

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA – IG

OLAVO RIBEIRO AMORIN

**ASPECTOS GEOLÓGICOS-GEOTÉCNICOS E ANÁLISE CINEMÁTICA
DA CACHOEIRA DO SANTUÁRIO: IMPLICAÇÕES PARA O ECOTURISMO
EM COROMANDEL, MINAS GERAIS**

Monte Carmelo - MG

Outubro - 2024

OLAVO RIBEIRO AMORIN

**ASPECTOS GEOLÓGICOS-GEOTÉCNICOS E ANÁLISE CINEMÁTICA
DA CACHOEIRA DO SANTUÁRIO: IMPLICAÇÕES PARA O ECOTURISMO EM
COROMANDEL, MINAS GERAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso II
apresentado ao Curso de Geologia do
Instituto de Geografia da Universidade
Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos necessários à obtenção do título de
bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Alessandretti

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em especial meus pais, Edison Amorin e Marli da Silva Ribeiro Amorin, e também a minha irmã, Gabriela Ribeiro Amorin, por me fornecerem suporte em todo caminho acadêmico.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Luciano Alessandretti pelo auxílio e colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos colegas Samuel Fonseca Oliveira e Gustavo Henrique Nielsen pela ajuda durante o trabalho de campo. Foram de total importância para coleta de dados e entendimento da área de estudo.

RESUMO

A cidade de Coromandel, localizada na Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, possui uma série de atrativos naturais que recebem visitantes ao longo de todo o ano. Os locais de visitação incluem cavernas, corredeiras, rios e cachoeiras, que ainda carecem de estudos geológico-geotécnicos com vistas a subsidiar o turismo de maneira segura. O presente trabalho de conclusão de curso apresenta uma avaliação geológica-geotécnica da Cachoeira do Santuário, um dos principais atrativos turísticos do município, com vistas a identificar se há potenciais riscos geológicos que possam colocar a vida ou a saúde dos visitantes em risco. O maciço rochoso que faz parte da cachoeira é formado exclusivamente por quartzitos com diferentes graus de resistência e alteração intempérica. Os quartzitos possuem foliação metamórfica incipiente e os planos de suas camadas apresentam atitude 240/30 (rumo do mergulho/mergulho). O talude da cachoeira está voltado para WSW (250) e possui mergulho médio de 75°. Foram identificadas quatro famílias de descontinuidades, a saber: Família 1, com orientação ENE-WSW e planos mergulhando para SSE (150°) variando entre 56° e 80°; Família 2, com orientação NW-SE e planos mergulhando para SW (230°) com mergulhos entre 62° e 83°; Família 3, com descontinuidades orientadas ao longo da direção NE-SW e planos que mergulham para NW (300°) com mergulhos variando entre 65° e 79°; e Família 4, com orientação preferencial NW-SE com planos mergulhando entre 58° e 72° para SW (28°). A Família 4 possui também descontinuidades com orientação NE-SW em menor quantidade, fazendo com que os planos mergulhem para SE. Conforme os índices RDQ (*Rock Quality Designation*) e RMR (*Rock Mass Rating*), o maciço rochoso da Cachoeira do Santuário é classificado como “Razoável”. A análise cinemática das descontinuidades com base em estereogramas estruturais indicou possibilidades de rupturas dos tipos planar (22,2%) para a Família 2, tombamento (25%) para a Família 1 e em cunha (20%) para as interseções entre as descontinuidades das famílias 1 e 3 e famílias 2 e 3. Em períodos de pluviosidade intensa no Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba entre os meses de outubro a março podem contribuir com condições de maior instabilidade do talude e, portanto, favorecer movimentos de massa gravitacionais. Nesse sentido, e com base na avaliação geológico-geotécnica apresentada, recomenda-se a implementação de duas medidas simples visando minorar potenciais situações de risco geológico: 1) a instalação de placas sinalizadoras informando da possibilidade de queda de blocos de rocha na base e nas laterais da cachoeira; e 2) que a visitação à Cachoeira do Santuário seja realizada preferencialmente na época da estiagem, entre os meses de abril e setembro.

Palavras-chave: Cachoeira; Riscos geológicos; Análise geológico-geotécnica; Análise cinemática; Turismo.

ABSTRACT

Coromandel, situated in the Mesorregion of Triângulo Mineiro and Alto Paranaíba, boasts a variety of natural attractions that draw visitors year-round. These sites include caves, rapids, rivers, and waterfalls, but they currently lack comprehensive geological and geotechnical evaluations. To address this gap, this undergraduate final project presents a geotechnical study of the Santuário Waterfall, aiming to support safe tourism. The rock massif constituting the waterfall is composed entirely of quartzite, exhibiting varying degrees of resistance and weathering. The quartzite shows incipient metamorphic foliation, with planes oriented at 240/30 (dip/dip direction). The waterfall's slope faces WSW (250°) and has an average inclination of 75°. Four families of discontinuities were identified: Family 1, oriented ENE-WSW, with planes dipping to the SSE (150°) at angles between 56° and 80°; Family 2, oriented NW-SE, with planes dipping to the SW (230°) at angles between 62° and 83°; Family 3, with discontinuities oriented NE-SW, and planes dipping to the NW (300°) at angles between 65° and 79°; and Family 4, predominantly oriented NW-SE, with planes dipping to the SW (28°) at angles between 58° and 72°. This family also contains smaller quantities of discontinuities oriented along the NE-SW direction, with planes dipping to the SE. According to the RDQ (Rock Quality Designation) and RMR (Rock Mass Rating) indices, the rock massif at the Santuário Waterfall is classified as “Reasonable”. The kinematic analysis of the discontinuities based on structural stereograms indicated the possibility of planar ruptures (22.2%) for Family 2, toppling ruptures (25%) for Family 1, and wedge failures (20%) for the intersections between the discontinuities of families 1 and 3 and families 2 and 3. The calculated safety factor, with a value of 2.8, indicates that the massif is stable concerning different types of ruptures. However, periods of intense rainfall in the Triângulo Mineiro and Alto Paranaíba between October and March can contribute to conditions of greater slope instability and, therefore, favor gravitational mass movements. In this sense, and based on the geological-geotechnical evaluation presented, it is recommended that two simple measures be implemented to reduce potential geological risk situations: 1) the installation of signage informing of the possibility of falling rocks at the base and sides of the waterfall and 2) that visits to the Santuário Waterfall should preferably be made during the dry season, between April and September.

Keywords: Waterfall; Geological-geotechnical characterization; kinematic analysis; Tourism.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cachoeira do Santuário.....	9
Figura 2: Localização da Cachoeira Santuário na região sudeste do município de Coromandel na Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba em Minas Gerais.....	10
Figura 3: Vias de acesso à Cachoeira do Santuário desde Coromandel.	11
Figura 4: Exemplo de maciço rochoso no Kurdistão, com destaque para o acamamento da rocha sedimentar, blocos de rocha intacta, falha suvertical e duas famílias de descontinuidades (FD 1 e FD 2).....	14
Figura 5: Ilustração esquemática mostrando um plano de um maciço rochoso hipotético, bem como a linha de varredura, descontinuidades, espaçamento entre descontinuidades, persistência de descontinuidades e interseção entre a linha de varredura e descontinuidades.....	14
Figura 6: Atitudes de um plano, com sua direção (strike), mergulho (dip) e rumo do mergulho (dip Direction).	15
Figura 7: (A) Maciço rochoso granítico com descontinuidades (fraturas) apresentando espaçamentos próximos, entre 6 e 20 cm. (B) Fotointerpretação de (A), destacando três famílias de descontinuidades (F1, F2 e F3).....	15
Figura 8: Bloco-diagrama ilustrando descontinuidades persistentes e descontinuidades não-persistentes.	16
Figura 9: Tipos de rugosidade presentes nos planos das descontinuidades.....	17
Figura 10: Tipos de abertura	18
Figura 11: Maciço rochoso com descontinuidades persistentes e preenchidas.....	19
Figura 12: Esquema de ruptura do tipo planar	24
Figura 13: Esquema para rupturas por tombamento.....	25
Figura 14: Esquema para ruptura em cunha.....	26
Figura 15: Visada para oeste do maciço rochoso quartzítico aflorante no topo da Cachoeira do Santuário.	27
Figura 16: Mapa geológico simplificado do Distrito Pântano de Santa Cruz na porção leste de Coromandel e localização da Cachoeira do Santuário.....	28
Figura 17: Estereogramas estruturais evidenciando descontinuidades. (A) Talude e Família 1; (B)	

Talude e Família 2; (C) Talude e Família 3; (D) Talude e Família 4; (E) Talude e Foliação Metamórfica	29
Figura 18: Preenchimento de descontinuidades por vegetação e clastos.	30
Figura 19: Valores médios para espaçamentos, persistências e aberturas das famílias de descontinuidades F1, F2, F3 e F4.....	31
Figura 20: Análise cinemática para ruptura planar das famílias de descontinuidades 1, 2, 3 e 4 e da foliação metamórfica do maciço rochoso aflorante no topo da Cachoeira do Santuário.....	35
Figura 21: Análise cinemática para tombamento das famílias de descontinuidades 1, 2, 3 e 4 e da foliação metamórfica do maciço rochoso aflorante no topo da Cachoeira do Santuário.....	36
Figura 22: Análise cinemática para rompimento em cunha das famílias de descontinuidades 1, 2, 3 e 4 e da foliação metamórfica do maciço rochoso aflorante no topo da Cachoeira do Santuário.....	37
Figura 23: Estereograma para aquisição dos ângulos e inclinação da ruptura em cunha.....	38
Figura 24: Chuva média mensal e total em Coromandel. Precipitação média (linha contínua) acumulada durante o período contínuo de 31 dias. Os dias 7 de julho e 31 de dezembro correspondem às mínimas e máximas pluviométricas, respectivamente.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Terminologia e intervalos correspondentes ao espaçamento de descontinuidades em maciços rochosos.	16
Tabela 2: Persistência das descontinuidades	17
Tabela 3: Abertura das descontinuidades.....	18
Tabela 4: Grau de fraturamento.....	19
Tabela 5: Classificação de maciços rochosos pelo método RQD	20
Tabela 6: Descrição segundo metodologia RMR.....	22
Tabela 7: Classificação RMR de acordo com os parâmetros vistos em campo.....	23
Tabela 8: Cálculo do RMR com base nos dados coletados em campo.	32
Tabela 9: Classificação Q da Cachoeira do Santuário.....	33

LISTA DE SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

CRD Coeficiente de rugosidade da descontinuidade

GPS *Global Positioning System*

GSI *Geological Strength Index*

IDE Infraestrutura de Dados Espaciais

ISRM *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering*

JRC *Joint Roughness Coefficient*

NASA *National Aeronautics and Space Administration*

NBR Norma Brasileira Regulamentadora

Q *Tunneling Quality Index*

RMR *Rock Mass Rating*

RQD *Rock Quality Designation*

SRF Estado de tensão no maciço

SRTM *Shuttle Radar Topographic Mission*

LISTA DE SÍMBOLOS

J_a	Grau de alteração das descontinuidades
J_n	Número de famílias de descontinuidades
J_r	Índice de rugosidade das descontinuidades
J_v	Índice volumétrico
J_w	Fator de redução de água
σ_1	Tensão principal maior
σ_3	Tensão principal menor
σ_c	Resistência a compressão uniaxial
mb	Constante de Hoek-Brown para maciço rochoso
S	Constante de Hoek-Brown
A	Constante de Hoek-Brown
S_1	Foliação Metamórfica
φ	Ângulo de atrito
Σ	Somatório

