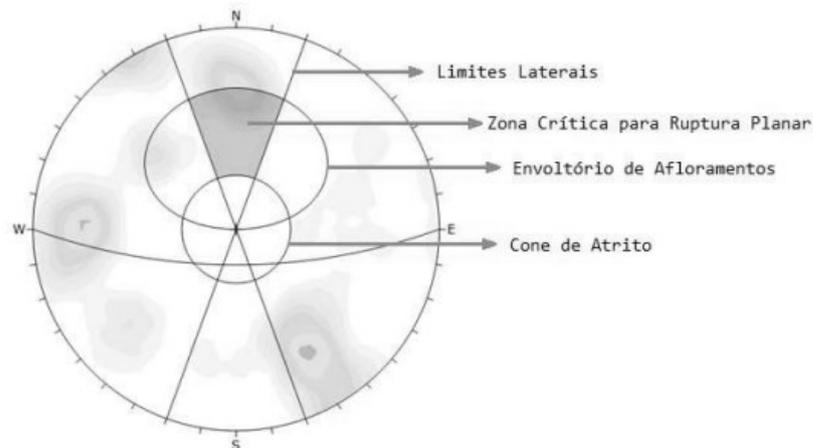


Figura 2.9: Representação estereográfica de uma análise cinemática de ruptura planar. Campos, 2020.

2.5.2 Ruptura em Cunha

De acordo com Guidicini e Nieble (1983), poderá ocorrer uma ruptura em cunha quando duas famílias de descontinuidades se cortam entre si, formando cunhas. Segundo Goodman (1989) a ruptura em cunha possui uma linha formada pelos planos e que ela está mergulhando no sentido semelhante ao da face do talude. Amaral (2019) ensina que para a ruptura em cunha

acontecer o ângulo de mergulho da face do talude deve ser maior do que o da interseção das descontinuidades que deverá ser maior que o ângulo de atrito.

De acordo com Willy e Mah (2004), a ruptura em cunha possui maior índice de ocorrência do que as planares pois existe grande variedade de condições geológicas e geométrica que permitem seu acontecimento. A Figura 2.10 mostra duas rupturas em cunha encontradas no talude em estudo em diferentes escalas.



Figura 2.10: Ruptura em cunha encontrada no talude em estudo em diferentes escalas.



Figura 2.11: Condições geométrica para uma ruptura em cunha. (Campos, 2020).

Em que, de acordo com Campos (2020), Ψ_{fi} indica o ângulo de mergulho do talude, Ψ_i corresponde ao mergulho da linha de interseção entre os dois planos, e Φ representa o ângulo de atrito, em concordância com a Figura 2.11.

Campos (2020) ensina que as rupturas em cunha podem ser identificadas em análises cinemática. Nessa, será as interseções entre as descontinuidades contida dentro de zonas críticas que irão indicar a possibilidade de ruptura.

A zona crítica primária indica cunhas que satisfazem condições cinemáticas e de atrito para ruptura. Já a zona crítica secundária engloba interseções que possuem ângulo de mergulho inferior ao de atrito, porém ainda

apresentam possibilidade de ruptura em planos de descontinuidades isolados que apresentam um vetor de mergulho superior ao ângulo de atrito. A área é delimitada pela representação gráfica do mergulho da face do talude e pelo cone formado pelo ângulo de atrito.” (CAMPOS,2020).

A Figura.2.12 mostra uma representação estereográfica de uma análise cinemática de ruptura em cunha.

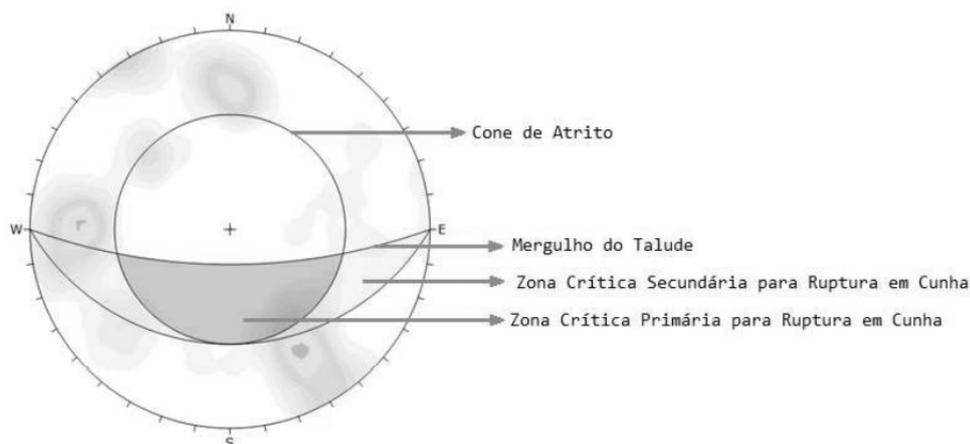


Figura.2.12: Análise cinemática de ruptura em cunha.

Fonte: Campos, (2020).

3. METODOLOGIA

3.1 Área de Estudo

O talude em questão foi recentemente construído para duplicação da BR146, a área de construção que engloba o talude rodoviário está inserida no perímetro urbano. A região escolhida para o estudo corresponde a uma região de recente ruptura em cunha. Importante destacar que foram consideradas para o estudo apenas um comprimento de 15 metros em aclave ao plano de ruptura do talude, os parâmetros foram medidos através da composição rochosa de moscovita xisto. Vale ressaltar que durante a pesquisa, mais precisamente antes dos trabalhos em campo, uma parte do talude rompeu, conforme mostrado Figura 3.1, o alto índice de chuvas na cidade colaborou para a ocorrência.



Figura 3.1: Ruptura em cunha do talude em análise.

A ruptura que o talude apresenta é tipo ruptura em cunha e se mostra superior a $2/3$ da altura total do talude. O comprimento linear aproximado do talude é de 500 metros com altura que varia de 2 metros a 12 metros. A descrição geral do talude é mostrada no item Geologia Local:.

A Figura 3.2 mostra a área de retaludamento devido a duplicação, limitando com um polígono de traço vermelho o local que se encaixa o talude em estudo. As coordenadas de referência para a região de análise são de $19^{\circ}35'24.06''$ S e $46^{\circ}55'54.69''$ O, marcada na mesma figura.



Figura 3.2: Região de retaludamento e ponto de análise.

Fonte: Google Earth (2022)

3.2 Materiais e Métodos:

O referencial teórico foi realizado com base em livros e trabalhos de outros autores que podem ser consultados pelo título REFERENCIAS deste trabalho. Os trabalhos seguintes ao referencial teórico só se tornaram possível quando todos os conceitos necessários foram acordados e entendidos.

Os trabalhos de campo objetivaram-se levantar estudos da geologia do local, estudo da área e levantamentos dos parâmetros geomecânicos. As condições ambientais adequadas para realização das atividades de campo também foram levadas em consideração. Os materiais de campo utilizados, além dos equipamentos de proteção individual, foram a bússola para aferição de atitude da face do talude e das descontinuidades, martelo de geólogo para fazer a estimativa da resistência do maciço rochoso; trenas e réguas, para obtenção do valor do espaçamento, abertura e da persistência das descontinuidades.

A terceira etapa do trabalho se tratou da determinação das classificações do maciço rochoso para região em estudo e determinação do mecanismo de ruptura do maciço. Uma planilha foi levada ao campo para anotação de todos os dados obtidos pela caracterização, como por exemplo as orientações das descontinuidades, medidas das aberturas e observações referentes a formação geológica do local. Tabelas de campos também foram levadas, essas são as tabelas encontradas nos ANEXO A – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR, ANEXO B – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA Q DE BARTON e ANEXO C – CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA GSI DE HOEK.

Sobre os *softwares* utilizados para classificação e posterior análise cinemática foram utilizados o Dips e o RocData, todos de domínio da Rocscience. A Figura 3.3 ilustra alguns dos materiais utilizados em campo.



Figura 3.3: Martelo de geólogo, caderneta de campo, bússola e prancheta com observações e tabelas de campo fixadas.

3.3.1 Trabalho de Campo:

Em campo, na região de análise foram medidas as orientações das descontinuidades e do talude com a bússola. Caracterizou-se quanto ao grau de rugosidade predominante em cada família, grau de alterabilidade e as condições das descontinuidades com auxílio de tabelas de campo. Paralelo aos levantamentos das descontinuidades foi feito um estudo de contexto geológico, mineralógico e petrográfico.

A abertura, espaçamento e persistências foram mensuradas com uso de réguas e trenas, mas a grande maioria das descontinuidades foi necessário usar de técnicas de trigonometria para estimar seus valores. Todos os resultados dessa etapa foram transferidos e organizados em planilhas de campo.

A estimativa dos valores de resistências foi feita por meio do teste do martelo de geólogo. Foram utilizados martelo de geólogo, canivete e tato. Observadas características no maciço rochoso conforme tabela da ISRM (1981), os mesmos foram classificados de R0 a R6.

A Figura 3.4 ilustra as técnicas utilizadas em campo. Nela estão nomeadas de “a” até “g” da esquerda para direita as seguintes atividades:

- a- Estimativa do grau de rugosidade com auxílio de tabelas de campo;
- b- Escavação necessária em rocha para mensuração das orientações das descontinuidades;
- c- Preparação para a técnica de scanline usada para estimar o valor de RQD;
- d- Análise e mensuração das aberturas das descontinuidades;

- e- Mensuração do valor do espaçamento entre duas descontinuidades consideradas muito próximas;
- f- Mensuração parcial da persistência de uma descontinuidade;
- g- Diferenciação de famílias de descontinuidades para melhor mensuração de parâmetros.

