

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA

SAMUEL FONSECA OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA E ANÁLISE CINEMÁTICA
DA CACHOEIRA DO MASCATE COMO SUBSÍDIO AO ECOTURISMO
EM COROMANDEL, MINAS GERAIS**

MONTE CARMELO

2024

SAMUEL FONSECA OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA E ANÁLISE CINEMÁTICA
DA CACHOEIRA DO MASCATE COMO SUBSÍDIO AO ECOTURISMO
EM COROMANDEL, MINAS GERAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Geologia da Universidade Federal de
Uberlândia, obrigatório para a obtenção do título
de bacharel em geologia.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Alessandretti.

Coorientador: Me. José Carlos Paranhos Souza de
Castro.

MONTE CARMELO

2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

O48
2024

Oliveira, Samuel Fonseca, 1997-
Avaliação geológico-geotécnica e análise cinemática da
Cachoeira do Mascate como subsídio ao ecoturismo em
Coromandel, Minas Gerais. [recurso eletrônico] / Samuel
Fonseca Oliveira. - 2024.

Orientador: Luciano Alessandretti.

Coorientador: José Carlos Paranhos.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em
Geologia.

Modo de acesso: Internet.

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Geologia. I. Alessandretti, Luciano, 1986-,
(Orient.). II. Paranhos, José Carlos, 1985-, (Coorient.).
III. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em
Geologia. IV. Título.

CDU: 551

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

SAMUEL FONSECA OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA E ANÁLISE CINEMÁTICA
DA CACHOEIRA DO MASCATE COMO SUBSÍDIO AO ECOTURISMO
EM COROMANDEL, MINAS GERAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Geologia da Universidade Federal de
Uberlândia, obrigatório para a obtenção do título
de bacharel em geologia.

Monte Carmelo (MG), 29 de outubro de 2024.

Banca Examinadora:

Dra. Ingrid Ferreira Lima – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dra. Joana Paula Sánches – Universidade Federal de Goiás

Prof. Dr. Luciano Alessandretti (orientador) – Universidade Federal de Uberlândia

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar, dar força, iluminação, sabedoria e saúde, permitindo ultrapassar obstáculos e alcançar meus objetivos.

Devo a conclusão do meu curso ao suporte e incentivo das diversas pessoas que me acompanharam ao longo da minha caminhada geológica. Em especial, gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha família, meu pai Geraldo, minha mãe Eliane e meu irmão Sávio, pelo suporte incondicional e inexorável, fundamental para que eu pudesse alcançar esta importante conquista.

Agradeço igualmente aos meus avós e madrinhas, Noraldino (*in memoriam*), Lucy, Jairo (*in memoriam*), Iara, Lenita e Tânia.

Ao meu orientador, Luciano e ao coorientador Zeck, expresso minha sincera gratidão por toda a paciência, dedicação, orientação e por compartilharem seus conhecimentos e experiências, indispensáveis para a conclusão da minha graduação.

Agradeço ao Curso de Geologia e a todos os professores que proporcionaram a base e a estrutura para o meu conhecimento.

Agradeço à banca examinadora, Joaquina e Ingrid, por aceitarem o convite e fazer parte da conclusão do meu curso.

Aos meus amigos de longa data, aos amigos que fiz durante o curso e aos companheiros de repúblicas, especialmente à República QG, que estiveram presentes em todos os momentos, agradeço ao companheirismo, amizade e histórias criadas, que tornaram a experiência da graduação mais divertida.

À todos os que me apoiaram direta e indiretamente, minha sincera gratidão.

“Não entre em pânico.”

(Douglas Adams)

RESUMO

O município de Coromandel, localizado na Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba em Minas Gerais, possui uma série de atrativos turísticos naturais que incluem diversas cachoeiras. Este trabalho de conclusão de curso apresenta uma avaliação geológica-geotécnica da Cachoeira do Mascate, um dos principais geoatrativos regionais, e possíveis implicações para o ecoturismo regional. O maciço rochoso que aflora na cachoeira é formado exclusivamente por quartzitos da Formação Chapada dos Pilões (Grupo Canastra) da Faixa Brasília, apresentando diferentes graus de intemperismo. Os quartzitos possuem foliação metamórfica com planos orientados na direção 210°N e mergulhos entre 16° e 54° . O talude da cachoeira possui direção 045°N e mergulha em média 75° . Foram identificadas quatro famílias de descontinuidades: Família 1 (F1), com orientação E-W e planos mergulhando para NW (direção 351°N); Família 2 (F2), com orientação NNW-SSE e planos que mergulham para NE (direção 070°N); Família 3 (F3), com orientação NE-SW e planos alternando mergulhos entre NW (direção 308°N) e SE (direção 148°N); e Família 4 (F4), com orientação WNW-ESSE e planos que variam seus mergulhos entre NE (direção 018°N) e SW (direção 202°N). De acordo com o índice Rock Quality Designation (RQD), a qualidade do maciço está enquadrada na classe Regular. Com base no índice Rock Mass Rating (RMR), o maciço é classificado como Razoável (Classe III). As análises cinemáticas indicam possibilidades de rupturas dos tipos em cunha (29%), por tombamentos direto (26%), flexural (3%) e oblíquo (1%) e planar (9%). As rupturas planares identificadas são controladas majoritariamente por fraturas orientadas aproximadamente na direção NW-SE e mergulhos sub-verticais. Ruptura por tombamentos direto e oblíquo ocorrem pelos planos da foliação metamórfica. O Fator de Segurança de 1,37 indica condições de estabilidade da cachoeira com relação aos diferentes tipos de rupturas. Porém, períodos de pluviosidade intensa entre os meses de novembro a março certamente levam a condições de maior instabilidade do talude e, portanto, favoráveis à ruptura. De fato, a base da cachoeira é rodeada por inúmeros matacões caídos que evidenciam movimentos de massa gravitacionais. Nesse sentido, recomenda-se a implementação de duas medidas simples a fim de reduzir potenciais situações de risco geológico na Cachoeira do Mascate: (i) a instalação de placas informativas sobre a possibilidade de queda de blocos de rocha e (ii) que a visita da cachoeira seja realizada em épocas de estiagem, entre os meses de abril e setembro.

