



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

MATEUS ALMEIDA KRUGEL DE FARIAS

**AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE GEOMECÂNICA DE UM MACIÇO ROCHOSO NO
MUNICÍPIO DE CRATEÚS-CE SEGUNDO O MÉTODO SMR**

CRATEÚS - CE

2025

MATEUS ALMEIDA KRUGEL DE FARIAS

AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE GEOMECÂNICA DE UM MACIÇO ROCHOSO NO
MUNICÍPIO DE CRATEÚS-CE SEGUNDO O MÉTODO SMR

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

Orientador: Prof. Me. Bruno do Rêgo
Soares

Coorientador: Prof. Me. Emanuel Itaquê
de Negreiro Moreira

CRATEÚS - CE

2025

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

F238a Farias, Mateus Almeida Krugel de.
Avaliação da estabilidade geomecânica de um maciço rochoso no município de Crateús-ce segundo o método smr / Mateus Almeida Krugel de Farias. – 2025.
88 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia de Minas, Crateús, 2025.

Orientação: Prof. Me. Bruno do Rêgo Soares.

Coorientação: Prof. Me. Emanuel Itaquê de Negreiro Moreira.

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

CDD 622

MATEUS ALMEIDA KRUGEL DE FARIAS

AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE GEOMECÂNICA DE UM MACIÇO ROCHOSO NO
MUNICÍPIO DE CRATEÚS-CE SEGUNDO O MÉTODO SMR

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

Aprovada em: 07 de Agosto de 2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Bruno do Rêgo Soares (Orientador)
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Me. Emanuel Itaquê de Negreiro
Moreira (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Dr. Thiago Fernandes da Silva
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Me. Rafael Chagas Silva
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo amor e apoio incondicionais, e à minha avó **Izabel**, cuja generosidade tornou possível a realização deste sonho. Com todo o meu carinho, este trabalho é para vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar com sabedoria, iluminar meu caminho nos momentos escuros e me fortalecer diante dos desafios. Sem fé, eu não teria chegado até aqui.

Aos meus pais, **Marlene** e **José**, dedico meu mais profundo amor e gratidão. Vocês foram meu porto seguro, meu conforto e minha inspiração nos momentos de dúvida e dificuldade. O carinho, o apoio incondicional e a presença constante de vocês me deram forças para seguir em frente, mesmo quando tudo parecia difícil demais. A cada passo que dei, senti o amor de vocês me envolvendo e me incentivando a nunca desistir. Esta conquista é, antes de tudo, uma homenagem à grandiosidade do amor de vocês.

À minha irmã **Suzi**, sou imensamente grato por sua companhia, palavras de incentivo e por estar sempre pronta a me ouvir. Sua amizade foi um verdadeiro alento nos momentos de cansaço e desânimo. Saber que podia contar com você fez toda a diferença nesta jornada. Obrigado por ser essa presença tão especial e por compartilhar comigo cada desafio e conquista.

À minha noiva **Celine**, companheira de vida e de sonhos, agradeço pelo amor, paciência e apoio incondicional. Você esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis, me dando forças para continuar quando tudo parecia impossível. Seu incentivo silencioso e constante foi essencial para que eu não desistisse.

À minha querida avó **Izabel**, cuja generosidade e cuidado fizeram toda a diferença nesta jornada. Seu apoio, mesmo nas pequenas atitudes, teve um impacto profundo em minha vida. Você sempre acreditou em mim, mesmo sem dizer uma palavra, e isso nunca será esquecido.

Aos verdadeiros professores, deixo meu reconhecimento e gratidão por cada ensinamento, cada orientação e cada palavra que ajudou a construir não só este trabalho, mas a minha formação como um todo.

Aos meus orientadores, **Emanuel** e **Bruno**, minha sincera gratidão pelo comprometimento e dedicação que foram além do acadêmico. Obrigado pela paciência em guiar meus passos, pelas críticas construtivas que me fizeram crescer e pela confiança depositada no meu potencial. Vocês foram fundamentais para a realização deste trabalho, oferecendo suporte técnico e humano em todas as etapas. Aprendi muito com vocês e levarei esses ensinamentos para toda a vida.

Aos meus amigos, verdadeiros irmãos de caminhada, com quem vivi intensamente cada fase deste percurso. Choramos juntos, sorrimos juntos e, acima de tudo, nos apoiamos nos momentos mais difíceis — quando o cansaço falava mais alto, quando pensávamos em desistir, e

quando as circunstâncias fora do nosso controle nos abalavam profundamente. Cada gesto de apoio, cada palavra, cada abraço foi essencial para que eu continuasse em frente. Sabemos que seremos grandes e que poderemos sempre contar uns com os outros, fortalecendo essa amizade que já é para a vida toda. Levo comigo não só a amizade de vocês, mas também a certeza de que a caminhada vale mais quando é compartilhada com pessoas como vocês.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte dessa jornada. Esta vitória é compartilhada com todos vocês que acreditaram, apoiaram e caminharam comigo. Muito obrigado!

“Onde outros homens seguem cegamente a verdade, lembre-se: nada é verdade.

Onde outros homens são limitados pela moralidade ou pela lei, lembre-se: tudo é permitido.”

(Ezio Auditore da Firenze)

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar de forma detalhada as condições geomecânicas de um maciço rochoso localizado no município de Crateús, Ceará, região onde a exploração de gnaisses para a produção de brita gera a necessidade de estudos consistentes voltados à prevenção de colapsos e rupturas em taludes. Para o desenvolvimento do estudo, foram conduzidas análises estruturais em duas faces expostas do maciço, aplicando-se o método da scanline para o mapeamento sistemático das descontinuidades, caracterizadas quanto à orientação, espaçamento, persistência, abertura, preenchimento e rugosidade, além da estimativa da resistência à compressão uniaxial obtida por meio do ensaio indireto com martelo de Schmidt. Com base nesses dados, foram aplicados os sistemas de classificação RQD, RMR e SMR, permitindo uma análise comparativa e integrada. Os resultados indicaram uma condição global favorável, expressa por um RQD de 97,63%, enquadrado como “muito bom”, e um RMR de 81, classificado como Classe I (“excelente”), evidenciando que o maciço, de forma geral, apresenta características adequadas para a estabilidade. No entanto, a análise estereográfica demonstrou que, apesar da boa qualidade global, existem condicionantes locais que comprometem a segurança: a Face 1 apresentou indícios de ruptura planar, enquanto a Face 2 revelou a possibilidade de ruptura em cunha. Essa diferenciação foi reforçada pelo índice SMR, que, ao considerar a orientação das descontinuidades em relação aos taludes, classificou a Face 1 como “instável” (valores de 21 e 31), recomendando-se a adoção de medidas corretivas, tais como concreto projetado, drenagem superficial e pregagens localizadas, ao passo que a Face 2 foi classificada como “estável” (SMR de 72), demandando apenas inspeções periódicas e remoções pontuais de blocos instáveis. Assim, conclui-se que, embora o maciço apresente alta qualidade geomecânica em termos gerais, a avaliação diferenciada por face e a aplicação integrada dos métodos de classificação revelaram-se fundamentais para identificar setores críticos, propor medidas de engenharia específicas e garantir não apenas a estabilidade dos taludes, mas também a continuidade e segurança operacional da atividade minerária na região, destacando a relevância de estudos geotécnicos aplicados como suporte essencial ao planejamento e à sustentabilidade da mineração a céu aberto.

Palavras-chave: Classificação geomecânica. Descontinuidades. Monitoramento.

ABSTRACT

The present work aimed to provide a detailed assessment of the geomechanical conditions of a rock mass located in the municipality of Crateús, Ceará, a region where the exploitation of gneisses for crushed stone production highlights the need for consistent studies focused on preventing slope collapses and failures. For the development of the study, structural analyses were carried out on two exposed rock faces, applying the scanline method for the systematic mapping of discontinuities, which were characterized in terms of orientation, spacing, persistence, aperture, infilling, and roughness, in addition to the estimation of uniaxial compressive strength obtained through the indirect Schmidt hammer test. Based on these data, the RQD, RMR, and SMR classification systems were applied, allowing for an integrated and comparative analysis. The results indicated a globally favorable condition, expressed by an RQD of 97.63%, classified as “very good,” and an RMR of 81, corresponding to Class I (“excellent”), evidencing that, in general, the rock mass presents adequate characteristics for stability. However, the stereographic analysis demonstrated that, despite the overall good quality, local factors compromise safety: Face 1 showed indications of planar failure, while Face 2 revealed the possibility of wedge failure. This differentiation was reinforced by the SMR index, which, by considering the orientation of discontinuities in relation to slope direction, classified Face 1 as “unstable” (values of 21 and 31), for which corrective measures such as shotcrete, surface drainage, and localized rock bolting were recommended, whereas Face 2 was classified as “stable” (SMR of 72), requiring only periodic inspections and occasional removal of unstable blocks. Therefore, it is concluded that although the rock mass presents high geomechanical quality in general terms, face-specific evaluation and the integrated application of classification methods proved to be essential for identifying critical sectors, proposing targeted engineering measures, and ensuring not only slope stability but also the continuity and operational safety of mining activities in the region, highlighting the relevance of applied geotechnical studies as an essential support for planning and the sustainability of open-pit mining.

Keywords: Geomechanical classification. Discontinuities. Monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de um maciço rochoso destacando as características geomecânicas das discontinuidades.	23
Figura 2 – Representação dos planos das discontinuidades e suas orientações.	25
Figura 3 – Efeito da rugosidade e do esforço normal sob o ângulo de atrito da superfície de discontinuidade.	28
Figura 4 – Perfis de rugosidade padrão para a estimativa visual do JRC	29
Figura 5 – Principais tipos de falhamentos em taludes e condições estruturais prováveis de ocasioná-los: ruptura a) circular; b) planar.; c) em cunha; d) por tombamento.	33
Figura 6 – Esquema de tombamento que envolve a rotação de blocos sobre uma base fixa	34
Figura 7 – Ilustração de tipos comuns de tombamento, (a) tombamento de blocos, (b) tombamento flexural e (c) tombamento bloco-flexural.	35
Figura 8 – Condição estrutural para ruptura em cunha	36
Figura 9 – Geometria de uma ruptura plana	37
Figura 10 – Geometria da ruptura planar: a) Fenda de tração no topo do talude; b) Fenda de tração na face do talude. z_w = altura da água na fenda; W = peso do bloco; U = força de soerguimento causada pela água no plano de discontinuidade	38
Figura 11 – Procedimento de determinação do RQD por testemunhos de sondagem	40
Figura 12 – Diagrama em blocos com um conjunto de três famílias de juntas distintas	42
Figura 13 – Relação entre a orientação de discontinuidades e a face do talude no maciço rochoso.	47
Figura 14 – Modelo do Martelo de Schmidt.	52
Figura 15 – Representação esquemática de uma scanline.	54
Figura 16 – Fluxograma Metodológico.	60
Figura 17 – Coleta dos parâmetros necessários para as classificações.	61
Figura 18 – Método da Scanline: Seção de 5 metros	62
Figura 19 – Método da Scanline aplicado : (a) face 1 e (b) face 2	63
Figura 20 – Utilização da bússola geológica	63
Figura 21 – Utilização do Martelo de Schmidt	64
Figura 22 – Utilização do pente de Barton	65
Figura 23 – Amostras obtidas no maciço analisado.	67
Figura 24 – Maciço rochoso - Face 1.	68

Figura 25 – Planos das famílias - Face 1	69
Figura 26 – Diagrama de rosetas (a) e contorno dos polos (b) - Face 1	70
Figura 27 – Planos representativos das famílias - Face 2	72
Figura 28 – Diagrama de rosetas (a) e contorno dos polos (b) - Face 2	73
Figura 29 – Principais descontinuidades identificadas (a) face 1 e (b) face 2	76
Figura 30 – Face 1 do maciço analisado	86
Figura 31 – Face 2 do maciço analisado	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do espaçamento segundo o termo correspondente.	26
Tabela 2 – Classificação da extensão das descontinuidades.	27
Tabela 3 – Classificação das descontinuidades por intervalo de abertura.	30
Tabela 4 – Classificação do maciço rochoso pelo número de famílias de descontinuidades.	31
Tabela 5 – Classificação da qualidade da rocha baseada no índice RQD.	41
Tabela 6 – Qualidade da rocha e percentual de recuperação.	41
Tabela 7 – Intervalos e designação de fraturas.	41
Tabela 8 – Classificação das condições das descontinuidades, parâmetro 4	45
Tabela 9 – Ajuste para orientações das descontinuidades	45
Tabela 10 – Parâmetros de classificação e seus coeficientes.	46
Tabela 11 – Valores adotados para o fator F_1	48
Tabela 12 – Valores correspondentes ao fator F_2	48
Tabela 13 – Valores correspondentes ao fator F_3	49
Tabela 14 – Valores correspondentes ao fator F_4	49
Tabela 15 – Caracterização do talude consoante ao valor do SMR	50
Tabela 16 – Tipos de suporte recomendados conforme o valor do SMR	50
Tabela 17 – Classificação pelo método do martelo geológico	51
Tabela 18 – Orientação das famílias de fraturas medidas na primeira face analisada - Face 1.	69
Tabela 19 – Características geotécnicas das fraturas - Face 1.	71
Tabela 20 – Orientação das famílias de fraturas medidas na segunda face analisada - Face 2.	71
Tabela 21 – Características geotécnicas das fraturas – Face 2.	73
Tabela 22 – Leitura do rebote do Martelo de Schmidt na Face 1.	74
Tabela 23 – Leitura do rebote do Martelo de Schmidt na Face 2.	74
Tabela 24 – Valores da resistência à compressão uniaxial obtidos pela correlação (Face 1).	75
Tabela 25 – Valores da resistência à compressão uniaxial obtidos pela correlação (Face 2).	75
Tabela 26 – Espaçamentos médios e seus inversos por família de descontinuidades. . . .	76
Tabela 27 – Valor do índice de juntas volumétricas (J_v) do maciço.	77
Tabela 28 – Resultado do RQD para o maciço analisado	77
Tabela 29 – Resultado do RMR-Básico para o maciço analisado.	77
Tabela 30 – Orientações estruturais das faces e famílias de descontinuidades do maciço analisado.	79

Tabela 31 – Resultados do SMR 79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação das descontinuidades quanto ao preenchimento e percolação de água	32
Quadro 2 – Classificação Geomecânica de Bieniawski	44

LISTA DE SÍMBOLOS

J_v	Índice de Juntas Volumétricas
σ_c	Resistência à compressão uniaxial (MPa)
ρ	Densidade da rocha (g/cm ³)
RL	Valor do martelo tipo L (rebote)
Rn	Valor do martelo tipo N (rebote)
α	Ângulo
F_1	Fator de orientação estrutural (diferença de direção)
F_2	Fator de mergulho (diferença entre inclinações)
F_3	Fator de tipo de ruptura
F_4	Fator de método de escavação
θ	Ângulo de atrito interno ou direção
Δ	Variação, diferença
mm	Milímetro
cm	Centímetro
m	Metro
m^2	Metro quadrado
m^3	Metro cúbico
μm	Micrômetro
g/cm^3	Grama por centímetro cúbico
MPa	Megapascal
$\%$	Porcentagem
$^\circ$	Graus (ângulo)
$\$$	Dólar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	19
2.1	Objetivo Geral	19
2.2	Objetivos Específicos	19
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1	Caracterização de Maciços Rochosos	20
3.1.1	<i>Descontinuidades</i>	21
3.1.2	<i>Características das descontinuidades</i>	22
3.1.3	<i>Orientação</i>	24
3.1.4	<i>Espaçamento ou frequência das descontinuidades</i>	25
3.1.5	<i>Persistência das descontinuidades</i>	26
3.1.6	<i>Rugosidade da descontinuidade</i>	27
3.1.7	<i>Abertura e preenchimento das fraturas</i>	30
3.1.8	<i>Resistência das paredes ao cisalhamento</i>	30
3.1.9	<i>Número de famílias</i>	31
3.1.10	<i>Percolação de água</i>	32
3.2	Tipos de Ruptura	32
3.2.1	<i>Ruptura por Tombamento</i>	34
3.2.2	<i>Ruptura em cunha</i>	36
3.2.3	<i>Ruptura planar</i>	37
3.2.4	<i>Ruptura circular</i>	38
3.3	MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA	39
3.3.1	<i>Sistema RQD - Rock Quality Designation</i>	39
3.3.2	<i>Sistema RMR - Rock Mass Rating</i>	42
3.3.3	<i>Sistema SMR - Slope Mass Rating</i>	46
3.3.4	<i>Teste do martelo geológico</i>	51
3.3.5	<i>Martelo de Schmidt</i>	52
3.3.6	<i>Scanline</i>	53
3.4	Trabalhos Correlatos	54
3.4.1	2016	54

3.4.2	2021	55
3.4.3	2022	57
4	METODOLOGIA	60
4.1	Visita de Campo e Coleta de Dados	60
4.2	Interpretação de Dados e Indicação de Medidas de Engenharia	65
5	RESULTADOS	67
5.1	Caracterização Petrográfica	67
5.2	Caracterização Geológica	68
5.3	Classificação geomecânica	73
5.3.1	<i>Martelo de Schmidt</i>	73
5.3.2	<i>Classificação RQD</i>	76
5.3.3	<i>Classificação RMR - Básico</i>	77
5.3.4	<i>Classificação SMR</i>	78
6	CONCLUSÃO	81
	REFERÊNCIAS	83
	APÊNDICES	86
	APÊNDICE A – Imagens de Campo	86

1 INTRODUÇÃO

A classificação geomecânica de maciços rochosos é uma etapa indispensável em projetos de engenharia, pois requer a integração entre levantamentos geológicos de campo como avaliações quantitativas de descontinuidades. Conforme descrito por Bieniawski (1989), Fiori (2016), esse processo envolve a caracterização de parâmetros como espaçamento de juntas, grau de alteração e resistência da rocha intacta, os quais permitem prever o comportamento do maciço frente a escavações.

De acordo com Fiori (2016), o maciço rochoso é definido não apenas pela rocha intacta, mas também por elementos como descontinuidades (foliação, xistosidade, juntas), blocos individuais, condições hidrológicas e estados de tensão residual, fatores críticos que influenciam a estabilidade do maciço rochoso. Os taludes analisados neste estudo são resultantes da exploração de gnaisses para produção de brita. No caso do gnaiss, a anisotropia característica de suas estruturas como bandamento mineralógico e planos de fraqueza preferenciais exige uma caracterização geomecânica detalhada. Essa análise é crucial, pois tais feições podem gerar padrões variáveis de fraturamento durante o desmonte, impactando tanto a segurança operacional quanto a eficiência produtiva (Bieniawski, 1989).

Na região de Crateús (CE), os trabalhos de Souza *et al.* (2019), Maia (2021) mostram que o maciço rochoso local apresenta qualidade classificada como "ruim" a "muito má" segundo os métodos RMR e Q-Barton, respectivamente, evidenciando fragilidades estruturais que afetam a estabilidade dos taludes. Segundo Palmstrom e Broch (2006) formações intensamente foliadas, como os quartzitos e micaxistos, tendem a desenvolver planos de fraqueza que favorecem o deslizamento de blocos e a instabilização de taludes, exigindo a adoção de medidas corretivas direcionadas, como o uso de tirantes ancorados, telas metálicas e sistemas de drenagem superficial.

Nesse contexto, a análise geomecânica de taludes é essencial para propor a mitigação de riscos de colapsos, rupturas ou deslocamentos que possam comprometer a segurança operacional, causar danos a equipamentos ou interromper a produção. Com base nisso, este trabalho visa avaliar a estabilidade de um maciço rochoso localizado no Município de Crateús–CE, por meio da aplicação integrada dos sistemas RQD, RMR e SMR. A partir dessa avaliação, busca-se embasar a proposição de soluções de engenharia que contribuam para a estabilidade e a segurança geotécnica da frente de lavra analisada.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a estabilidade de taludes de um maciço rochoso em uma pedreira no Sertão de Crateús-CE.

2.2 Objetivos Especificos

- Realizar uma análise petrográfica visual para identificar características mineralógicas e texturais das rochas.
- Caracterizar os parâmetros geomecânicos do maciço rochoso com base nas descontinuidades estruturais e propriedades físicas relevantes à estabilidade.
- Classificar o maciço por meio da aplicação dos sistemas RQD, RMR e SMR.
- Propor medidas de engenharia que assegurem a estabilidade e a segurança operacional do local, de acordo com o sistema SMR.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda análises geomecânicas, iniciando pela caracterização de maciços rochosos e suas estruturas, com foco em descontinuidades (juntas, falhas, foliação) e os parâmetros necessários para essas classificações, sendo eles, o espaçamento, persistência, rugosidade, abertura, presença de água, resistência e grau de alteração. Em seguida, são apresentados sistemas de classificação geomecânica, que utilizam esses critérios para analisar a qualidade do maciço e prever seu comportamento durante escavações.