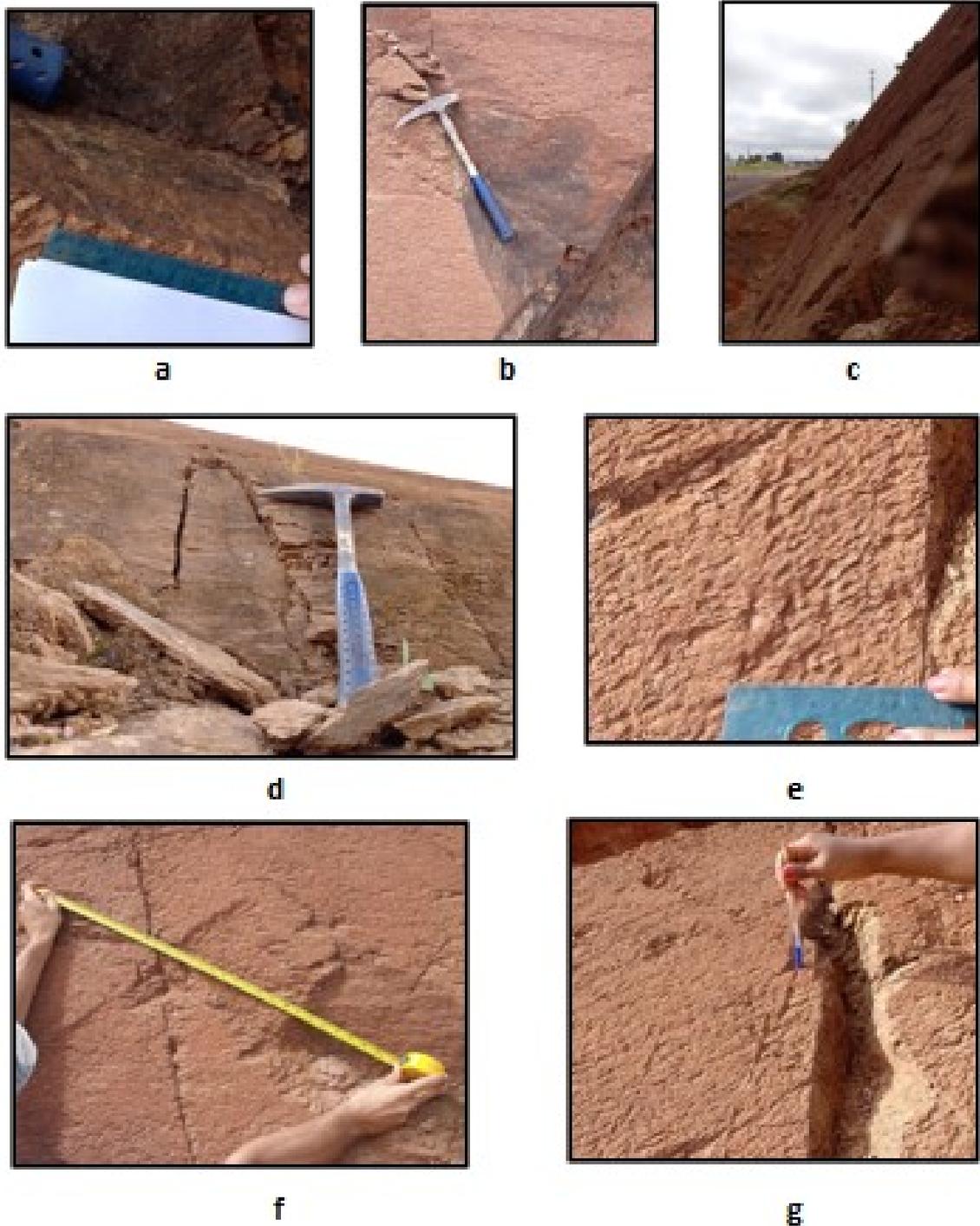


Figura 3.4: Trabalhos de campo referente a grau de rugosidade (a), escavação de rocha (b), preparação para técnica scanline(c), abertura das descontinuidades(d), espaçamento (e), persistência (f) e diferenciação de famílias de descontinuidades(g).

3.3.2 Classificação Geomecânica, parâmetros de resistência e mecanismo de ruptura:

Os índices de GSI, parâmetro Q de Barton e o valor do RMR foram estimados após análises em campo. As tabelas utilizadas para classificação do maciço rochoso podem ser encontradas nos ANEXO A – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR, ANEXO

B – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA Q DE BARTON e ANEXO C – CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA GSI DE HOEK. Com a classificação do maciço rochoso foi possível determinar a qualidade da rocha e os dados de critério de resistência como o ângulo de atrito e coesão pelo *software* RocData.

A análise cinemática foi realizada no *software* Dips e permitiu identificar os mecanismos de ruptura predominante no talude posterior a definição das famílias de discontinuidades. Com as análises cinemáticas foi possível determinar a probabilidade de ocorrência de rupturas planar e cunha do talude.

O valor de cada parâmetro foi relacionado a seu respectivo sistema de classificação geomecânica, e procedido o seu cálculo. De posse dos resultados foram estimadas a resistência dos maciços rochosos.

Para validação dos parâmetros de resistência das classificações geomecânica foram realizadas análises das rupturas utilizando softwares da Rocscience, como o Dips, para a análise cinemática de rupturas e o RocData para os estudos de critério de resistência.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Geologia Local:

Em termos geológicos os materiais que compõe o talude são limitados às rochas metamórficas. Na parte superior do talude é visível uma camada de clorita xisto e inferior e moscovita xisto, conforme ilustra a Figura 4.1.1 Em algumas regiões do talude encontra-se rochas do tipo Anfibolito Figura 4.1.2 e Figura 4.1.3 (Figura 4.1.3). Apenas em clorita xisto é possível encontrar, ainda, lentes de quartzo que variam de espessuras de 4 a 7 cm, tais lentes seguem as orientações da xistosidade da rocha.

A descrição petrográfica das rochas foi realizada a partir da observação a olho nu de amostras do talude. A classificação foi definida em função de sua composição mineralógica, estrutura, textura, coloração e tamanho de grãos. Os principais minerais observados foram quartzos, moscovitas, clorita e pirolusita. A moscovita e clorita são as principais composições dos moscovitas xisto e clorita xisto respectivamente, o quartzo presente principalmente nas lentes de clorita xisto e a pirolusita presente nas discontinuidades das rochas. Tanto clorita xisto quanto os moscovitas xisto possuem cores de tom avermelhado.



Figura 4.1.1: Face do talude da BR 146. Google Earth (2022).

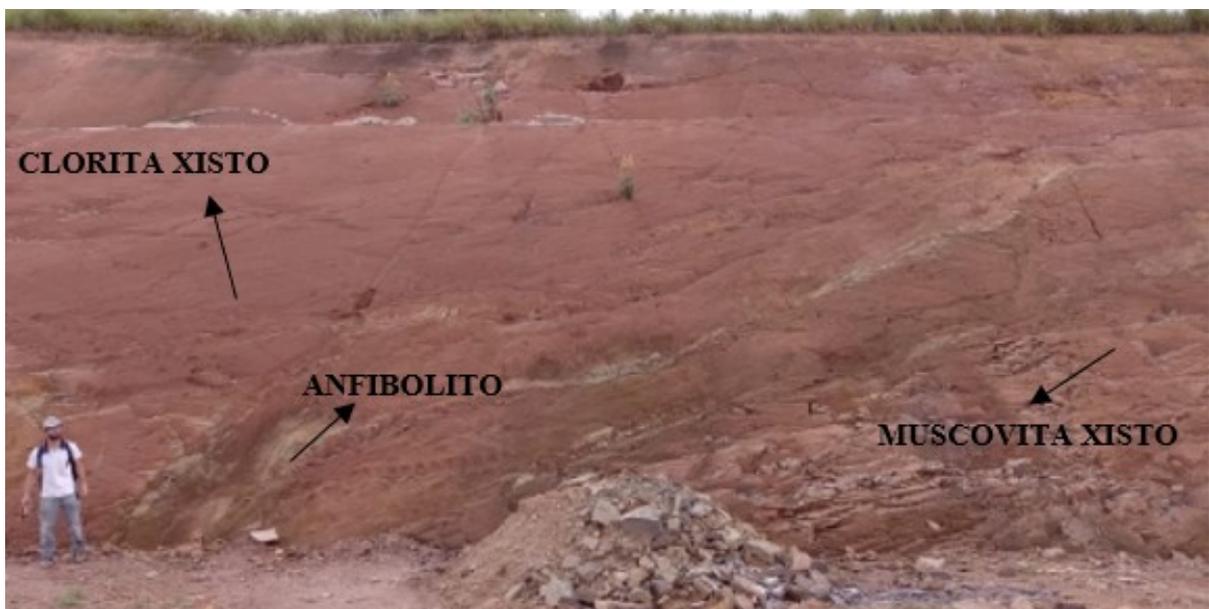


Figura 4.1.2: Face do talude da BR 146 com veio de Anfibolito.



Figura 4.1.3: Veio de Anfibolito em evidência no talude da BR 146.

Em campo foi possível diferenciar quatro famílias de descontinuidades, sendo 3 de fraturas e 1 de foliação da rocha. A orientação média da face do talude é de 280/54. Foram coletadas 76 orientações de descontinuidades no talude que foram tratadas utilizando software *Dip*, a Figura 4.1.4 representa todas as famílias encontradas por ele.

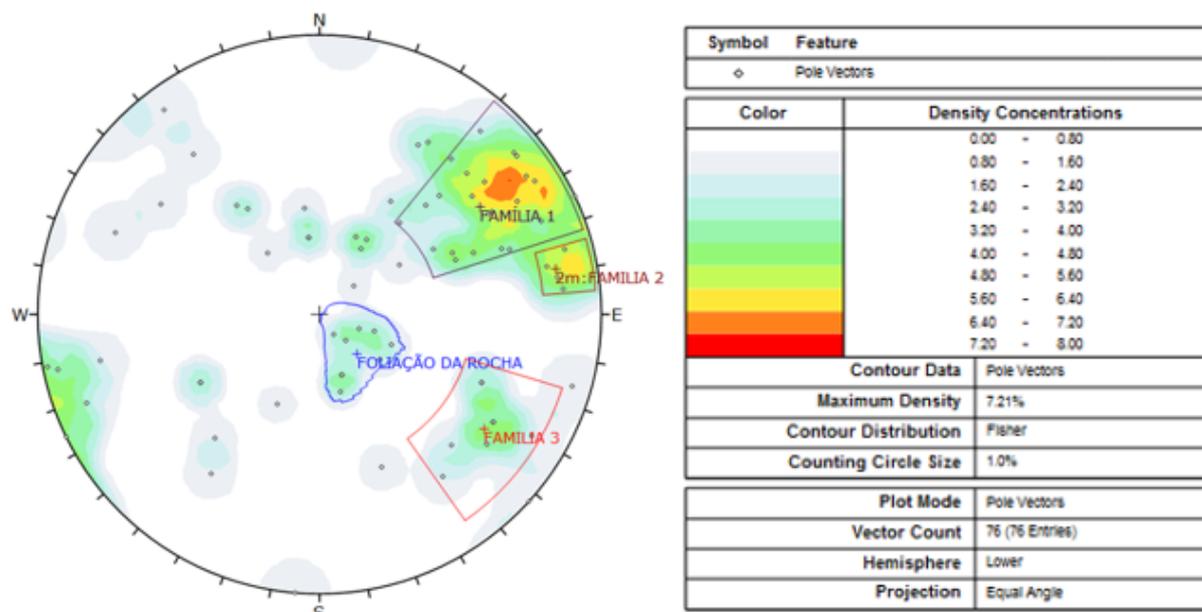


Figura 4.1.4:Famílias de descontinuidades. Fonte: Dips (2022)

Em campo as famílias 1 e 2 foram consideradas uma só, ao tratar esses dados nota-se que elas foram divididas, isso porque ambas se diferenciam em valores de direção de mergulho (DIP DIRECTION) e mergulho (DIP). A ausência de pontos que podem definir melhor a família 2 pode ser explicada pela dificuldade na coleta das atitudes, visto que foi necessário fazer uma pequena escavação para medir a grande maioria das descontinuidades e como o maciço rochoso se encontra muito alterado, perdia-se o plano de medição.