Palavras-chave: cachoeira; geotecnia; análise cinemática; fator de segurança; maciços rochosos; ecoturismo.

ABSTRACT

The municipality of Coromandel, situated in the Triângulo Mineiro and Alto Paranaíba Mesoregion of Minas Gerais, boasts several natural tourist attractions, including numerous waterfalls. This undergraduate final project presents a geological-geotechnical evaluation of the Mascate Waterfall, a key geo-attraction in the region, and examines its implications for regional ecotourism. The rock massif at the waterfall is composed entirely of quartzites from the Chapada dos Pilões Formation (Canastra Group) of the Brasília Belt and displays varying degrees of weathering. It features incipient metamorphic foliation, with planes oriented at 210°N and dipping between 16° and 54° . The slope of the waterfall has a direction of 045°N and an average dip of 75° . Four families of discontinuities were identified, namely: Family 1 (F1), with E-W orientation and planes dipping to NW (direction 351°N); Family 2 (F2), with NNW-SSE orientation and planes dipping to NE (direction 070°N); Family 3 (F3), with NE-SW orientation and planes alternating dips between NW (direction 308°N) and SE (direction 148°N); and Family 4 (F4), with WNW-ESSE orientation and planes that vary their dips between NE (direction 018°N) and SW (direction 202°N). According to the Rock Quality Designation (RQD) index, the quality of the massif is classified as "Regular." Based on the Rock Mass Rating (RMR) index, the massif is classified as "Reasonable" (Class III). Kinematic analyses indicate the potential for various types of failures: wedge (29%), direct toppling (26%), flexural toppling (3%), oblique toppling (1%) and planar (9%). Planar failures are primarily controlled by discontinuities oriented approximately in the NW-SE direction with sub-vertical dips. Failures by direct and oblique toppling occur along the planes of the metamorphic foliation. The Safety Factor of 1.37 indicates stable conditions of the waterfall slope concerning different types of failures. However, periods of intense rainfall between November and March can cause greater slope instability, increasing the risk of failure. The base of the waterfall is surrounded by numerous fallen boulders, showcasing signs of gravitational mass movements. To reduce potential geological risks at Mascate Waterfall, it is recommended to implement two simple measures: (i) install informational signs regarding the risk of falling rock blocks and (ii) advise visitors to the waterfall to plan their visits during the dry season, from April to September.

Keywords: waterfall; geotechnics; kinematic analysis; safety factor; rock masses; ecotourism.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: (A) Vista aérea da Cachoeira do Mascate. (B) Entrada da Fazenda Mascate com indicação do caminho a ser percorrido até a cachoeira.	20
Figura 2: (A) Mapa do Brasil com destaque para o estado de Minas Gerais; (B) Localização do município de Coromandel em Minas Gerais; (C) Localização da Cachoeira do Mascate e sua principal via de acesso.	22
Figura 3: Trilha percorrida para acesso à cachoeira.	22
Figura 4: Mapa geológico com Cachoeira do Mascate no centro.	26
Figura 5: Coluna estratigráfica do Grupo Canastra (modificado de Dardenne, 2000 e Pereira, 1992), segundo Rodrigues (2008).	27
Figura 6: Imagem de satélite com visada para oeste, mostrando a localização da Cachoeira do Mascate.	28
Figura 7: Diagrama de formação e erosão de cachoeiras.	29
Figura 8: Representação do feito escala desde a rocha intacta até maciço rochoso bastante fraturado.	30
Figura 9: Parâmetros geomecânicos de descrição de maciço rochoso.	32
Figura 10: Imagem ilustrativa da atitude a ser medida.	33
Figura 11: Representação do espaçamento, rugosidade e abertura de descontinuidades.	35
Figura 12: Maciço rochoso com blocos articulados delimitados contendo heterogeneidades em forma de descontinuidades divididas em famílias.	36
Figura 13: Ábaco para obtenção de valores do GSI.	46
Figura 14: Zona crítica de ruptura planar.	48
Figura 15: Zonas críticas da ruptura em cunha.	49
Figura 16: Zonas críticas das rupturas por tombamento.	50
Figura 17: Perfil ilustrativo do tombamento num talude.	50
Figura 18: Perfil de um talude apresentando fraturas do tombamento em blocos.	51
Figura 19: (A) Vista ilustrativa da cunha mostrando a numeração das linhas de intersecção e planos (traduzido); (B) Estereograma de dados necessários para análise de estabilidade de cunha (traduzido).	57
Figura 20: Estereograma utilizado para realizar o cálculo dos coeficientes A, B, X e Y.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tabela utilizada em campo.	24
Tabela 2: Notação das estações (Disponível Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos [SNIRH]).	25
Tabela 3: Descrição do espaçamento das descontinuidades.	33
Tabela 4: Descrição da persistência.	34
Tabela 5: Descrição de abertura.	34
Tabela 6: Descrição do grau de fraturamento.	36
Tabela 7: Grau de resistência da rocha.	37
Tabela 8: Classificação de qualidade do maciço rochoso a partir do RQD.	39
Tabela 9: Classificação de maciços rochosos segundo o sistema RMR.	40
Tabela 10: Valores de J_n	42
Tabela 11: Valores de J_r no sistema Q.	42
Tabela 12: Valores de J_a no sistema Q.	42
Tabela 13: Valores de J_w no sistema Q.	44
Tabela 14: Valores de SRF no sistema Q.	44
Tabela 15: Classificação do maciço rochoso no Sistema Q.	45
Tabela 16: Tipos de ruptura e condições de instabilidade.	47
Tabela 17: Valores de m_i para rocha intacta.	54
Tabela 18: Diretrizes para estimar o fator de perturbação D.	55