LISTA DE ABREVIACÕES

cm	Centímetro
km	Quilômetro
m	Metro
mm	Milímetro
m ³	Metro cúbico
min	Minuto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	7
2. OBJETIVOS	8
3. LOCALIZAÇÃO E ACESSOS À CACHOEIRA SANTUÁRIO	10
4. MATERIAIS E MÉTODOS	11
4.1. Revisão bibliográfica	11
4.2. Geoprocessamento	12
4.3. Trabalho de campo	12
4.4. Tratamento dos dados de campo	12
5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
5.1. Maciços rochosos	13
5.2. Sistemas de classificação	20
5.3. Análise Cinemática	23
5.3.1. Ruptura planar	24
5.3.2 Ruptura por tombamento	24
5.3.3 Ruptura em cunha	25
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
6.1. Caracterização geológica-geotécnica	26
6.2. Análise cinemática	34
6.2.1 Ruptura planar	34
6.2.2 Ruptura por tombamento	34
6.2.3 Ruptura em cunha	34

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	39
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A análise de maciços rochosos em atrativos naturais como cachoeiras é de suma importância e visa a maior segurança dos visitantes que utilizam tais locais como áreas de lazer. Maciços rochosos são definidos como meios descontínuos, formados pelo material rocha e pelas discontinuidades que a atravessam, incorporando também a presença de água e o estado de tensões. O termo descontinuidade é utilizado em geologia de engenharia para todos os tipos de planos – que podem ocorrer em várias escalas (de microfissuras, fissuras, juntas, fraturas e planos de acamamento/foliação até falhas de extensão regional) – resultantes da redução da resistência da rocha à tração e ao cisalhamento (AZEVEDO; MARQUES, 2006). As descontinuidades funcionam, portanto, como superfícies de fraqueza que separam blocos de “rocha intacta” e controlam os processos de deformação e ruptura dos maciços rochosos (DA COSTA, 2007). São também elas que permitem a extração dos materiais rochosos em pedreiras onde, naturalmente, se aproveitam as superfícies de fraqueza para obter o desmonte primário das massas explosivas.

A caracterização e classificação de maciços rochosos possui diversos objetivos, sendo os principais: (i) a identificação dos parâmetros mais significativos que influenciam o comportamento dos maciços; (ii) subdivisão de maciços rochosos em grupos de comportamento similar, ou seja, em classes de maciços de qualidades variadas; (iii) fornecimento de uma base para a compreensão das características de cada classe de maciço rochoso; (iv) comparação de informações sobre as condições de diferentes maciços rochosos; (v) obtenção de dados quantitativos e diretrizes básicas para projetos de engenharia em fase de pré-viabilidade; e (vi) facilitamento da comunicação entre engenheiros e geólogos (BIENIAWSKI, 1989). Ainda, de acordo com Bieniawski (1989), a análise de maciços rochosos impacta em uma melhor caracterização da área de estudo a partir da aferição dos parâmetros mínimos necessários à classificação, o fornecimento de informações quantitativas para fins de projeto e a contribuição para que a comunicação em um projeto seja mais eficiente e a tomada de decisão mais consistente.

O território brasileiro é farto em atrativos turísticos naturais que recebem visitantes ao longo de todo o ano. Porém, são escassas as pesquisas voltadas para o reconhecimento,

identificação e avaliação dos riscos geológicos nesses locais. Recentemente, e devido à queda de um bloco de rocha no lago do Cânion de Furnas em Capitólio-Minas Gerais, que provocou a morte de dez pessoas, motivou ações emergenciais por parte de órgãos públicos, e estudos focados na avaliação de riscos geológicos e hidrológicos passaram a ser desenvolvidos amplamente. O município de Coromandel, localizado na Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, oeste de Minas Gerais, é rico em atrativos naturais como cavernas, rios, corredeiras e cachoeiras, que recebem a visita de turistas ao longo de todo ano. Porém, os atrativos ainda carecem de estudos geológicos-geotécnicos detalhados visando prevenir e mitigar possíveis acidentes envolvendo futuros visitantes. Nesse sentido, o presente trabalho de conclusão de curso utilizou uma abordagem multi-indicadores envolvendo técnicas e métodos em geologia de engenharia com o intuito realizar uma análise geológico-geotécnica na Cachoeira do Santuário (**Figura 1**), um dos principais atrativos turísticos de Coromandel.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho de conclusão de curso foi a avaliação dos riscos e perigos geológicos existentes na Cachoeira do Santuário em Coromandel. A fim de compreender e apontar os possíveis riscos e perigos geológicos presentes, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- Caracterização geológico-geotécnica do maciço rochoso do topo da Cachoeira do Santuário através dos índices *Rock Mass Rating* (RMR), *Rock Quality Drilling* (RQD), *Geological Strenght Index* (GSI) e *Tunnelling Quality Index* (Q);
- Análise cinemática para rupturas dos tipos planar, cunha e tombamento em estereogramas estruturais; e
- Subsidiar os administradores da cachoeira e o poder público municipal com informações técnicas voltadas à prevenção e mitigação de acidentes envolvendo riscos geológicos.

Figura 1: Cachoeira do Santuário.

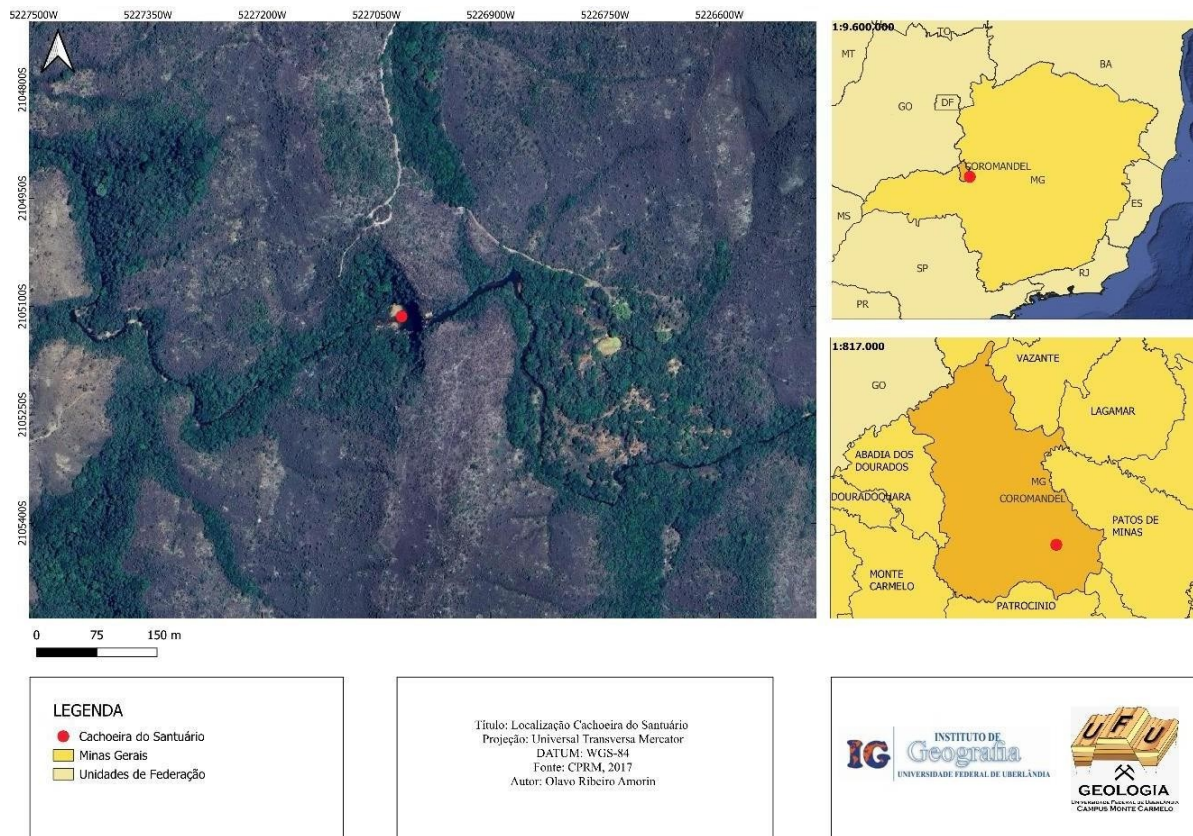


Fonte: Fotografia de Olavo Ribeiro Amorin.

3. LOCALIZAÇÃO E ACESSOS À CACHOEIRA SANTUÁRIO

A Cachoeira do Santuário está localizada no Distrito de Pântano de Santa Cruz, a cerca de 28 km a sudeste de Coromandel. Suas coordenadas geográficas são 18°34'34,89''S e 46°57'17,26''O. O topo da cachoeira ocorre em cota altimétrica de 922 metros. Desde o centro de Coromandel existem duas rotas para se chegar à Cachoeira do Santuário. A primeira opção é trafegar cerca de 27 km sentido leste pela Rodovia Gustavo Capanema (BR-352). Após, segue-se por estrada de terra, sentido sul, por aproximadamente 20 km até o portão de acesso à cachoeira. A distância total é de 46,5 km. A segunda opção é percorrer a Rodovia MG-188 sentido sudeste (Patrocínio-MG) por cerca de 38 km. Em seguida, percorre-se sentido nordeste, em estrada de terra, cerca de 28,6 km. A distância total a ser percorrida é de 66,6 km. Ambos os trajetos possuem duração de viagem aproximada de 1h10min (**Figura 3**).

Figura 2: Localização da Cachoeira Santuário na região sudeste do município de Coromandel na Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba em Minas Gerais.



Fonte: O Autor.

Figura 3: Vias de acesso à Cachoeira do Santuário desde Coromandel.



Fonte: Modificado de *Google Maps*. Acesso em 03 de maio de 2024.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos que foram utilizados para o desenvolvimento do presente projeto buscaram viabilizar a análise geológica-geotécnica da Cachoeira do Santuário, localizada no Distrito de Pântano de Santa Cruz em Coromandel. Desse modo, o trabalho foi pautado nas seguintes metodologias:

4.1. Revisão bibliográfica

A pesquisa bibliográfica compreendeu o levantamento da literatura referente aos temas de interesse e sua leitura crítica ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho. Nesse sentido, foi dada atenção especial à livros, dissertações, teses e artigos científicos focados em análises geológico-geotécnicas e cinemática de maciços rochosos.