Ainda de acordo com a Figura 4.1.4 é possível inferir sobre a foliação da rocha, em campo essa foliação era vista como linhas de traço praticamente horizontais. Sobre os pontos que não foram considerados como famílias estão as linhas de traço verticalizadas, as orientações de algumas lentes de quartzo e outras que foram encontradas ao acaso no talude. Importante ressaltar que as linhas de traço verticalizadas eram as mais espaçadas como consequência, poucas foram medidas na região de análise.

Em algumas regiões do talude ele se mostrou muito alterado, impossibilitando assim a mensuração de muitas orientações das descontinuidades e até mesmo de diferenciar a olho nu as famílias. A Figura 4.1.5 ilustra bem tal região onde foram realizadas poucas medidas em

relação às descontinuidades. Na Figura 4.1.6 é possível a presença das famílias 1,2 e 3 além da foliação da rocha com mais clareza em uma região do talude melhor para a análise.



Figura 4.1.5: Famílias de descontinuidades e foliação da rocha em região de maior alteração do talude.

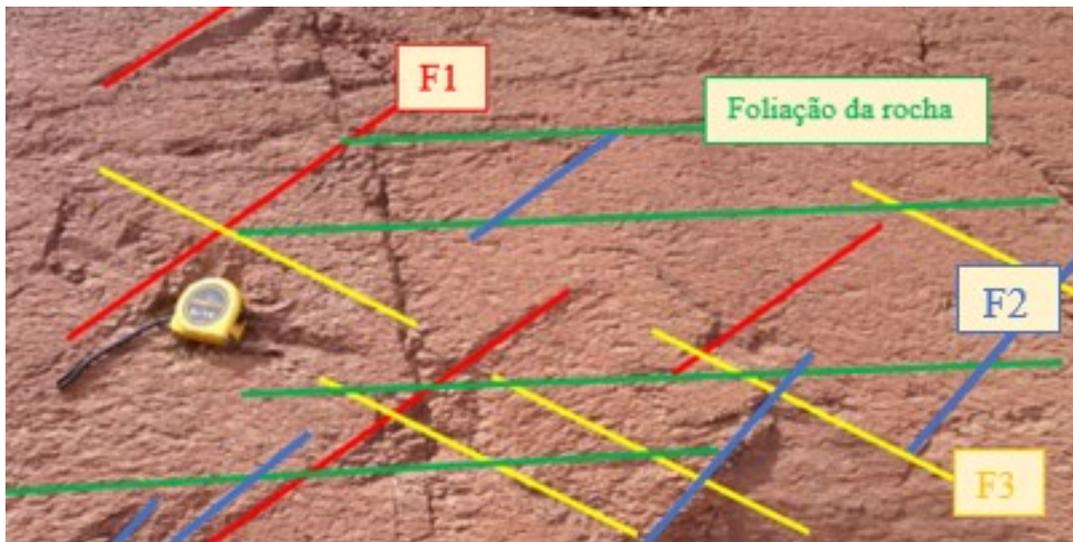


Figura 4.1.6: Famílias 1, 2 e 3 mais a foliação da rocha em região menos alterada do talude.

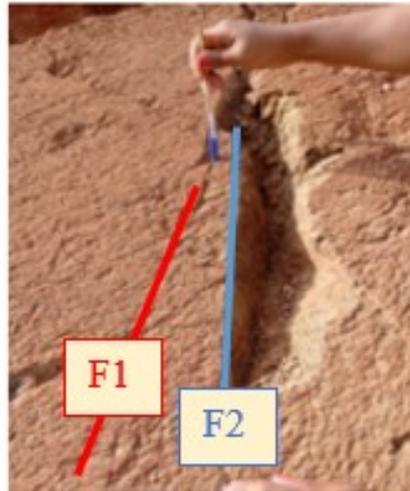


Figura 4.17:Descontinuidade da família 1 e 2. Fonte: Autoria Própria.

A Figura 4.17 mostra a diferença de direção das famílias 1 e 2. Nota-se que as linhas que definem a fratura da rocha se interceptam, mostrando que apresentam orientações distintas e por isso não podem ser consideradas como sendo da mesma família.

A atitude média das famílias de descontinuidades é descrita na Tabela 8. Pelos valores é possível comprovar o baixo mergulho da foliação do maciço apesar de sua direção estar relativamente próxima da família 3. Infere-se também sobre a diferença da direção de mergulho das famílias 1 e 2, são 23° de diferença na direção do mergulho.

Tabela 8: Atitudes média das famílias de descontinuidades.

Família	DIP/DIP DIRECTION
1	69/236
2	81/259
3	71/305
foliação	22/317

A tomada de dados de espaçamento e persistência das famílias teve complicações devido à dificuldade do posicionamento para medidas, a altura e consequente inacessibilidade às porções mais altas do talude impediu a aquisição direta dos dados sobre grandes descontinuidades de maiores valores de persistências, por tanto foram estimadas. Importante destacar que na região de análise do talude, ora o espaçamento se tornava elevado entre duas descontinuidades e ora muito próximos.

A Figura 4.1.8 ilustra os valores médio de espaçamento. O espaçamento médio encontrado para as famílias 1,2 e 3 valem 22,6cm, 35,3 cm e 58,9 cm. Sobre a foliação da rocha, o

espaçamento médio por lâminas foi de 2 cm, o que invalida o cálculo do RQD segundo Palmström (

Equação 2 - a).

Sobre os dados de persistência, mediu-se algumas enquanto que outras foram estimadas, pela estimativa notou-se uma variação das persistências de 2 a 10 metros. Conforme a Figura 4.1.9 sugere, a família com menor valor médio foi a família 2, que variou de 2 a 4 metros, enquanto que as famílias 1 e 3, sua variação foi em torno de 3 a 10 metros. Sobre a foliação da rocha levou-se em consideração o comprimento linear da região de análise, 15 metros.

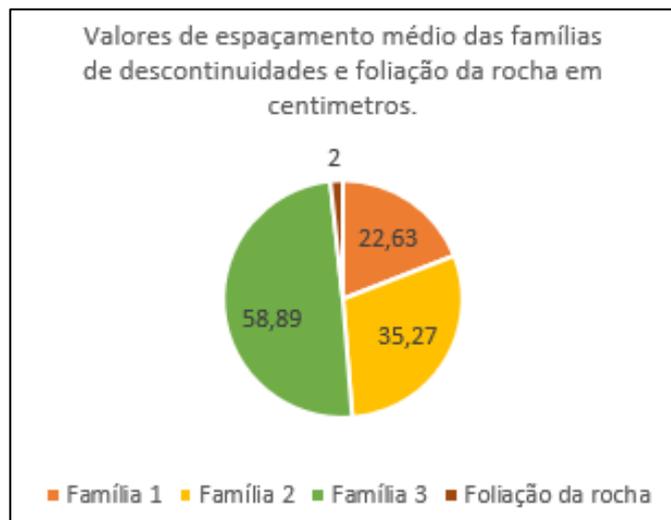


Figura 4.1.8: Valores de espaçamento médio em centímetros das famílias de descontinuidades e foliação de rocha.

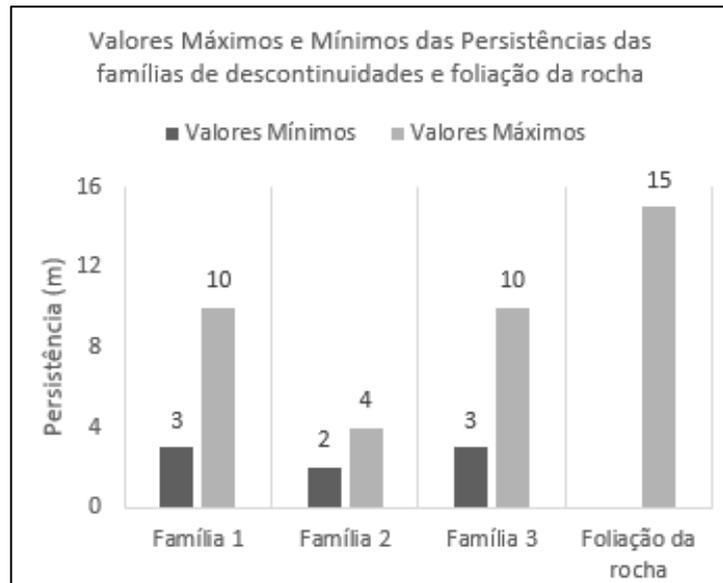


Figura 4.1.9: Valores máximos e mínimos de persistência encontrados no talude por família de descontinuidades e foliação da rocha.

As condições das descontinuidades estão organizadas na Tabela 9, nota-se que todas as famílias de descontinuidades estão sob mesma condição. As conclusões tiradas em campo são importantes para a classificação RMR do maciço rochoso, para tanto, a coluna 3 da Tabela 9 ilustra os pesos que cada parâmetro analisado recebeu na citada classificação. Logo o peso total que se refere as condições das descontinuidades é igual a 12. A Tabela 9: Condições das descontinuidades. ilustra os dados das condições das descontinuidades encontradas em campo conforme o ANEXO B – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA Q DE BARTON.