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: RQD	39
Equação 2: J_v	39
Equação 3: Q	41
Equação 4: FS	52
Equação 5: c	53
Equação 6: ϕ	53
Equação 7: a	53
Equação 8: s	53
Equação 9: m_b	53
Equação 10: σ_{3n}	54
Equação 11: A	57
Equação 12: B	57
Equação 13: X	57
Equação 14: Y	57
Equação 19: Resultado de a	89
Equação 20: Resultado de s	89
Equação 21: Resultado de m_b	89
Equação 22: Resultado de σ_{3n}	89
Equação 23: Resultado de c	90
Equação 24: Resultado de A	90
Equação 25: Resultado de B	90
Equação 26: Resultado de X	90
Equação 27: Resultado de Y	90

LISTA DE SIGLAS

et al.	e outros(as)
i. e.	ou seja
in loco	no lugar
p.	página
vd.	vide
ed.	edição
apud	citado por
ANA	Agência Nacional de Águas
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DEM	Modelo Digital de Elevação
EMBRATUR	Agência Brasileira de Promoção Internacional do Turismo
FS	Fator de Segurança
GSI	<i>Geological Stress Index</i> (Índice de Resistência Geológica)
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
IDE	Infraestrutura de Dados Espaciais
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
ISRM	Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MEL	Método de Equilíbrio Limite
MG	Minas Gerais
Q	<i>Tunneling Quality Index</i> (Índice de Qualidade de Tunelamento)
RNH	Rede Hidrometeorológica Nacional
RQD	<i>Rock Quality Designation</i> (Designação de Qualidade da Rocha)
RMR	<i>Rock Mass Rating</i> (Classificação de Massa Rochosa)
SBG	Serviço Geológico do Brasil
SGB	Sociedade Brasileira de Geologia
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SRF	Estado de tenção do maciço

UNWTO *United Nations World Tourism Organization* (Organização Mundial do Turismo das Nações Unidas)

UTM Universal Transversa de Mercator

WGS *World Geodetic System* (Sistema Geodésico Mundial)

LISTA DE SÍMBOLOS

C ou c	Coesão
cm	Centímetros
cm ³	Centímetro cúbico
D	Fator de perturbação da resistência do maciço rochoso
H	Altura do talude
J _a	Joint Alteration Number (Grau de alteração das descontinuidades)
J _n	Joint Set Number (Número de famílias de descontinuidades)
J _r	Joint Roughness Number (Índice de rugosidade das descontinuidades)
J _v	Joint Value (Índice volumétrico)
J _w	Joint Water Reduction Factor (Fator de redução de água)
kg	Quilograma
km	Quilômetro
kN	quilonewton
l	Litro
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
m _b	Constante material para resistência do maciço rochoso
m _i	Constante material para rochas intactas
min	Minuto
min	Minuto
mm	Milímetro
Mpa ou kPa	Mega Pascal
PN1	Alto Rio Paranaíba
S ₁	Foliação Metamórfica
S _i	Espaçamento médio da família
s	Segundo
US\$	Dólar Americano
γ	Densidade específica
ψ	Ângulo de mergulho
φ	Ângulo de atrito

σ_1	Tensão principal maior
σ_{3n}	Tensão principal menor máxima dividida pela resistência a compressão uniaxial
σ_c	Resistência a compressão uniaxial
N	Norte
S	Sul
E	Leste
O ou W	Oeste
NW	Noroeste
NE	Nordeste
SW	Sudoeste
SE	Sudeste
NNW	Nor-noroeste
SSE	Sul-sudeste
WNW	Oeste-noroeste
ESE	Leste-sudeste

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	19
1.1. Objetivos.....	20
2. LOCALIZAÇÃO E ACESSO À CACHOEIRA DO MASCATE	21
3. METODOLOGIA	22
3.1. Revisão Bibliográfica	23
3.2. Elaboração de banco de dados	23
3.3. Fotointerpretação	23
3.4. Análise de Maciços Rochosos e rupturas	23
3.5. Análise de dados hidrogeológicos	25
4. GEOLOGIA LOCAL	25
4.1. Contexto Geomorfológico	27
5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	28
5.1. Cachoeiras.....	29
5.2. Maciços rochosos e descontinuidades	29
5.2.1. RQD.....	39
5.2.2. RMR	39
5.2.3. Sistema Q.....	41
5.2.4. GSI.....	46
5.3. Análise Cinemática	46
5.3.1. Ruptura planar	48
5.3.2. Ruptura em cunha.....	48
5.3.3. Ruptura por tombamento	49
5.4. Fator de Segurança.....	52
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....	57
7. REFERÊNCIAS	58
1. INTRODUÇÃO:	64
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	65
2.1. Localização e vias de acesso.....	65
2.2. Geologia local	66
3. METODOLOGIA	67
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	68

4.1.	Fotointerpretação	68
4.2.	Mapeamento geológico-geotécnico	69
4.3.	Análise Cinemática	72
4.3.1.	Ruptura planar	72
4.3.2.	Ruptura em cunha.....	74
4.3.3.	Ruptura por tombamento	75
4.4.	Fator de segurança	77
5.	IMPLICAÇÕES E RECOMENDAÇÕES PARA O ECOTURISMO	78
6.	CONCLUSÃO	79
7.	REFERÊNCIAS.....	80