3.1 Caracterização de Maciços Rochosos

Segundo Fiori (2016), a mecânica das rochas é um campo de estudo que analisa o comportamento mecânico tanto das rochas intactas quanto dos maciços rochosos, levando em consideração as forças naturais e induzidas que atuam sobre eles. Os maciços rochosos são formados por blocos individuais de rocha intacta, separados por descontinuidades como falhas, juntas e interfaces entre diferentes tipos de rochas. Essas descontinuidades podem variar em escala, desde pequenas fissuras até grandes fraturas, o que confere aos maciços uma natureza heterogênea e anisotrópica, contrastando com a homogeneidade relativa das rochas intactas.

As descontinuidades são uma das características mais relevantes dos maciços rochosos, exercendo influência direta sobre sua estabilidade. Segundo Pinotti e Carneiro (2013), tanto a presença dessas descontinuidades quanto as alterações mecânicas causadas por processos de intemperismo são fatores determinantes para o controle da resistência mecânica e da deformação dos maciços.

Conforme Fiori (2016), os maciços rochosos são compostos por blocos de rochas, que, por sua vez, são formados pela aglomeração de minerais. Entre as características que distinguem esses maciços, destacam-se:

- A resistência mecânica;
- A porosidade da rocha intacta;
- A permeabilidade;
- As descontinuidades naturais e sua distribuição espacial.

Além dessas propriedades, parâmetros obtidos por meio de ensaios específicos, como o grau de alteração, o grau de fraturamento, o RQD, a espessura das camadas, a resistência à compressão e o ângulo de atrito entre as fraturas, são essenciais para a classificação geomecânica

dos maciços rochosos (Hoek, 2007).

3.1.1 Descontinuidades

As descontinuidades podem ser definidas como superfícies de fraqueza que ocorrem nos maciços rochosos, interrompendo a continuidade física da rocha intacta Kliche (1999). A investigação dos parâmetros associados a essas descontinuidades é de grande importância, uma vez que elas criam planos de fraqueza entre os blocos de rocha intacta, influenciando diretamente sua resistência e comportamento geomecânico Hudson (1989). De acordo com Fiori (2016), os principais tipos de descontinuidades encontradas em maciços rochosos são:

- Os planos de acamamento são estruturas típicas de rochas sedimentares, formadas durante o processo de deposição de sedimentos em camadas. Cada camada, ou estrato, apresenta propriedades físicas distintas, como composição, granulometria e densidade, refletindo as condições ambientais e processos geológicos ocorridos durante sua formação.
- Os planos de juntas são estruturas planares que se formam devido ao alívio ou aumento de tensões no maciço rochoso. Presentes em todos os tipos de rochas, elas geralmente ocorrem em conjuntos, conhecidos como famílias de juntas, distribuídos de maneira sistemática ao longo de uma superfície.
- Os planos de falha são estruturas geológicas definidas pelo movimento relativo entre os blocos rochosos ao longo de uma direção preferencial (paralela ao plano da falha), resultantes de processos tectônicos. Comparadas às juntas, as falhas são menos frequentes, porém de maior complexidade. Em contextos específicos, podem desenvolver zonas de falha, caracterizadas por múltiplas superfícies de deslocamento interligadas. Essas estruturas geram planos de fraqueza contínuos e persistentes no maciço rochoso, capazes de influenciar significativamente sua estabilidade e comportamento mecânico.
- A foliação metamórfica surge a partir da transformação do protólito por metamorfismo, levando ao realinhamento dos minerais em camadas que se distribuem de forma paralela ou levemente desalinhada em uma direção predominante na rocha.
- As discordâncias ou inconformidades são superfícies de descontinuidade estratigráfica que indicam interrupções na sedimentação, frequentemente associadas

a erosão, ausência de deposição ou atividade tectônica. Essas estruturas criam diferenças temporais e litológicas entre os estratos, impactando propriedades geotécnicas do maciço, como resistência, permeabilidade e coesão.

- As margens de intrusões ígneas representam os contatos entre rochas ígneas e as formações adjacentes, indicando se a intrusão ocorre de maneira concordante ou discordante em relação ao acamamento das sequências sedimentares.
- Planos de Cisalhamento e Fendas de Tração: Os planos de cisalhamento estão relacionados a falhas e resultam de deslocamentos tectônicos, podendo ser remanescentes de movimentos antigos ou originados por eventos mais recentes. Já as fendas de tração, ou juntas, correspondem a fraturas formadas recentemente, frequentemente associadas à presença de água e à variação de tensões no maciço rochoso.

3.1.2 Características das discontinuidades

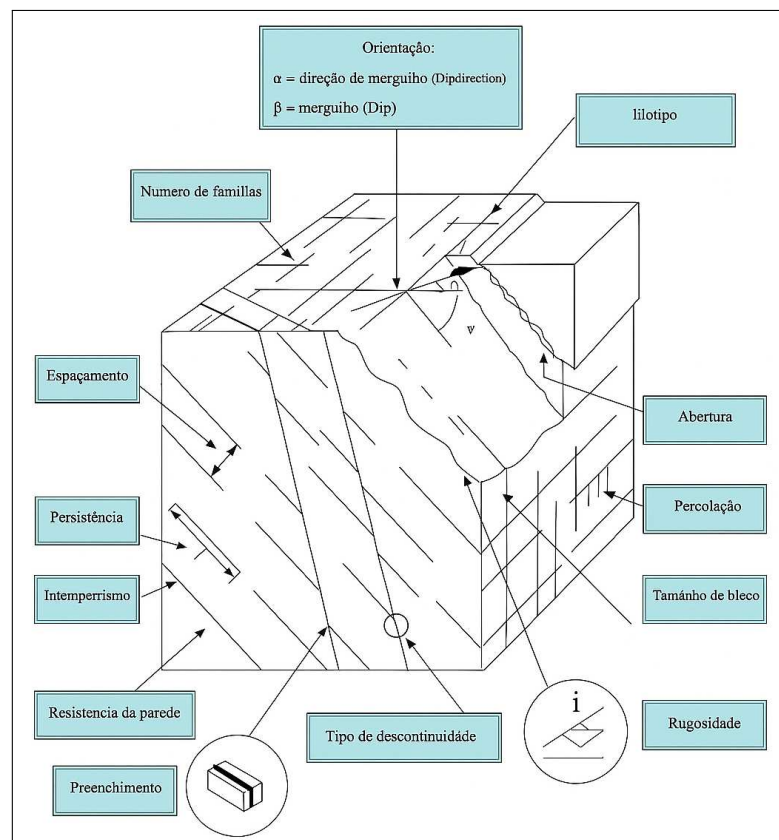
As propriedades geométricas das discontinuidades são fundamentais para análises geotécnicas, pois definem o comportamento mecânico e hidrológico dos maciços rochosos. Sua influência abrange desde a estabilidade de taludes, túneis e propagação de fraturas em reservatórios geotérmicos até a interação com tensões *in situ*, que controlam deformações e fluxo de fluidos. Parâmetros como orientação, espaçamento e persistência são essenciais para descrever a arquitetura do maciço e calibrar modelos numéricos (Hatheway, 2009).

- Orientação das discontinuidades: Definida por mergulho e direção, condiciona a anisotropia e a estabilidade estrutural do maciço.
- Espaçamento ou frequência: Determina a densidade de fraturas por unidade de volume, correlacionando-se com o grau de fragmentação da rocha.
- Persistência: Refere-se à extensão areal ou linear das discontinuidades, influenciando a continuidade de planos de fraqueza.
- Rugosidade superficial: Afeta a resistência ao cisalhamento, sendo classificada em escalas macro e microestrutural.
- Abertura e preenchimento: A dimensão da fissura e a presença de material infill (argila, minerais secundários) alteram a permeabilidade e a coesão do sistema.
- Resistência ao cisalhamento das paredes: Relaciona-se à coesão residual e ao atrito interno, críticos para análises de ruptura progressiva.

- Condutividade hidráulica: Controla o fluxo de água através das fraturas, impactando pressões intersticiais e processos de erosão interna.
- Número de famílias de descontinuidades: Indica a complexidade estrutural, com múltiplos conjuntos aumentando a probabilidade de instabilidade cinemática.

As características geomecânicas da Figura 1, resistência à compressão uniaxial, módulo de deformação tangente e coeficiente de segurança global, são essenciais para analisar maciços rochosos, pois permitem prever comportamentos críticos, como ruptura progressiva em taludes, convergência de túneis ou subsidência em áreas mineradas. A geometria das descontinuidades (orientação, persistência, rugosidade) influencia diretamente a estabilidade estrutural: famílias de juntas paralelas ao mergulho de um talude podem desencadear mecanismos de planar ou cunha, enquanto fraturas preenchidas com material argiloso reduzem a coesão efetiva do sistema. A interação entre parâmetros, como a relação entre espaçamento de descontinuidades e anisotropia de resistência, define a resposta do maciço sob carregamento estático ou dinâmico, sendo crucial para calibrar modelos constitutivos e integrar dados de ensaios *in situ* com simulações computacionais (Wyllie; Mah, 2004).

Figura 1 – Representação de um maciço rochoso destacando as características geomecânicas das descontinuidades.



Fonte: Wyllie e Mah (2004)

3.1.3 Orientação

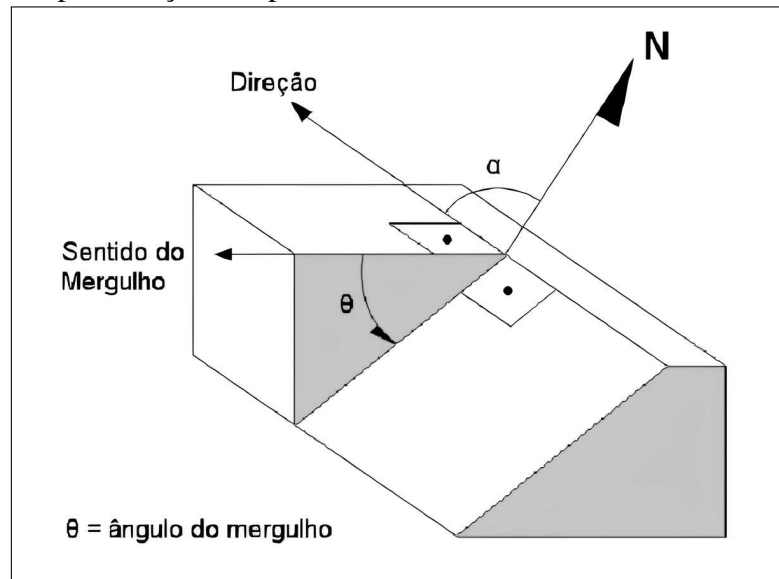
A orientação espacial de descontinuidades é descrita por três parâmetros fundamentais: mergulho (β), direção de mergulho (α) e direção (strike), conforme definido por Azevedo e Marques (2002):

- Mergulho (β): Ângulo de máxima inclinação entre o plano da descontinuidade e a horizontal, variando de 0° (plano horizontal) a 90° (plano vertical).
- Direção de Mergulho (α): Azimute da linha de mergulho, ou seja, a direção geográfica (em graus, de 0° a 360°) para a qual o plano se inclina mais acentuadamente. Corresponde à projeção horizontal da linha de maior inclinação.
- Direção (Strike): Ângulo entre o Norte geográfico e a linha de interseção entre o plano da descontinuidade e um plano horizontal. É sempre perpendicular à direção de mergulho ($\alpha \pm 90^\circ$), estabelecendo a orientação geral da estrutura no espaço.

Conforme ilustrado na Figura 2, o dip (β) e o strike representam os parâmetros fundamentais para a descrição geométrica das descontinuidades. A orientação das juntas no maciço rochoso exerce influência direta sobre a anisotropia mecânica do maciço e sua resistência global, conforme destacado por Fiori (2016). Observa-se que:

- Alinhamento Estrutural com a Vertente: Ocorre quando juntas ou interseções de juntas afloram na vertente com ângulo igual ou inferior à inclinação do talude. Essa condição favorece a instabilidade, pois cria superfícies de ruptura potencialmente contínuas, compatíveis com mecanismos de deslizamento planar ou em cunha.
- Relação Ângulo de Atrito vs. Inclinação: A instabilidade torna-se crítica se o ângulo de mergulho das juntas ou o caimento das interseções (ângulo de inclinação linear) exceder o ângulo de atrito (ϕ) ao longo das superfícies de descontinuidade. Quando essa relação ocorre, a resistência ao cisalhamento é insuficiente para equilibrar as tensões gravitacionais, reduzindo o fator de segurança do talude.

Figura 2 – Representação dos planos das discontinuidades e suas orientações.



Fonte: Modificado de Magalhães e Cella (1998)

3.1.4 Espaçamento ou frequência das descontinuidades

O espaçamento de descontinuidades, definido como o número de fraturas por metro no maciço Priest e Hudson (1976), é medido pelo método da linha de varredura (scanline), que posiciona uma fita métrica perpendicularmente à família de juntas para evitar distorções amostrais Brady e Brown (2006). Este parâmetro influencia diretamente o comportamento geomecânico: espaçamentos reduzidos aumentam a fragmentação e a susceptibilidade a movimentos gravitacionais, enquanto espaçamentos amplos favorecem blocos maiores e mecanismos críticos de ruptura. Sua quantificação é essencial para análises de estabilidade de taludes e projetos geotécnicos.

Conforme Fiori (2016), a frequência de descontinuidades (F_d) expressa em número de juntas por metro de linha de varredura, exerce influência direta na qualidade geomecânica e resistência global do maciço rochoso, enquanto o espaçamento atua em escala macroscópica, condicionando as propriedades da rocha intacta. O espaçamento também controla a permeabilidade do maciço, uma vez que a condutividade hidráulica do sistema de descontinuidades é inversamente proporcional a este parâmetro, sendo determinada principalmente pela magnitude das aberturas entre as fraturas. Essa relação pode ser expressa pela Equação 1:

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

Onde N é o número de juntas interceptadas pela linha de varredura e L o compri-

mento total da linha (em metros). A interação entre frequência, espaçamento e geometria das descontinuidades define não apenas a resposta mecânica do maciço, mas também seu comportamento hidrológico, aspectos críticos para projetos de estabilidade de taludes e obras subterrâneas. O espaçamento médio (E_d), definido como a distância média entre descontinuidades adjacentes, corresponde ao inverso da frequência de descontinuidades (F_d). Essa relação é expressa pela Equação 2:

$$E_d = \frac{1}{F_d} \quad (2)$$

A frequência de juntas em maciços rochosos não apresenta distribuição homogênea, uma vez que as descontinuidades tendem a se agrupar de forma irregular ou aleatória no espaço (Kovari *et al.*, 1983). Essa heterogeneidade implica variações significativas no espaçamento, com tendência de aumento progressivo com a profundidade, exceto em zonas influenciadas por falhas tectônicas, onde processos de deformação crítica podem gerar padrões anômalos de fraturas. A Tabela 1 sintetiza a classificação descritiva do espaçamento médio, permitindo associar valores métricos a categorias qualitativas, essenciais para análises geotécnicas preliminares.

Tabela 1 – Classificação do espaçamento segundo o termo correspondente.

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

Fonte: Adaptado de ISMR (1983)

3.1.5 *Persistência das descontinuidades*

A persistência, também chamada de extensão, descreve o tamanho ou a área que uma descontinuidade ocupa em um maciço rochoso (Azevedo; Marques, 2002). De acordo com Fiori (2016), esse conceito está relacionado à continuidade ininterrupta da descontinuidade, tanto na direção horizontal quanto na vertical. Em um mesmo maciço, é comum observar que descontinuidades de sistemas distintos apresentam variações em sua continuidade, como

demonstrado na Figura 1. A persistência é um dos parâmetros mais relevantes para a análise de descontinuidades, mas sua medição pode ser complexa, principalmente quando as fraturas são de pequena escala em relação às juntas mais extensas. Dependendo da persistência, as descontinuidades podem ser categorizadas de diferentes formas:

- Persistentes: são aquelas que se prolongam além da área exposta, continuando de forma ininterrupta no maciço rochoso;
- Subpersistentes: caracterizam-se por ter seu término visível dentro do maciço rochoso exposto, sem se estender além dele;
- Não persistentes: referem-se às descontinuidades que terminam ao interceptar outras descontinuidades, interrompendo sua continuidade.

A classificação das persistências pode ser realizada por meio de uma análise macroscópica dos maciços rochosos, utilizando como base a medição do comprimento das descontinuidades. Essa avaliação possibilita a categorização das descontinuidades de acordo com critérios estabelecidos, como demonstrado na Tabela 2, auxiliando na compreensão de sua influência no comportamento geomecânico do maciço.

Tabela 2 – Classificação da extensão das descontinuidades.

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

Fonte: Adaptado de ISRM (1980)

3.1.6 Rugosidade da descontinuidade

As superfícies das descontinuidades geralmente apresentam irregularidades e ondulações, que influenciam diretamente o comportamento da resistência tangencial do material. A rugosidade dessas superfícies desempenha um papel crucial na resistência ao corte, embora sua influência diminua com o aumento da abertura ou com a presença de material de enchimento nas descontinuidades (Ferrer; Vallejo, 2007). Dois aspectos fundamentais no estudo dessa propriedade são a ondulação da superfície, que causa variações na orientação ou atitude ao longo da descontinuidade, e a rugosidade superficial, que, em uma escala menor, é responsável pelo atrito entre os blocos adjacentes (Fiori, 2016). Esses fatores combinados determinam a interação

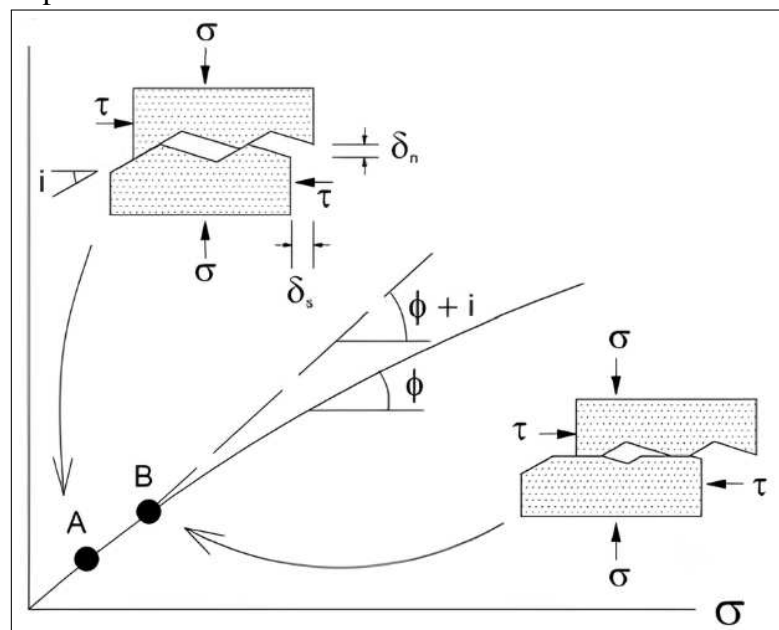
mecânica e a estabilidade do maciço rochoso.

Os conceitos de rugosidade e ondulação foram introduzidos para descrever as irregularidades de primeira e segunda ordem, respectivamente (Deere *et al.*, 1966). Dessa forma, a rugosidade pode ser definida como as irregularidades e ondulações presentes nas superfícies e paredes das descontinuidades, sendo classificadas de acordo com sua escala, conforme destacado por Fiori (2016):

- Ondulação da superfície: refere-se a variações que podem atingir dezenas de metros, causando mudanças na orientação ou atitude da descontinuidade;
- Rugosidade da superfície: corresponde a irregularidades de menor escala, geralmente da ordem de alguns metros, que influenciam diretamente o atrito entre os blocos adjacentes de uma descontinuidade.

O comportamento ao cisalhamento das descontinuidades depende de fatores como rugosidade superficial, resistência da rocha, tensão normal e deslocamento relativo entre as superfícies. Segundo Barton (1976), ao serem cisalhadas, essas descontinuidades sofrem uma dilatação inicial, seguida pelo desgaste das asperezas. A Figura 3 ilustra a transição entre os modos de dilatação e cisalhamento, destacando a importância desses mecanismos na resposta mecânica das descontinuidades e na estabilidade do maciço.

Figura 3 – Efeito da rugosidade e do esforço normal sob o ângulo de atrito da superfície de descontinuidade.