Tabela 9: Condições das descontinuidades.

	Condição	Peso
Abertura	0,1 a 1 mm	4
Rugosidade	Pouco Rugoso (Plano)	3
Persistência	Varia de 3 a 10 metros	2
Preenchimento	Mole < 5mm	2
Grau de Alteração	Fortemente alterado	1

Sobre a abertura das descontinuidades, em campo notou-se a predominância menor que 1 mm, no entanto, a grande maioria, principalmente as famílias 1, 2 e 3 eram preenchidas com óxido de manganês. O plano da descontinuidade se apresentou pouco rugoso e fortemente alterados, principalmente quando em presença com óxido de manganês.

Não foi considerado, apesar de nos dias dos trabalhos em campo o talude se encontrar úmido, o fator água. O que significa que ele foi tratado como talude seco para fins de classificação e obtenção dos parâmetros de resistência.

4.2 Teste do martelo de Geólogo – Resistência da Rocha Intacta:

Um dos parâmetros que é levado em consideração para a classificação RMR é a resistência da rocha intacta, essa foi aferida através do teste do martelo de geólogo e comparada com a tabela da ISRM (Tabela 4: Grau de resistência do maciço rochoso.). Um teste simples e de fácil realização. A Tabela 4 mostra a classificação das três principais rochas do talude.

A atenção vai para a classificação do moscovita xisto, cujo resistência média foi estimada de grau 3 (R3) com valores que variam de 25 a 50 Mpa, uma vez que o maciço foi fraturado com um único golpe de martelo e não foi riscado por um canivete. Salienta-se que para que o objetivo principal da pesquisa fosse alcançado foi considerado apenas a resistência da rocha moscovita xisto, visto que a grande maioria dos dados foram levantados sobre elas (atitude das descontinuidades por exemplo).

Tabela 10: Grau de resistência do maciço rochoso.

Grau	Resistência (Mpa)	Descrição	Aspectos observados
R0	0,25 – 1,00	Extremamente branda	Marcada pela unha
R1	1,00 – 5,00	Muito branda	Esmigalha-se com um golpe de martelo. Raspada com canivete.
R2	5,00 – 25,0	Branda	Marcada com a ponta do martelo em golpe firme. Raspada com dificuldade com o canivete.
R3	25,0 – 50,0	Resistência média	Amostras fraturadas com único golpe de martelo. Não risca com canivete.
R4	50,0 – 100	Resistente	Mais de um golpe de martelo para fraturar a rocha.
R5	100 – 250	Muito resistente	Muitos golpes de martelo para fraturar a rocha.
R6	> 250	Extremamente resistente	Amostras somente lascadas com golpes de martelo.

Fonte: Adaptado do ISRM (1981).

O resultado final do teste do martelo de geólogo está organizado conforme a Tabela 11: Grau de Resistência da rocha intacta.

Tabela 11: Grau de Resistência da rocha intacta.

	Grau de resistência	Intervalo de Resistência (Mpa)
Moscovita Xisto	R3	25 a 50

Clorita Xisto	R2	5 a 25
Anfíbolito	R1	1 a 5

A ISRM (1981) leva em consideração que o grau R3 refere-se a rochas que podem ser quebradas sob poucos golpes firmes do martelo de geólogo. Além disso, elas possuem bordas finas que podem ser quebradas com a mão com dificuldade, possuem superfície pouco riscável pelo canivete e ainda necessitam de desmonte por explosivo. No talude em questão em nenhum momento a rocha foi desmontada por explosivos, mas as demais características se encaixaram para o moscovita xisto.

Sobre o grau R2 a ISRM (1989) diz que o maciço quebra sob único impacto e é gerado uma cavidade rasa sob impacto firme da ponta final do martelo de geólogo. As bordas dos fragmentos podem ser quebradas pela pressão dos dedos e a lâmina do canivete provoca sulco acentuado na superfície do fragmento. No entanto, podem ser escavadas por equipamentos mecanizados, exigindo em alguns casos, fogo de afrouxamento do maciço. A clorita xisto foi a rocha que melhor se encaixou nessas características.

Para o anfíbolito, considerado como de menor valor de resistência notou-se que ao impactar a rocha com um golpe de martelo houve uma fragmentação total do material. O canivete provocou um sulco profundo na rocha e foi possível ainda fragmentá-las com as pontas dos dedos, por isso da classificação R1.

Uma possível explicação para diferença de graus de resistência para essas rochas pode estar atrelada a dois fatores. O primeiro é a composição mineralógica, de todas as três rochas a que é formada por minerais mais frágeis em relação ao intemperismo é o anfíbolito. A muscovita, principal componente do muscovita xisto é o mineral mais resistente ao intemperismo das três litologias. Outro fator que pode contribuir está relacionado a forma que estão os pacotes de rocha. De todos eles o Clorita Xisto é o que está mais exposto ao intemperismo, o Moscovita xisto vem logo em seguida. O Anfíbolito está em menor quantidade cortando as duas rochas em determinadas regiões do talude.

4.3 Classificação Geomecânica:

De posse dos dados de campo foi realizado a classificação geomecânica do maciço. Os resultados e discussões relacionado aos valores das classificações RQD, RMR, Q de Barton e GSI estão descritas nos itens 4.3.1 RQD, 4.3.2 RMR 4.3.3 Q de Barton e 4.3.4 GSI

respectivamente. A relação dos sistemas RMR, Q de Barton e GSI também são discutidas a seguir.

4.3.1 RQD

Devido à inexistência de testemunhos de sondagem do maciço rochoso e a invalidez da fórmula proposta por Palmström (1987) para este trabalho, o RQD foi estimado a partir da equação proposta por Hudson e Harrison (1997). A Equação 2.2: Fórmula para cálculo do RQD segundo Hudson & Harrison (1997). proposta por Palmström (1987) foi usada desconsiderando a foliação da rocha, uma vez que o espaçamento médio entre as lâminas da foliação foi tão baixo a ponto de invalidar a equação para esse trabalho. Para a aplicação da fórmula de Hudson e Harrison, foi utilizado da técnica de scanline, em toda a área do talude analisada e mediu-se a frequência que as descontinuidades cruzassem a linha.

O comprimento de talude utilizado para cálculo foi de 6m em que foram observadas 65 descontinuidades, contudo a frequência das descontinuidades foi dada como:

$$f = \frac{\text{Número de descontinuidades que interceptam a linha}}{\text{Comprimento da Linha}} = \frac{65}{6} = 10,83$$

A aplicação da fórmula de Hudson e Harrison (1997) segue a

Equação 2.2

$$RQD = 100e^{-0,1f}(0,1f + 1) = 100e^{-0,1 \times 10,83}(0,1 \times 10,83 + 1) = 70,52\%$$

Para o valor de RQD calculado de 70,52 % e seguindo a Tabela 1: Classificação da qualidade da rocha de acordo com o valor de RQD em %, verifica-se que a qualidade do maciço pode ser considerada como de 50 a 75% o que representa um talude regular em termo de qualidade. A comparação do RQD obtido pela fórmula de Hudson e Harrison (1997) com a realidade do maciço leva a dizer que houve baixa compatibilidade, uma vez que o maciço em si se apresenta muito fragmentado, mas esperava-se um valor mais baixo de RQD.

Tabela 12: Classificação da qualidade da rocha de acordo com o valor de RQD em %.

RQD (%)	Qualidade do Maciço	Índice de qualidade
0 – 25	Muito fraco	A
25 – 50	Fraco	B
50 – 75	Regular	C
75 – 90	Bom	D

90 – 100	Excelente	E
----------	-----------	---

Fonte: adaptado de Deere et al. (1967).

Contudo o índice volumétrico de juntas foi calculado para auxílio da classificação do maciço rochoso como proposto por Palmström (1987) com os espaçamentos obtidos em campo, os valores de J_v considerando o espaçamento médio de todas as famílias (incluindo a foliação) foi de 58,95; já quando não se considera a foliação esse valor cai para 8,95.

$$J_v(\text{famílias} + \text{foliação}) = \sum \frac{1}{S_i} = \frac{1}{0,2263} + \frac{1}{0,3527} + \frac{1}{0,5889} + \frac{1}{0,02} = 58,95$$

$$J_v(\text{famílias}) = \sum \frac{1}{S_i} = \frac{1}{0,2263} + \frac{1}{0,3527} + \frac{1}{0,5889} = 8,95$$

O valor do índice volumétrico de juntas, comparando com a Tabela 2, mostra uma classificação mais compatível com o campo que diz que o maciço em questão é muito descontínuo por estar dentro de uma faixa de J_v de 30 a 100, ao considerar o J_v de 58,95. Para o segundo caso o talude pode ser considerado moderadamente descontínuo visto que o valor obtido de 8,95 se encaixa na faixa de 3 a 10 no valor de J_v .

Os resultados obtidos para o RQD são questionáveis devido à variabilidade presente nos resultados obtidos ao comparar os dois autores. Apesar do valor do índice volumétrico de juntas se mostrar compatível com o que é a realidade do maciço, a melhor fórmula que se ajustou para o cálculo de RQD foi a de Hudson e Harrison (1987) assim sendo, o maciço do talude em questão foi considerado regular por apresentar o valor de RQD de 50 a 75%.

4.3.2 RMR

As planilhas para o cálculo do RMR se encontram no ANEXO A – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR. O resultado final obtido para o maciço estudado é apresentado Tabela 13. Vale ressaltar que para tal classificação, o talude foi considerado seco.

Tabela 13: Valores da classificação RMR do maciço

Objeto de análise:	Valores	Peso
Resistência a Compressão Uniaxial	25 – 50 Mpa	4
RQD	50 – 75%	13
Espaçamento	200 – 600mm	10
Persistência	3-10 m	2
Abertura	0,1 – 1 mm	4

Rugosidade	Pouco rugoso	3
Preenchimento	Mole < 5mm	2
Grau de Alteração	Fortemente alterado	1
Valor total		39

Fonte: autoria própria.

Pela Tabela 13 observa-se que as condições das descontinuidades (Persistência, Abertura, Rugosidade, Preenchimento e Grau de Alteração), foram responsável pela segunda maior parcela na classificação, o peso total foi de 12. O RQD foi o parâmetro de maior peso na classificação RMR com peso 13.