4.2. Geoprocessamento

Foi confeccionado um banco de dados georreferenciados no *software* QGIS, versão 3.30.2, buscando, de início, subsidiar informações sobre a região de estudo, tratando dados de relevo, altimetria, geomorfologia e geologia. As imagens de satélite (LANDSAT 8) foram obtidas gratuitamente no sítio eletrônico <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Os *shapefiles* de hidrografia, sistemas de transporte, localidades e limites geográficos foram obtidos no *site* da Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas Gerais (IDE-Sisema) (<https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>). Foi elaborado um Modelo Digital de Terreno da área a ser estudada a partir da base de dados da missão espacial SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) da Agência Espacial Norte-americana (NASA), disponibilizado no *site* <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Essa base de dados foi utilizada para a etapa de fotointerpretação de lineamentos estruturais em escala 1:150.000.

4.3. Trabalho de campo

A etapa de trabalho de campo ocorreu entre os dias 11 e 12 de março de 2024 e consistiu na descrição litológica, verificando composição mineralógica, grau de alteração, textura e estrutura, assim como a obtenção de dados espaciais e descritivos das discontinuidades presentes no maciço rochoso que aflora no topo da Cachoeira do Santuário. Os parâmetros tratados em campo foram: orientação espaçamento, persistência, rugosidade, abertura, preenchimento e percolação das discontinuidades. Durante as atividades foram utilizados os seguintes equipamentos: martelo de geólogo, lupa de bolso, escalímetro, trena, sistema de posicionamento global (GPS), prancheta e bússola geológica.

4.4. Tratamento dos dados de campo

Os dados referentes às diferentes feições das discontinuidades obtidos durante as atividades de campo foram compilados em tabelas *Excel*. Depois, e com base nos dados das discontinuidades, foram calculados os índices *Rock Mass Rating* (RMR), *Rock Quality Drilling* (RQD), *Geological Strength Index* (GSI) e *Tunnelling Quality Index* (Q) e realizada a análise

geológico-geotécnica. Através de diagramas estruturais confeccionados com os dados das descontinuidades e orientação do talude (cachoeira), foi realizada a análise cinemática e probabilidades de rupturas dos tipos planar, em cunha e de tombamento. Essa etapa foi realizada por meio do *software* gratuito Stereonet (disponível em: <https://www.rickallmendinger.net/stereonet>).

5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

5.1. Maciços rochosos

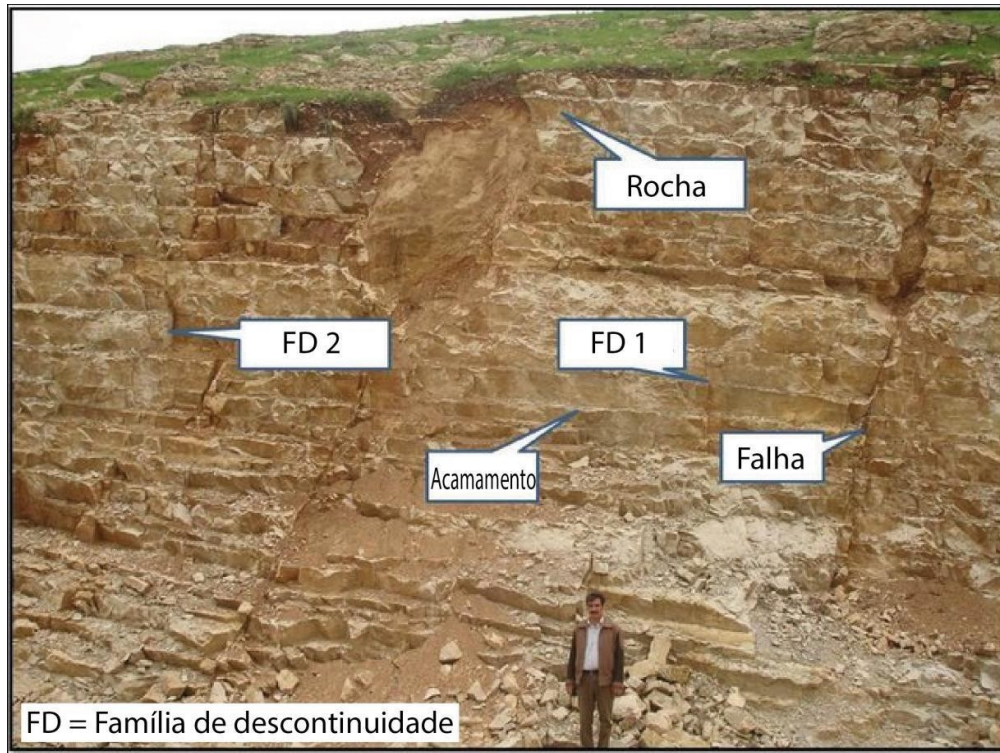
O desenvolvimento de um estudo efetivo sobre maciços rochosos em cachoeiras necessita de um discernimento prévio entre rocha e maciço rochoso. Rocha pode ser definido como um agregado natural de minerais, que ocorreram por meio de procedimentos geológicos sob a determinação de temperatura e pressão (MESQUITA, 2008). Também podem ser compreendidas como materiais sólidos consolidados que compõem o maciço rochoso (AZEVEDO; MARQUES, 2002).

Em contraponto, em relação aos maciços rochosos, adere-se como uma rocha delimitada por descontinuidades, essas podendo ser falhas, juntas ou até mesmo foliações metamórficas. A presença de água maximiza os processos de intemperismo desses maciços, modificando sua forma física e o estado de tensões (SANCHEZ, 2023).

A análise de maciços rochosos envolve a aplicação de diferentes metodologias e a descrição de uma série de parâmetros (ISRM, 1978). Esses estão apresentados abaixo de maneira simplificada:

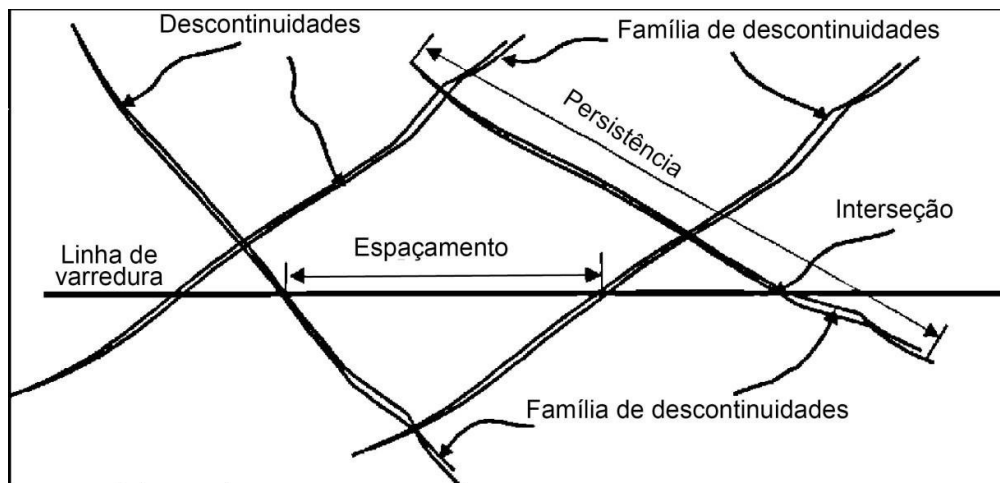
- Variedades litológicas: previamente a análise geotécnica propriamente dita, os diferentes litotipos que constituem o maciço rochoso são descritos com base em suas características mineralógicas, estruturais e texturais. Recomenda-se também que sejam avaliados os diferentes graus de alteração das rochas;
- Linha de varredura ou scanline: consiste na anotação do espaçamento entre descontinuidades ao longo de uma linha pré-definida (**Figura 5**);

Figura 4: Exemplo de maciço rochoso no Kurdistan, com destaque para o acamamento da rocha sedimentar, blocos de rocha intacta, falha suvertical e duas famílias de descontinuidades (FD 1 e FD 2).



Fonte: Retirado de Alshkane (2015).

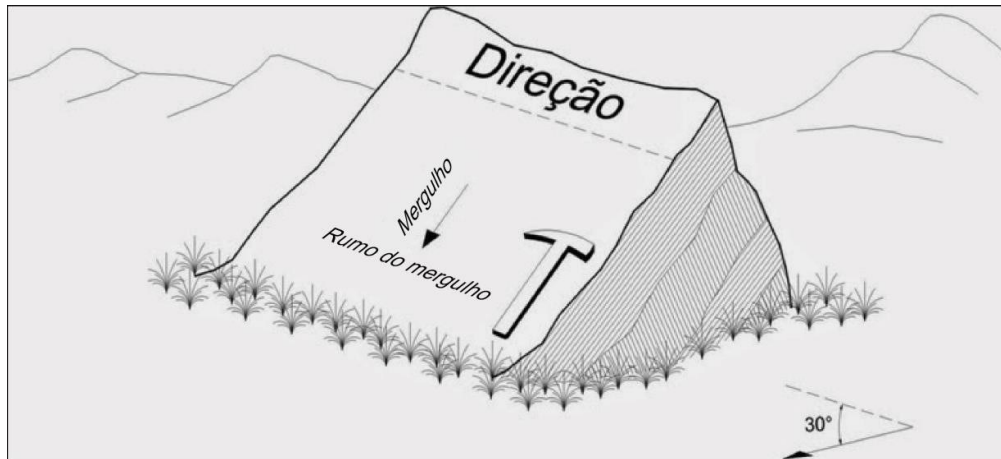
Figura 5: Ilustração esquemática mostrando um plano de um maciço rochoso hipotético, bem como a linha de varredura, descontinuidades, espaçamento entre descontinuidades, persistência de descontinuidades e interseção entre a linha de varredura e descontinuidades.



Fonte: Retirado e modificado de Lu, Ping (1997)

- Orientação das discontinuidades: as discontinuidades constituem planos, e suas atitudes (orientações) são obtidas através da medição do rumo do mergulho e mergulho do plano (**Figura 6**).

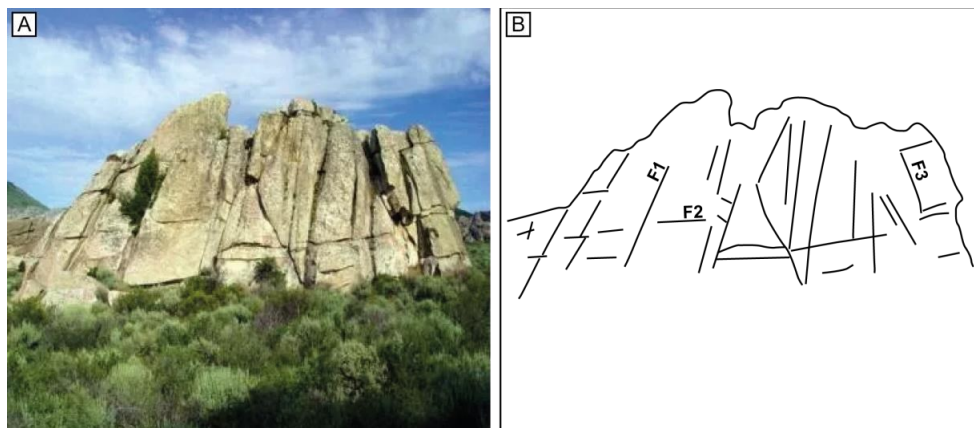
Figura 6: Atitudes de um plano, com sua direção (strike), mergulho (dip) e rumo do mergulho (dip Direction).