Fonte: (WYLLIE; MAH, 2004)

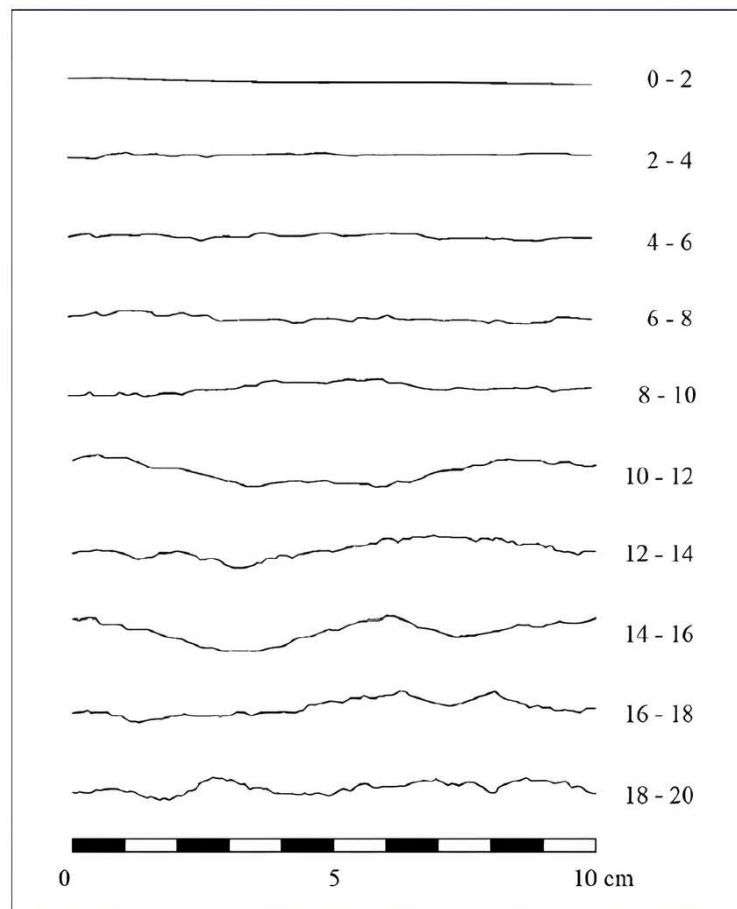
Para superfícies rugosas artificiais e isentas de preenchimento, o comportamento

do cisalhamento pode ser descrito pela Equação 3, empírica proposta por Barton (1976), que relaciona a resistência ao cisalhamento com as características da junta e as tensões aplicadas:

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

O valor de *JRC* representa o coeficiente de rugosidade da junta, enquanto *JCS* corresponde à resistência à compressão da rocha na superfície da fratura, e σ' indica a tensão normal efetiva aplicada. Esses parâmetros são essenciais para avaliar o comportamento mecânico das descontinuidades, pois a rugosidade superficial (*JRC*) influencia diretamente a resistência ao cisalhamento, e a resistência da rocha (*JCS*) determina a capacidade de suporte da superfície fraturada. Os perfis de rugosidade, que ilustram as variações nas irregularidades das juntas, podem ser observados na Figura 4, fornecendo uma representação visual das características que afetam a interação entre os blocos rochosos.

Figura 4 – Perfis de rugosidade padrão para a estimativa visual do JRC



Fonte: Barton (1976)

3.1.7 Abertura e preenchimento das fraturas

A abertura das descontinuidades varia conforme a região do maciço rochoso, podendo ocorrer casos em que uma descontinuidade apresente uma abertura de alguns centímetros na superfície, mas esteja completamente fechada em profundidade. Quanto ao preenchimento, essas estruturas podem ser classificadas como vazias, parcialmente preenchidas ou totalmente preenchidas. A caracterização dessas aberturas é crucial, pois sua dimensão e largura têm impacto direto na resistência ao cisalhamento ao longo da descontinuidade (Ferrer; Vallejo, 2007). A Tabela 3 apresenta a classificação da abertura de descontinuidades proposta pelo ISRM (1980). A influência do preenchimento na resistência ao cisalhamento depende da espessura e das propriedades do material que preenche a descontinuidade. Quando a espessura do preenchimento ultrapassa 25 a 50% da amplitude das asperezas, o contato direto entre as paredes da descontinuidade pode ser perdido, e a resistência ao cisalhamento será determinada principalmente pelas propriedades do material de preenchimento (Goodman, 1991).

Tabela 3 – Classificação das descontinuidades por intervalo de abertura.

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

Fonte: Adaptado de (ISRM, 1980)

3.1.8 Resistência das paredes ao cisalhamento

Esse parâmetro está relacionado à resistência à compressão das paredes das descontinuidades, sendo um fator crítico para determinar tanto a resistência ao cisalhamento quanto a deformabilidade dos maciços rochosos (Fiori, 2016). A resistência das paredes das descontinuidades influencia diretamente a interação entre os blocos rochosos, afetando a estabilidade do maciço como um todo. Em ensaios de cisalhamento direto, por exemplo, a tensão normal (σ) é mantida constante, enquanto a tensão de corte (τ) é incrementada de forma controlada. Durante

o processo, os deslocamentos por cisalhamento (δ) são medidos para avaliar o comportamento da descontinuidade sob diferentes níveis de carga, permitindo compreender como a resistência ao cisalhamento varia em função das condições aplicadas (Neyra, 2010).

O critério de ruptura de Mohr-Coulomb é amplamente utilizado para descrever a resistência ao cisalhamento em função das tensões normais atuantes no plano de ruptura. Esse critério estabelece uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal, caracterizada por parâmetros como coesão e ângulo de atrito interno, sendo fundamental para prever o ponto de ruptura em materiais geotécnicos. Além disso, o conceito de Mohr-Coulomb pode ser adaptado para expressar os critérios de ruptura em termos das tensões principais, o que facilita a análise de estados de tensão complexos em problemas de engenharia (Wyllie; Mah, 2004).

3.1.9 Número de famílias

O termo "família" designa um grupo de descontinuidades geológicas cujas superfícies exibem orientação e paralelismo aproximados entre si (Azevedo; Marques, 2002). A identificação desses conjuntos pode ser realizada por meio de ferramentas como bússolas geológicas, medidores de inclinação (clinômetros) ou até mesmo por observação direta no campo. A classificação do maciço rochoso, por sua vez, é influenciada pelo número de famílias presentes, critério que permite categorizar sua complexidade estrutural (Matula, 1981). Essa categorização, detalhada na Tabela 4, é fundamental para avaliar a organização das fraturas e sua relação com a estabilidade geotécnica do maciço.

Tabela 4 – Classificação do maciço rochoso pelo número de famílias de descontinuidades.

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

Fonte: Adaptado de ISRM (1980)

3.1.10 Percolação de água

A percolação de água, também denominada como condições de fluxo, consiste na movimentação de água através das descontinuidades abertas presentes no maciço rochoso (Azevedo; Marques, 2002). A água desempenha um papel fundamental em processos como a erosão do solo, a degradação de rochas e a estabilidade de encostas, atuando principalmente por meio do gradiente hidráulico que se estabelece ao longo das fraturas (Freitas, 2011). A avaliação da infiltração de água no interior das descontinuidades permite estimar seu impacto na resistência mecânica do maciço. Para isso, é necessário considerar aspectos como as condições climáticas locais e a profundidade do lençol freático no maciço rochoso (Fontinhas, 2012). A classificação qualitativa da infiltração de água, tanto em descontinuidades preenchidas quanto não preenchidas, pode ser realizada com base nos critérios estabelecidos no Quadro 1 (Matula, 1981).

Quadro 1 – Classificação das descontinuidades quanto ao preenchimento e percolação de água

Classe	Designação	Descontinuidades sem preenchimento	Descontinuidades com preenchimento
I	Seco	Fratura muito plana e fechada. Sem possibilidade de percolação de água.	Enchimento consolidado e seco. Sem percolação de água.
II		Fratura seca sem evidência de percolação.	Enchimento consolidado e seco.
III	Moderadamente seco	Fratura seca com evidências pontuais de percolação.	Enchimento úmido com gotas ocasionais.
IV	Úmido	Fratura úmida, sem fluxo livre de água.	Enchimento com lavagem e fluxo contínuo.
V	Escorrimentos	Fratura com gotejamento esporádico.	Enchimento lavado e fluxo considerável.
VI	Fluxo elevado	Fratura com fluxo contínuo de água.	Enchimento totalmente lavado e pressões hidráulicas elevadas.

Fonte: Adaptado de ISRM (1980)

3.2 Tipos de Ruptura

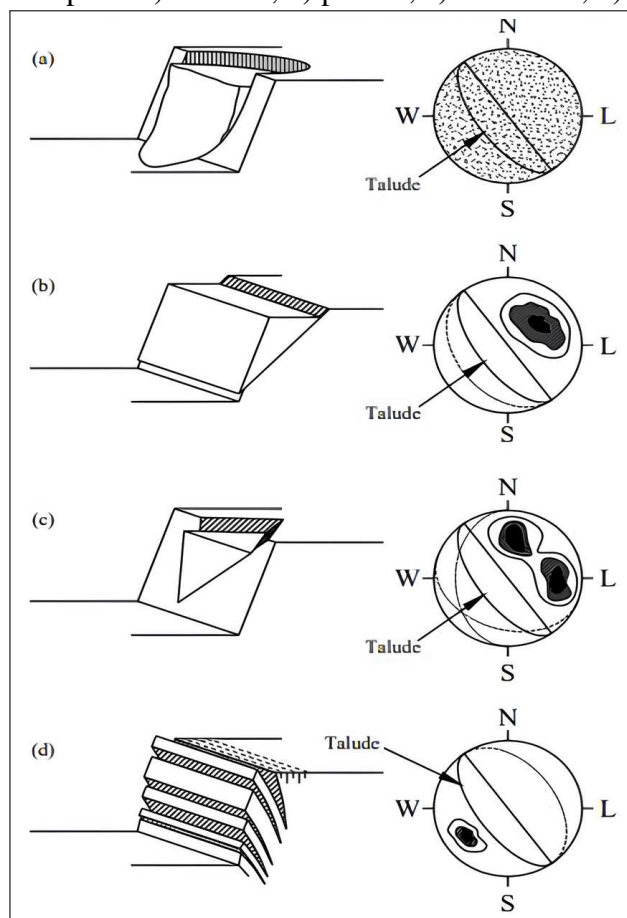
As descontinuidades no maciço rochoso são fundamentais para sua estabilidade, pois representam zonas de fraqueza que podem levar ao colapso e à ruptura. Conforme Hoek (1981),

a magnitude e o tipo dessas rupturas dependem da quantidade e natureza das descontinuidades. Além disso, a orientação dessas estruturas em relação à inclinação do talude influencia diretamente seu comportamento geomecânico, como observado por Pan e Hudson (1988).

Essas descontinuidades atuam como planos de fraqueza, afetando a geometria e os mecanismos de ruptura. A descrição macroscópica dos taludes, considerando sua geometria e os processos físicos de ruptura, permite entender a propagação das fraturas. Segundo Sjöberg (1999), a ruptura geralmente começa em pontos específicos da rocha, evoluindo progressivamente até o colapso do talude.

A desestabilização de taludes rochosos pode ocorrer devido a estruturas contínuas ou descontínuas. Em estruturas contínuas, as rupturas assumem formato circular (Figura 5-a), enquanto em estruturas descontínuas, observam-se rupturas planares, em cunha e por tombamento (Figuras 5-b a 5-d), conforme Hoek (1981). Esses mecanismos estão diretamente ligados à geometria e orientação das descontinuidades, influenciando o comportamento do maciço.

Figura 5 – Principais tipos de falhamentos em taludes e condições estruturais prováveis de ocasioná-los: ruptura a) circular; b) planar.; c) em cunha; d) por tombamento.



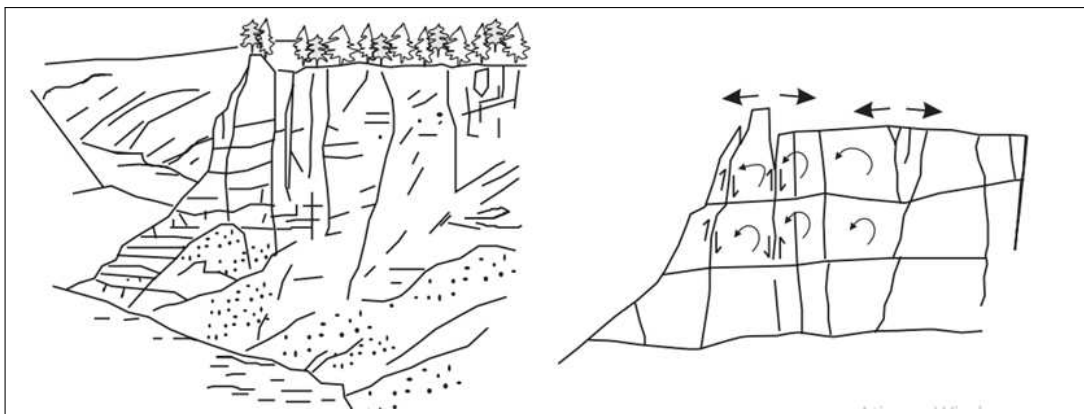
Fonte: Hoek (1981)

3.2.1 Ruptura por Tombamento

A ruptura por tombamento é um mecanismo de instabilidade em maciços rochosos caracterizado pela rotação de blocos ou colunas em torno de uma base fixa, representada na Figura 6, associada à presença de descontinuidades estruturais. No campo, são identificados três principais tipos de tombamento: blocos, flexural e bloco-flexural, conforme classificação de Goodman (1976). O tombamento de blocos ocorre em estruturas rígidas e bem definidas, enquanto o tombamento flexural envolve a deformação progressiva de camadas estratificadas.

Já o tombamento bloco-flexural, descrito por Wyllie e Mah (2004), surge da combinação entre escorregamento e rotação de blocos, associada à flexão pseudocontínua de colunas rochosas segmentadas por juntas transversais. Esse mecanismo híbrido reflete a interação entre a deformação flexural e o deslizamento parcial dos blocos. Complementando essa classificação, Fiori (2016) ressalta que a instabilidade é desencadeada pela interceptação de dois planos de descontinuidades, sendo um deles inclinado em alto ângulo (geralmente acima de 60°) contra a direção da vertente, criando uma geometria propícia ao desequilíbrio gravitacional. Essa configuração favorece a inclinação dos blocos em direção à face livre do talude, podendo resultar em rupturas progressivas ou abruptas, dependendo da interação entre os mecanismos de flexão, cisalhamento e rotação.

Figura 6 – Esquema de tombamento que envolve a rotação de blocos sobre uma base fixa



Fonte: Goodman (1976)

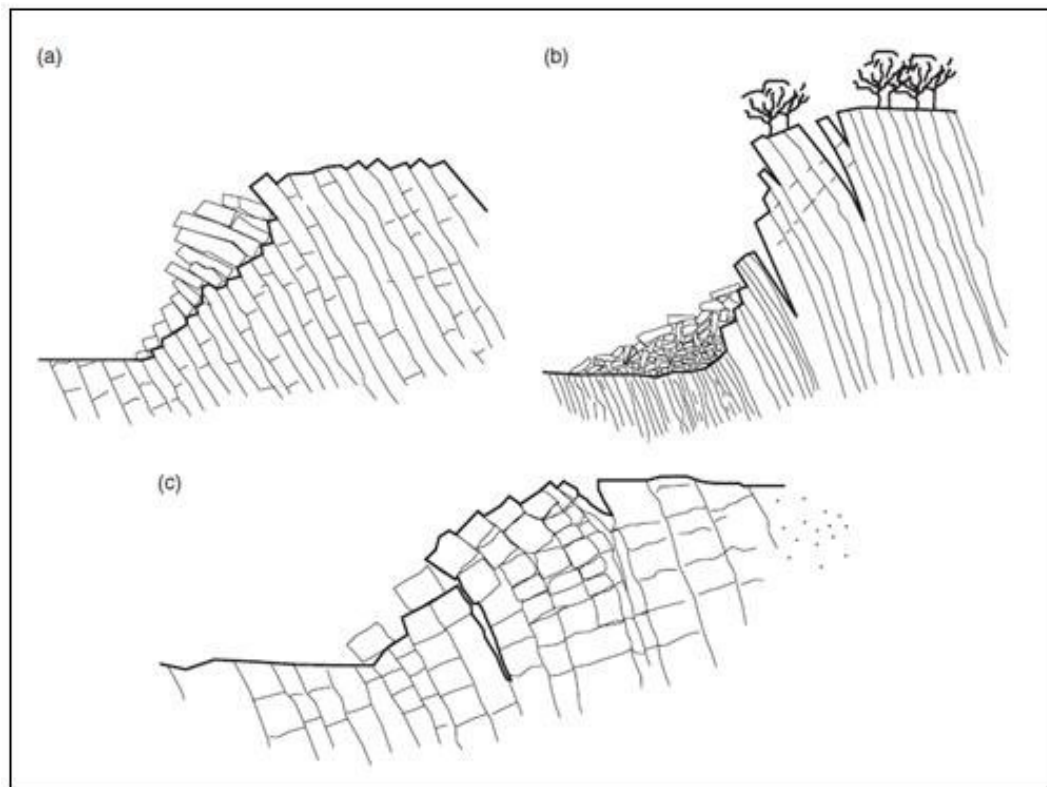
O tombamento de blocos ocorre quando colunas individuais são formadas por duas famílias de descontinuidades: uma que mergulha acentuadamente em direção à face do talude e outra, ortogonal e amplamente espaçada, que define a altura das colunas (Wyllie; Mah, 2004). Nesse mecanismo, as colunas menores localizadas na base do talude são progressivamente

empurradas para frente devido às cargas transmitidas pelas colunas adjacentes e superiores. Esse movimento de escorregamento induz a instabilidade rotacional nas colunas superiores, desencadeando o tombamento sequencial característico desse tipo de ruptura.

Já o tombamento bloco-flexural é um mecanismo híbrido que combina escorregamento e rotação de blocos. Segundo Wyllie e Mah (2004), ele surge quando colunas rochosas, divididas por juntas transversais, sofrem uma flexão pseudocontínua. Essa deformação ocorre devido à interação entre a rigidez das juntas e a flexibilidade relativa das colunas, resultando em um movimento simultâneo de deslizamento na base e inclinação progressiva das estruturas, que culmina em um padrão de ruptura complexo.

Por fim, o tombamento flexural é definido pela flexão gradual de colunas contínuas de rocha, separadas por descontinuidades de alto ângulo de mergulho (Wyllie; Mah, 2004). Nesse caso, as colunas inclinam-se para frente da face do talude, com sua resistência à ruptura sendo condicionada pelas propriedades do maciço rochoso, como a rigidez da rocha, a densidade de fraturas e a orientação das descontinuidades. Esse tipo de tombamento é comum em rochas estratificadas ou foliadas, onde a anisotropia do material favorece a deformação por flexão sob carregamento gravitacional.

Figura 7 – Ilustração de tipos comuns de tombamento, (a) tombamento de blocos, (b) tombamento flexural e (c) tombamento bloco-flexural.

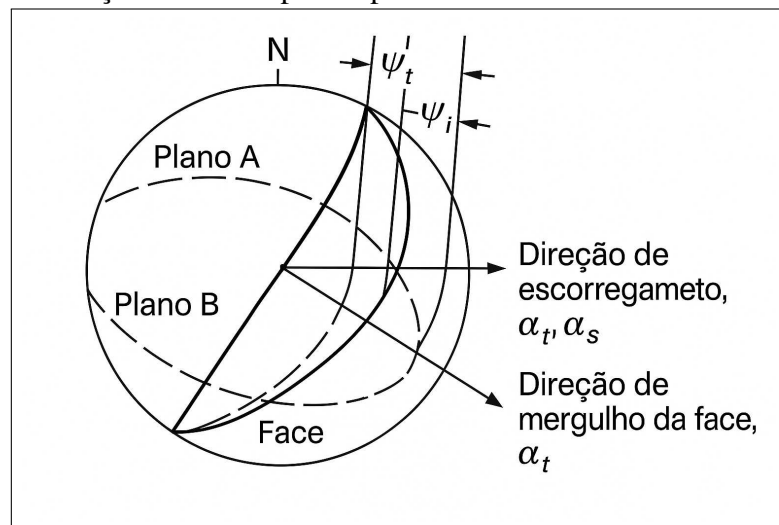


Fonte: Goodman (1976)

3.2.2 Ruptura em cunha

A ruptura em cunha ocorre quando dois ou mais planos de descontinuidades, com direções divergentes, interceptam-se e isolam um bloco rochoso em formato de cunha, promovendo um escorregamento translacional (Fiori, 2016). Para que esse mecanismo se desenvolva, a linha de interseção entre as descontinuidades deve apresentar um caimento (direção de mergulho) inferior ao mergulho do talude, conforme ilustrado na Figura 8, condição que permite o movimento gravitacional da cunha ao longo dos planos. Essa ruptura é típica de maciços rochosos com múltiplas famílias de descontinuidades, cujas orientações relativas, espaçamentos e persistências determinam diretamente a geometria (forma e volume) da cunha e, conseqüentemente, sua estabilidade. A combinação desses fatores estruturais define se a cunha terá mobilidade suficiente para deslizar, tornando-se um dos mecanismos de instabilidade mais críticos em encostas com sistemas complexos de fraturas.