Ao verificar o ANEXO A – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR, é possível obter para o valor de RMR, a classe que se encaixa o talude. A região do talude em análise se encaixa na classe IV, cuja descrição é dada como ruim por possuir um RMR de 21 a 40. Por meio dessa classe é possível ainda estimar o comportamento do maciço através das faixas de valores de coesão e o ângulo de atrito que valem de 100kPa a 200 kPa para a coesão e de 15° a 25° para o ângulo de atrito. Os valores aqui explicados são mostrados na Tabela 14.

Tabela 14: Resultado do valor de RMR, classe, coesão e ângulo de atrito.

Objeto de Análise	Valores
Valor de RMR	21- 40
Classe do Maciço	IV
Descrição segundo a classe	R1
Coesão	100 – 200 kPa
Ângulo de atrito	15° - 25°

Fonte: Autoria própria.

Para fins de análise cinemática e por conservadorismo, os valores de ângulo de atrito e coesão a considerar foram de 15° e 100 kPa.

4.3.3 Q de Barton

Os resultados obtidos utilizando o Sistema – Q estão apresentados na Tabela 15 tendo como base os valores que estão em ANEXO B – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA Q DE BARTON.

Tabela 15: Resultados do sistema de classificação Q.

Termo em análise:	Descrição	Peso
Jn	Quatro famílias ou mais de fraturas	15

Jr	Fraturas rugosas ou irregulares, planas	1,5
Ja	G- Fraturas com preenchimento argiloso sobre consolidado (espessura < 5 mm) $\phi=16-24^\circ$	6
Jw	Não foi considerado	-
SRF	Não foi considerado	-

Fonte: Autoria própria.

De posse dos pesos obtidos pelas planilhas, obtém-se o valor de Q de 1,17 que, corresponde a um maciço de padrão geomecânico ruim, de classe VI cujo valores de Q variam de 1 a 4 (Tabela 7). Importante ressaltar que foi considerado o valor de 70,52% de RDQ e que a equação utilizada para o cálculo é a Equação 3: Equação proposta por Barton et. al. (1974) para cálculo de índice Q.

Em relação aos parâmetros de resistência, a classificação do maciço rochoso segundo Q de Barton forneceu o ângulo de atrito variando de 16 a 24 graus. A primeira parcela da Equação 3: Equação proposta por Barton et. al. (1974) para cálculo de índice Q. representa de forma grosseira que os blocos estão dimensionados em 3,93 metros. O arco tangente da divisão Jr/Ja, segunda parcela da equação, forneceu um ângulo de atrito igual a $14,04^\circ$. O índice de condições de tensões ativa no maciço rochoso, representado pela terceira parcela da Equação 3: Equação proposta por Barton et. al. (1974) para cálculo de índice Q. foi considerada como sendo igual a 1, ou seja, tanto o Jw como o SRF foram considerados como mesmo valor e diferente de zero.

Sobre a correlação dos resultados de RMR e Q de Barton, nota-se que utilizando a Equação 4: Relação entre os sistemas RMR de Bieniawski e sistema Q de Barton que o RMR calculado vale 45,41. A diferença do RMR calculado pela relação com o sistema Q com o RMR tabelado é de 6,41 unidades, mostrando assim uma boa concordância entre os dois sistemas de classificação.

$$RMR = 9 \ln Q + 44 = 9 \ln(1,17) + 44 = 45,41$$

4.3.4 GSI

De todos os sistemas de classificação geomecânica o GSI foi o primeiro a ser executado pela facilidade de aplicação. O ábaco utilizado para tal classificação é ilustrado no ANEXO C – CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA GSI DE HOEK. cujo resultado final está ilustrado na Figura 4.3.10. Para o talude em questão notou-se que a faixa mais parecida, de acordo com o ábaco está compreendida entre valores de 30 a 45. Em campo as condições das superfícies das

descontinuidades foram consideradas como sendo razoáveis. Quanto a estrutura do maciço, o mesmo se apresenta de forma compartimentada.

GSI - Geological Strength Index Índice Geológico de Resistência - maciços diaclasados A partir da litologia, da estrutura do maciço e das características das superfícies das suas descontinuidades, estimar o valor médio de GSI. Não ser demasiado preciso (é mais realista referir um intervalo de GSI=33-37 que afirmar GSI=35) É de referir que a tabela não tem validade para roturas determinadas pela estrutura do maciço. Quando ocorram descontinuidades desfavoravelmente orientadas determinarão o comportamento da escavação. No caso de descontinuidades com preenchimento que se possa deteriorar com a presença de humidade, resultando na diminuição da resistência ao corte, sugere-se o uso de valores mais à direita. A ação da pressão da água é analisada em função das tensões efectivas.		CONDIÇÕES DAS SUPERFÍCIES DAS DESCONTINUIDADES				
ESTRUTURA		MUITO BOAS - Muito rugosas, inalteradas	BOAS - Rugosas, pouco alteradas, vestígios de oxidação	RAZOÁVEIS - Lisas, moderadamente alteradas a alteradas	FRACAS - Polidas, superfícies muito alteradas com revestimento compacto ou com preenchimentos de material anguloso	MUITO FRACAS - Polidas, superfícies muito alteradas com revestimento ou preenchimento argiloso mole
 INTACTA OU MACIÇA - Rocha intacta ou maciça com descontinuidades em pequena quantidade e muito afastadas.	90 80				NA	NA
 COMPARTIMENTADO - Maciço rochoso não perturbado, constituído por blocos cúbicos bem travados entre si, definidos por três famílias de descontinuidades.	70 60					
 MUITO COMPARTIMENTADO - Maciço rochoso parcialmente perturbado com blocos angulares e multifacetados, travados entre si, formados por 4 ou mais famílias de descontinuidades.	50 40					
 COMPARTIMENTADO/TECTONIZADO - Maciço rochoso dobrado e/ou cisalhado, com blocos angulosos formados por bastantes intercepções de várias descontinuidades. Persistência da xistosidade ou planos de fraqueza.	30					
 DESINTEGRADO - Maciço rochoso muito perturbado, muito fracturado, com mistura de material angular e arredondado.	20					
 FOLIADO/LAMINADO - Maciço rochoso foliado, dobrado e tectonizado; A estrutura do maciço é conferida pela presença de planos de xistosidade ou de corte pouco espaçados; sem formação de blocos devido à prevalência da xistosidade.	NA	NA				10

Figura 4.3.10: Resultado da classificação GSI.

Ao correlacionar as classificações RMR, pela Equação 5, cujo valor do GSI pode ser considerado como sendo o valor encontrado do RMR menos 5 unidades, encontrou-se, considerando o RMR de 39, um GSI de 34. A diferença entre o que foi encontrado pela equação e o que foi encontrado em campo é de apenas uma unidade ao considerar o valor médio encontrado em campo (35).

$$GSI = RMR - 5 = 39 - 5 = 34.$$

Ao relacionar o valor de Q para achar o valor de GSI obteve-se um valor de 44,14; que se encaixa dentro da faixa considerada do GSI como visto na Figura 4.3.10: Resultado da classificação GSI.

$$GSI = \ln Q + 44 = \ln(1,17) + 44 = 44,14$$

4.4 Estimativa do parâmetro de resistência:

Para a determinação dos parâmetros de resistências o *software* RocData foi utilizado. Dois critérios foram considerados para determinação dos parâmetros, foram eles: o critério de Hoek e Brown e o critério de Barton e Bandis. Os principais parâmetros encontrados no critério de Hoek e Brown são a coesão e o ângulo de atrito. Tais valores desses critérios podem ser usados, em uma visão não tão conservadora na análise cinemática. As Figura 4.411 e Figura 4.412 ilustram os resultados encontrados com o critério de resistência de Hoek & Brown e Barton & Bandis, a envoltória de Hoek e Brown para o mesmo critério e os parâmetros de resistências encontrados.

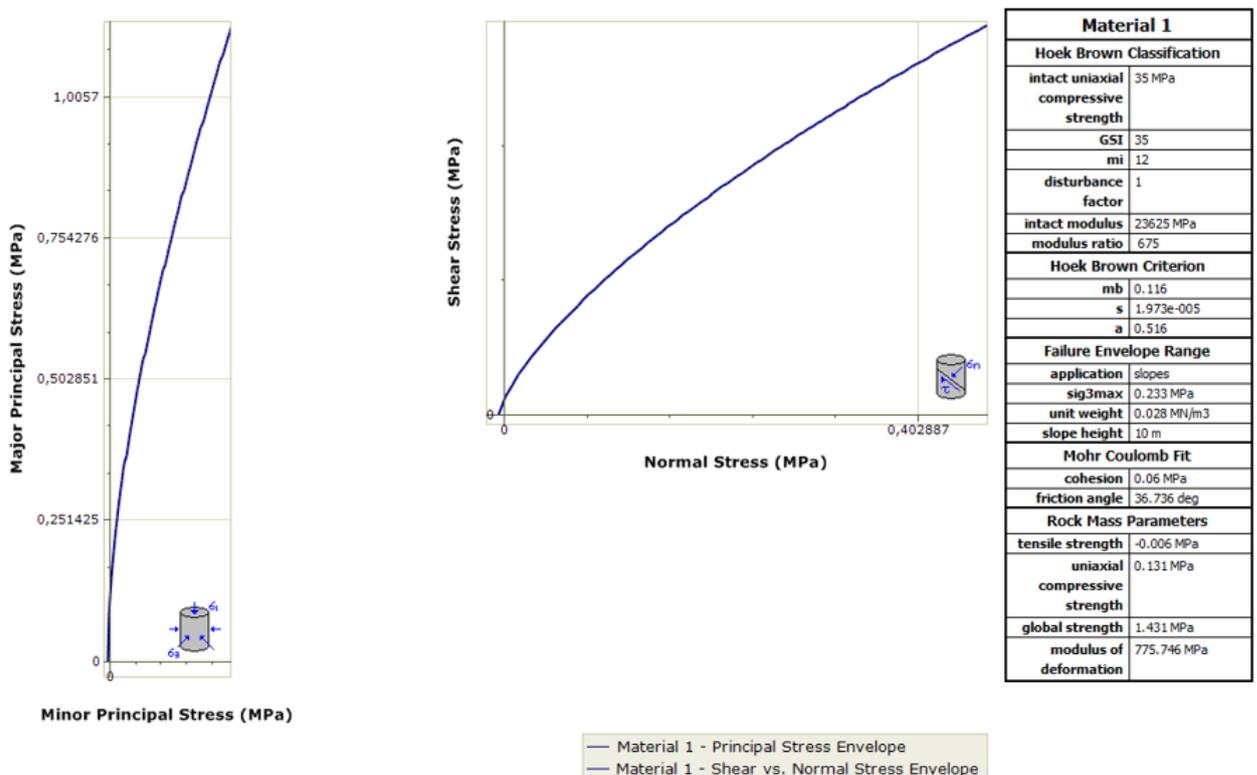


Figura 4.411: Resultados do critério Hoek e Brown.