Fonte: Retirado e modificado de <http://professormarciosantos4.blogspot.com/2014/06/a-secao-geologica.html>.

- Espaçamento ou frequência das discontinuidades: corresponde ao intervalo entre duas discontinuidades que são adjacentes e pertencentes à mesma família. (**Figura 7 e Tabela 1**);

Figura 7: (A) Maciço rochoso granítico com discontinuidades (fraturas) apresentando espaçamentos próximos, entre 6 e 20 cm. (B) Fotointerpretação de (A), destacando três famílias de discontinuidades (F1, F2 e F3)



Fonte: (A) Retirado de <https://home.nps.gov/ciro/learn/nature/geological-features.htm>. (B) O Autor.

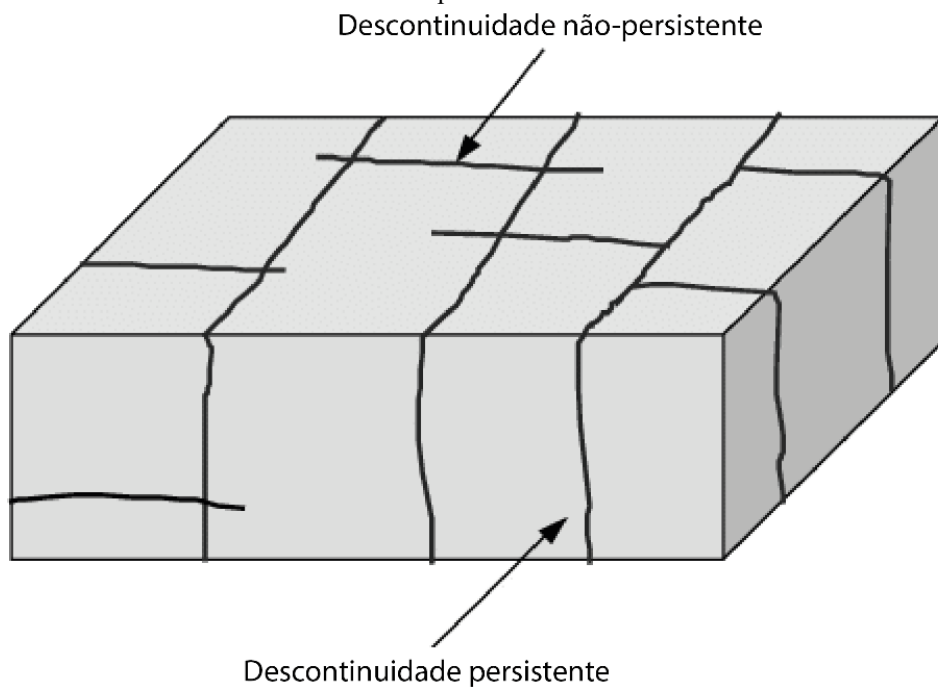
Tabela 1: Terminologia e intervalos correspondentes ao espaçamento de descontinuidades em maciços rochosos.

Descrição	Espaçamento (milímetros)
Extremamente próximas	< 20
Muito próximas	20 – 60
Próximas	60 – 200
Moderadamente espaçadas	200 – 600
Muito espaçadas	600 – 6000
Extremamente espaçadas	> 6000

Fonte: Retirado de ISRM (1978).

- Persistência ou extensão: comprimento do traço de uma descontinuidade contida em um plano. A persistência das descontinuidades pode ser dos tipos persistente e não-persistente (**Figura 8 e Tabela 2**);

Figura 8: Bloco-diagrama ilustrando descontinuidades persistentes e descontinuidades não-persistentes.



Fonte: <https://theconstructor.org/geotechnical/scan-line-survey/45651/>.

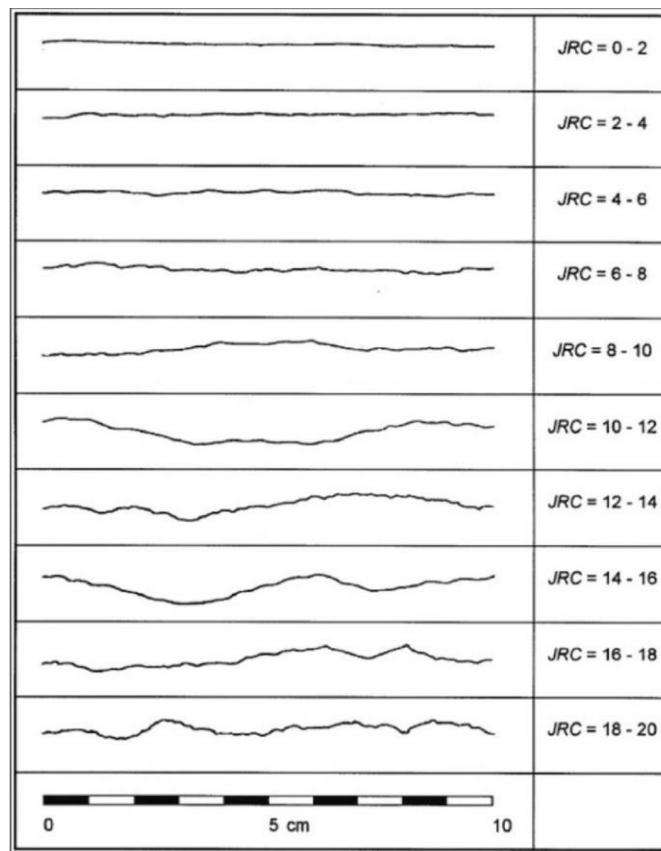
Tabela 2: Persistência das descontinuidades

Descrição	Persistência (metros)
Muito baixa	< 1
Baixa	1 – 3
Média	3 – 10
Alta	10 – 20
Muito alta	> 20

Fonte: Retirado de ISRM (1978).

- **Rugosidade:** Presença de irregularidades no relevo dos planos das descontinuidades, atuando em melhor resistência ou baixa resistência ao cisalhamento. Podem ser tratadas também como ondulações. Coeficiente de rugosidade da descontinuidade (CRD) (*Joint Roughness Coefficient = JRC*);

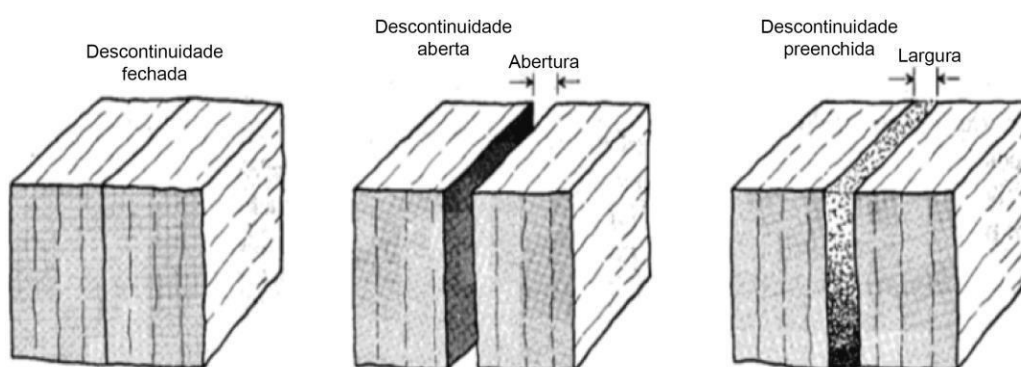
Figura 9: Tipos de rugosidade presentes nos planos das descontinuidades



Fonte: Retirado de Barton e Choubey (1977).

- Resistência das paredes: Resistência à compressão das paredes das descontinuidades. Geralmente possui resistência inferior a rocha sã devido às alterações impostas por agentes erosivos;
- Abertura: É a medida perpendicular entre duas paredes paralelas de uma descontinuidade específica que pode ter um preenchimento temporário ou não de água ou ar, assim como o preenchimento mineral permanente (**Figura 10 e Tabela 3**);

Figura 10: Tipos de abertura



Fonte: <https://theconstructor.org/geotechnical/scan-line-survey/45651/>.

Tabela 3: Abertura das descontinuidades.

Descrição	Abertura (milímetros)
Muito fechada	< 0,1
Fechada	0,1 – 0,25
Parcialmente fechada	0,25 – 0,5
Abertas	0,5 – 2,5
Cavernosas	> 1

Fonte: Retirado de ISRM (1978).

- Preenchimento: Elemento ou conjunto de elementos presente entre as paredes da descontinuidade. Pode ter composição mais frágil que a rocha originária. Deriva do transporte de água e ar;

Figura 11: Maciço rochoso com descontinuidades persistentes e preenchidas.



Fonte: <https://theconstructor.org/geotechnical/scan-line-survey/45651/>.

- Percolação: Possibilidade da presença do fluxo de água evidenciados pelo crescimento de vegetação interior a descontinuidade ou no maciço por um todo;
- Grau de fraturamento: Quantidade de fraturas no maciço por metro linear do maciço rochoso. A partir disso, classificá-lo de acordo com a sigla (**Tabela 4**).

Tabela 4: Grau de fraturamento.

Siglas	Nº de fraturas por metro	Denominação
F1	< 1	Ocasionalmente fraturado
F2	1 – 5	Pouco fraturado
F3	6 – 10	Medianamente fraturado
F4	11 – 20	Muito fraturado
F5	> 20	Extremamente fraturado

Fonte: Guidicini *et al.* (1972) *apud* Silva (2013).

Os parâmetros citados auxiliam em metodologias como *RQD* e *RMR* para que seja feita uma caracterização dos maciços rochosos de maneira aprofundada e confiável, classificando-os.

5.2. Sistemas de classificação

Os sistemas de classificação de maciços rochosos vêm sendo sistematizados desde a segunda metade dos anos 1940 a partir da proposição do método *Rock Load Classification* (TERZAGHI, 1946). Esses primeiros estudos foram inicialmente aplicados à construção de túneis sustentados por suportes de aço e visavam cálculos de padrões de carregamento através de uma classificação descritiva. A partir da necessidade da aplicação dessa metodologia pioneira em outras situações envolvendo geologia de engenharia, novos métodos passaram a ser difundidos. Entre eles, os mais conhecidos e utilizados atualmente são o *Rock Mass Rating* (RMR) (BIENIAWSKI, 1973), o *Rock Quality Designation* (RQD) (DEERE, 1963), o *Geological Strength Index* (GSI) (HOEK *et al.*, 1994) e o *Tunneling Quality Index* (Sistema Q) (BARTON *et al.*, 1974).

-RQD: Deere (1963) apresentou tal método a fim de quantificar a classificação dos maciços rochosos, descrevendo qualidade dos testemunhos de sondagem, de início. O método leva em consideração partes de testemunhos que possuem mais de 10 cm de comprimento. Para chegar a um resultado final, o somatório das partes (acima de 10 cm), é dividida pelo tamanho total, gerando um valor RQD, designando a uma classe intervalada por valores, assim como exemplifica a equação e a tabela abaixo:

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

A classificação estabelecida por Deere (1989) é dada pela **Tabela 5**:

Tabela 5: Classificação de maciços rochosos pelo método RQD.