Figura 8 – Condição estrutural para ruptura em cunha



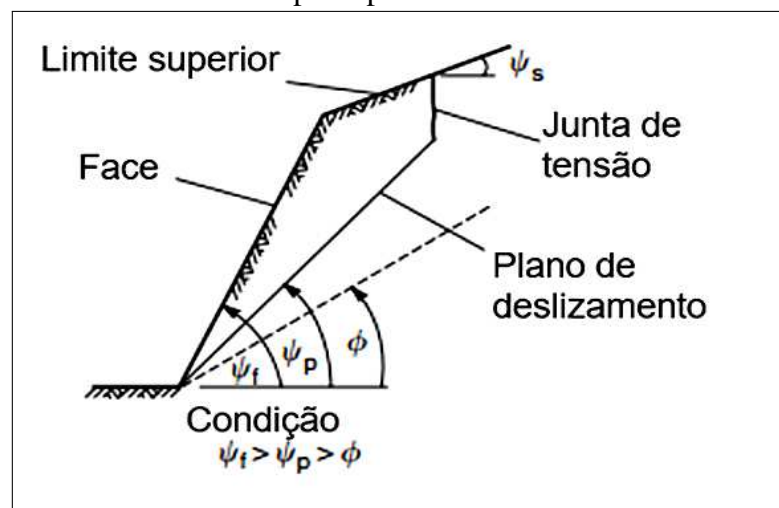
Fonte: Adaptada de Hoek (1981)

- O mergulho do talude deve ser superior ao mergulho da linha de intersecção dos planos de descontinuidades, ou seja, $\psi_f > \psi_i$ (Figura 8).
- A linha de intersecção deve aflorar na face do talude.
- O mergulho da linha de intersecção deve ser superior ao ângulo de atrito da rocha, isto é, $\psi_f > \psi_i > \phi$.

3.2.3 Ruptura planar

A ruptura planar ocorre ao longo de descontinuidades predominantes e/ou contínuas, cuja orientação é paralela à face do talude, mergulhando na mesma direção do mergulho do talude, porém com um ângulo de inclinação menor que o da própria face. Esse mecanismo de deslizamento é típico em situações em que a estrutura geológica apresenta fraturas ou planos de fraqueza alinhados com a superfície do terreno, criando uma superfície de cisalhamento potencial. A condição crítica para sua ocorrência é justamente a combinação entre a orientação paralela da descontinuidade, a concordância de direção do mergulho e o menor ângulo de inclinação em relação ao talude, fatores que favorecem a instabilidade e o movimento de blocos ao longo do plano definido (Fiori, 2016).

Figura 9 – Geometria de uma ruptura plana



Fonte: Wyllie e Mah (2004)

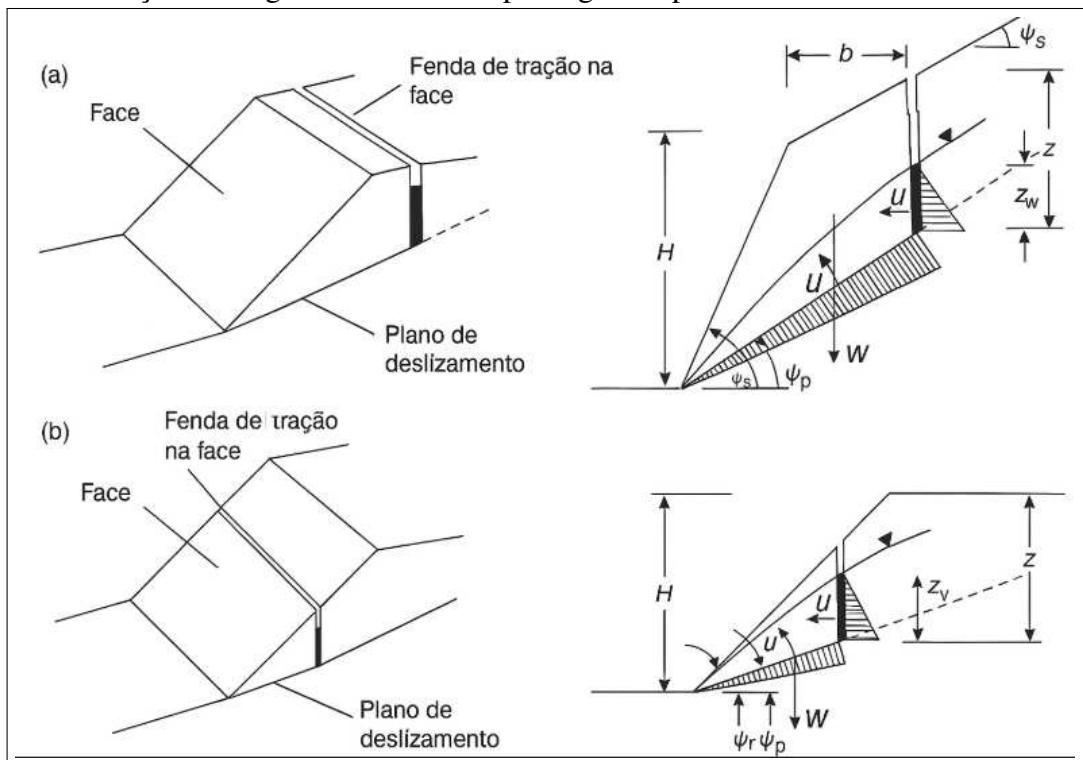
As condições geométricas gerais para essa ruptura são:

- A orientação da descontinuidade (strike) deve estar paralela à face do talude, divergindo em, no máximo, $\pm 20^\circ$.
- O mergulho da descontinuidade deve ser menor que o mergulho da face do talude, ou seja, $\psi_p < \psi_f$.
- O mergulho da descontinuidade deve ser maior que o ângulo de atrito, isto é, $\psi_p > \phi$.
- O plano de ruptura intersecta o limite superior do talude ou atinge uma junta de tensão (fenda de tração).

A ruptura planar pode ser desencadeada quando a água infiltrada em uma fenda de

tração penetra no plano de deslizamento, gerando pressão hidrostática que reduz a resistência ao cisalhamento do material e promove a instabilidade do maciço. Esse processo ocorre principalmente em taludes onde o plano de ruptura é paralelo à superfície do terreno, e o acúmulo de água nas discontinuidades exerce uma força ascendente, diminuindo a coesão e a fricção interna. À medida que a pressão intersticial aumenta, o equilíbrio de tensões é rompido, resultando no movimento abrupto do bloco rochoso ao longo do plano de falha, conforme ilustrado na Figura 10 (Wyllie; Mah, 2004).

Figura 10 – Geometria da ruptura planar: a) Fenda de tração no topo do talude; b) Fenda de tração na face do talude. z_w = altura da água na fenda; W = peso do bloco; U = força de soerguimento causada pela água no plano de descontinuidade



Fonte: Adaptado de Wyllie e Mah (2004)

3.2.4 Ruptura circular

Ruptura circular ocorre em maciços rochosos intensamente fraturados, solos ou rochas altamente alteradas, caracterizados por baixa resistência e comportamento isotrópico, nos quais a falha não é governada por discontinuidades específicas, mas sim pela homogeneização das propriedades mecânicas do material. Segundo Hoek (1981), esse tipo de ruptura é favorecido por discontinuidades pouco espaçadas, pressões intersticiais elevadas (como em condições de saturação) e alteração química ou física intensa, que reduzem a coesão e a capacidade de

suporte do maciço. Em ambientes isotrópicos, onde as descontinuidades apresentam orientações aleatórias e não há plano predominante conforme Fontinhas (2012), a ruptura desenvolve-se ao longo de uma superfície curva, semelhante a um arco, que se propaga pelas zonas de menor resistência do material. Esse mecanismo é comum em taludes com materiais pouco competentes, como solos argilosos ou rochas decompostas, onde a combinação de fraturamento denso, pressão de água nos poros e alteração promove uma distribuição homogênea de tensões, culminando em colapso generalizado.

3.3 MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA

A geomecânica é um ramo da engenharia que estuda o comportamento de solos e maciços rochosos submetidos a esforços ou solicitações. A importância da geomecânica no campo da engenharia está diretamente relacionada à sua habilidade de analisar e prever o comportamento de maciços rochosos. Devido à sua natureza heterogênea e à presença de descontinuidades, esses materiais frequentemente apresentam respostas complexas e, por vezes, imprevisíveis quando submetidos a cargas ou modificações no ambiente natural, conforme destacado por Bieniawski (1989).

Hoek (2007) destaca a relevância da classificação de maciços rochosos para definir suas propriedades geotécnicas, baseando-se em ensaios de campo e laboratório. Entre os principais sistemas, destacam-se o RQD (Rock Quality Designation), RMR (Rock Mass Rating), SMR (Slope Mass Rating), cada um com abordagens específicas para análise do maciço e suporte a projetos de engenharia.

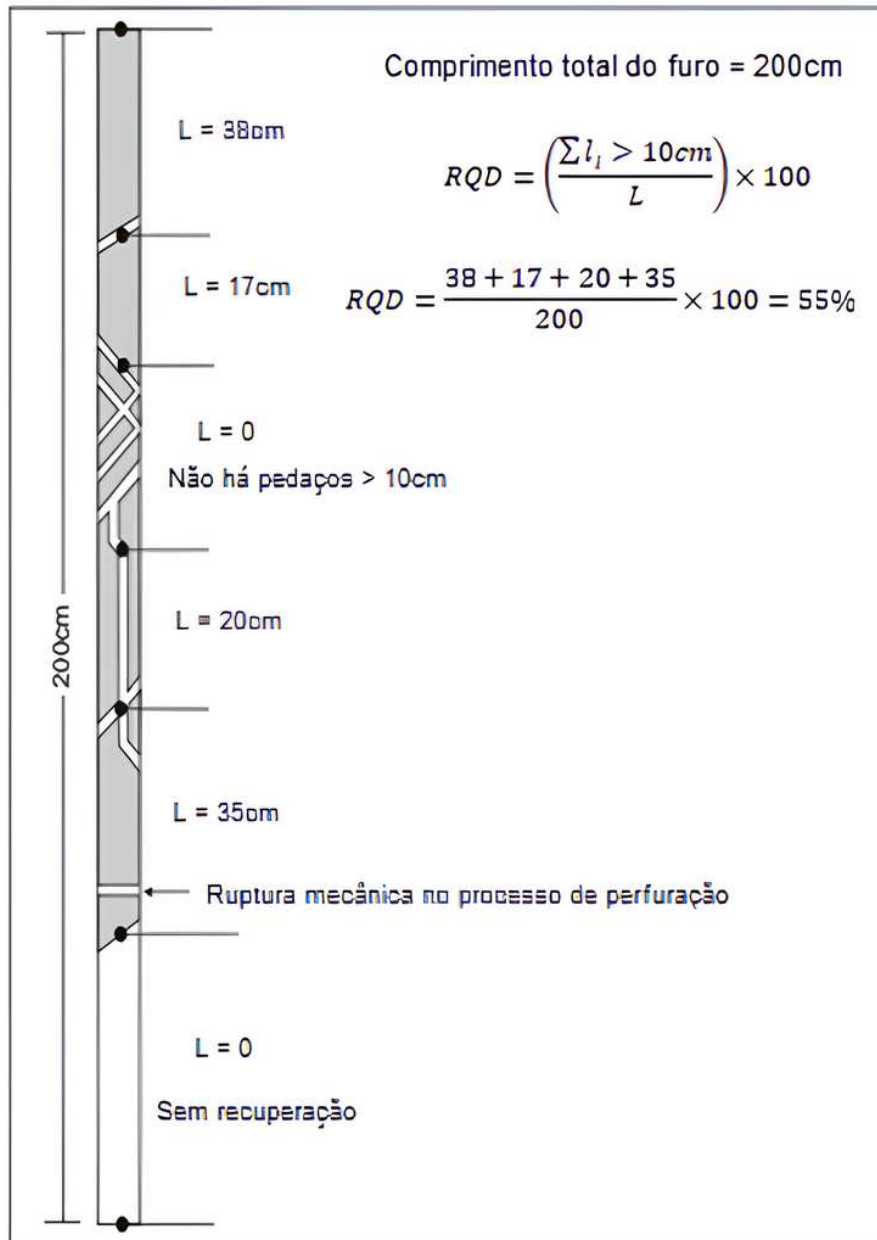
3.3.1 Sistema RQD - Rock Quality Designation

O RQD proposto por Deere *et al.* (1966), é um parâmetro essencial em sistemas de classificação geomecânica, utilizado para estimar rapidamente a qualidade do maciço rochoso por meio da análise de testemunhos de sondagem. Embora não descreva completamente o maciço, é relevante para orientar a seleção de suportes em túneis, conforme destacado por Bieniawski (1989). Seu principal objetivo é fornecer uma avaliação preliminar da rocha antes de escavações, baseando-se na integridade dos testemunhos obtidos em investigações geotécnicas.

O cálculo do RQD utiliza testemunhos de sondagem com diâmetro mínimo de 48 mm, sendo definido pela relação percentual entre a soma dos segmentos de tarolos com mais de

10 cm e o comprimento total perfurado (Figura 11). Reconhecido por sua simplicidade, baixo custo e reprodutibilidade, o método é amplamente aplicado na avaliação inicial da qualidade de maciços rochosos (Deere *et al.*, 1966).

Figura 11 – Procedimento de determinação do RQD por testemunhos de sondagem



Fonte: Palmstrom (1982)

Com base no somatório obtido a partir da análise dos testemunhos de sondagem, é possível determinar a qualidade da rocha, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Classificação da qualidade da rocha baseada no índice RQD.

RQD (%)	Classe	Qualidade da rocha
<25	1	Muito ruim
25 - 50	2	Ruim
50 - 75	3	Média
75 - 90	4	Boa
90 - 100	5	Muito boa

Fonte: Deere *et al.* (1966)

Já a Tabela 6 permite calcular o índice de recuperação do maciço rochoso.

Tabela 6 – Qualidade da rocha e percentual de recuperação.

Qualidade da rocha	% de recuperação
Maciço muito alterado	<50
Maciço mediantemente alterado	50 - 80
Maciço pouco alterado	>80

Fonte: Deere *et al.* (1966)

Em relação ao fraturamento, podemos classificá-lo em relação aos intervalos das fraturas presentes no testemunho de sondagem de acordo com a Tabela 7.

Tabela 7 – Intervalos e designação de fraturas.

Intervalos (cm)	Símbolo	Designação	Grupo
>200	F1 F1 - 2	Muito afastadas	Afastadas
60 a 200	F2 -	Afastadas	
20 a 60	F3 F3	Medianamente afastadas	Medianamente afastadas
6 a 20	F4 F4 - 5	Próximas	Próximas
<6	F5 -	Muito próximas	

Fonte: Deere *et al.* (1966)

O RQD volumétrico, introduzido por Palmstrom (1982), estabelece uma correlação empírica entre o índice volumétrico (J_v), que representa o número total de descontinuidades por unidade de comprimento, e o RQD. Para valores de $J_v > 4,5$, aplica-se a Equação 4:

$$\text{RQD} = 115 - 3,3 \cdot J_v \quad (\text{para } J_v > 4,5) \quad (4)$$

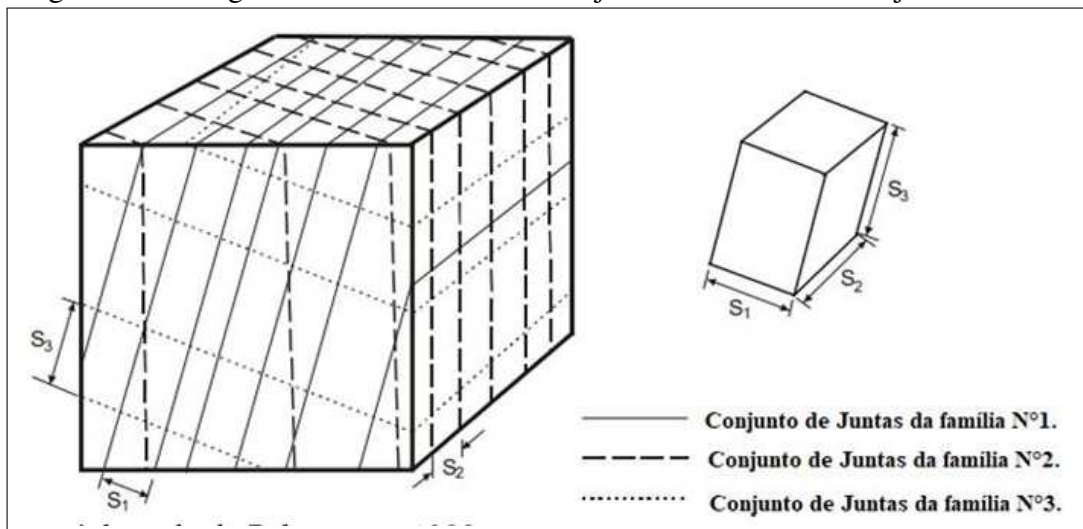
Para valores de $J_v \leq 4,5$, adota-se $\text{RQD} = 100$, conforme definido por Palmstrom (1982).

De acordo com Palmstrom (1982), na ausência de testemunhos de sondagem, o RQD pode ser estimado com base no número de descontinuidades por unidade de volume. Esse método considera a adição do número de juntas por metro para cada conjunto de descontinuidades. Na Equação 4, o parâmetro J_v representa o número total de juntas por metro cúbico, sendo calculado pelo somatório do inverso do espaçamento médio (S) das famílias de descontinuidades, conforme apresentado na Equação 5.

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} \quad (5)$$

A Figura 12 apresenta um diagrama de blocos contendo três famílias de juntas, caracterizadas pelos espaçamentos S_1 , S_2 e S_3 . A frequência de juntas, definida como o número de juntas por unidade de comprimento, é determinada para cada conjunto como $1/S_1$, $1/S_2$ e $1/S_3$, respectivamente.

Figura 12 – Diagrama em blocos com um conjunto de três famílias de juntas distintas



Fonte: Palmstrom (1982)

O RQD é um parâmetro sensível à direção, de modo que diferentes orientações do furo de sondagem podem resultar em valores variados. Conforme destacado por Hoek (2007), o uso do J_v oferece uma vantagem significativa, pois minimiza os problemas associados à dependência direcional.

3.3.2 Sistema RMR - Rock Mass Rating

O sistema de classificação geomecânico RMR, proposto por Bieniawski (1989), é amplamente utilizado para avaliar a qualidade de maciços rochosos, especialmente em projetos

de engenharia subterrânea. A metodologia é baseada na atribuição de pesos a seis critérios considerados fundamentais para o comportamento dos maciços rochosos (Hoek, 2007). Esses critérios são avaliados separadamente em diferentes zonas do maciço, e seus valores somados para obter o índice RMR, que classifica o maciço em uma das cinco categorias de qualidade propostas pelo autor:

- Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta
- Índice Rock Quality Designation (RQD)
- Espaçamento das descontinuidades
- Condição das descontinuidades
- Condições da água subterrânea
- Orientação das descontinuidades

Esses parâmetros foram selecionados por sua relevância no comportamento mecânico das massas rochosas. A aplicação do método envolve a análise detalhada das zonas do maciço, atribuindo pontuações específicas a cada critério, conforme tabelas de referência, como o Quadro 2, que define os pesos relativos à condição das descontinuidades (Bieniawski, 1989).

Quadro 2 – Classificação Geomecânica de Bieniawski

Parâmetros		Coeficientes						
1	Resistência da rocha intacta	Carga pontual (MPa)	>10 MPa	4–10 MPa	2–4 MPa	1–2 MPa	Ver compressão uniaxial	
		Compressão uniaxial (MPa)	>250	100–250	50–100	25–50	5–25	1–5 / <1
		Pesos	15	12	7	4	2	1 / 0
2	R.Q.D		90–100%	75–90%	50–75%	25–50%	<25%	
	Pesos		20	17	13	8	3	
3	Espaçamento das descontinuidades		>2 m	0,6–2 m	200–600 mm	60–200 mm	<60 mm	
	Pesos		20	15	10	6	5	
4	Condição das descontinuidades		Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes ligeiramente alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou enchimento com espessura < 5 mm ou juntas contínuas com separação 1–5 mm	Enchimento mole com espessura > 5 mm ou juntas contínuas com separação > 5 mm	
		Pesos		30	25	20	10	0
5	Presença de água	Caudal por 10 m de comprimento do túnel	Nenhum	<10 l/min	10–25 l/min	25–125 l/min	>125 l/min	
		Relação pressão da água vs tensão principal máxima	0	<0,1	0,1–0,2	0,2–0,5	>0,5	
		Condições gerais	Completamente seco	Água intersticial	Úmido	Escorrimentos	Entrada de água	
	Pesos		15	10	7	4	0	

Fonte: Bieniawski (1989)

Caso seja necessária uma descrição mais detalhada das juntas no maciço, pode-se utilizar a Tabela 8, que soma os parâmetros indicados. Na ausência de valores específicos, deve-se escolher a descrição que melhor se adapta à realidade do maciço. A Tabela 8 aprimora o parâmetro 4, relacionado à condição das descontinuidades, atribuindo pesos a características como persistência, abertura, rugosidade, preenchimento e grau de alteração, não detalhadas no Quadro 2. O somatório desses pesos substitui o parâmetro 4 do Quadro 2.