Sobre o critério de resistência de Hoek e Brown infere-se que:

- O ângulo de atrito estimado é de 36°;
- O valor de coesão estimado é de 0,06 Mpa;
- O valor de mi foi de 12 conforme o próprio programa sugere para os xistos;
- O valor de GSI usado foi o médio calculado pelo sistema de classificação (35);
- O valor de resistência a compressão de rocha intacta considerado para esse foi

de 35 MPa, pelo martelo de geólogo foi visto um valor entre 25 a 50 MPa;

- O talude foi considerado extremamente perturbado, $D = 1$;
- Valores de mb , s e a medidos foram de 0,116; $1,97e^{-5}$ e 0,516 respectivamente;
- O máximo valor de $\text{Sig}3$ foi de 0,233 Mpa;
- A altura do talude foi considerada de 10 m;

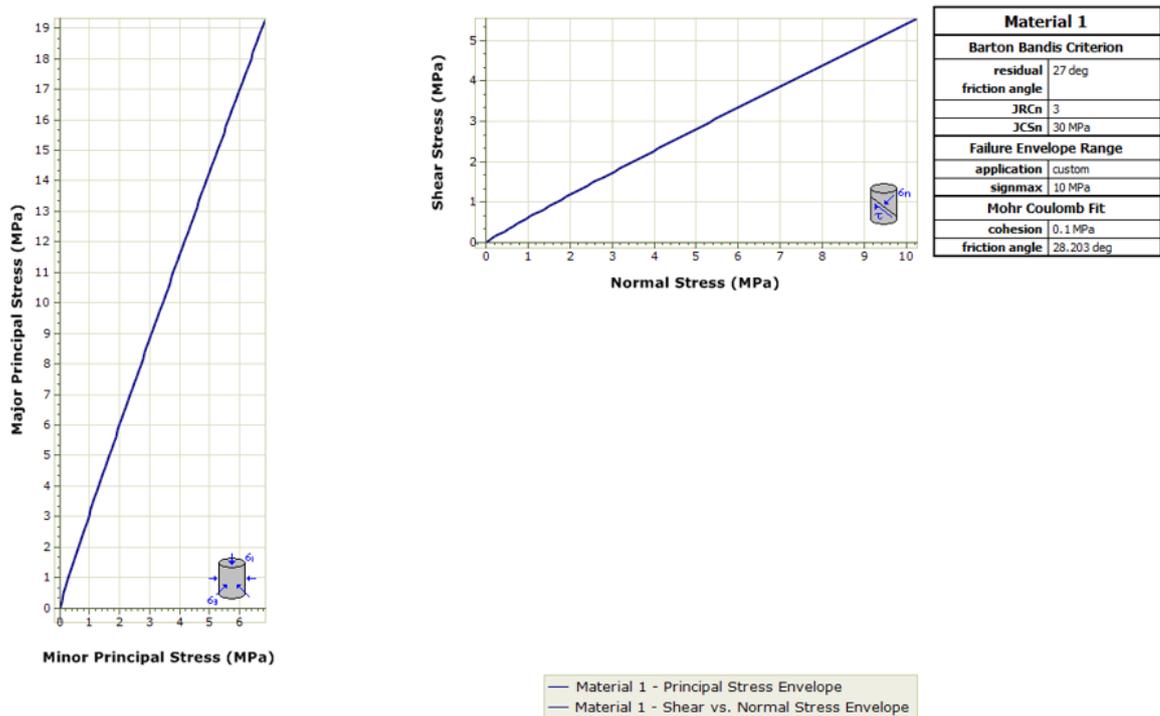


Figura 4.412: Resultados do critério de Barton e Bandis.

Sobre o critério de resistência de Barton e Bandis infere-se que:

- O ângulo de atrito residual vale 27° ;
- Os valores de JRC e JCR valem respectivamente 3 e 30 MPa;
- O valor do ângulo de atrito é de $28,203^\circ$;
- O valor da coesão vale 0,1MPa.

Sobre os valores de critério de resistência obtidos pelo *software* é importante destacar que todos foram considerados de acordo as determinadas situações, por exemplo, o valor de m igual a 12 para o critério de Hoek Brown refere-se ao xisto, no entanto, refere-se a uma rocha sem o grau de alteração que se encontra em campo. Para tanto, os resultados obtidos pelos

critérios ajudam a entender como os maciços se comportam quando sujeito a determinados esforços e condições.

4.5 Análise Cinemática:

Para a análise cinemática, o ângulo de atrito considerado foi de valor de 15° , e a entrada para atitude do talude foi de 280° de direção de mergulho e 54° para o valor do mergulho do talude. Ainda sobre a análise cinemática, sabe-se que a escolha do ângulo de atrito envolve a situação mais crítica para o talude em se tratando de riscos de ruptura.

As análises cinemáticas foram realizadas no *software* Dips v. 5 da Rocscience Inc. Os resultados de probabilidades de rupturas significativos foram a ruptura planar e cunha, cujo valores foram de 33,33% e 22,92% respectivamente. As Figura 4.513 e 4.14 apresentam as análises cinemáticas probabilísticas para ruptura planar e por cunha, respectivamente.

Sobre as famílias responsáveis pelas rupturas discute-se os seguintes pontos:

- A foliação da rocha é responsável pela ruptura planar;
- As famílias 1 e a foliação da rocha são responsáveis pelos 22,92% de probabilidade de ruptura em cunha;

Uma suposta hipótese para explicar a ruptura em cunha observada em campo de grande extensão (Figura 2.10) pode ser resultado do processo de escavação do talude na época do retaludamento, ruptura esta é formada pelas famílias 1 e 3. Uma possível explicação é que na época do retaludamento a escavadeira foi suavizando o talude até chegar a atual configuração. Durante a escavação, ocorreu a formação da cunha, sem o devido deslocamento. Contudo, com a chegada do período chuvoso, o talude, além de supersaturado, se tornou menos resistente e permitiu com que todo o material da cunha formada fosse deslocado para configuração da Figura 2.10.

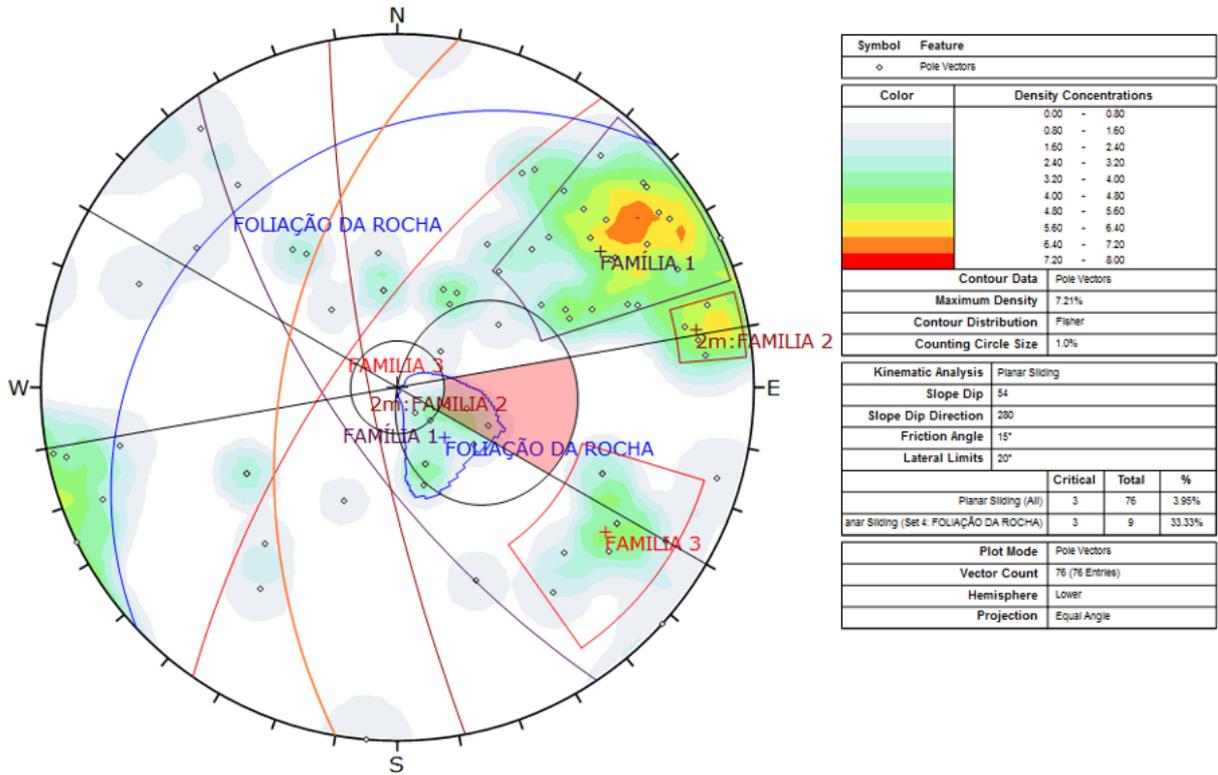


Figura 4.513: Probabilidade de mecanismos de ruptura planar.