ANEXO 1 – E-mail de confirmação de submissão do artigo científico “Avaliação geológico-geotécnica e análise cinemática da Cachoeira do Mascate como subsídio ao ecoturismo em Coromandel, Minas Gerais” ao periódico Geologia USP – Série Científica.	62
ANEXO 2 – Artigo científico.....	63
ANEXO 3: Atitudes das famílias de descontinuidades	81
ANEXO 4: Espaçamentos das descontinuidades	82
ANEXO 5: Persistências das descontinuidades.....	83
ANEXO 6: Aberturas das descontinuidades.....	84
ANEXO 7: Preenchimentos das descontinuidades.....	85
ANEXO 8: Rugosidades das paredes das descontinuidades	86
ANEXO 9: Percolação nas descontinuidades.....	87
ANEXO 10: Classificação geomecânica do índice GSI da Cachoeira do Mascate	88
ANEXO 11: Equações utilizadas para o cálculo do FS e demais coeficientes	89

APRESENTAÇÃO DA MONOGRAFIA

A estrutura da presente monografia, intitulada “Avaliação geológico-geotécnica e análise cinemática da Cachoeira do Mascate como subsídio ao ecoturismo em Coromandel, Minas Gerais”, está dividida em sete capítulos e dez anexos.

O Capítulo 1 – Introdução apresenta sucintamente a evolução das técnicas e métodos voltados à análise de maciços rochosos e suas posteriores aplicações em atrativos turísticos naturais. Os subcapítulos 1.1 e 1.2 apresentam, respectivamente, as justificativas e os objetivos da monografia.

A localização e as principais vias de acesso à Cachoeira do Mascate a partir do município de Coromandel são apresentadas no Capítulo 2.

O Capítulo 3 exibe a metodologia utilizada ao longo do desenvolvimento da monografia para que se pudessem alcançar os objetivos propostos.

O contexto geológico local é apresentado de maneira sumarizada no Capítulo 4.

O Capítulo 5 – Fundamentação Teórica fornece uma revisão conceitual acerca de cachoeiras as principais técnicas e métodos utilizados na análise de maciços rochosos.

No Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais sobre o projeto desenvolvido e abordando a eficácia da análise de maciços rochosos nos atrativos turísticos de Coromandel. Ainda, discute a necessidade de estudos envolvendo riscos geológicos nos demais atrativos turísticos do município e a seu continuado monitoramento.

No Capítulo 7 são listadas as referências bibliográficas utilizadas na elaboração da monografia.

O Anexo 1 exibe a carta de submissão do artigo científico ao periódico Geologia USP – Série Científica.

O Anexo 2 inclui o artigo científico “Avaliação geológico-geotécnica e análise cinemática da Cachoeira do Mascate como subsídio ao ecoturismo em Coromandel, Minas Gerais” submetido ao periódico Geologia USP – Série Científica.

Os Anexos 3 a 10 apresentam a determinação das características das descontinuidades da Cachoeira do Mascate, incluindo orientações, espaçamentos, persistências, rugosidades, resistências das paredes, aberturas, materiais de preenchimento e condições de fluxo.

O Anexo 11 apresenta as fórmulas e resultados dos coeficientes utilizados para o cálculo do Fator de Segurança da Cachoeira do Mascate.

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A análise de maciços rochosos foi desenvolvida formalmente entre as décadas de 1920 e 1950, impulsionada principalmente pela necessidade de engenheiros e geólogos compreenderem melhor o comportamento de grandes volumes de rocha em projetos de barragens, túneis, estradas e mineração. Os primeiros estudos focaram no reconhecimento e importância de descontinuidades (juntas, falhas, fraturas) e da pressão de água em maciços rochosos e seu impacto na estabilidade das estruturas (vd. Terzaghi, 1950). A expansão e pleno desenvolvimento da análise de maciços rochosos se deu a partir da década de 1950 com o surgimento de teorias matemáticas e experimentais focadas na análise de tensões, deformações e resistência das rochas sob diversas condições de carga (vd. Jaeger; Cook, 1969). A evolução continuou nas décadas seguintes com a introdução de sistemas de classificação geomecânica de maciços rochosos como o Sistema Q (Barton *et al.*, 1974) e o *Rock Mass Rating* (RMR) (Bieniawski, 1989). O Sistema Q é amplamente utilizado em escavações subterrâneas e túneis e é embasado em parâmetros geotécnicos que auxiliam a determinar o tipo de suporte necessário para garantir a estabilidade de estruturas subterrâneas em diferentes condições de rochas (Barton *et al.*, 1974). A classificação RMR é usada para estimar a resistência de maciços rochosos, bem como para auxiliar na escolha de métodos de escavação e sistemas de suporte (Bieniawski, 1989).

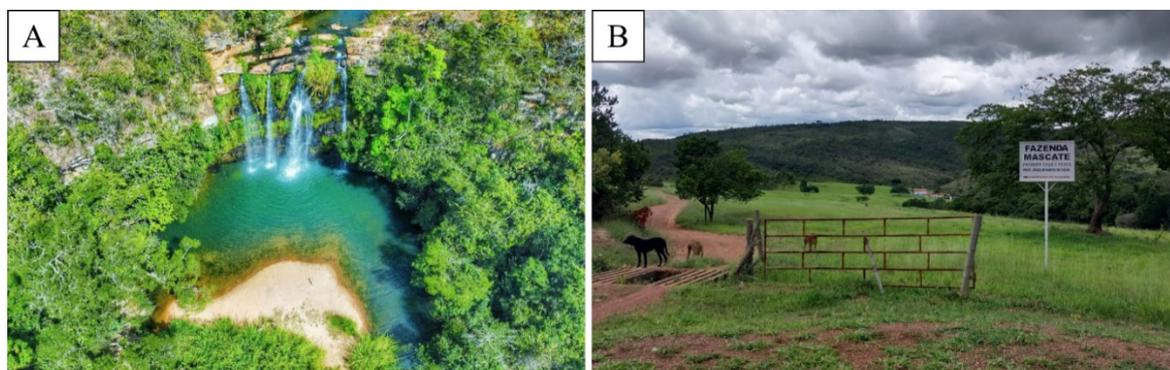
A aplicação da análise de maciços rochosos em atrativos turísticos naturais ao redor do mundo ganhou impulso nos anos 2000 (vd. Peng e Wang, 2015; Qadaryati, 2020), a partir da crescente popularização do ecoturismo e turismo de aventura em áreas com formações rochosas, como parques nacionais, cavernas, montanhas e falésias. De acordo com o último relatório da Organização Mundial do Turismo das Nações Unidas (*United Nations World Tourism Organization, UNWTO*), o ecoturismo cresce cerca de 5,8% ao ano (UNWTO, 2017). Segundo o relatório do *Ecotourism Global Market Report 2024* (<https://www.researchandmarkets.com/report/ecotourism>) do *The Business Research Company*, estima-se que o mercado financeiro de ecoturismo crescerá de US\$219.5 bilhões em 2023 para US\$249.1 bilhões em 2024, ampliando sua taxa de crescimento anual para 13.5%.