Tabela 8 – Classificação das condições das descontinuidades, parâmetro 4

Parâmetro	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Persistência / Continuidade	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Peso	6	4	2	1	0
Separação (abertura)	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1 - 1 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Liso	Polido
Peso	6	5	3	1	0
Preenchimento	Nenhum	Duro < 5 mm	Duro > 5 mm	Mole < 5 mm	Mole > 5 mm
Peso	6	4	2	1	0
Grau de alteração	Não alteradas	Ligeiramente alteradas	Moderadamente alteradas	Muito alteradas	Em decomposição
Peso	6	5	3	1	0

Fonte: Elaborado com base em Bieniawski (1989).

A Tabela 9 apresenta o parâmetro orientação das descontinuidades, com os pesos atribuídos para a classificação correspondente.

Tabela 9 – Ajuste para orientações das descontinuidades

Direção e mergulho das descontinuidades	Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
Fundações	0	-2	-7	-15	-15
Encostas	0	-5	-25	-50	-60

Fonte: Bieniawski (1989)

Com base nos valores obtidos pelo RMR, Bieniawski (1989) também propôs uma

avaliação do maciço rochoso em cinco classes, permitindo a estimativa de sua coesão e ângulo de atrito. As classificações podem ser visualizadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros de classificação e seus coeficientes.

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

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Bieniawski (1989).

3.3.3 Sistema SMR - Slope Mass Rating

O índice SMR, desenvolvido por Romana *et al.* (2003), é uma adaptação do RMR para avaliar a estabilidade de taludes rochosos. Originalmente, o RMR foi proposto para aberturas subterrâneas, como túneis, mas sua aplicação em taludes exigiu ajustes devido à ausência de um critério prático para determinar a influência da orientação das descontinuidades em relação à escavação. Além disso, a elevada pontuação atribuída a esse fator tornava a análise menos objetiva e, em alguns casos, arbitrária (Romana *et al.*, 2003).

Para contornar essas limitações, Romana introduziu o SMR, que ajusta o RMR básico Bieniawski (1989) por meio de quatro fatores empíricos. Três deles (F_1 , F_2 e F_3) representam a relação entre a orientação das descontinuidades e a face do talude, enquanto o quarto fator (F_4) está relacionado ao método de escavação empregado. Essa abordagem aprimorada permite uma avaliação mais precisa da estabilidade de taludes rochosos, tornando o índice SMR uma referência amplamente utilizada em engenharia geotécnica (Romana *et al.*, 2003).

Assim para obter o SMR aplica-se a Equação 6:

$$SMR = RMR_b + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad (6)$$

O RMR_b é calculado a partir da soma dos cinco principais parâmetros propostos por Bieniawski (1989): resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, índice RQD, espaçamento das descontinuidades, características das juntas e condições de fluxo de água.

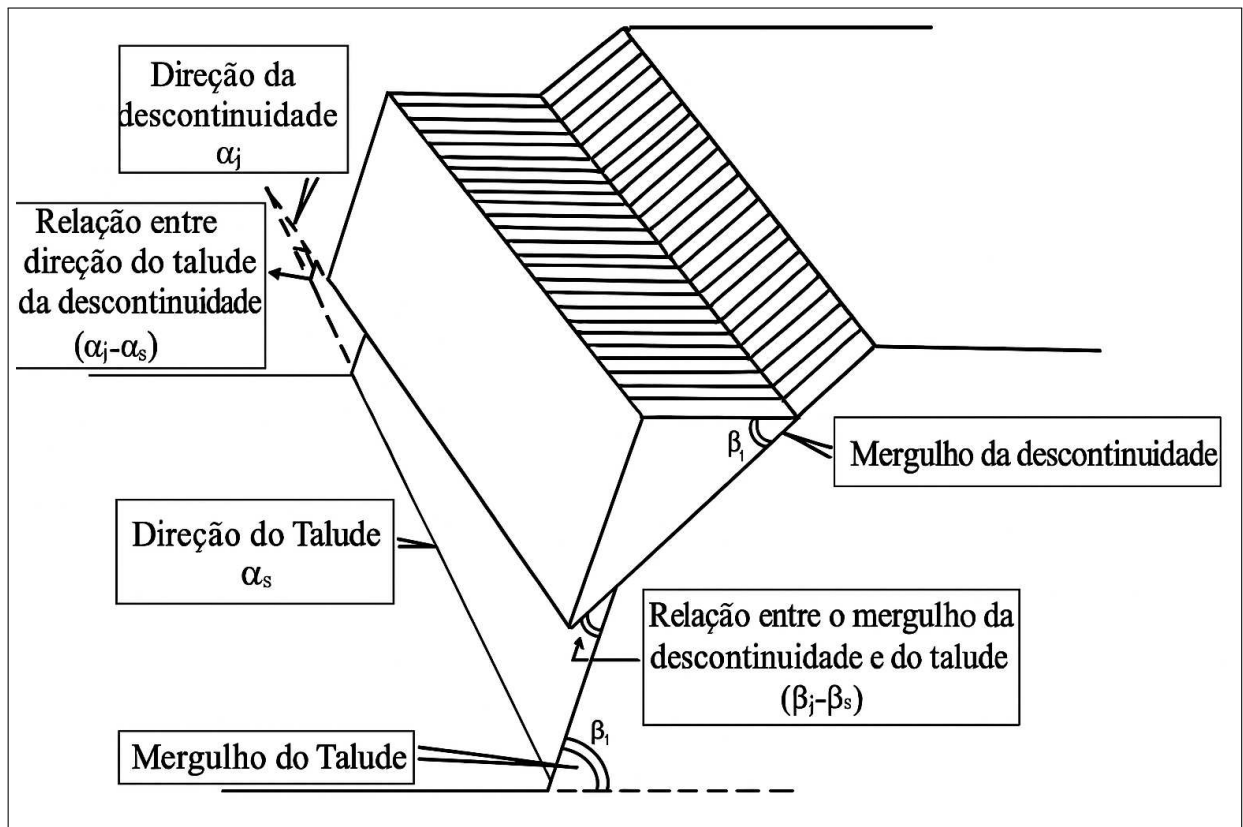
Além disso, o método considera fatores de ajuste específicos: F_1 , que avalia a relação entre a orientação das descontinuidades e a superfície do talude; F_2 , que analisa o

ângulo de mergulho das descontinuidades; F_3 , que verifica o paralelismo entre o mergulho das descontinuidades e a inclinação do talude; e F_4 , que é um fator empírico de correção relacionado ao método de escavação empregado.

Para determinar os valores de F_1 , F_2 e F_3 , é necessário utilizar os subfatores (α_j , α_s , β_j e β_s) apresentados na Figura 13, os quais permitem uma avaliação mais detalhada e precisa das condições geomecânicas do maciço rochoso.

O fator de ajuste F_1 é influenciado pelo grau de paralelismo entre a orientação das juntas (α_j) e a direção da face do talude (α_s), conforme ilustrado na Figura 13. Esse fator assume valores que variam de 1, quando as duas direções são praticamente paralelas, até 0,15, que corresponde ao menor valor adotado na classificação.

Figura 13 – Relação entre a orientação de descontinuidades e a face do talude no maciço rochoso.



Fonte: Singh (1999)

Esse valor mínimo ocorre quando o ângulo entre as duas direções ultrapassa 30° , considerando a diferença $|\alpha_j - \alpha_s|$ para rupturas planares ou $|\alpha_j - \alpha_s - 180^\circ|$ para rupturas por tombamento (Romana *et al.*, 2003).

Os valores específicos de F_1 podem ser obtidos de forma discreta por meio da Tabela 11, facilitando a aplicação prática do método.

Tabela 11 – Valores adotados para o fator F_1

Tipo de ruptura		Muito favorável	Favorável	Normal	Desfavorável	Muito desfavorável
Planar	$ \alpha_j - \alpha_s $	$> 30^\circ$	$30^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 5^\circ$	$< 5^\circ$
Tombamento	$ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ $	$> 30^\circ$	$30^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 5^\circ$	$< 5^\circ$
F_1		0,15	0,4	0,7	0,8	1

Fonte: Romana *et al.* (2015).

Com o objetivo de tornar os valores de F_1 contínuos, Romana *et al.* (2003) propôs a Equação 7, visando facilitar a determinação desse parâmetro:

$$F_1 = (1 - \sin |A|)^2 \quad (7)$$

Onde:

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

O fator de ajuste F_2 está associado ao mergulho das descontinuidades, representado por β_j . No contexto de ruptura planar, conforme ilustrado na Tabela 12, a superfície de ruptura da junta pode desenvolver força de cisalhamento entre suas paredes. Em função disso, o valor numérico de F_2 pode variar de 1, para descontinuidades com mergulho superior a 45° , que são suscetíveis à ruptura por tombamento, até 0,15, para descontinuidades com inclinação inferior a 20° (Romana *et al.*, 2015). Esse parâmetro pode ser determinado empiricamente por meio da Tabela 12 ou através de uma função contínua proposta por Romana, apresentada na Equação 8 (Romana *et al.*, 2003).

Tabela 12 – Valores correspondentes ao fator F_2

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

Fonte: Romana *et al.* (2015).

$$F_2 = \tan^2 \beta_j \quad (8)$$

Em que β_j corresponde ao ângulo de mergulho da descontinuidade.

O fator F_3 avalia o paralelismo entre o mergulho das descontinuidades (β_j) e a face do talude (β_s), conforme ilustrado na Tabela 13, e quantifica, em casos de ruptura planar, a probabilidade de as descontinuidades aflorarem na superfície do talude. Para rupturas planares, o fator varia de 0, quando a diferença entre β_j e β_s é superior a 10° , a -60 , quando essa diferença é inferior a -10° . No caso de rupturas por tombamento, o parâmetro varia de 0, quando a soma de β_j e β_s é menor que 110° , a -25 , quando essa soma ultrapassa 120° , conforme detalhado na Tabela 13 (Romana *et al.*, 2015). Os valores adotados para este parâmetro são consistentes com aqueles propostos por Bieniawski (1989) para o fator de ajuste.

Tabela 13 – Valores correspondentes ao fator F_3

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

Fonte: Romana *et al.* (2015).

O parâmetro de correção F_4 está associado aos métodos de escavação empregados na construção do talude. Seu valor é determinado empiricamente com base na Tabela 14, variando de 15, para taludes naturais ou pouco perturbados, a -8 , para casos em que são utilizadas detonações mal controladas ou deficientes. Esse parâmetro reflete a influência das técnicas de escavação na estabilidade do talude.

Tabela 14 – Valores correspondentes ao fator F_4

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

Fonte: Romana *et al.* (2015).

A partir do valor do SMR calculado pela Equação 6, o maciço rochoso pode ser classificado em cinco categorias distintas. Essa classificação permite uma avaliação quantitativa da qualidade do maciço. Adicionalmente, a análise qualitativa do SMR possibilita a classificação da estabilidade do talude, identificando o tipo de ruptura mais provável e estimando a probabilidade

de sua ocorrência, conforme detalhado na Tabela 15. Essa abordagem integrada oferece uma compreensão abrangente das condições de estabilidade do talude.

Tabela 15 – Caracterização do talude consoante ao valor do SMR

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

Fonte: Romana *et al.* (2015).

A Tabela 16 mostra possíveis medidas que podem ser utilizadas para estabilizar taludes instáveis, assim como as técnicas a serem utilizadas conforme o valor do SMR. De acordo com Romana *et al.* (2015), para valores de SMR inferiores a 20, as rupturas ocorrem de forma abrupta e não há registros de taludes com valores de SMR menores que 10.

Tabela 16 – Tipos de suporte recomendados conforme o valor do SMR

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

Fonte: Romana *et al.* (2015).

A classificação SMR não abrange modelos de ruptura em cunha, o que limita sua aplicação em taludes onde esse tipo de falha é predominante. Para esses casos, é necessário adotar metodologias específicas disponíveis na literatura. Duas abordagens amplamente recomendadas são descritas a seguir:

- Determinar o índice SMR para cada uma das duas famílias de juntas que compõem a cunha, considerando que cada descontinuidade se comporta cinemati-

camente como uma ruptura planar. Nesse processo, o valor mais crítico entre os dois índices obtidos é adotado como representativo da estabilidade do talude rochoso (Freitas, 2011).

- Realizar a classificação SMR utilizando como referência a linha de interseção entre os dois planos que formam a cunha, considerando sua direção (Strike) e seu ângulo de mergulho (Dip) (Hikel *et al.*, 2020).

3.3.4 Teste do martelo geológico

A resistência à compressão de uma amostra de rocha do maciço rochoso pode ser determinada por métodos qualitativos e quantitativos, tanto em laboratório quanto *in situ*. Em laboratório, os ensaios mais comuns incluem a compressão uniaxial e o teste de carga pontual, enquanto no campo pode-se utilizar o martelo de Schmidt. No entanto, quando esses métodos não estão disponíveis, uma alternativa viável é o teste do martelo geológico, que permite estimar a resistência da rocha de forma discreta. Esse teste consiste em aplicar impactos sucessivos com um martelo geológico ou, no caso de formações mais brandas, utilizar um canivete para avaliar o grau de dureza da rocha até que ocorra o fraturamento do fragmento de rocha sã (Fiori, 2016).

Com base nos resultados obtidos no teste do martelo geológico, a resistência à compressão uniaxial da rocha pode ser estimada por meio dos valores apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Classificação pelo método do martelo geológico

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

Fonte: Fiori (2016).

3.3.5 Martelo de Schmidt

O esclerômetro, também conhecido como martelo de Schmidt (Figura 14), foi originalmente desenvolvido para avaliar a resistência de corpos de prova de concreto por meio de ensaios não destrutivos. Com o tempo, sua aplicação expandiu-se para outras áreas, incluindo a mecânica das rochas, onde foi adaptado para estimar parâmetros geotécnicos essenciais. Por meio de medições de rebote e correlações empíricas, o equipamento permite obter valores aproximados da resistência à compressão uniaxial (RCU) e do módulo de elasticidade de rochas intactas, tornando-se uma ferramenta prática para avaliações preliminares em campo (Fiori, 2016). Sua versatilidade e simplicidade operacional contribuíram para sua ampla adoção em estudos geotécnicos e de engenharia de rochas.

Figura 14 – Modelo do Martelo de Schmidt.



Fonte: PNIPE (2025)

O funcionamento do esclerômetro baseia-se na aplicação perpendicular do equipamento à superfície da rocha. Ao ser acionado, o êmbolo do equipamento é impulsionado contra a superfície, sendo que parte da energia gerada é dissipada pela absorção do impacto e convertida em som. A energia restante está associada à resistência oferecida pela rocha à penetração do êmbolo, sendo esta resistência expressa pelo número de rebotes registrados (Aydin; Basu, 2005). Em geral, quanto maior a dureza superficial do material, maior será o número de rebotes observados.

Visando correlacionar diferentes modelos de esclerômetros, Aydin e Basu (2005) propuseram uma equação empírica para converter os valores obtidos com o martelo do tipo L para os equivalentes do tipo N. Tal correlação é relevante, considerando que os martelos do tipo

L não são mais comercializados, sendo comum a utilização de valores equivalentes. A Equação 9 utilizada é apresentada a seguir:

$$Rn = 1,064 \cdot RL + 6,3673 \quad (9)$$

Onde:

- Rn representa o número de rebotes equivalente ao martelo do tipo N;
- RL corresponde à média dos valores obtidos com o martelo do tipo L.

A correlação entre o número de rebotes e a inclinação do equipamento durante os ensaios pode ser estabelecida com base em tabelas específicas que relacionam os valores obtidos com o martelo de Schmidt à resistência à compressão simples. Neste trabalho, adotou-se a Equação 10 proposta por *Deere et al.* (1966), amplamente utilizada devido à sua confiabilidade, baseada em ensaios com 28 litologias distintas, incluindo rochas ígneas, sedimentares e metamórficas. Essa equação apresenta um coeficiente de correlação de 0,94 e abrange intervalos de resistência de 22 a 358 MPa. Para sua aplicação, são necessários apenas o valor médio dos rebotes obtidos com o martelo do tipo L (R_L) e a densidade da rocha, representada por ρ .

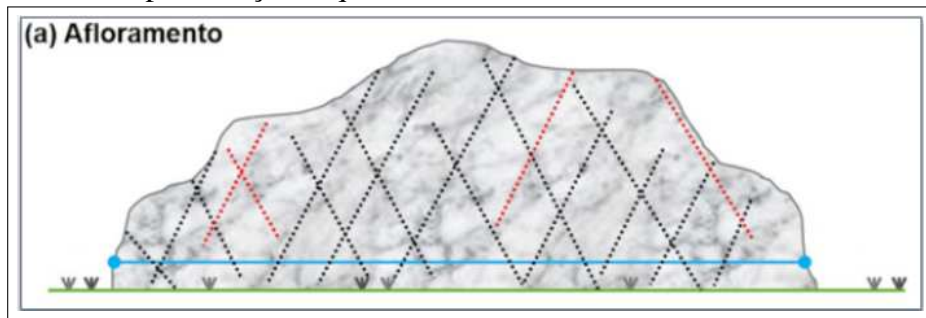
$$\alpha_c = 9,97 \cdot e^{(0,02 \cdot L\rho)} \quad (10)$$

3.3.6 Scanline

O método da linha de varredura (scanline) consiste na seleção de áreas representativas do afloramento rochoso, onde uma linha reta contínua é estabelecida para mapear sistematicamente todas as descontinuidades que a interceptam (Fiori, 2016). Essa técnica permite caracterizar parâmetros como espaçamento, persistência e orientação das fraturas, sendo amplamente utilizada para análises estruturais. Segundo Fiori (2016), esse método destaca-se por fornecer um detalhamento superior na quantificação da densidade e na diversidade das atitudes das descontinuidades, permitindo uma representação precisa da heterogeneidade do maciço rochoso, conforme ilustrado na Figura 15.

Na representação esquemática, a linha azul corresponde a scanline (linha de varredura), enquanto as linhas pretas indicam as fraturas que interceptam essas linhas de referência. Já as linhas vermelhas representam as fraturas que não cruzam a scanline, ilustrando assim a distribuição espacial das descontinuidades em relação ao traçado analisado.

Figura 15 – Representação esquemática de uma scanline.



Fonte: Adaptado de (PINO, 2012)

De acordo com Fiori (2016), recomenda-se que a extensão adotada seja em torno de 10 metros, podendo variar entre 5 e 20 metros em função da dimensão da face disponível e do grau de heterogeneidade da rocha. Em casos em que não seja possível utilizar linhas mais extensas devido à limitação do talude ou do afloramento, recomenda-se a realização de múltiplas scanlines mais curtas, distribuídas em diferentes setores da face, a fim de garantir a representatividade dos dados levantados.

3.4 Trabalhos Correlatos

Nesta seção, serão apresentados cinco trabalhos correlatos que serviram como base teórica para esta pesquisa.

3.4.1 2016

No estudo intitulado “Estabilidade de taludes por meio da análise cinemática e classificação de maciços rochosos ao longo da Rodovia Governador Mário Covas (BR-101), município de São Sebastião – SP” Severino (2016), destaca-se a utilização integrada de métodos de classificação geomecânica e análise cinemática para identificar riscos geotécnicos em taludes rochosos ao longo da rodovia Governador Mário Covas (BR-101), entre os km 115 e 121, em São Sebastião (SP). A pesquisa teve como objetivo principal mapear zonas críticas propensas a deslizamentos, planejando medidas de contenção preventivas para evitar acidentes e interrupções no tráfego.

Metodologicamente, o trabalho baseou-se nos sistemas de classificação RMR básico e Sistema Q, complementados por análise cinemática das estruturas geológicas e avaliação do grau de fraturamento das rochas. A área de estudo foi dividida em dois domínios geotécnicos distintos: Norte e Sul, cada um com mecanismos de ruptura característicos. Foram analisados

parâmetros como orientação de descontinuidades, persistência, espaçamento e grau de alteração das rochas para identificar zonas prioritárias de intervenção.

Os resultados indicaram que o domínio Norte apresenta maior propensão a deslizamentos planares e em cunha, associados a famílias de descontinuidades com orientações favoráveis a esses mecanismos. Já o domínio Sul mostrou risco predominante de tombamento de blocos, devido à combinação de fraturas verticais e inclinação do talude. Pontos com alto grau de alteração da rocha e deslizamentos de solo foram identificados como críticos, exigindo ações imediatas.