Valor do RQD (%)	Qualidade do maciço
90-100	Excelente
75-90	Bom
50-75	Razoável
25-50	Fraco
0-25	Muito fraco

Fonte: Adaptado de Deere (1989).

No estudo sobre maciços rochosos, alguns trabalhos são feitos em sondagens, outros, referem-se a análise dos maciços nos afloramentos, ou seja, nas rochas em que já se encontram superficialmente. Esse é um exemplo dos estudos em cachoeiras, como na Cachoeira Santuário, na cidade de Coromandel/MG. Autores como Palmstrom (1982), elaborou formas diferentes para a análise RQD, onde propôs classificar um valor de qualidade das rochas de estudo por meio da quantidade de descontinuidades presentes nos maciços por unidade de volume.

$$RQD = 115 - 3,3 Jv$$

Jv é o parâmetro que indica o índice volumétrico, ou seja, é o número de descontinuidades por unidade de comprimento num volume de 1 m³.

O desenvolvimento de novos estudos com métodos mais eficientes fez que autores como Bieniawski (1989) sintetizasse alguns parâmetros analíticos e, a partir disso, propor um novo método denominado “Rock Mass Rating” ou RMR. Tratando de uma maneira mais simples e abrangente, o resultado final, ao comparativo com métodos anteriores, é mais confiável, levando em consideração a quantidade de parâmetros para análise. São: Resistência a compressão uniaxial da rocha; Espaçamento entre as descontinuidades da rocha; Condição das descontinuidades; Condição da percolação de água; Orientação das descontinuidades; RQD.

Os parâmetros constatados têm, individualmente, um peso referente de acordo com sua importância e, de acordo com Bieniawski (1989), são estes que determinam o comportamento e estado dos maciços rochosos aflorantes. O resultado é dado por um somatório, tendo a condição das descontinuidades o único parâmetro sem ser quantitativo, somente de ajuste. Segue a equação devida ao parâmetro:

$$RMR = \Sigma (\text{pesos atribuídos a cada parâmetro}) + \text{ajuste da orientação das descontinuidades}$$

Os parâmetros da análise RMR são determinados em medidas retiradas em campo, tendo,

no total, 6 (seis) diferentes tratativas. Na **Tabela 6** a seguir, esta proposta por Bieniawski (1989), os parâmetros estão agrupados em faixas de valores, tendo os 5 primeiros como quantitativos e somente a orientação das descontinuidades como fator qualitativo. Após o enquadramento em cada parâmetro, a área de estudo assume uma das cinco classes de maciços, tendo os maciços Classe I como o mais estáveis e os maciços Classe V menos estáveis. O valor RMR é classificado de 0-100.

Tabela 6: Descrição segundo metodologia RMR

Parâmetros		Valores						
Resistência da rocha intacta	Compressão Puntiforme	>10	4-10	2-4	1-2			
	Compressão Uniaxial	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	< 1
Pesos		15	12	7	4	2	1	0
RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	< 25		
Pesos		20	17	13	8	3		
Espaçamento das Descontinuidades (cm)		>200	200-60	60-20	20-6	< 6		
Pesos		20	15	10	8	5		
Condição das descontinuidades		Superfícies muito rugosas, não-contínua e sem separação, parede da rocha não alterada	Superfícies pouco rugosas, separação <1mm, parede da rocha pouco alterada	Superfícies pouco rugosas, separação <1mm, paredes da rocha muito alterada	Superfícies estriadas ou polida com enchimento <5mm ou separação de 1-5 mm (contínua)	Enchimento mole com espessura >5mm ou separação de 1-5mm (contínua)		
Pesos		30	25	20	10	0		
Água subterrânea	Pressão de água na junta/ σ principal maior	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	>0,5		
	Condições gerais	Completamente seco	Úmido	Molhado	Gotejando	Com fluxo		
Pesos		15	10	7	4	0		

Orientação das Descontinuidades e Mergulho				
	Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável
Pesos	0	-5	-25	-50

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

Após a classificação quantitativa dos maciços estudados, insere-se o valor na **Tabela 7** para que haja uma definição geral da área.

Tabela 7: Classificação RMR de acordo com os parâmetros vistos em campo.

Classe	Valor do RMR	Descrição
I	81-100	Maciço muito bom
II	61-80	Maciço bom
III	41-60	Maciço médio
IV	21-40	Maciço fraco
V	< 21	Maciço muito fraco

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

5.3. Análise Cinemática

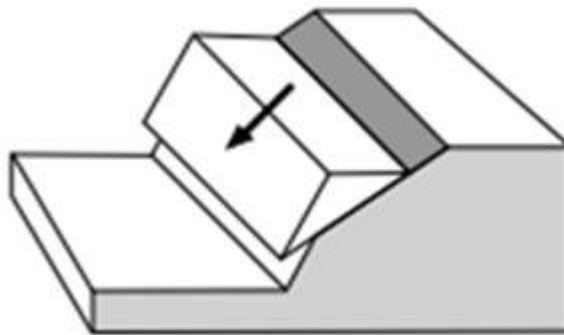
A análise cinemática é desenvolvida para um estudo mais aprofundado sobre estabilidade de taludes. Através do entendimento estrutural dos maciços e encostas, são identificados diferentes riscos, com vistas à evitar riscos geológicos para a população, sendo em atividades para lazer ou trabalho.

O desenvolvimento de estereogramas estruturais evidenciam, em uma análise geral, probabilidades de rupturas planares, rupturas em cunha e rupturas por tombamento dos maciços rochosos. Cada um destes modos de ruptura dependerá da combinação entre a atitude das estruturas geológicas presentes, a geometria do corte e o ângulo de atrito dos planos de descontinuidade. Para se avaliar se um corte em rocha está sujeito ou não a algum destes modos de ruptura, são usualmente empregues estereogramas estruturais (Fiori et al. 1998).

5.3.1. Ruptura planar

Esse tipo de ruptura ocorre em uma superfície pré-existente. Há a necessidade de uma descontinuidade mergulhando a favor do talude, tendo a mesma direção. Além disso, o ângulo de mergulho do talude precisa ser maior do que da descontinuidade, e esse, por sua vez, maior que o ângulo de atrito interno, causando o deslocamento (Hudson e Harrison et al. 1996). A **Figura 12** representa o exemplo de uma ruptura planar.

Figura 12: Esquema de ruptura do tipo planar

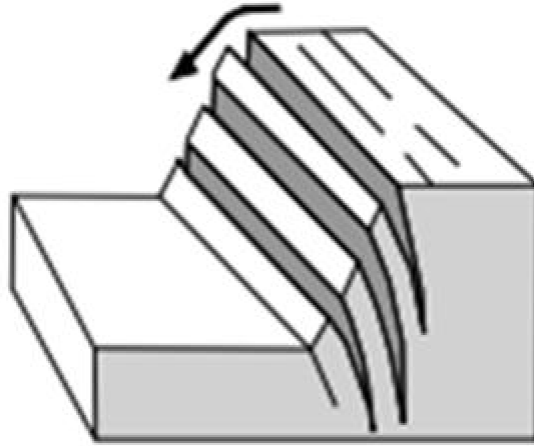


Fonte: Retirado de Wyllie e Mah (2004).

5.3.2 Ruptura por tombamento

Ainda para Hudson e Harrison (1996), para que ocorra uma ruptura por tombamento, tem-se a possibilidade por meio de: (a) uma família de descontinuidades mergulha para dentro do maciço com alto ângulo de mergulho; e (b) a orientação desta família de descontinuidades deve ser subparalela à orientação do talude ($< 10^\circ$). Esse tipo de ruptura pode ocorrer como tombamento flexural, oblíquo e direto.

Figura 13: Esquema para rupturas por tombamento



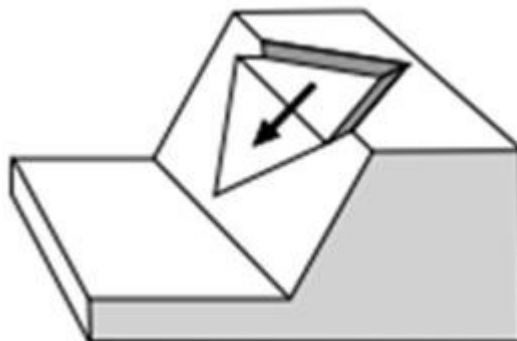
Fonte: Retirado de Wyllie e Mah (2004).

5.3.3 Ruptura em cunha

Para que este tipo de ruptura ocorra, é necessário: (a) A linha de intersecção dos dois planos aflore na superfície do talude com um ângulo de inclinação menor que o ângulo de mergulho do plano de talude e rumo menor ou igual a 20° que o rumo do talude; (b) O ângulo da linha de intersecção também deve ser maior que o ângulo de atrito das discontinuidades.

É uma ocorrência de ruptura típica em maciços rochosos com várias famílias de discontinuidades, onde as atitudes, espaçamentos e persistências do maciço vão determinar a forma e volume da cunha (Hartwig e Pinheiro et al., 2022).

Figura 14: Esquema para ruptura em cunha



Fonte: Retirado de Wyllie e Mah (2004).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Caracterização geológica-geotécnica

O maciço rochoso que aflora no topo da Cachoeira do Santuário é exclusivamente formado por litotipo caracterizado como quartzito. A presença de veios de quartzo preenchendo fraturas é comum (**Figura 15**). A rocha possui coloração esbranquiçada a avermelhada devido a porções com a presença de material ferruginoso, granulação fina a média e grau de intemperismo baixo. Os quartzitos em questão pertencem ao Membro Hidrelétrica da Batalha, Formação Chapada dos Pilões (Grupo Canastra) da Faixa de Dobramentos Brasília. A **Figura 16** apresenta o mapa geológico do Distrito de Pântano de Santa Cruz e a localização da Cachoeira do Santuário em sua porção centro-oeste.

A face (talude) da Cachoeira do Santuário possui orientação NW-SE e mergulho médio de 75°. A foliação metamórfica possui planos orientados ao longo da direção NW-SE e mergulho médio de 30° (**Figura 17E**).