No Brasil, são ainda escassas as pesquisas voltadas à análise de riscos geológicos em atrativos geoturísticos. Porém, recentes iniciativas tomadas pelo Serviço Geológico do Brasil (SBG-CPRM) têm mudado esse cenário. Constituem alguns exemplos inéditos as avaliações geotécnicas dos atrativos turísticos do município de Presidente Figueiredo-AM (Oliveira *et al.*

2022), do Parque Nacional de Jericoacoara (Dias; Souza; Rodrigues, 2024), e do estado de Rondônia (Moraes; Oliveira; Adamy, 2023). Nessas regiões, avaliações geológico-geotécnicas têm sido aplicadas para contribuir com as práticas de gestão ambiental, subsidiar os administradores dos atrativos naturais com informações técnicas voltadas à prevenção, mitigação e resposta a possíveis acidentes geológicos e aumentar as condições de segurança dos turistas e moradores locais.

Os diversos atrativos geoturísticos de Coromandel vêm cada vez mais recebendo a visita de turistas ao longo dos anos. O município é bastante conhecido pela abundância de cachoeiras e lagos, e por isso, no de 1997, foi certificado pela EMBRATUR com o selo de município com potencialidade para o Ecoturismo (PREFEITURA DE COROMANDEL, 2012). Porém, ainda não existem estudos focados nas condições de estabilidade geotécnica das cachoeiras de Coromandel. Dessa forma, pesquisas geológico-geotécnicas nesses locais possuem fundamental importância para a prevenção de acidentes envolvendo eventuais visitantes, uma vez que são capazes de indicar os locais mais adequados para a prática do turismo e os possíveis perigos (i.e., queda de blocos, cabeças d'água) ao longo das diferentes épocas do ano.

Figura 1: (A) Vista aérea da Cachoeira do Mascate. (B) Entrada da Fazenda Mascate com indicação do caminho a ser percorrido até a cachoeira.



Fontes: (A) Fotografia de autoria de Bruno Jôsimar (maio de 2022). Disponível em: maps.app.goo.gl/GrXJyA61UwqvP86w7. (B) Fotografia de autoria de Luciano Alessandretti (março de 2024).

1.1. Objetivos

O objetivo principal do presente trabalho de conclusão de curso é a avaliação dos riscos e perigos geológicos existente na Cachoeira do Mascate, um dos principais atrativos ecoturísticos de Coromandel e propor medidas de segurança a partir dos dados obtidos. Com o

intuito de compreender e apontar os possíveis riscos e perigos geológicos, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Caracterização geológico-geotécnica do maciço rochoso do topo e base da Cachoeira do Mascate através dos índices *Rock Mass Rating (RMR)*, *Rock Quality Drilling (RQD)*, *Tunnelling Quality Index (Q)* e *Geological Strength Index (GSI)*;
- Análise cinemática para rupturas dos tipos planar, cunha e tombamento em estereogramas estruturais;
- Calcular o Fator de Segurança (FS) da cachoeira; e
- Subsidiar os administrador(es)/proprietário(s) da cachoeira e o poder público municipal com informações técnicas a fim de mitigar a possibilidade de acidentes e contribuir com a segurança de visitantes e moradores locais.