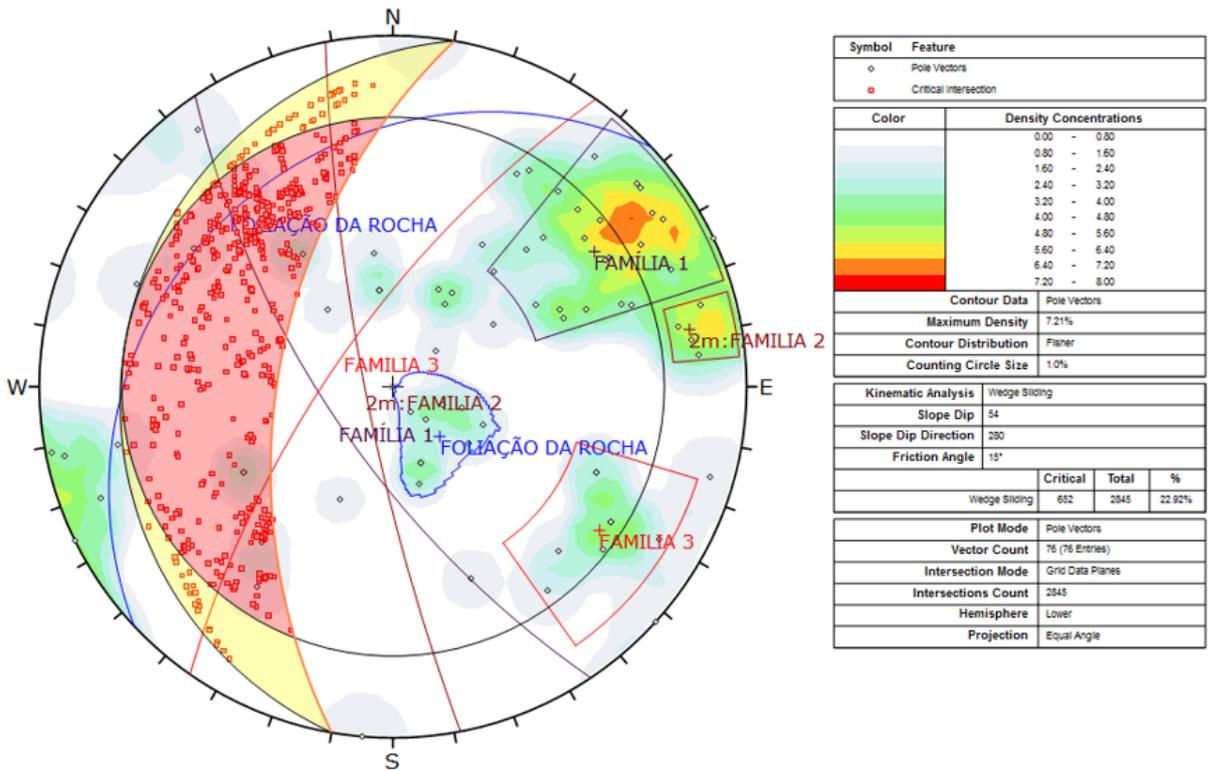


Figura 4.14: Probabilidade de mecanismo de ruptura em cunha.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o final de todos os trabalhos o objetivo principal do trabalho foi alcançado, ou seja, a caracterização do talude da BR146. Para isso, todos os dados obtidos em campo foram devidamente utilizados para a classificação e caracterização do maciço rochoso para posterior análise cinemática.

O maciço em questão apresentou inúmeras dificuldades em suas medições, fazendo com que a atenção para tomadas dos dados fosse redobrada. Alguns parâmetros usados nas classificações foram estimados, como a persistência e, em alguns casos, o espaçamento médio das descontinuidades. Outra dificuldade encontrada durante a classificação do maciço está relacionada ao fato do teor qualitativo do método, o que não favorece na uniformidade dos resultados. De todos os sistemas de classificações o RQD apresentou ser um bom índice para estipular a qualidade do maciço.

Apesar de todas as adversidades, generalizações e suposições encontradas durante o estudo, os resultados das classificações geomecânicas foram todos satisfatórios. Os valores encontrados de RMR, Q de Barton e GSI de Hoek, apresentaram-se praticamente os mesmos, quando correlacionados de acordo com suas equações.

O talude em questão foi considerado de classe IV, cuja descrição é dada como ruim por possuir um RMR de 21 a 40, com padrão geomecânico ruim, de classe VI cujo valores de Q variam de 1 a 4, conforme Q de Barton e está compreendida entre valores de 30 a 40, segundo a classificação de GSI de Hoek. Em campo, as condições das superfícies das descontinuidades foram consideradas como sendo razoáveis. Quanto a estrutura do maciço, o mesmo se apresenta de forma compartimentada, também segundo GSI de Hoek.

Os valores dos parâmetros de resistências foram estimados para conseguir melhores resultados nas análises cinemática, no entanto, não se mostraram tão compatíveis ao utilizar o critério de Hoek e Brown e o de Barton e Bandis uma vez que, para o programa utilizados, alguns parâmetros poderiam ser superestimados.

Esperava-se que, com a análise cinemática uma maior probabilidade de ruptura em cunha pelas famílias 1 e 3, o que não ocorreu. No entanto essa foi presente entre as descontinuidades da família 1 e da foliação da rocha, com o valor de 22,22%. A ruptura planar poderá acontecer nos planos de foliação da rocha. A previsão de possíveis mecanismos de rupturas é o início para o estudo de estabilidade do talude.

Para trabalhos futuros sugere-se a caracterização do maciço rochoso com realização de ensaios de laboratório para que se tenha resultados mais concretos.

Esse trabalho mostrou a importância do uso de classificações geomecânicas como apoio para determinação dos parâmetros de resistência e análise cinemática de taludes de rocha.

Como futuros estudos sugere-se o estudo de estabilidade do mesmo talude através da determinação do fator de segurança do mesmo. Tal pesquisa poderá colaborar ainda mais para a segurança da população, visto que métodos de contenção de massas poderão ser sugeridos. Outra sugestão de pesquisa relaciona-se ao estudo da procura de um modelo matemático alternativo para o cálculo de RQD para rochas mais alteradas, cujo valores de J_v determinam valor de RQD maiores 100% segundo a fórmula de Palmström.

REFERENCIAS

ABRAMSON, L. W. et al. **Slope Stability and Stabilization Methods**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.

ASSIS A.P. **Apostila de Mecânica das Rochas**. Universidade de Brasília, 2013. Disponível em: <<https://www.studocu.com/pt-br/document/universidade-de-brasilia/mecanica-das-rochas/apostila-de-mecanica-das-rochas-andre-assis-unb/17358671>>. Acesso em 03 Jan 2022.

AMARAL R. R. **Caracterização geológica-geotécnica de de maciços rochos marginais à BR 262 entre Pará de Minas e Nova Serrana**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Minas, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2019. Disponível em: CEFET-MG. Disponível em: <https://www.eng-minas.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/170/2020/02/TCC_Rafaella_Resende.pdf>. Acesso em 03 Jan.2022.

AZEVEDO & MARQUES. **Introdução à Mecânica das Rochas**. Viçosa: UFV, 2002. 363p Disponível em: <<https://xdocs.com.br/doc/introducao-a-mecanica-das-rochaslivro-13-de-marco-de-2012-4olrez77edom>>. Acesso em 11 Dez. 2021.

BARTON, N. R.; CHOUBEY, V. **The shear strength of rock joints in theory and practice**. Rock Mechanics, vol 10, n. 1-2, 1977, pp 1-54.

BARTON, N. R; et al. **Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints**. *Int. J. Rock Mech, Min. Sci.*, v.3, p. 121-140, 1985.

BARTON, N. R. et al. **Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support**. Rock Mechanics Felsmechanik Mecanique des Roches. 6. 189-236. 10.1007/BF01239496. 1974

BIENIAWSKI Z. T. **Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering**. John Wiley & Sons, New York, 251. pp, 1989.+.-

CAMPOS F. F. **Estudo Da Estabilidade De Um Talude De Filito Na Região Metropolitana De Blo Horizonte**. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Minas, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2020. Disponível em: CEFET-MG. Disponível em <https://www.eng-minas.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/170/2021/08/Filipe-Fonseca-de-Campos.pdf>>. Acesso em 03 Jan.2022.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações. Fundamentos**. 6. Ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. Volume 1, 2008. 244 p.

DEERE, D. U., HENDRON, A. J., PATTON, F. D. AND CORDING, E. J. **Design of surface and near surface construction in rock**. In *Failure and breakage of rock, proc.*

8th U.S.symp. Rock mech., 237-302. New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs. 1967.

FERREIRA, M. **Análise de estabilidade de taludes pelos métodos Janbu e Spencer.** Faculdade de Engenharia. Dissertação (mestrado). Universidade do Porto: 2012. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/64689/1/000151854.pdf>. Acesso em 07 Dez. 2021.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 166 p.

GOODMAN, R. E., **Introduction to Rock Mechanics.** New York, Willey, 1989, 562 p.

GOOGLE EARTH. Disponível em:< <https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>>. Acesso em: 07 jan. 2022.

GUIDICINI, G.; Nieble, C. M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação.** São Paulo:Blucher, 1983. 196 p.

HOEK, E.; BROWN, E. T. **Underground excavations in rock.** London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981. 527 p.

HOEK, E.; BROWN, E.T. **Practical estimates of rock mass strength.** International Journal of Rock Mechanics And Mining Sciences, [s.l.], v. 34, n. 8, p.1165-1186, dez. 1997.

HUDSON, J. A.; HARRISON J. P. **Engineering rock mechanics: an introduction to the principles.** Elsevier Science Ltd Oxford, UK, 1997.370 p.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS . **Rock Characterization, Testing and Monitoring – ISRM Suggested methods,** Pergamon Press, Oxford, E.T. Brown (ed), 1981, p.211.

JAQUES, D. S. **Caracterização e classificação de maciços rochosos da mina de volta grande, nazareno, minas gerais.** 2014. Tese (Magister Scientiae) – Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2014. Disponível em: <<https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/3841>> Acesso em 07 Jan. 2022.

MAIA P. A. S. **Sobre o uso do GSI na avaliação do efeito da variabilidade do maciço no dimensionamento de túneis.** 2011 Tese (Mestrado) – Especialização em Geotecnia, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2011. Disponível em:< <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/62040/1/000149350.pdf>>. Acesso em: 02 Jan. 2022

MOURA S.L. **Efeitos da utilização de drenos horizontais profundos para estabilidade e otimização de taludes em uma mina de fosfato.** 2019. Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas . CEFET-MG.

2019. Disponível em: < https://www.eng-minas.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/170/2020/02/TCC_Lucas_-Santos_-Moura.pdf > Acesso em: 07 Jan. 2022.