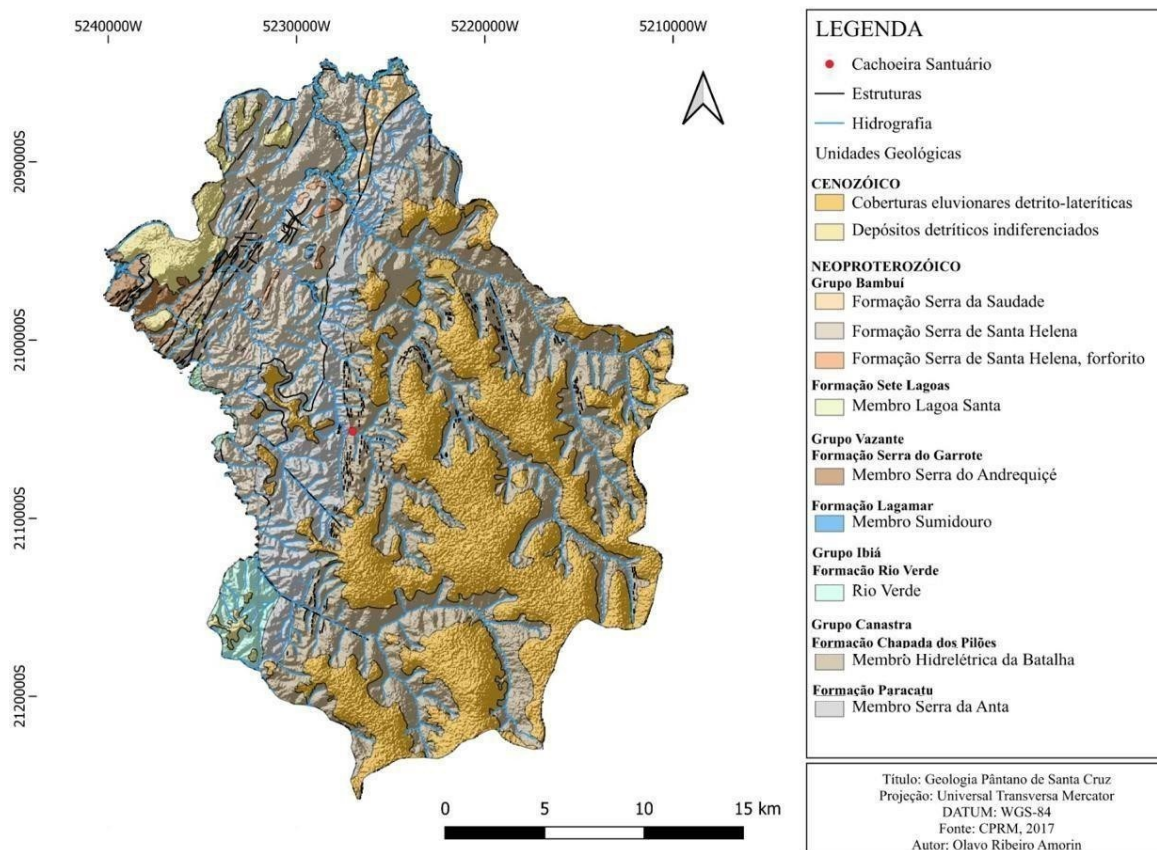
Figura 15: Visada para oeste do maciço rochoso quartzítico aflorante no topo da Cachoeira do Santuário. A lapiseira ao centro indica o norte geográfico. Tamanho da lapiseira: 13,5 cm



Fonte: O Autor.

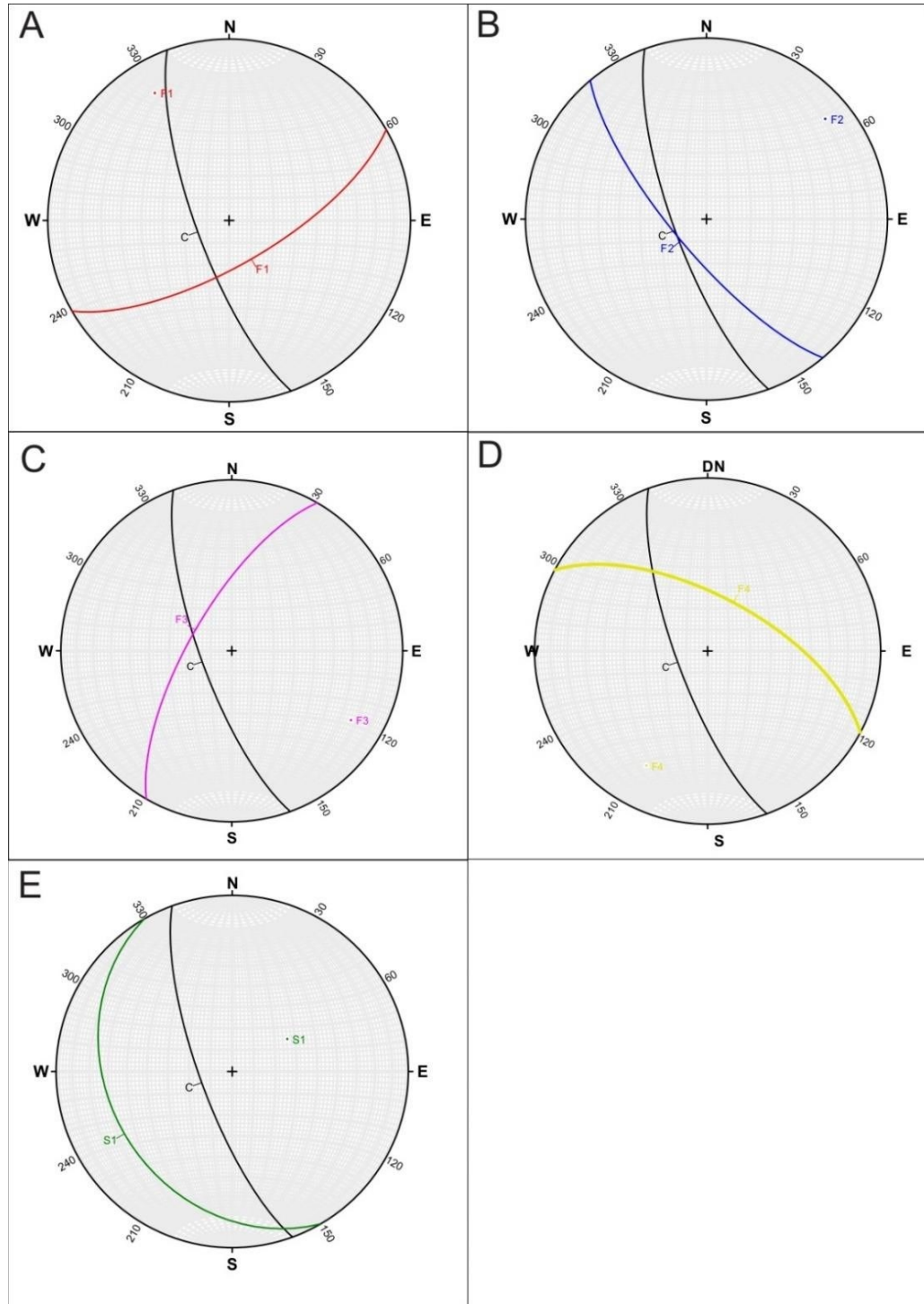
Na base da cachoeira são observados blocos de rocha caídos, com dimensões centimétricas a métricas. Com base no mapeamento geotécnico, verificou-se a existência de quatro famílias de descontinuidades. A Família (F1) possui orientação ENE-WSW e planos mergulhando para SSE (150°) variando entre 56° e 80° (**Figura 17A**). As descontinuidades que conformam a Família 2 (F2) possuem orientação NW-SE e planos mergulhando para SW (230°) com mergulhos entre 62° e 83° (**Figura 17B**). A Família 3 (F3) possui descontinuidades orientadas ao longo da direção NE-SW e planos que mergulham para NW (300°) com mergulhos variando entre 65° e 79° (**Figura 17C**). As descontinuidades da Família 4 possuem orientação preferencial NW-SE com planos mergulhando entre 58° e 72° para SW (28°). Ocorrem também, nessa mesma família, descontinuidades com orientação NE-SW em menor quantidade, fazendo com que os planos mergulhem para SE (**Figura 17D**).

Figura 16: Mapa geológico simplificado do Distrito Pântano de Santa Cruz na porção leste de Coromandel e localização da Cachoeira do Santuário.



Fonte: O Autor

Figura 17: Estereogramas estruturais evidenciando descontinuidades. (A) Talude e Família 1; (B) Talude e Família 2; (C) Talude e Família 3; (D) Talude e Família 4; (E) Talude e Foliação Metamórfica.



Fonte: O Autor

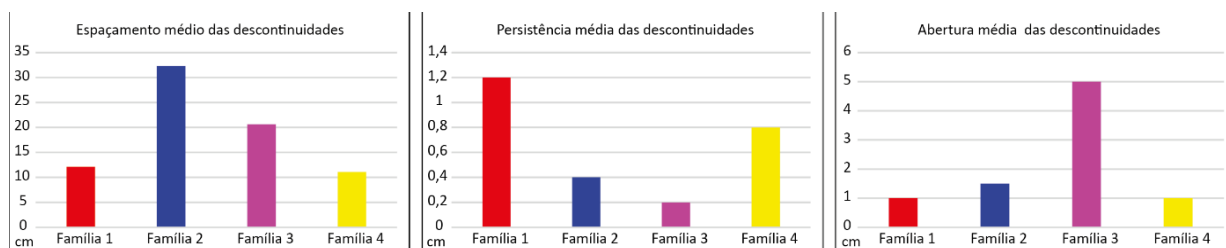
Figura 18: Preenchimento de descontinuidades por vegetação e clastos. A lapiseira ao lado indica o norte geográfico. Tamanho da lapiseira: 13,5 cm



As quatro famílias de fraturas reconhecidas atribuem grau de fraturamento ($J_n = 15$) ao maciço. As descontinuidades possuem paredes levemente alteradas, com a presença de partículas argilosas, arenosas e cascalhosas. Essas características conferem condição de alteração das paredes (J_a) igual a 2. As descontinuidades apresentam-se lisas e onduladas, conferindo uma condição de rugosidade das paredes (J_r) igual a 2. A presença de uma estação chuvosa bem marcada na região sugere que as descontinuidades devem apresentar afluência média de água, com lavagem ocasional de seus preenchimentos. Portanto, define-se aqui uma condição de afluência de água (J_w) igual a 0,66. Devido a ocorrer próximo e na superfície, o maciço possui tensões baixas e, portanto, foram atribuídas condições de tensão (SRF) iguais a 2,5.

Os espaçamentos das descontinuidades das famílias F1 e F2 variam, respectivamente, entre 24 e 73 cm (média de 12,4 cm) e entre 16 e 65,5 cm (média de 33 cm) e são classificados como “muito espaçados” e “extremamente espaçados”. As descontinuidades das famílias 3 e 4 são consideradas “extremamente espaçadas”, com espaçamentos variando entre 12,5 a 23,5 cm (média de 21 cm) e 22 a 52 cm (média de 13 cm), respectivamente.

Figura 19: Valores médios para espaçamentos, persistências e aberturas das famílias de descontinuidades F1, F2, F3 e F4.



Fonte: O Autor.

A persistência das descontinuidades das famílias 1, 2 e 4 variam, respectivamente, entre 43 e 145 cm (média de 120 cm), 34 e 71 cm (média de 33 cm) e 23 e 87 cm (média de 76 cm). São portanto classificadas como persistências “muito altas”. As descontinuidades da F3 possuem persistência entre 12 e 41,5 cm (média de 21 cm) e são consideradas “altas” a “muito altas”.