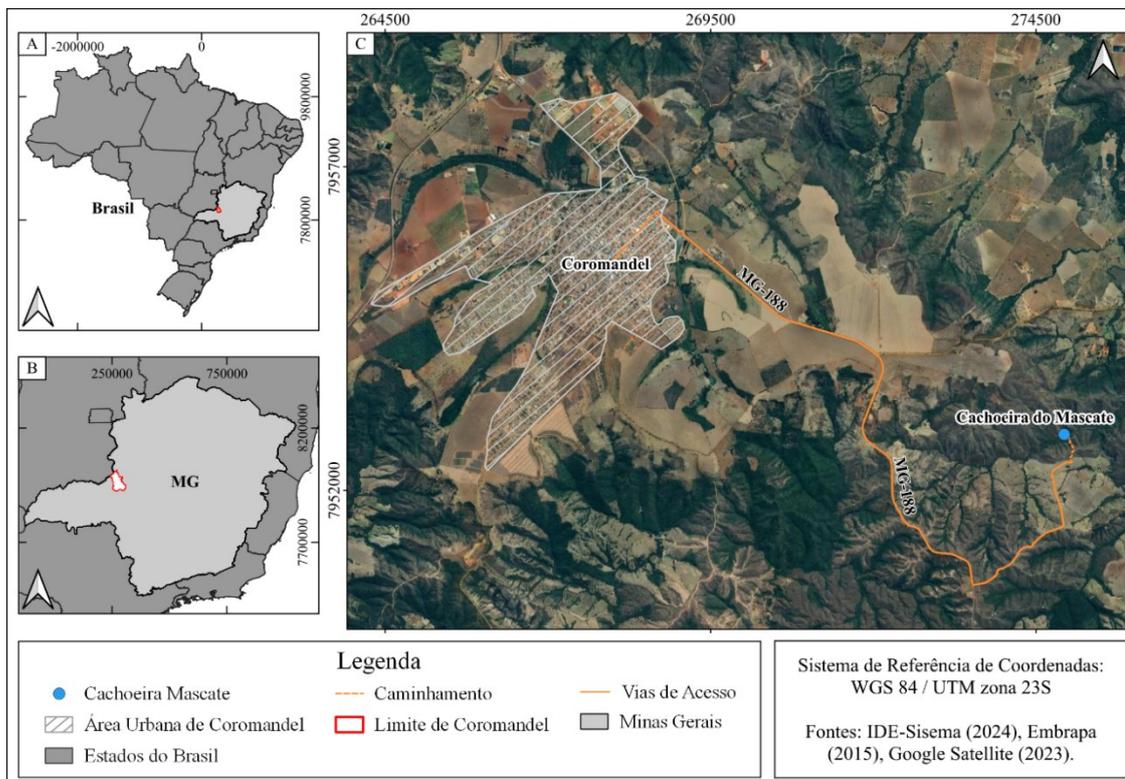
2. LOCALIZAÇÃO E ACESSO À CACHOEIRA DO MASCATE

A Cachoeira do Mascate está localizada no distrito-sede de Coromandel, município pertencente à Microrregião de Patrocínio, Mesorregião do Triângulo Mineiro-Alto Paranaíba, Minas Gerais (MG). As coordenadas geográficas da cachoeira são 18° 30' 09.9" S e 47° 07' 54.1" O, estando situada em altitude de 1003 metros acima do nível do mar.

A partir da zona urbana do município, o melhor trajeto a ser percorrido para se ter acesso à cachoeira é através da Rodovia MG-188, sentido Patrocínio, onde se percorre cerca de 9,8 km em estrada asfaltada (Figura 2C). Deve-se então seguir por estrada de terra por aproximadamente 3 km, sentido E-NE, até a entrada da Fazenda Mascate (Figura 1B). O tempo total aproximado de viagem em carro está estimado entre 20 e 30 minutos.

A partir desse ponto, é necessário percorrer trilha de nível médio, com rumo para o norte e distância aproximada de 590 metros até o topo da cachoeira e cerca de 160 metros até a base (Figura 3). Ao longo da trilha, os ganhos e perdas de elevação são de 15 e -54,9 metros, respectivamente, e a inclinação máxima durante a subida é de 17,3%, durante a descida é de 30,3% de acordo com os dados disponibilizados pelo *Google Earth*.

Figura 2: (A) Mapa do Brasil com destaque para o estado de Minas Gerais; (B) Localização do município de Coromandel em Minas Gerais; (C) Localização da Cachoeira do Mascate e sua principal via de acesso.



Fonte: Autor.

Figura 3: Trilha percorrida para acesso à cachoeira.



Fonte: Autor.

3. METODOLOGIA

A pesquisa de caracterização geológico-geotécnica para verificação de estabilidade e segurança da queda d'água foi dividida em etapas teóricas e práticas.

3.1. Revisão Bibliográfica

A consulta bibliográfica foi realizada ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso, e compreende o levantamento da literatura referente aos temas de interesse e sua leitura crítica. Atenção especial está sendo dada a estudos focados em análise de maciços rochosos, geologia local, análise cinemática e em dados climatológicos de onde estão situadas as cachoeiras.

3.2. Elaboração de banco de dados

Para a elaboração do SIG foram obtidos *shapefiles* disponíveis na plataforma da Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema) do Estado de Minas Gerais. Imagens do Satélite LANDSAT 8 foram obtidas no sítio eletrônico do Serviço Geológico Americano (*Unites States Geological Survey*). Todo o tratamento dos dados foi elaborado utilizando como Datum o Sistema de Referência de Coordenadas WGS 84 / UTM zona 23S. O SIG gerado possui acesso público e se encontra disponível a partir do link https://drive.google.com/drive/folders/1IV47HxQxY-6H1vVQAqclJo4-Uj3iN_Te?usp=sharing, contendo os *shapefiles* de localidades, limites geográficos, hidrografia, vias de acesso, DEM, composição RGB, mapas topográfico, relevo sombreado e de lineamentos estruturais em escala macroscópica.

3.3. Fotointerpretação

Com o intuito de auxiliar a análise geológico-geotécnica da Cachoeira do Mascate foi realizada uma fotointerpretação de lineamentos estruturais de escala regional, da geomorfologia e litologias em um perímetro de 10 km a partir da Cachoeira do Mascate. A interpretação dos lineamentos foi realizada em imagem de relevo sombreado e em escala 1:140.000. Para efetuar tal atividade, foi utilizado o software livre QGIS, versão 3.28.

3.4. Análise de Maciços Rochosos e rupturas

A análise geológico-geotécnica da Cachoeira do Mascate está sendo realizada com base nas classificações geotécnicas de Bieniawski (1989), Barton (1974), Rocha (1976), Palmström

(2005) e da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM). Anteriormente ao trabalho de campo, foi desenvolvida uma tabela (Tabela 1) a partir dos parâmetros geomecânicos de maciços rochosos propostos por Wyllie e Mah (2004). Os parâmetros analisados e tabelados incluem litotipo, número de famílias, orientação, espaçamento, abertura, persistência, intemperismo, preenchimento, percolação, rugosidade, grau de fraturamento e resistência da parede.

Tabela 1: Tabela utilizada em campo.