Como medidas de contenção, os autores propuseram soluções adaptadas a cada cenário: cortinas atirantadas e barreiras flexíveis para zonas com risco de deslizamento planar/cunha, solo grampeado para áreas com deslizamentos superficiais, e muros de arrimo para estabilizar blocos suscetíveis a tombamento. Essas intervenções visam evitar a interdição da rodovia e reduzir custos com reparos emergenciais.

O estudo reforça a eficácia das classificações geomecânicas e análises cinemáticas na fase preliminar de projetos, mas aponta limitações, como a ausência de modelagem numérica para quantificar o impacto de chuvas intensas ou vibrações do tráfego na estabilidade. Recomenda-se, como aprimoramento, a integração de monitoramento em tempo real (ex.: sensores de umidade e inclinação) e simulações dinâmicas para avaliar cenários críticos. Além disso, destaca-se a importância da manutenção periódica das estruturas de contenção, especialmente em regiões com alta taxa pluviométrica, como o litoral paulista.

3.4.2 2021

No estudo intitulado “CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE MACIÇO ROCHOSO EM UMA MINERAÇÃO ARTESANAL PARALISADA NO MUNICÍPIO DE TAUÁ-CE” Farias (2021), destaca-se a preocupação com a estabilidade de escavações em uma mineração artesanal desativada no Serrote do Quinamuiú, em Tauá (CE), frequentemente visitada por turistas. A pesquisa teve como objetivo principal avaliar as condições geomecânicas do maciço rochoso, caracterizar a geologia local e analisar as descontinuidades para atestar a segurança das galerias.

Metodologicamente, o trabalho combinou técnicas de modelagem digital do terreno para reconhecimento topográfico, investigação geológica de campo e análise das descontinuidades nas galerias. Foram coletados parâmetros como orientação espacial, frequência, espaçamento,

persistência, rugosidade, resistência à compressão, abertura e preenchimento de fraturas em afloramentos, paredes e tetos das escavações. Esses dados subsidiaram a aplicação dos sistemas de classificação RQD, RMR, Q-Barton e GSI. Adicionalmente, os padrões de descontinuidades foram analisados por meio dos softwares Stereonet e Stereonet/app Visible Geology.

Os resultados geológicos identificaram rochas encaixantes compostas por gnaisses migmatizados, diatexitos, granodioritos e paragneisses do Complexo Tamboril-Santa Quitéria, enquanto o Serrote do Quinamuiú é formado por riolitos de granulação fina, ricos em sílica. A análise das descontinuidades revelou duas famílias principais com atitudes médias de $098^{\circ}/50$ e $041^{\circ}/56$, orientadas predominantemente na direção WNW-ESE, identificadas como condicionantes de instabilidades nas paredes externas das galerias. As classificações geomecânicas indicaram qualidade do maciço entre “razoável” e “ruim”, com valores consistentes nos sistemas RMR, Q-Barton e GSI. Concluiu-se que a entrada das galerias não é segura para visitação, devido ao alto risco de desprendimento de blocos e colapso parcial.

Como medidas de estabiliza o, os autores sugeriram a instala o de suportes estruturais (como parafusos de ancoragem e telas metálicas) em zonas críticas, além de sinaliza o de áreas de risco e restri o de acesso até a implementa o das interven es. O estudo também apontou limita es, como a ausência de análises numéricas complementares (ex.: modelos de elementos finitos) para simular o comportamento do maciço sob cargas dinâmicas. Recomendou-se, como aprimoramento, a realiza o de monitoramento contínuo com instrumenta o (ex.: extens metros) e a integra o de técnicas de reforço estrutural adaptadas ao contexto geológico local.

No estudo intitulado “AVALIA O DA ESTABILIDADE DOS TALUDES DE ROCHA DO CORTE FERROVIÁRIO SITUADO NO CENTRO DA CIDADE DE CRATEÚS/CE PELOS MÉTODOS RMR, Q - BARTON E SMR ” Maia (2021), percebe-se que a utiliza o de sistemas de classifica o geomecânica, como RMR, Q-Barton e SMR,   fundamental para identificar riscos de instabilidade em taludes artificiais de rochas, especialmente em contextos urbanos. A pesquisa teve por finalidade avaliar a estabilidade de taludes rochosos em um corte ferroviário localizado em Crateús (CE), identificando potenciais mecanismos de ruptura e propondo medidas de conten o adequadas.

Metodologicamente, os taludes T1 e T2 foram divididos em Scanlines de 5 metros, totalizando 30 metros de extensão, onde foram caracterizadas as descontinuidades geológicas (orienta o, persistência e espaçamento). Em seguida, realizou-se uma análise cinemática com

o Software Stereonet 11 para identificar famílias de descontinuidades propícias a rupturas. Os parâmetros coletados foram aplicados aos sistemas RMR, Q-Barton e SMR para classificar a qualidade do maciço rochoso.

Como resultado, identificaram-se quatro famílias de descontinuidades (F1 a F4), sendo as famílias F2 e F4 associadas a rupturas em cunha. Os sistemas RMR e Q-Barton classificaram o maciço como "rocha ruim" e "muito má qualidade", respectivamente, enquanto o SMR indicou classe "regular", com baixa probabilidade de rupturas planares, porém necessidade de contenção em zonas fraturadas. Foram sugeridas medidas como instalação de telas metálicas, muros de suporte no pé dos taludes e aplicação de concreto projetado nas faces para mitigar riscos.

O estudo demonstra a eficácia das classificações geomecânicas na identificação de mecanismos de ruptura, mas aponta limitações, como a divergência entre os resultados do SMR e os demais sistemas. Os autores sugerem, como aprimoramento, a integração de análises numéricas complementares para validar as medidas propostas e monitoramento contínuo das intervenções realizadas.

3.4.3 2022

No estudo intitulado “CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE UM MACIÇO ROCHOSO EM CORTE DE ESTRADA NO MUNICÍPIO DE BOA VIAGEM-CE.” Soares (2022), observa-se que a análise de taludes rochosos em cortes de estradas é crucial para prevenir acidentes relacionados a deslizamentos, especialmente em regiões com tráfego intenso. A pesquisa focou-se em classificar geomecanicamente um maciço rochoso localizado em um corte de estrada no município de Boa Viagem (CE), visando determinar sua estabilidade e propor medidas de contenção adequadas às condições identificadas.

Metodologicamente, o estudo utilizou investigações de campo com equipamentos como bússola, martelo geológico, trena e GPS para coletar parâmetros das descontinuidades, como rugosidade, espaçamento, presença de água, resistência à compressão e orientação. Esses dados foram aplicados aos sistemas de classificação RMR, Q-Barton e SMR, segmentando o talude em cinco áreas distintas (1 a 5) para análise individualizada.

Como resultados, as classificações apresentaram variações significativas. Pelo sistema RMR, as áreas 1 e 2 obtiveram valor 71, classificadas como "boas", a área 4 alcançou 80 ("boa") e a área 3 registrou 85 ("muito boa"). Já o método Q-Barton classificou a área 1 como

"boa qualidade"(22,5), enquanto as áreas 2 e 3 foram categorizadas como "má qualidade"(valores 1 e 2, respectivamente), e a área 4 como "qualidade regular"(8). No sistema SMR, as áreas 1 e 2 receberam pontuação 54, sendo consideradas "parcialmente estáveis", a área 3 obteve 68 ("estável"), a área 4 registrou 63 ("estável") e a área 5 foi classificada como "instável", demandando retaludamento.

Com base nesses resultados, foram propostas medidas específicas para cada área. Para as zonas parcialmente estáveis (áreas 1 e 2), recomendaram-se proteção superficial (telas metálicas ou concreto projetado) e reforços estruturais (muros de suporte). A área 5, instável, exigiu intervenções drásticas, como retaludamento, enquanto as áreas 3 e 4, estáveis, não necessitaram de medidas além de monitoramento preventivo.

O estudo reforça a importância das classificações geomecânicas na priorização de ações de contenção, porém destaca limitações, como a divergência entre os resultados do Q-Barton e RMR para algumas áreas, possivelmente devido à sensibilidade diferenciada dos métodos a parâmetros como presença de água. Como sugestão, os autores recomendam a integração de análises dinâmicas, como modelagem numérica, e monitoramento contínuo para validar as medidas propostas e ajustá-las conforme o envelhecimento do maciço rochoso.

No estudo intitulado “MAPEAMENTO ESTRUTURAL E ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE UM CORTE DE ESTRADA NO MUNICÍPIO DE BOA VIAGEM - CE” Silva (2022), evidencia-se a importância do mapeamento geológico-geotécnico aliado a ferramentas computacionais para prever riscos de ruptura em taludes rochosos. A pesquisa teve como objetivo principal avaliar a estabilidade de três seções de taludes em um corte de estrada, por meio de mapeamento estrutural e análises combinadas (cinemáticas, determinísticas e de sensibilidade), visando propor soluções para garantir a segurança do maciço.

Metodologicamente, o trabalho foi dividido em quatro etapas interligadas. Inicialmente, realizou-se o mapeamento geológico-geotécnico das três seções (TS1, TS2 e TS3), caracterizando discontinuidades como orientação, persistência e espaçamento. Na segunda etapa, análises cinemáticas-probabilísticas identificaram discontinuidades críticas e tipos potenciais de ruptura (planar, em cunha e tombamento de blocos) utilizando softwares especializados. A terceira etapa envolveu análises determinísticas para cálculo do fator de segurança (FS), enquanto a quarta etapa focou em análises de sensibilidade, avaliando o impacto da saturação por água na resistência ao cisalhamento.

Como resultados, as análises cinemáticas-probabilísticas indicaram condições para

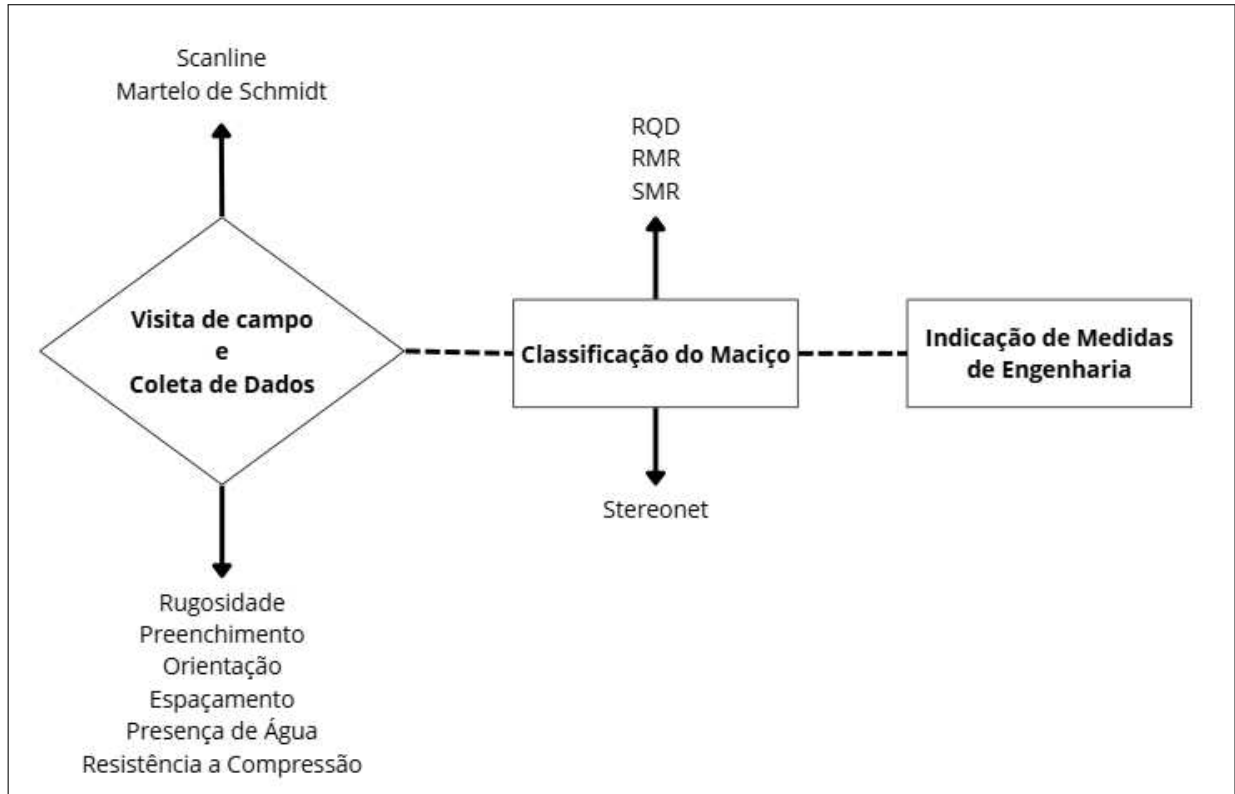
ruptura planar apenas na seção TS1 e risco de ruptura em cunha e tombamento de blocos (direto e oblíquo) em todas as seções, com probabilidades variáveis. As análises determinísticas mostraram fatores de segurança superiores a 1 para as descontinuidades críticas, sugerindo estabilidade imediata. No entanto, as análises de sensibilidade revelaram que o aumento da saturação por água reduz significativamente a resistência ao cisalhamento, elevando o risco de instabilidade a longo prazo.

O estudo conclui que a combinação de métodos computacionais (cinemáticos, determinísticos e de sensibilidade) permite uma interpretação mais robusta das condições de estabilidade, especialmente em cenários dinâmicos como variações hidrológicas. Contudo, os autores destacam limitações, como a dependência de pressupostos simplificadores nos modelos matemáticos e a ausência de dados de monitoramento em tempo real. Como aprimoramento, sugerem a integração de modelagem numérica (ex.: elementos finitos) para simular cenários de saturação extrema e a instalação de instrumentação de campo (ex.: piezômetros) para validar as previsões teóricas.

4 METODOLOGIA

A Figura 16 apresenta o fluxograma metodológico adotado, sintetizando de maneira objetiva e sequencial as fases e procedimentos que nortearam este trabalho.

Figura 16 – Fluxograma Metodológico.



Fonte: Autor (2025).

4.1 Visita de Campo e Coleta de Dados

A coleta de dados voltada para a classificação geomecânica do maciço rochoso, foi executada, conforme ilustrada na Figura 17 a seguir. Para isso, foram realizadas duas campanhas de reconhecimento geológico em momentos distintos, envolvendo o deslocamento até a área de estudo com os equipamentos necessários. O objetivo dessas visitas foi obter os parâmetros essenciais para a aplicação dos métodos de classificação geomecânica RQD, RMR e SMR.

Figura 17 – Coleta dos parâmetros necessários para as classificações.



Fonte: Autor (2025).

A caracterização geomecânica do maciço rochoso foi realizada com o apoio de equipamentos disponibilizados pela Prefeitura da Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus de Crateús, por meio do Laboratório de Geologia e Mineralogia e pelo Laboratório de Materiais da Construção Civil, ambos do Campus Crateús. Entre os principais recursos utilizados, destacam-se:

- Bússola geológica Brunton modelo DQL-8, utilizada para a medição precisa da

orientação das descontinuidades;

- Martelo de Schmidt modelo N - 300.162 da EngeTotus, empregado na determinação indireta da resistência à compressão uniaxial da rocha;
- Pente de Barton, utilizado na avaliação quantitativa da rugosidade das superfícies das descontinuidades;
- Trena, empregada no auxílio à medição das scanlines, especialmente no que se refere ao espaçamento e à abertura das fraturas.

A coleta de dados estruturais foi conduzida por meio do método scanline, cuja adoção neste trabalho se fundamenta na sua ampla utilização nos estudos correlatos apresentados na Seção 3.4. A recorrência dessa técnica em pesquisas anteriores reforçou sua adequação aos objetivos deste estudo, uma vez que permite a caracterização sistemática das descontinuidades em afloramentos rochosos. Para sua aplicação, foram instaladas linhas de varredura com 10 metros de extensão, subdivididas em seções de 5 metros, o que possibilitou o registro padronizado das descontinuidades que interceptaram cada segmento ao longo do perfil. A Figura 18 ilustra a execução do método em campo.

Figura 18 – Método da Scanline: Seção de 5 metros

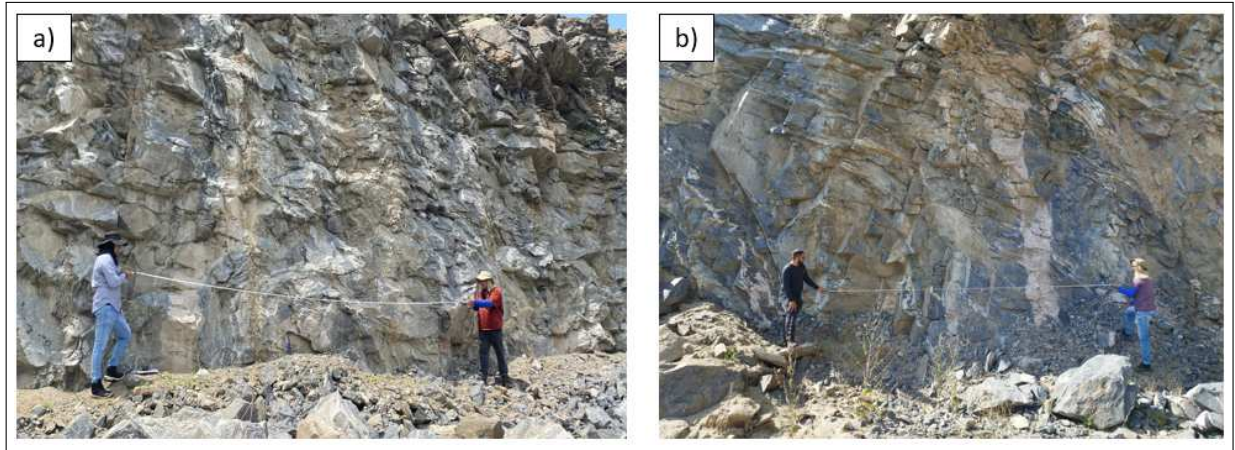


Fonte: Autor (2025).

As projeções e medições foram realizadas com base nas imagens representadas na Figura 19, que foi vetorizada no software AutoCAD, o que permitiu medir com maior precisão o espaçamento entre as principais descontinuidades interceptadas ao longo da scanline, servindo

de base para a classificação geomecânica. A Figura 19 (a) corresponde à Face 1 e a (b) à Face 2 do maciço analisado.

Figura 19 – Método da Scanline aplicado : (a) face 1 e (b) face 2



Fonte: Autor (2025).

A orientação das discontinuidades foi obtida com o auxílio de uma bússola geológica, utilizada para medir a direção e o mergulho das fraturas presentes nos afloramentos. Esse procedimento foi fundamental para o levantamento dos dados estruturais, fornecendo subsídios importantes para a análise da geometria e da distribuição espacial das discontinuidades ao longo do maciço rochoso, além de possibilitar a elaboração das projeções estereográficas utilizadas nas etapas posteriores deste estudo, por meio do software Stereonet.

Figura 20 – Utilização da bússola geológica



Fonte: Autor (2025).

O martelo de Schmidt foi utilizado como método indireto e não destrutivo para estimar a resistência à compressão uniaxial (UCS) da rocha, em razão da praticidade de aplicação em campo e por permitir uma estimativa rápida da resistência em superfícies naturais. Conforme ilustrado na Figura 21, foram aplicados cinco golpes sucessivos do martelo diretamente sobre superfícies de fraturas previamente identificadas no maciço rochoso. Os valores de rebote obtidos em cada impacto foram registrados e, posteriormente, corrigidos de acordo com a angulação da aplicação, utilizando-se o ábaco fornecido pelo próprio fabricante do equipamento. Os valores corrigidos foram então utilizados para o cálculo da resistência média do material nas regiões fraturadas.

Figura 21 – Utilização do Martelo de Schmidt



Fonte: Autor (2025).

A presença de água foi observada in loco, por meio da verificação da percolação nas discontinuidades e de sua influência no comportamento do maciço. A abertura e o preenchimento das discontinuidades foi analisado por meio de inspeção visual e tátil, permitindo a classificação do material presente nas fraturas. A avaliação da persistência das discontinuidades foi realizada a partir da estimativa do comprimento médio das fraturas mais representativas de cada família estrutural identificada. Essa caracterização contribuiu significativamente para o refinamento dos parâmetros geomecânicos obtidos em campo, servindo de suporte técnico à aplicação dos métodos de classificação do maciço rochoso.

A rugosidade das superfícies das discontinuidades foi avaliada com o auxílio do pente de Barton, conforme a Figura 22, possibilitando a classificação da textura superficial das fraturas. Ademais, realizou-se uma análise visual da composição mineralógica da rocha, com a identificação dos minerais presentes, a fim de compreender melhor suas características e propriedades.