As aberturas das descontinuidades das F1 e F4 variam entre 0,3 e 1,2 cm (média de 1,03 cm) e entre 0,5 e 1 cm (média de 0,96 cm), respectivamente. São portanto classificadas como

“parcialmente abertas”. As F2 e F3 possuem aberturas de 0,4 a 1,0 cm (média de 0,87 cm) e 1,0 a 5,0 cm (média de 1,44 cm). Tais aberturas são classificadas como “parcialmente abertas” a “abertas”.

Os cálculos do grau de fraturamento (J_v) e do RQD foram efetuados de acordo com a proposta de Palmström (1996) e são apresentados nas fórmulas abaixo:

Fórmula 1: $J_v = \sum \frac{1}{S_i} = \frac{1}{0,124} + \frac{1}{0,33} + \frac{1}{0,21} + \frac{1}{0,13} = 23,54$

Fórmula 2: $RQD = 110 - 2,5J_v = 110 - 58,85 = 51,15$

De acordo com o número de descontinuidades por metro (grau de fraturamento), o maciço pode ser classificado como medianamente fraturado, tendo de 6 a 10 fraturas por metro.

O RMR obtido para a Cachoeira do Santuário foi de 47, sendo seu maciço rochoso classificado como Classe III (Razoável). O índice Q (Fórmula 3) obtido para a cachoeira foi de 0,90, posicionando-a na classe “VII – Muito Ruim” para maciços rochosos. Os valores dos parâmetros utilizados para as classificações RMR e Q estão sumarizados na **Tabela 8** e **Tabela 9**, respectivamente.

Fórmula 3: $Q = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) * \left(\frac{J_r}{J_a}\right) * \left(\frac{J_w}{SRF}\right) = \left(\frac{51,15}{15}\right) * \left(\frac{2}{2}\right) * \left(\frac{0,66}{2,5}\right) = 0,90$

Tabela 8: Cálculo do RMR com base nos dados coletados em campo.

Parâmetros	Peso	Descrição
RQD	13	Razoável
Resistência da rocha intacta	4	25-50 MPa
Condições das descontinuidades	10	Superfícies estriadas ou polidas com enchimento <5mm ou separação de 1-5mm.
Água subterrânea	10	Úmido

Orientação da descontinuidades e mergulho	0	Muito favorável
Somatório ou RMR	47	Classe III - Razoável

Fonte: O Autor.

Devido ao maciço ser constituído por muitos blocos interconectados e possuir descontinuidades com superfícies lisas e moderadamente alteradas, o intervalo estimado para o índice GSI é de 50 a 55.

Tabela 9: Classificação Q da Cachoeira do Santuário.

Coefficientes	Características	Peso
Jn	Quatro famílias	15
Jr	Fraturas lisas e onduladas	2
Ja	Paredes com partículas de areia e rochas desintegradas	2
Jw	Afluência elevada com considerável lavagem do preenchimento das fraturas	0,66
SRF	Tensões baixas, próximas à superfície	2,5

Fonte: O Autor.

6.2. Análise cinemática

6.2.1 Ruptura planar

A **Figura 20** apresenta a análise cinemática geral para ruptura planar de todas as descontinuidades mapeadas na cachoeira, além da foliação metamórfica. A ruptura planar para a F2 pode ser identificada através da localização de dois (2) polos na zona crítica para esse tipo de ruptura. De um total de nove (9) polos, a probabilidade de ruptura é de 22,2%. Os polos das famílias 1, 3 e 4 e da foliação metamórfica encontram-se afastados da zona crítica e, portanto, tais descontinuidades apresentam probabilidade nula para ruptura planar.

6.2.2 Ruptura por tombamento

A **Figura 21** apresenta a análise cinemática para possíveis rupturas por tombamento das descontinuidades da cachoeira. A partir da análise dos estereogramas, verifica-se que as famílias 2, 3 e 4 e a foliação metamórfica possuem polos distanciados das zonas críticas para tombamentos direto, oblíquo e flexural. Do total de polos da F1 ($n = 4$), apenas um (1) encontra-se inserido na zona crítica para tombamento flexural, representando probabilidade de 25% para esse tipo de ruptura.

6.2.3 Ruptura em cunha

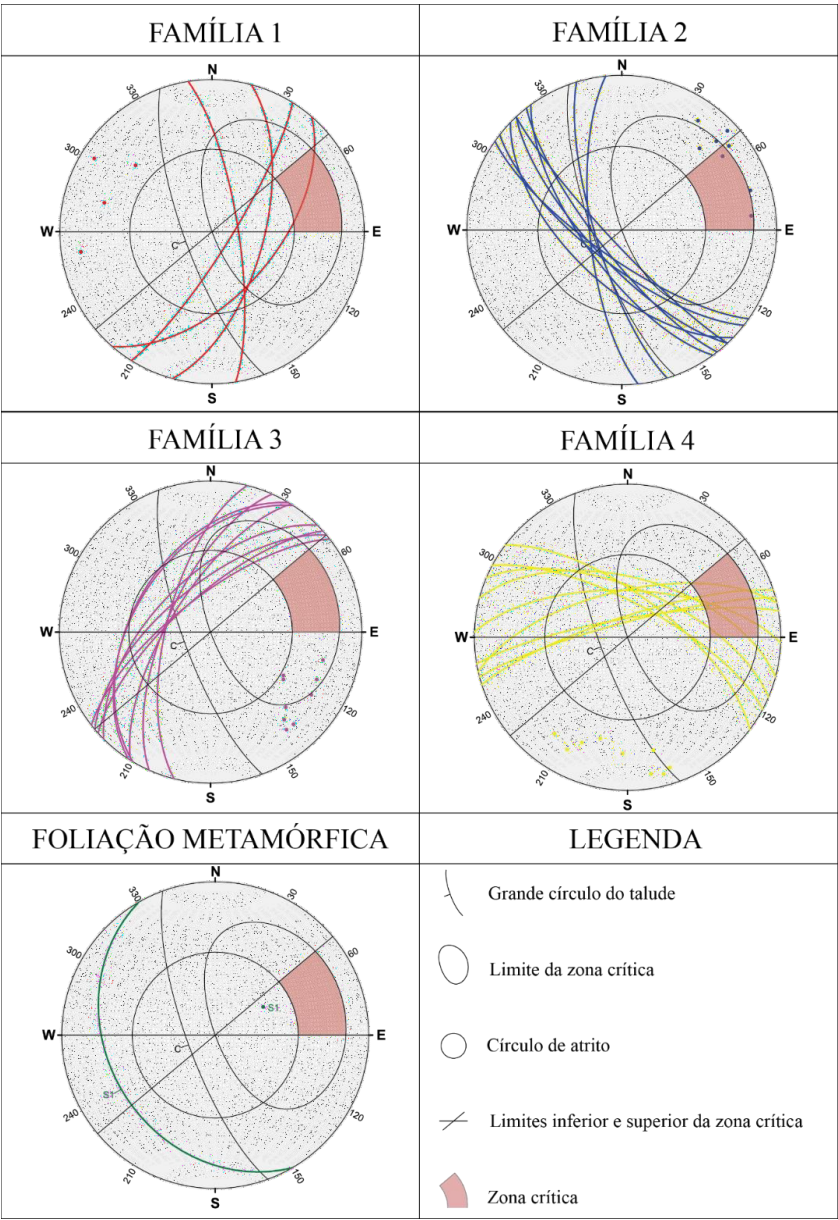
A **Figura 22** apresenta a análise cinemática para possíveis rupturas em cunha das descontinuidades da cachoeira. Foram utilizadas as médias da orientação de cada uma das famílias de descontinuidades. O valor do ângulo de atrito foi calculado com base no índice de rugosidade (J_r) e no grau de alteração das descontinuidades (J_a) através da seguinte fórmula:

$$\text{Fórmula 4: } tg^{-1} \left(\frac{J_r}{J_a} \right) = tg^{-1} \left(\frac{2}{2} \right) = 36,8$$

Através da análise do estereograma para ruptura em cunha das descontinuidades da cachoeira, verifica-se que dois (2) polos de um total de dez estão inseridos dentro dos limites da

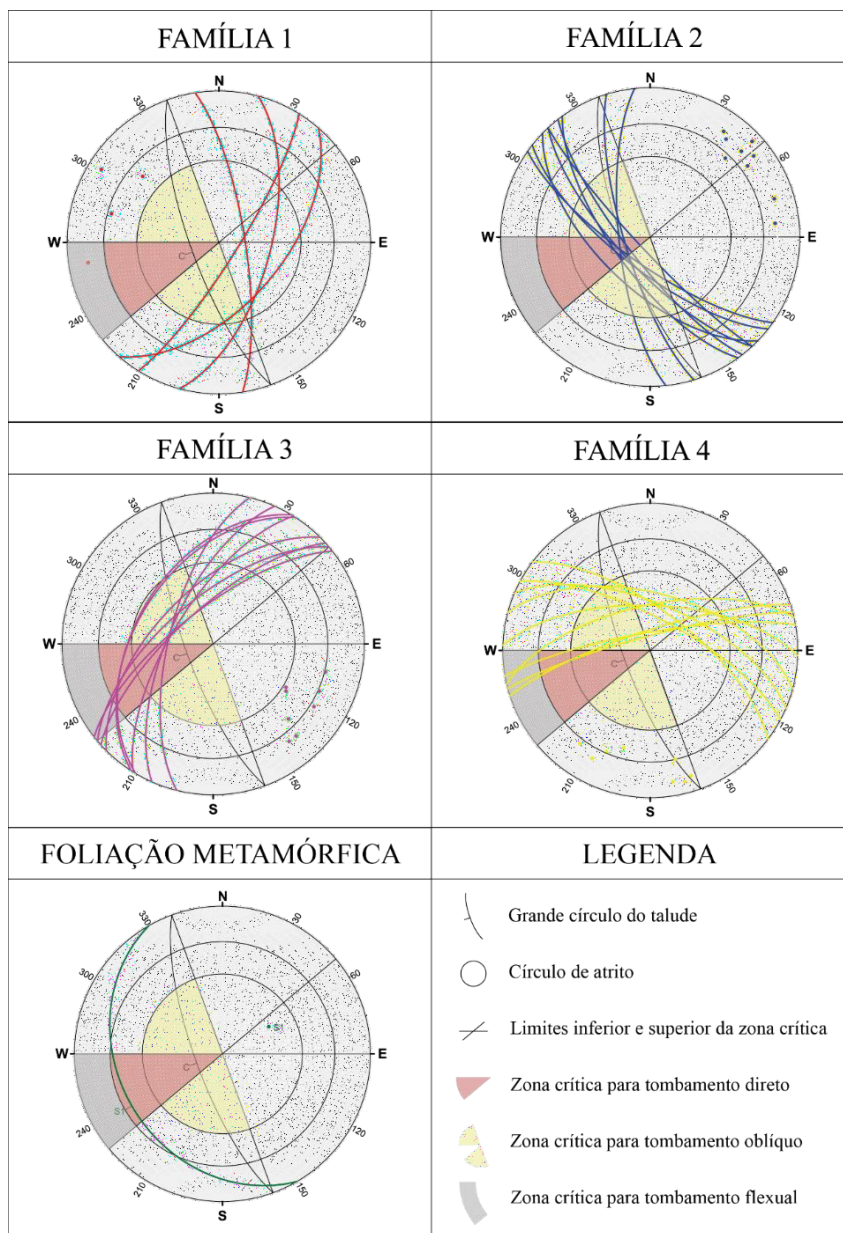
zona crítica para esse tipo de movimento de massa. Dessa maneira, a probabilidade para rompimento em cunha é de 20%. O rompimento em cunha é verificado entre as F1 e F3 e F2 e F3 (**Figura 22**). Os polos oriundos das interseções das discontinuidades entre as F1 e F2, F1 e F4, F2 e F4, F3 e F4 e entre a foliação metamórfica e as discontinuidades ocorrem afastados da zona crítica e, dessa forma, não apresentam probabilidade de rompimento em cunha.