Descrição de maciço rochoso											
Litotipo	Nº de Famílias	Orientação	Espaçamento	Abertura	Persistência	Intemperismo	Preenchimento	Percolação	Rugosidade	Grau de fraturamento	Resistência

Fonte: Autor.

Os materiais utilizados em campo foram: caderneta de campo, martelo petrográfico, lupa de bolso com aumento de 30x, fita métrica, régua graduada, GPS e *smartphone* com aplicativo de bússola geológica (*FieldMove Clino*).

Previamente à análise geotécnica, procedeu-se com a descrição e identificação dos litotipos constituintes dos maciços rochosos aflorantes no topo e na base da cachoeira, bem como durante a trilha de acesso. Para tal, foram verificados os seguintes atributos: coloração, composição mineralógica, estrutura, textura, e grau de alteração.

Os dados obtidos em campo foram analisados de maneira qualitativa através dos métodos *Rock Quality Designation* (RQD) (Deere, 1963), *Rock Mass Rating* (RMR) (Bieniawski, 1973), Sistema Q (*Tunneling Quality Index*) (Barton, 1974) e GSI (*Geological Strain Index*) (Hoek *et al.*, 1994). A determinação das probabilidades de ruptura foi realizada através de análises cinemáticas no *software Stereonet*, versão 11.6.3, através dos métodos descritos por Hoek e Bray (1981) e Wyllie e Mah (2004). O Fator de Segurança (FS) foi calculado a partir do Método de Equilíbrio Limite (MEL), através da fórmula desenvolvida por Hoek e Bray (1981).

3.5. Análise de dados hidrogeológicos

A caracterização da estabilidade e segurança da cachoeira também consiste na avaliação da vazão das quedas d'água nas épocas de cheia e seca, em conjunto com seus atributos geomorfológicos como sua dimensão e formações regionais.

Os dados fluviométricos e pluviométricos foram obtidos através das séries históricas disponibilizadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RNH) da Agência Nacional de Águas (ANA). Foram utilizados dados das estações pluviométricas e fluviométricas mais próximas (Tabela 2), a estação pluviométrica é pertencente à Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) e a estação fluviométrica pertence ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). As estações citadas avaliam o comportamento das águas da bacia hidrográfica estadual Alto Rio Paranaíba (PN1), na qual as drenagens da Cachoeira do Mascate estão inseridas.

Tabela 2: Notação das estações (Disponível Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos [SNIRH]).

Tipo	Nome	Código de identificação
Estações Fluviométricas	Estação Ponte Vicente Goulart	60.012.000
Estação Pluviométrica	Estação Coromandel/ Buriti	1.847.047

Fonte: Autor.

Os dados hidrogeológicos se baseiam em estimativas que consideram a vazão determinada em campo, relacionada a informações disponibilizados publicamente, onde foram utilizados dados de probabilidade diária de precipitação e chuva mensal média em Coromandel e aplicando os dados de registros históricos, com o auxílio do software Hidro, versão 1.3, disponibilizado pela ANA, aos registros climatológicos da área, descritos a partir dos dados disponibilizados pelo sítio eletrônico *weatherspark.com*.

4. GEOLOGIA LOCAL

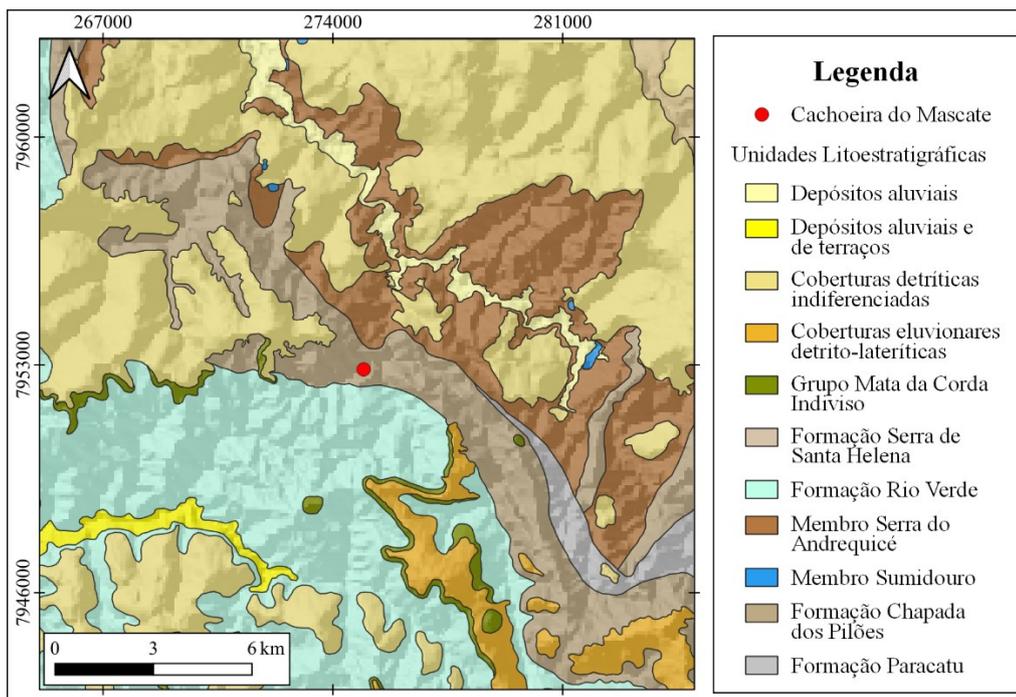
O município de Coromandel é formado por rochas pertencentes a três grandes unidades geotectônicas: o Cráton do São Francisco região oriental, a Faixa de Dobramentos Brasília e a Bacia Sanfranciscana. As rochas que constituem a Cachoeira do Mascate são atribuídas à Faixa de Dobramentos Brasília, mais especificamente na Zona Externa da Faixa Brasília (PINHO *et al.*, 2017).