Figura 22 – Utilização do pente de Barton



Fonte: Autor (2025).

4.2 Interpretação de Dados e Indicação de Medidas de Engenharia

Com o objetivo de aprofundar a compreensão das condições do maciço rochoso em estudo, os dados obtidos em campo foram utilizados na caracterização geológica e na realização da classificação geomecânica. Para isso, foram coletadas informações sobre a orientação das discontinuidades, incluindo seus ângulos de mergulho e direção, que são fundamentais para a avaliação estrutural do maciço.

A representação das projeções estereográficas foram realizadas com o auxílio do software Stereonet, uma ferramenta amplamente utilizada na análise estereográfica de estruturas geológicas. Com ele, foi possível representar graficamente as medições em projeções estereográficas, facilitando a identificação de padrões e agrupamentos de fraturas. A análise permitiu distinguir com clareza as principais famílias de discontinuidades presentes, fornecendo subsídios

essenciais para a aplicação dos sistemas de classificação geomecânica RQD, RMR e SMR. A partir dessas classificações, foram propostas intervenções e medidas de suporte específicas para cada uma das faces dos taludes analisados, com o objetivo de garantir sua estabilidade e segurança em longo prazo.

5 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia descrita no capítulo anterior.

5.1 Caracterização Petrográfica

As amostras do maciço rochoso apresentam uma textura bandada bem desenvolvida, caracterizada pela alternância de faixas de coloração clara e escura, dispostas paralelamente entre si. Tal configuração evidencia a presença de foliação, típica de rochas submetidas a metamorfismo regional em condições de médio a alto grau. O bandamento observado na Figura 23 sugere que a rocha passou por processos intensos de deformação e recristalização, resultando na reorganização mineralógica segundo planos preferenciais.

Figura 23 – Amostras obtidas no maciço analisado.



Fonte: Autor (2025).

As bandas de coloração clara indicam a predominância de minerais leucocráticos, como o quartzo e o feldspato, responsáveis pelo aspecto granuloso e tonalidade clara nessas

regiões. Por outro lado, as faixas de tonalidade cinza a escura são compostas por minerais máficos, como a biotita e, possivelmente, o anfibólio, que se concentram nas zonas mais ricas em ferromagnesianos.

Com base nas características macroscópicas descritas como o bandamento composicional, a presença de minerais claros e escuros em faixas distintas e a foliação bem definida, a rocha pode ser classificada como um gnaiss. Trata-se de uma rocha metamórfica derivada de protólito rico em sílica, cuja evolução está associada a eventos tectono-metamórficos regionais, envolvendo condições de elevada pressão e temperatura.

5.2 Caracterização Geológica

Foram realizadas duas visitas técnicas, em duas faces, aproximadamente ortogonais entre si, utilizando o método scanline em duas seções lineares de 5 metros por dia, totalizando 10 metros por visita. Os dados obtidos, sendo eles: abertura, direção, mergulho, rugosidade, persistência e resistência das fraturas, foram organizados e plotados em projeções estereográficas no software Stereonet, auxiliando na identificação das famílias estruturais presentes no maciço.

Figura 24 – Maciço rochoso - Face 1.



Fonte: Autor (2025).

Na primeira face do talude, exemplificada na Figura 24, foram identificadas sete descontinuidades, distribuídas entre três famílias estruturais distintas. As aberturas variaram entre 4 e 6 mm, sendo classificadas como ligeiramente abertas. A rugosidade das superfícies foi avaliada com o uso do pente de Barton, resultando em classificações que variaram de moderadamente lisa a rugosa. A seguir, na Tabela 18 apresentam-se as descontinuidades e suas

respectivas orientações identificadas nesta primeira face analisada.

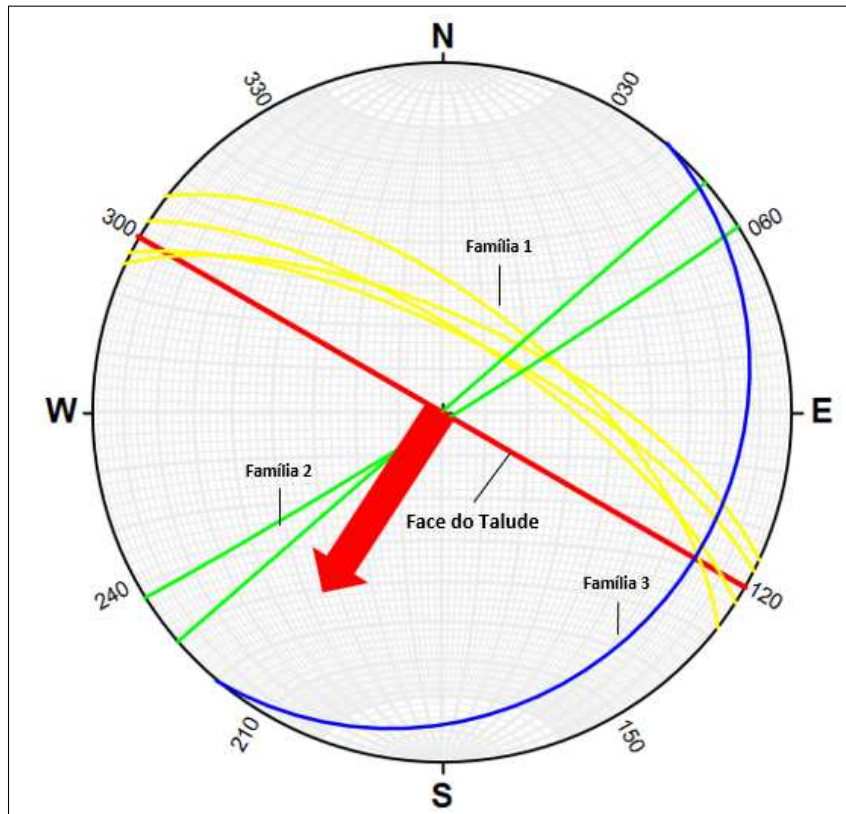
Tabela 18 – Orientação das famílias de fraturas medidas na primeira face analisada - Face 1.

Direção (°)	Mergulho (°)	Família
300	90	Face
295	68	F1
297	72	F1
303	72	F1
308	64	F1
49	90	F2
58	88	F2
40	18	F3

Fonte: Autor (2025).

As orientações estruturais mapeadas estão representadas no estereograma de planos apresentado a seguir na Figura 25. O plano correspondente à face 1 analisada foi destacado em vermelho, com sua frente para direção SW, destacada pela seta vermelha.

Figura 25 – Planos das famílias - Face 1



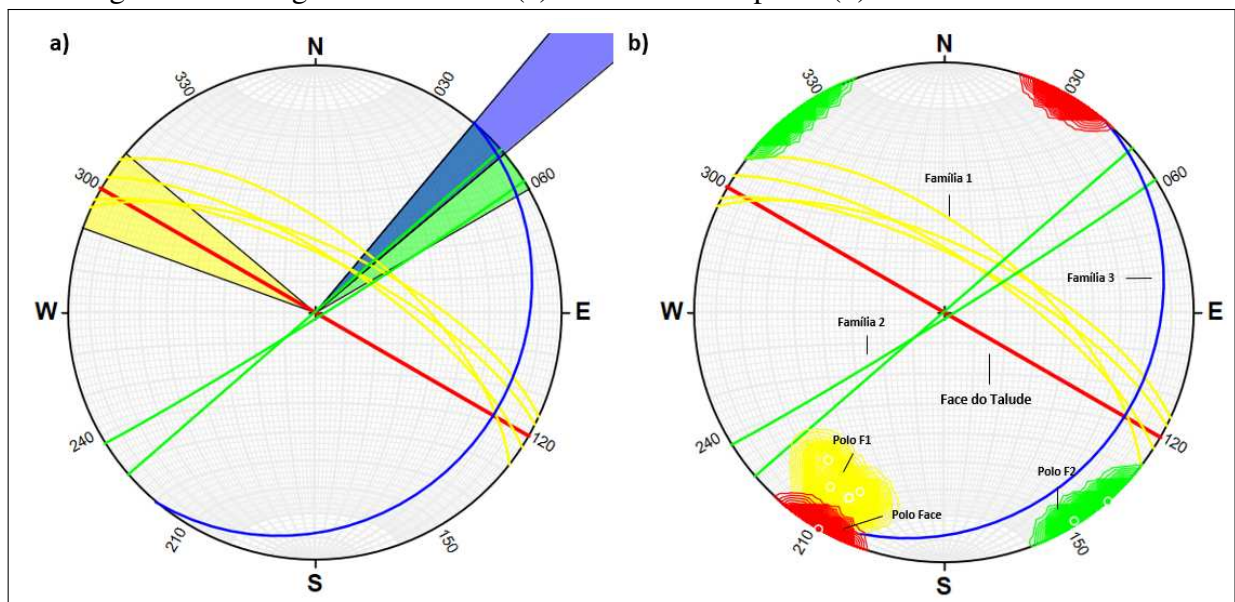
Fonte: Autor (2025).

A análise estereográfica evidenciou a presença de três famílias de descontinuidades

previamente identificadas na face do talude estudado. A Família 1 apresenta orientação média de 301° e mergulho de 69° , correspondendo a fraturas subverticais com direção NE. A Família 2 reúne descontinuidades com direções entre 049° e 058° e mergulhos variando de 90° a 88° , com orientação predominante SE. Já a Família 3 é composta por uma fratura com direção de 40° e mergulho de 18° , com orientação de SE. A disposição espacial das famílias F1, associada à geometria da face do talude, favorece a formação de rupturas do tipo planar, uma vez que são paralelas a face do talude e possuem um mergulho menor, sendo esta a principal instabilidade potencial do maciço rochoso. A maioria das descontinuidades possui persistência de até 12 metros, exceto a que forma a família 3, que atravessa toda a extensão visível do maciço rochoso, tendo a persistência classificada como superior a 20 metros de acordo com a classificação RMR.

A utilização dos diagramas de rosetas e de contorno de polos (Figura 26), contribuiu para reforçar a interpretação da estrutura do maciço, ao evidenciar a orientação predominante das fraturas e sua relação com a face do talude. A análise integrada das representações estereográficas confirmou que a família de descontinuidades F1 são subparalelas a face do talude, e os polos são muito próximos. Essa compatibilidade direcional sugere que os blocos limitados por essas estruturas possuem potencial para deslizar, evidenciando a ocorrência de ruptura planar como o principal mecanismo de instabilidade na área.

Figura 26 – Diagrama de rosetas (a) e contorno dos polos (b) - Face 1



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 19 apresenta uma síntese das principais características geomecânicas das fraturas identificadas durante as análises de campo.

Tabela 19 – Características geotécnicas das fraturas - Face 1.

Fraturas	Rugosidade	Abertura (cm)	Persistência (m)	Percolação
F1	Moderadamente lisa	0	12	Seco
F1	Rugosa	0	12	Seco
F1	Moderadamente lisa	0	12	Seco
F1	Rugosa	0	12	Seco
F2	Rugosa	0	12	Seco
F2	Rugosa	0	12	Seco
F3	Rugosa	0	> 20	Seco

Fonte: Autor (2025).

Na segunda face do talude, as fraturas foram registradas apenas na primeira seção, pela dificuldade de visualização e aproximação da segunda seção, totalizando seis descontinuidades agrupadas em três famílias estruturais. As aberturas variaram entre 2 e 6 mm, sendo classificadas como fechadas a ligeiramente abertas. A rugosidade das superfícies foi avaliada com o uso do pente de Barton, resultando em classificações que variaram de moderadamente lisa a rugosa. A seguir, apresenta-se a Tabela 20 com as descontinuidades e suas respectivas orientações identificadas nessa segunda face.

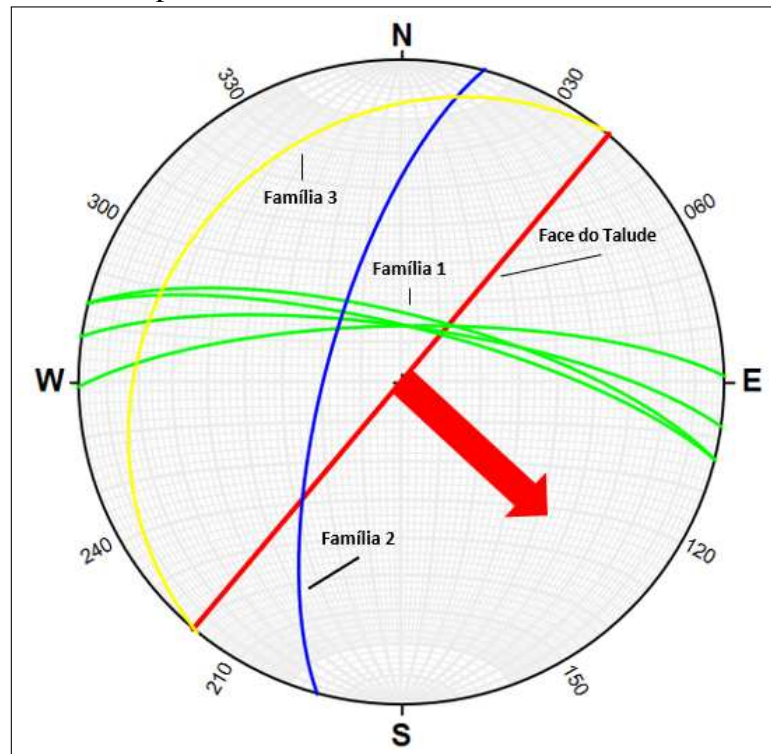
Tabela 20 – Orientação das famílias de fraturas medidas na segunda face analisada - Face 2.

Direção (°)	Mergulho (°)	Família
40	90	Face
269	76	F1
278	76	F1
284	76	F1
284	73	F1
195	71	F2
219	23	F3

Autor (2025).

As orientações estruturais mapeadas estão representadas no estereograma de planos apresentado a seguir. O plano correspondente à face 2 analisada foi destacado em vermelho, com sua frente para direção SE, destacada pela seta vermelha.

Figura 27 – Planos representativos das famílias - Face 2



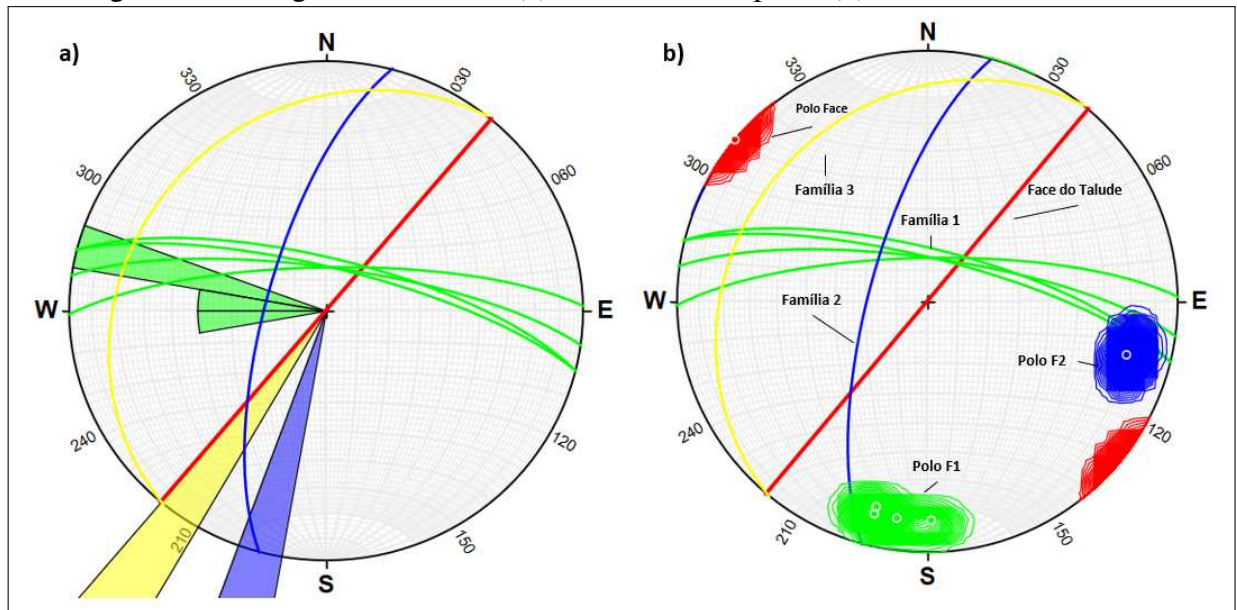
Fonte: Autor (2025).

A análise estereográfica da segunda face do talude, representada na Figura 27, confirmou a presença das três famílias de descontinuidades. A Família 1 reúne fraturas com direções entre 269° e 284° , mergulhos entre 73° e 76° , com orientação para NE. A Família 2 reúne uma fratura com direção de 195° e mergulho de 71° , inclinando-se para NW. Já a Família 3 possui direção de 219° e mergulho de 23° , mergulhando para NW. A disposição espacial das famílias F1 e F2 favorece a formação de rupturas do tipo em cunha, sendo esta a principal instabilidade potencial do maciço rochoso. A maioria das descontinuidades possui persistência de até 12 metros, exceto a que forma a família 3, que atravessa toda a extensão visível do maciço rochoso, tendo a persistência classificada como superior a 20 metros de acordo com a classificação RMR

A utilização dos diagramas de roseta e de contorno de polos (Figura 28) contribuiu significativamente para a interpretação estrutural do maciço, ao evidenciar as direções predominantes das descontinuidades e a concentração estatística dos polos. No diagrama de contorno de polos (Figura 28b), observa-se que as famílias de descontinuidades F1 e F2 apresentam orientações que convergem para a formação de uma linha de interseção com inclinação semelhante à da face do talude. Essa configuração geométrica indica uma condição favorável ao deslocamento de blocos ao longo desse eixo, caracterizando um mecanismo típico de instabilidade por ruptura em

cunha na Face 2.

Figura 28 – Diagrama de rosetas (a) e contorno dos polos (b) - Face 2



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 21 apresenta uma síntese das principais características geomecânicas das fraturas identificadas durante as análises de campo.

Tabela 21 – Características geotécnicas das fraturas – Face 2.

Fraturas	Rugosidade	Abertura (cm)	Persistência (m)	Percolação
F1	Moderadamente lisa	0	12	Seco
F2	Moderadamente lisa	0	12	Seco
F2	Lisa	0	12	Seco
F2	Moderadamente lisa	0	12	Seco
F2	Rugosa	0	12	Seco
F3	Rugosa	0	>20	Seco

Fonte: Autor (2025).

5.3 Classificação geomecânica

Nesta seção, são apresentados os resultados da caracterização geomecânica realizada a partir dos dados coletados em campo.

5.3.1 Martelo de Schmidt

A resistência à compressão uniaxial foi estimada de forma indireta por meio da aplicação do martelo de Schmidt, utilizando cinco impactos consecutivos em cada fratura e

na face analisada. Os valores obtidos encontram-se sistematizados na Tabela 22, onde são apresentadas as leituras individuais, as respectivas médias por ponto de impacto e o desvio padrão associado, para a Face 1.

Tabela 22 – Leitura do rebote do Martelo de Schmidt na Face 1.

Pontos - Face 1	Golpe 1	Golpe 2	Golpe 3	Golpe 4	Golpe 5	Média	DP
<i>Maciço</i>	55	45	41	55	45	48.2	6.26
F1	61	54	61	63	62	60.2	3.56
F2	50	47	36	50	41	44.8	6.14
F3	64	66	66	65	64	65	1.00
F4	38	42	60	59	50	49.8	9.85
F5	60	60	54	59	61	59	2.19
F6	39	41	38	43	31	38.4	4.56
F7	59	52	50	58	64	56.6	5.63

Fonte: Autor (2025).

A Tabela 23 apresenta as leituras obtidas, incluindo as médias por ponto e os respectivos desvios padrão, para a Face 2.

Tabela 23 – Leitura do rebote do Martelo de Schmidt na Face 2.

Pontos - Face 2	Golpe 1	Golpe 2	Golpe 3	Golpe 4	Golpe 5	Média	DP
<i>Maciço</i>	51	52	57	50	44	52.5	4.56
F1	58	50	58	58	54	55.6	3.57
F2	66	64	68	66	66	66	1.41
F3	55	56	59	54	60	56.8	2.58
F4	50	50	46	46	52	48.8	2.68
F5	54	47	45	43	52	48.2	4.65
F6	58	54	52	58	62	56.8	3.89

Fonte: Autor (2025).

Inicialmente, os valores médios de rebote obtidos com o martelo do tipo N foram convertidos para os equivalentes do martelo do tipo L, conforme a metodologia proposta por Aydin e Basu (2005), utilizando a Equação 9. Em seguida, aplicou-se a Equação 10, desenvolvida por Deere *et al.* (1966), que relaciona o número de rebotes (valor de esclerometria) e a densidade do material, permitindo a estimativa da resistência à compressão simples da rocha. Ambas as equações e seus respectivos fundamentos encontram-se descritos na Seção 3.3.5 deste trabalho. Os dados utilizados para esses cálculos encontram-se nas Tabelas 22 e 23.