OLIVEIRA; BRITO. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. 586 p.

PALMSTRÖM (1996). **Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD)**. Tunnels and Underground Space Technology. 1996.

PALMSTRÖM A.; SINGH R. **The deformation modulus of rock masses - comparisons between in situ tests and indirect estimates**. Tunneling Underground Space Technol 2001; vol.16, 2001, pp.115-131.

SANTOS, T. B. **Aplicabilidade das classificações geomecânicas e retroanálises para estimação das propriedades dos maciços rochosos**. 2015. Teses (Mestrado) - Programa de Pós- Graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2015. Disponível em: < https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/5803/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_AplicabilidadeClassifica%C3%A7%C3%B5esGeomec%C3%A2nicas.pdf >. Acesso em 07 Dez. 2022.

SINGH; GOEL. **Rock Mass Classification: a practical approach in civil engineering**. Oxford, UK: Elsevier Science Ltda, 1999. 267 p.

SINGH; GOEL. **Engineering Rock Mass Classification: Tunneling, Foundations, and Landslides**. Oxford, UK: Elsevier Science Ltda, 2011. 365 p.

ANEXO A – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR

Fonte: Assis (2013).

A PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO COM SEUS PESOS									
Parâmetro			Faixa de valores						
1	Resistência da rocha intacta (MPa)	Índice de carga puntiforme	>10	4-10	2-4	1-2	Para menores valores, recomenda-se ensaio (σ_c)		
		Resistência a compressão uniaxial	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Peso	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Peso		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		>2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm		
	Peso		20	15	10	8	5		
4	Padrão das descontinuidades (ver tabela E)		Superfície muito rugosa, e sem alteração, fechadas e sem persistência	Superfície pouco rugosa e levemente alteradas, abertura <1 mm	Superfície pouco rugosa e muito alteradas, abertura <1 mm	Superfície estriada ou espessura de preenchimento <5 mm ou abertura persistente de 1-5 mm	Espessura de preenchimento com material argiloso >5 mm ou abertura persistente >5 mm.		
	Peso		30	25	20	10	0		
5	Ação da água subterrânea	Vazão de infiltração por 10 m de túnel (l/m)	nulo	<10	10-25	25-125	>125		
		(pressão de água na junta)/ σ_1	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5		
	Condições gerais no maciço		Completamente seco	úmido	molhado	gotejamento	fluxo abundante		
	Peso		15	10	7	4	0		

B CORREÇÃO POR DIREÇÃO E ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES (ver Tabela F)						
Direção e orientação do mergulho		Muito Favorável	Favorável	Moderado	Desfavorável	Muito Desfavorável
Pesos	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

C DETERMINAÇÃO DAS CLASSES DO MACIÇO ROCHOSO EM FUNÇÃO DO PESO TOTAL					
Peso	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	<21
Número da classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Excelente	Bom	Regular	Ruim	Péssimo

D COMPORTAMENTO DO MACIÇO ROCHOSO POR CLASSE					
Número da classe	I	II	III	IV	V
Tempo médio de auto-sustentação / tamanho do vão	20 anos / 15 m	1 ano / 10 m	1 semana / 5 m	10 h / 2,5 m	30 min / 1 m
Coesão do maciço rochoso (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Ângulo de atrito do maciço rochoso (°)	>45	35-45	25-35	15-25	<15

E GUIA PARA A CLASSIFICAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES					
Persistência / Comprimento (m)	<1	1-3	3-10	10-20	>20
Peso	6	4	2	1	0
Abertura / Espessura (mm)	Nula	<0,1	0,1-1,0	1-5	>5
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Pouco rugosa	Lisa	Superfície estriada
Peso	6	5	3	1	0
Preenchimento (característica) / Espessura (mm)	Nulo	duro / <5	duro / >5	mole / <5	mole / >5
Peso	6	4	2	2	0
Grau de Alteração (Impermeabilidade)	Inalterada	Levemente alterada	Moderada, alterada	Fortemente alterada	Decomposta
Peso	6	5	3	1	0

F EFEITOS DA DIREÇÃO E ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES, EM TÚNEIS*					
Direção Perpendicular ao eixo do Túnel			Direção Paralela ao eixo do Túnel		
Ângulo de mergulho 45-90°	Ângulo de mergulho 20-45°		Mergulho 45-90°		Mergulho 20-45°
Muito Favorável	Favorável		Muito Favorável	Desfavorável	
Ângulo de mergulho contrário 45-90°	Ângulo de mergulho contrário 20-45°		Mergulho de 0-20° sem relação a direção		
Desfavorável	Muito Desfavorável		Desfavorável		

ANEXO B – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA Q DE BARTON

Adaptado de Barton et.al, 1974.

Valores para Jn:

Condições de compartimentação do maciço	Valores de Jn
Fraturas esparsas ou ausentes	0,5-1,0
Uma família de fraturas	2
Uma família, mais fraturas esparsas	3
Duas famílias de fraturas	4
Duas famílias, mais fraturas esparsas	6
Três famílias de fraturas	9
Três famílias, mais fraturas esparsas	12
Quatro ou mais famílias de fraturas	15
Rocha triturada (completamente fragmentada)	20

Valores para Jr:

a-Fraturas sem deslocamento relativo. Contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas	
b- Fraturas com deslocamento relativo (menos de 10 cm). Contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas	
Condições de rugosidade das paredes	Valores de Jr
A- Fraturas não-persistentes	4
B- Fraturas rugosas ou irregulares, onduladas	3
C- Fraturas lisas, onduladas	2
D- Fraturas polidas, onduladas	1,5
E- Fraturas rugosas ou irregulares, planas	1,5
Fraturas lisas, planas	1
G- Fraturas polidas ou estriadas, planas	0,5
c- Fraturas com deslocamento relativo. Não há contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas	
H- Fraturas com minerais argilosos	1
I- Zonas esmagadas	1

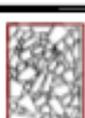
Valores para Ja:

a-Fraturas sem deslocamento relativo. Há contato rocha-rocha entre paredes das fraturas	
Condição de alteração das paredes	Valores de Ja
A- Paredes duras, compactas, preenchimentos impermeáveis (quartzo ou epidoto)	0,75
B- Paredes sem alteração, somente leve descoloração $\varphi=25-30^\circ$	1
C- Paredes levemente alteradas, com partículas arenosas e rochas desintegradas não argilosas $\varphi=20-25^\circ$	2
D- Paredes com películas siltosas ou areno-argilosas $\varphi=20-25^\circ$	3
E- Paredes com películas de matérias moles ou com baixo ângulo de atrito (caolinita, clorita, talco, grafita, etc.) e pequena quantidade de minerais expansivos $\varphi=8-16^\circ$	4
b- Fraturas com deslocamento relativo (menos de 10 cm). Há contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas	
F- Paredes com partículas de areia e rochas desintegradas, sem argila $\varphi=25-35^\circ$	4
G- Fraturas com preenchimento argiloso sobre consolidado (espessura < 5 mm) $\varphi=16-24^\circ$	6
H- Fraturas com preenchimento argiloso subconsolidado (espessura < 5 mm $\varphi=12-16^\circ$	8
I- Fraturas com preenchimento argiloso expansivo (espessura < 5 mm) $\varphi=12-16^\circ$	8 a 12
c- Fraturas com deslocamento relativo. Não há contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas	
J, K, L- Zonas com rochas trituradas ou esmagadas, com argila (ver G, H, I para condições do material argiloso) $\varphi=6-24^\circ$	6 a 8 ou 8 a 12
M- Zonas siltosas ou areno-argilosas com pequena quantidade de argila	5
N, O, P- Zonas ou bandas contínuas de argila (ver g, h, i para condições de material argiloso) $\varphi=6-24^\circ$	10 a 13 ou 13 a 20

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

ANEXO C – CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA GSI DE HOEK.

Ábaco para classificação do maciço rochoso através do GSI. Modificado de Assis (2013).

GSI - Geological Strength Index Índice Geológico de Resistência - maciços diaclasados A partir da litologia, da estrutura do maciço e das características das superfícies das suas descontinuidades, estimar o valor médio de GSI. Não ser demasiado preciso (é mais realista referir um intervalo de GSI=33~37 que afirmar GSI=35) É de referir que a tabela não tem validade para roturas determinadas pela estrutura do maciço. Quando ocorram descontinuidades desfavoravelmente orientadas determinarão o comportamento da escavação. No caso de descontinuidades com preenchimento que se possa deteriorar com a presença de humidade, resultando na diminuição da resistência ao corte, sugere-se o uso de valores mais à direita. A ação da pressão da água é analisada em função das tensões efectivas.		CONDIÇÕES DAS SUPERFÍCIES DAS DESCONTINUIDADES				
ESTRUTURA		MUITO BOAS - Muito rugosas, inalteradas	BOAS - Rugosas, pouco alteradas, vestígios de oxidação	RAZOÁVEIS - Lisas, moderadamente alteradas a alteradas	FRACAS - Polidas, superfícies muito alteradas com revestimento compacto ou com preenchimentos de material angular	MUITO FRACAS - Polidas, superfícies muito alteradas com revestimento ou preenchimento argiloso mole
 INTACTA OU MACIÇA - Rocha intacta ou maciça com descontinuidades em pequena quantidade e muito afastadas.	90 80				NA	NA
 COMPARTIMENTADO - Maciço rochoso não perturbado, constituído por blocos cúbicos bem travados entre si, definidos por três famílias de descontinuidades.		70 60				
 MUITO COMPARTIMENTADO - Maciço rochoso parcialmente perturbado com blocos angulares e multifacetados, travados entre si, formados por 4 ou mais famílias de descontinuidades.			50 40			
 COMPARTIMENTADO/TECTONIZADO - Maciço rochoso dobrado e/ou cisalhado, com blocos angulosos formados por bastantes intercepções de várias descontinuidades. Persistência da xistosidade ou planos de fraqueza.				30		
 DESINTEGRADO - Maciço rochoso muito perturbado, muito fracturado, com mistura de material angular e arredondado.				20		
 FOLIADO/LAMINADO - Maciço rochoso foliado, dobrado e tectonizado; A estrutura do maciço é conferida pela presença de planos de xistosidade ou de corte pouco espaçados; sem formação de blocos devido à prevalência da xistosidade.	NA	NA				10