Figura 20: Análise cinemática para ruptura planar das famílias de discontinuidades 1, 2, 3 e 4 e da foliação metamórfica do maciço rochoso aflorante no topo da Cachoeira do Santuário



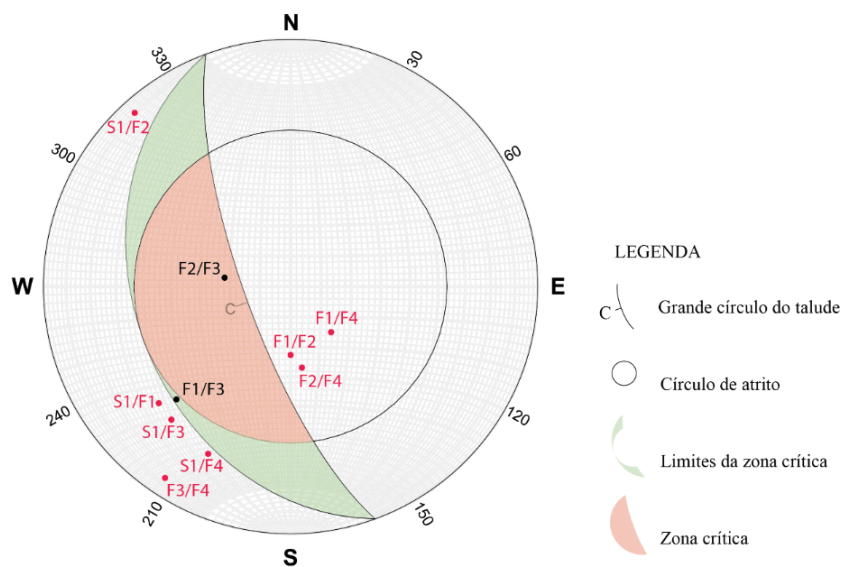
Fonte: O Autor.

Figura 21: Análise cinemática para tombamento das famílias de descontinuidades 1, 2, 3 e 4 e da foliação metamórfica do maciço rochoso aflorante no topo da Cachoeira do Santuário



Fonte: O Autor.

Figura 22: Análise cinemática para rompimento em cunha das famílias de descontinuidades 1, 2, 3 e 4 e da foliação metamórfica do maciço rochoso aflorante no topo da Cachoeira do Santuário.



Fonte: O Autor.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho de conclusão de curso apresentou dados inéditos acerca dos riscos e perigos geológicos existentes na Cachoeira do Santuário em Coromandel. A aplicação de técnicas e métodos clássicos em geotecnia mostrou-se uma ferramenta excelente para a avaliação da estabilidade do maciço rochoso que aflora no topo da cachoeira. Portanto, recomenda-se que novos estudos sobre possíveis riscos geológicos sejam realizados em outros atrativos turísticos do município, a exemplo das dezenas de cavernas. Além das metodologias típicas, sugere-se que as novas pesquisas também empreguem métodos recentes como análise computacional 3D e imagens de drones aerofotogramétricos para auxiliar a compreensão das estabilidades dos maciços rochosos a serem investigados.

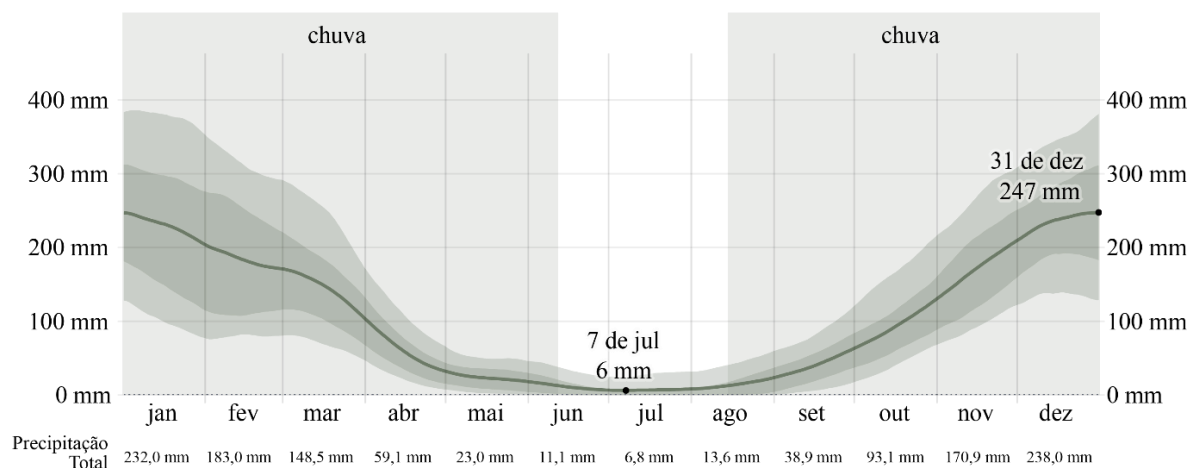
Os métodos RQD e RMR indicaram que o maciço quartzítico que compõem a Cachoeira do Santuário pode ser classificado como “Regular (Classe III)” e “Razoável (Classe III)”, respectivamente. Com base no método Q, o maciço é classificado como “Muito Ruim”. A análise cinemática das descontinuidades indicou que a Família 2 possui 22,2% de probabilidade para ruptura planar. A Família 1 possui 25% de probabilidade para tombamento flexural. Rupturas em cunha apresentam probabilidade de ruptura de 20% e envolvem descontinuidades entre as famílias 1 e 3 e famílias 2 e 3.

Alguns fatores que podem contribuir para eventos envolvendo riscos geológicos na Cachoeira do Santuário incluem: 1) descontinuidades com aberturas centimétricas a decimétricas; 2) descontinuidades preenchidas por sedimentos areno-cascalhosos, o qual evidencia a ocorrência periódica de correntes fluviais carregadas de detritos; 3) presença de algumas fraturas com percolação de água, favorecendo o intemperismo químico e reduzido o atrito das descontinuidades; e 4) presença de vegetação abundante em boa parte da face da cachoeira.

O município de Coromandel apresenta estações seca e chuvosa bem definidas (**Figura 24**). Portanto, o aumento da vazão relacionado às altas taxas pluviométricas entre os meses de outubro e março pode também ampliar a probabilidade de ocorrência de acidentes geológicos. Nesse sentido, recomendam-se aqui duas medidas simples a fim de mitigar potenciais situações de risco geológico, a saber: 1) a instalação de placas informativas anunciando a respeito de queda de blocos rochosos próximo à queda d’água e nas laterais da cachoeira e 2) visita da cachoeira em épocas

de estiagem (de abril a setembro) (**Figura 24**).

Figura 24: Chuva média mensal e total em Coromandel. Precipitação média (linha contínua) acumulada durante o período contínuo de 31 dias. Os dias 7 de julho e 31 de dezembro correspondem às mínimas e máximas pluviométricas, respectivamente.



Fonte: ©WeatherSpark.com.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682: **Estabilidade de encostas**. Rio de Janeiro, p. 24. 2009.

ALSHKANE, Younis Mustafa Ali. **Numerical modelling investigation of rock mass behaviour under gravity dams**. 2015. 217 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de Nottingham, Nottingham, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL. **Geologia de Engenharia**. [S.l.]: ABGE/FAPESP/CNPq, 1998. 587 p.

AZEVEDO, I. C. D.; MARQUES, E. A. G. **Introdução à Mecânica das Rochas**. Viçosa: Ed. UFV, 2006.

BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering Rock Mass Classifications**. New York: John Wiley & Sons, 1989. 251 p.

DEERE, D. U. **Rock Quality Designation (RQD) After Twenty Years**. Gainesville, Florida: National Technical Information Service, 1989. 22 p.

FIORI, A.P. et al. (1998). **Estudo da estabilidade de taludes escavados da Mina Saivá, PR. Solos e Rochas**. V.21, n.1, p. 19-29.

HARTWIG, Marcos Eduardo; PINHEIRO, Vinicius Scherrer. **Estudo sobre ruptura ocorrida no talude em rocha do km 13, 3 da ES-177 (Serra da aliança, ES)**. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2019.

HOEK, E. AND BRAY, J.W. (1981) **Rock Slope Engineering**. Revised 3rd Edition, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 341-351.

HOEK, E.; BROWN, E. T. **The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition**. Journal

of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, p. 1-19, 2018.

HUDSON, J.A.; HARRISON, J.P. **Engineering Rock Mechanics**: An introduction to the principles. Pergamon. Elsevier Science. Kidling, Oxford, UK. Pags 1-458, 1997.

MESQUITA, J. B. **Maciços Rochosos em Projetos Hidroelétricos: Proposta de Classificação Geomecânica**. Dissertação de Doutorado. Rio Claro: Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2008.

PINHO, António Bastos de. **Caracterização geotécnica de maciços rochosos de baixa resistência: o flysch do baixo Alentejo**. 2003. 272 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade de Évora, Évora, Portugal, 2003.

SANCHEZ, Erika Schumacher. **Serra de Botucatu: análise da estrutura do trapp basáltico e suas implicações de natureza geológico-geotécnica**. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade de São Paulo, 2023.

SANTOS, T. B. **Aplicabilidade das Classificações Geomecânicas e Retroanálise para Estimação das Propriedades dos Maciços Rochosos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia de Minas, Ouro Preto, 2015.

SERRA JUNIOR, E.; OJIMA, L. M. **Caracterização e classificação de maciços rochosos**. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Eds.). *Geologia de Engenharia*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - ABGE, 1998.

SILVA, Anne Caroline da et al. **Análise estrutural do maciço rochoso para orientação otimizada da face livre em pedreira localizada no distrito de Pão de Açúcar, município de Taquaritinga do Norte, Pernambuco**. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

TERZAGHI, K. **Rock defects and loads on tunnel supports**. In: PROCTOR, R.V; WHITE, T.L. (Eds.). Rock tunneling with steel support. Volume 1. Youngstown: Commercial Shearing and Stamping Company, 1946.

VALLEJO, L. L. et al. **Ingeniería Geológica**. Espanha: Prentice Hall, 2002.

WYLLIE, D.C.; MAH, C.W. 2004. Rock Slope Engineering: civil and mining. London: **Inst. of Mining and Metallurgy**. 431p

.