A densidade da rocha, disponibilizada pela empresa responsável pela operação no local, foi obtida através de testes em laboratório e considerada constante em 2,662 g/cm³ para todos os cálculos realizados. Com esse valor, foram aplicadas as correlações adequadas para a obtenção da resistência à compressão uniaxial, cujos resultados estão dispostos nas Tabelas 24 e 25, sendo utilizado para o parâmetro de resistência da classificação RMR, a média das resistências medidas no maciço, nas faces 1 e 2.

Tabela 24 – Valores da resistência à compressão uniaxial obtidos pela correlação (Face 1).

Pontos - Face 1	Média	Densidade	RL	α_c (MPa)
<i>Maciço</i>	48,2	2,662	39,32	80,87
F1	60,2	2,662	50,59	147,41
F2	44,8	2,662	36,12	68,21
F3	65	2,662	55,10	187,43
F4	49,8	2,662	40,82	87,60
F5	59	2,662	49,46	138,82
F6	38,4	2,662	30,10	49,52
F7	56,6	2,662	47,21	123,11

Fonte: Autor (2025).

Tabela 25 – Valores da resistência à compressão uniaxial obtidos pela correlação (Face 2).

Pontos - Face 2	Média	Densidade	RL	α_c (MPa)
<i>Maciço</i>	52,5	2,662	43,36	100,28
F1	55,6	2,662	46,27	117,10
F2	66	2,662	56,04	197,05
F3	56,8	2,662	47,39	124,35
F4	48,8	2,662	39,88	83,33
F5	48,2	2,662	39,31	80,86
F6	56,8	2,662	47,39	124,35

Fonte: Autor (2025).

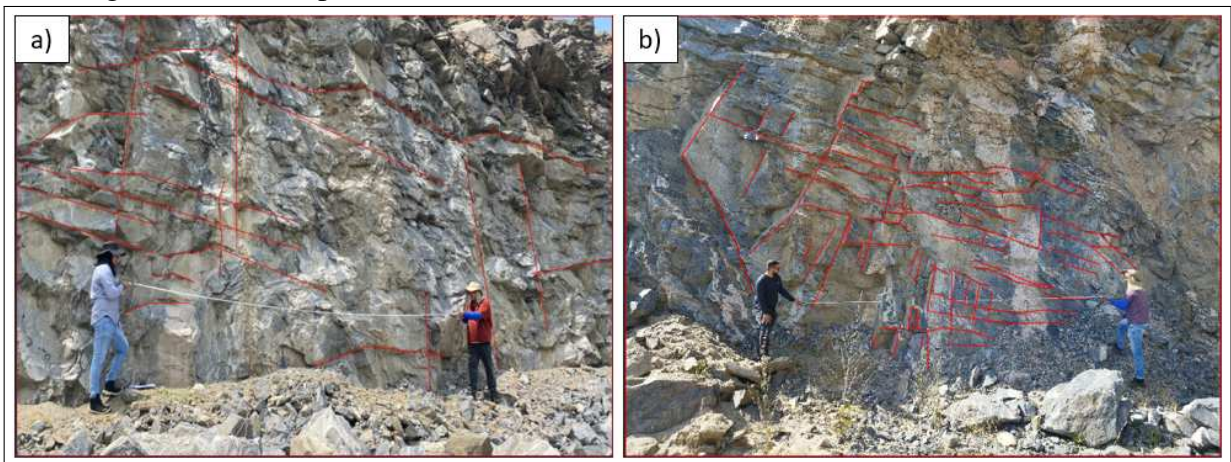
Conforme apresentado nas tabelas anteriores, foram identificados alguns valores atípicos, como os pontos F2 e F6 da Tabela 24. Esses registros foram obtidos em áreas com elevado grau de fraturamento, possivelmente decorrente de desmontes anteriores. Ainda assim, optou-se por mantê-los na análise, uma vez que o presente estudo adota uma abordagem conservadora, considerando todas as discontinuidades observadas nas duas faces analisadas.

5.3.2 Classificação RQD

Para o cálculo do RQD, adotou-se a correlação proposta por Palmstrom (1982), na qual o índice é estimado com base no Índice de Juntas Volumétricas (J_v), conforme apresentado na Equação 4. A classificação correspondente foi atribuída com base nos critérios descritos na Tabela 5.

Os cálculos foram aplicados com base nas famílias de descontinuidades identificadas nas faces analisadas do maciço durante os dois dias de visita, utilizando-se os valores médios de espaçamento entre as fraturas. Esses espaçamentos foram estimados a partir da interseção das fraturas com as superfícies das faces, por meio de medições realizadas no software AutoCAD, com base na vetorização das principais descontinuidades mapeadas nas imagens das Faces 1 e 2, conforme ilustrado na Figura 29 e indicados na Tabela 26. Cabe destacar que, embora as imagens apresentem todas as fraturas identificadas visualmente, nem todas puderam ser medidas diretamente, devido a limitações até determinadas descontinuidades,

Figura 29 – Principais descontinuidades identificadas (a) face 1 e (b) face 2



Fonte: Autor (2025).

Tabela 26 – Espaçamentos médios e seus inversos por família de descontinuidades.

Parâmetro	Família 1	Família 2
Espaçamento médio (m)	0,408	0,355

Fonte: Autor (2025).

A seguir, é apresentado na Tabela 27 o valor do índice de juntas volumétricas (J_v), calculado com base nos inversos dos espaçamentos médios de duas famílias de descontinuidades identificadas no maciço, pois, a terceira família identificada se trata de uma única descontinuidade,

considerada infinita por atravessar todo o maciço.

Tabela 27 – Valor do índice de juntas volumétricas (J_v) do maciço.

Parâmetro	Valor
J_v	5,262

Fonte: Autor (2025).

A seguir, apresenta-se na Tabela 28 o valor do RQD atribuído ao maciço com base nesse cálculo. Adotou-se uma abordagem integrada para representar a qualidade do maciço rochoso ao longo do talude como um todo, considerando que as faces representam um único maciço geológico. Este procedimento é compatível com estudos geomecânicos de escala local, conforme indicado em literaturas como Bieniawski (1989) e Palmström (2005).

Tabela 28 – Resultado do RQD para o maciço analisado

<i>RQD</i>	Classe	Qualidade da rocha
97,63	5	Muito Boa

Fonte: Autor (2025).

5.3.3 Classificação RMR - Básico

Os valores apresentados na Tabela 29 referem-se aos pesos atribuídos segundo os critérios estabelecidos por (BIENIAWSKI, 1989), conforme o Quadro 2 e Tabela 8.

Tabela 29 – Resultado do RMR-Básico para o maciço analisado.

Parâmetros	Valor
Resistência	7
RQD	20
Espaçamento	5
Condição	10
Presença de água	15
Persistência	1
Abertura	6
Rugosidade	5
Preenchimento	6
Grau de Alteração	6
RMR Básico	81
Classe	I

Fonte: Autor (2025).

Foi adotado um único valor de RMR para representar o maciço rochoso analisado, uma vez que os parâmetros utilizados na classificação, tais como RQD, resistência da rocha, espaçamento médio das descontinuidades e condições estruturais, apresentaram pouca variação entre as duas faces analisadas do maciço. Como ambas as faces compartilham as mesmas famílias de fraturas e não há presença de água, os critérios classificatórios mantêm-se dentro da mesma faixa de pontuação. Dessa forma, a região estudada enquadra-se na Classe I, conforme a Tabela 10 da Seção 3.3.2, correspondente a maciços de muito boa qualidade. Ressalta-se que o sistema de classificação RMR foi originalmente desenvolvido para aplicação em ambientes subterrâneos. Portanto, neste trabalho, os valores do RMR-Básico serão utilizados como base para o cálculo do índice SMR, mais adequado à avaliação da estabilidade de taludes em maciços expostos a céu aberto.

5.3.4 Classificação SMR

Para o cálculo do índice SMR, foram considerados os modos de ruptura identificados em cada face do talude. Na face 1, observou-se um mecanismo de ruptura planar, sendo adotado o critério convencional de avaliação do SMR proposto por Romana *et al.* (2003).

Na face 2, foi identificada uma ruptura em cunha, sendo aplicado o critério específico descrito por Freitas (2011), no qual se considera que cada uma das duas famílias de juntas que compõem a cunha se comporta, do ponto de vista cinemático, como uma ruptura planar. Dessa forma, o índice SMR foi calculado individualmente para cada uma dessas duas famílias.

Assim, foram analisadas as duas faces do talude, cada uma com orientação distinta e submetida a um mecanismo diferente de instabilidade, o que exigiu o cálculo individualizado do SMR para cada condição. O cálculo foi ajustado utilizando-se o valor do RMR-Básico previamente determinado, em conjunto com os quatro fatores de correção descritos na Seção 3.3.3. Os valores obtidos permitiram classificar a estabilidade de cada face analisada e, quando necessário, indicar as medidas mais adequadas para sua estabilização.

A Tabela 30 apresenta os valores de orientação estrutural (direção e mergulho) das faces analisadas e das principais famílias de descontinuidades identificadas no maciço rochoso. Ressalta-se que, para as famílias com mais de uma descontinuidade, foram utilizados os valores médios de suas orientações. Esses parâmetros constituem a base para a aplicação do método SMR, uma vez que os fatores de correção F_1 , F_2 e F_3 dependem diretamente da relação geométrica entre os planos de descontinuidade e as faces do talude.

Tabela 30 – Orientações estruturais das faces e famílias de descontinuidades do maciço analisado.

Orientação	Face 1			Face 2		
	Face	Família 1	Família 2	Face	Família 1	Família 2
Direção (°)	300	300	54	40	279	195
Mergulho (°)	90	69	89	90	75	71

Fonte: Autor (2025).

Após seguir o procedimento descrito na Seção 3.3.3, foram determinados os fatores de ajuste (F_1 , F_2 , F_3 e F_4) para cada família de descontinuidades e faces do talude. A partir desses valores, juntamente com o RMR básico, calculou-se o SMR correspondente. Os resultados finais encontram-se consolidados na Tabela 31.

Tabela 31 – Resultados do SMR

Fator	Face 1		Face 2	
	Família 1	Família 2	Família 1	Família 2
RMRb	81	81	81	81
F1	1	1	0,15	0,15
F2	1	1	1	1
F3	-60	-50	-60	-60
F4	0	0	0	0
SMR	21	31	72	72
Classe	II	II	V	V

Fonte: Autor (2025).

Com base nos valores obtidos de SMR para as diferentes faces do talude analisado, observou-se que a Face 1, associada a um mecanismo de ruptura planar, apresentou valores de SMR iguais a 21 para a Família 1 e 31 para a Família 2, ambos pertencentes à Classe II, o que caracteriza uma condição instável, com o talude descrito como ruim e uma probabilidade de ruptura de 0,6. O valor mais crítico (SMR = 21) está diretamente relacionado à orientação da Família 1, cujas fraturas possuem direção quase paralela à face do talude, favorecendo o deslizamento ao longo dessas descontinuidades. Diante disso, e conforme recomendações da Tabela 16, indica-se a adoção de concreto projetado, aliado a drenagem superficial para controle de infiltrações, além de ajustes na geometria do talude nos pontos de maior risco. Em trechos mais críticos, pode ser necessária a instalação de reforços adicionais, como pregagens ou ancoragens.

Por outro lado, a Face 2, onde foi identificado um mecanismo de ruptura em cunha, apresentou valores de SMR iguais a 72 para ambas as famílias, sendo enquadrada na Classe V, que representa um talude completamente estável. Nessa condição, o tipo de ruptura é limitado

ao desprendimento pontual de blocos, com probabilidade de ruptura de apenas 0,2. Diante desse cenário, não são requeridas medidas de contenção estruturais, recomendando-se apenas a realização de inspeções de rotina e a remoção localizada de blocos instáveis, caso identificados durante o monitoramento.

6 CONCLUSÃO

A caracterização petrográfica evidenciou que o maciço rochoso em estudo é constituído por gnaiss, apresentando textura bandada bem desenvolvida, com alternância de minerais félsicos e máficos. Esse arranjo indica um material de elevada competência geotécnica, compatível com a aplicação de análises de estabilidade de taludes em rocha sã.

Na caracterização geológica, realizada por meio do método scanline em duas faces aproximadamente ortogonais do talude, foram mapeadas sete descontinuidades na Face 1, distribuídas em três famílias estruturais, e seis descontinuidades na Face 2, também agrupadas em três famílias. As rugosidades variaram entre moderadamente lisa e rugosa, segundo avaliação com o pente de Barton. A maioria das descontinuidades apresentou persistência de até 12 metros; entretanto, destacou-se a família F3, presente em ambas as faces, com persistência superior a 20 metros, atravessando toda a extensão visível do maciço.

A análise das projeções estereográficas demonstrou que, na Face 1, a família F1 encontra-se paralela à orientação do talude, favorecendo a ocorrência de rupturas planares. Já na Face 2, as famílias F1 e F2 apresentam linha de interseção com inclinação semelhante à da face do talude, favorecendo a formação de rupturas em cunha.

No que se refere à caracterização geomecânica, os ensaios com o Martelo de Schmidt resultaram em valores de resistência à compressão uniaxial majoritariamente superiores a 80 MPa, confirmando a boa qualidade do material rochoso. Considerando a impossibilidade de obtenção de testemunhos para ensaios laboratoriais, adotou-se o índice de junta volumétrica (JV), cujo valor de 5,262 possibilitou estimar o índice de qualidade da rocha (RQD), que foi de 97,63. Esse resultado classifica o maciço na Classe 5, correspondente a rocha de muito boa qualidade. De forma complementar, o índice de classificação geomecânica RMR-básico apresentou valor de 81, enquadrando o maciço na Classe I, o que reforça sua caracterização como geotecnicamente muito competente.

A avaliação do índice SMR, aplicado especificamente para análise da estabilidade de taludes, indicou condições distintas entre as faces estudadas. Para a Face 1, as famílias 1 e 2 resultaram em valores de 21 e 31, respectivamente, ambas enquadradas na Classe II, que indica condição de instabilidade. Esse resultado é justificado pela orientação da família 1, cujas fraturas são paralelas à face do talude, favorecendo o deslizamento ao longo dessas descontinuidades. Em contrapartida, as famílias 1 e 2 da Face 2 apresentaram SMR igual a 72, correspondente à Classe V, que representa condição de estabilidade muito boa, com possibilidade apenas de

desprendimentos pontuais de blocos.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que o maciço apresenta boa qualidade geotécnica. Apesar da classificação favorável da Face 2, recomenda-se atenção especial à Face 1, onde os valores de SMR indicam necessidade de medidas preventivas adicionais, por conta da relação entre as orientações das fraturas e a face do talude. Para a Face 1, portanto, recomenda-se a aplicação de concreto projetado, em conjunto com sistemas de drenagem superficial, visando ao controle de infiltrações. Adicionalmente, ajustes na geometria do talude devem ser realizados nos pontos considerados críticos, com risco potencial elevado. Nos casos em que tais medidas se mostrarem insuficientes, é indicada a implementação de reforços adicionais, como pregagens ou ancoragens. Para a Face 2, não são necessárias medidas estruturais de contenção, sendo recomendada apenas a realização de inspeções rotineiras e a remoção localizada de blocos instáveis, caso sejam identificados durante o processo de monitoramento. Os dados levantados e as análises aplicadas podem servir como base técnica para avaliações similares e para o planejamento de futuras intervenções geotécnicas.

REFERÊNCIAS

- AYDIN, A.; BASU, A. The schmidt hammer in rock material characterization. **Engineering geology**, Elsevier, v. 81, n. 1, p. 1–14, 2005.
- AZEVEDO, I. C. D.; MARQUES, E. A. G. Introdução à mecânica das rochas. **Cadernos Didáticos**, v. 85, 2002.
- BARTON, N. The shear strength of rock and rock joints. In: ELSEVIER. **International Journal of rock mechanics and mining sciences & Geomechanics abstracts**. [S.l.], 1976. v. 13, n. 9, p. 255–279.
- BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1989.
- BRADY, B. H.; BROWN, E. T. **Rock mechanics: for underground mining**. [S.l.]: Springer science & business media, 2006.
- DEERE, D. U.; HENDRON, A.; PATTON, F.; CORDING, E. Design of surface and near-surface construction in rock. In: ARMA. **ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium**. [S.l.], 1966. p. ARMA–66.
- FARIAS, J. G. Caracterização geomecânica de maciço rochoso em uma mineração artesanal paralisada no município de tauá-ce. 2021.
- FIORI, A. P. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2016.
- FONTINHAS, A. M. P. **Aplicação do SMR na avaliação da estabilidade de taludes de escavação em grauvaques da Formação de Mértola**. Tese (Doutorado) — Dissertação de Mestrado em Engenharia Geológica (Geotecnia). FCT-UNL, Monte . . . , 2012.
- FREITAS, S. B. N. **Caracterização geomecânica e classificações RMR (Bieniawsky) e SMR (Romana) de maciços rochosos em taludes do Funchal**. Dissertação (Mestrado) — Universidade da Madeira (Portugal), 2011.
- GOODMAN, R. E. Toppling of rock slopes. In: AMER. SOC. CIVIL ENG. **Proc. Specialty Conf. on Rock Engineering for Foundations and Slopes**. [S.l.], 1976. v. 2, p. 201–234.
- HOEK, E. Rock slope engineering. **The Institution of Mining and Metallurgy**, v. 402, 1981.
- HOEK, E. Practical rock engineering: Rocscience. Available from the publisher at <http://www.rocscience.com/hoek/PracticalRockEngineering.asp>, 2007.
- HUDSON, J. **Rock mechanics principles in engineering practice**. [S.l.]: CIRIA, 1989.
- ISMR. **Suggested Methods for Characterizing Swalling Rock**. Lisboa, Portugal: International Society for Rock Mechanics, 1983. ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing, and Monitoring.
- ISRM. **Basic Geotechnical Description of Rock Masses**. Lisbon, Portugal: International Society for Rock Mechanics, 1980.
- KLICHE, C. A. Rock slope stability. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Littleton, CO (US), 1999.

MAGALHÃES, F. S.; CELLA, P. Estruturas dos maciços rochosos. **Oliveira, AMS & Brito, SNA. Geologia de Engenharia**, cap. v. 3, p. 39–55, 1998.

MAIA, A. F. d. C. Avaliação da estabilidade dos taludes de rocha do corte ferroviário situado no centro da cidade de crateús/ce pelos métodos rmr, q-barton e smr. 2021.

PALMSTROM, A. The volumetric joint count—a useful and simple measure of the degree of rock mass jointing. In: **International Association of Engineering Geology. International congress. 4.** [S.l.: s.n.], 1982. p. 221–228.

PALMSTROM, A.; BROCH, E. Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the q-system. **Tunnelling and underground space technology**, Elsevier, v. 21, n. 6, p. 575–593, 2006.

PAN, X.; HUDSON, J. A simplified three dimensional hoek-brown yield criterion. In: **ISRM. ISRM International Symposium.** [S.l.], 1988. p. ISRM–IS.

PINO, D. Structural hydrogeology of the kénogami uplands. **Sciences Appliquées, Université du Québec à Chicoutimi, Dissertação de Mestrado**, 2012.

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

PNPIE. **Plataforma Nacional de Infraestrutura de Pesquisa - Esclerômetro.** 2025. Acesso em: 14 fev. 2025. Disponível em: <<https://pnpie.mcti.gov.br/equipment/2499>>.

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

ROMANA, M.; SERÓN, J. B.; MONTALAR, E. Smr geomechanics classification: application, experience and validation. In: **ISRM. ISRM Congress.** [S.l.], 2003. p. ISRM–10CONGRESS.

ROMANA, M.; TOMÁS, R.; SERON, J. B. Slope mass rating (smr) geomechanics classification: thirty years review. In: **ISRM. ISRM Congress.** [S.l.], 2015. p. ISRM–13CONGRESS.

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

SILVA, D. J. d. Mapeamento estrutural e análise de estabilidade de taludes de um corte de estrada no município de boa viagem-ce. 2022.

SINGH, B. **Rock Mass Classification—A Practical Approach in Civil Engineering.** [S.l.]: Elsvier, 1999. v. 293.

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

SOARES, J. P. G. Caracterização geomecânica de um maciço rochoso em corte de estrada no município de boa viagem-ce. 2022.

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

WYLLIE, D. C.; MAH, C. **Rock Slope Engineering: Fourth Edition**. 4. ed. [S.l.]: CRC Press, 2004.

APÊNDICE A – IMAGENS DE CAMPO

Figura 30 – Face 1 do maciço analisado



Fonte: Autor (2025).

Figura 31 – Face 2 do maciço analisado



Fonte: Autor (2025).