A geologia de onde a Cachoeira do Mascate se localiza, apresenta rochas metassedimentares do Grupo Canastra e do Grupo Ibiá, com diversidade cronoestratigráfica neoproterozoica, do toniano ao edicariano respectivamente (PINHO *et al.*, 2017). Estratigraficamente, o Grupo Ibiá está sobreposto ao Grupo Canastra (Figura 5).

Durante a elaboração dos dados geológicos foi utilizada a base geológica as folhas Coromandel (SE.23-Y-A-II), de 2013 e Folha Monte Carmelo (SE.23-Y-A-V), de 2015, ambas em escala 1:100.000, elaboradas pelo Serviço Geológico do Brasil (SBG), com isso, foi desenvolvido um mapa geológico com uma área de 20 km², com o intuito de visualizar as principais litologias próximas à cachoeira (Figura 4).

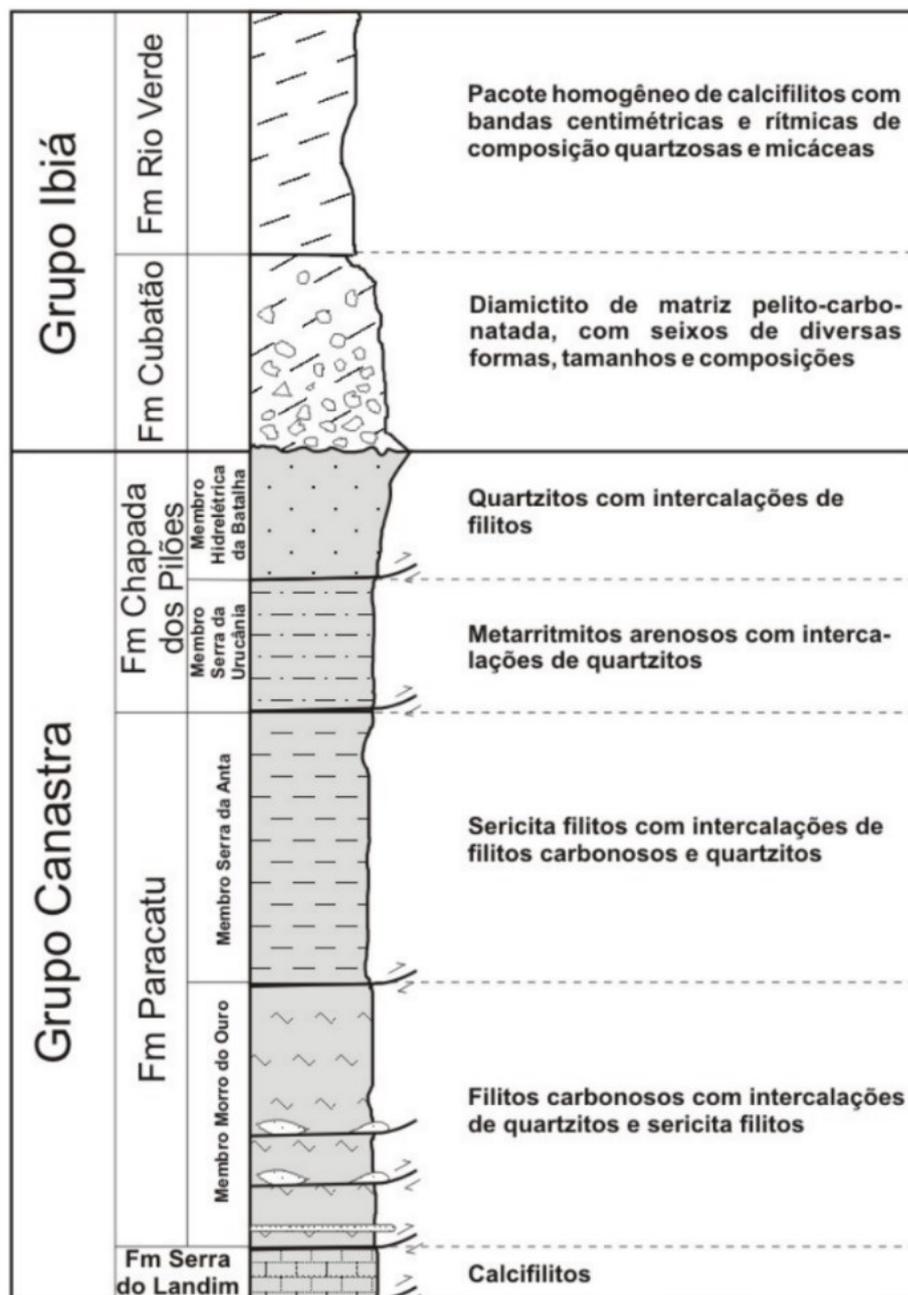
De acordo com Pinho *et al.* (2017), as rochas do Grupo Canastra presentes no local, são do Membro Hidrelétrica da Batalha, pertencente à Formação Chapada dos Pilões (Figura 4), na Zona Externa da Faixa Brasília. Essa unidade é majoritariamente constituída por quartzitos esbranquiçados, de granulação fina a média, bandados, foliados e laminados (PINHO *et al.*, 2017). Sericita filitos, filitos carbonosos e quartzitos ferruginosos ocorrem intercalados (PINHO *et al.*, 2017). A sul da cachoeira, em contato por falha com a Formação Chapada dos Pilões, afloram metarritmitos, filitos e xistos da Formação Rio Verde (Figura 4) (PINHO *et al.*, 2017). Nos sentidos norte e leste da cachoeira, afloram principalmente siltitos e siltitos carbonosos com lentes de quartzito intercaladas, atribuídos ao Membro Serra do Andrequicé da Formação Serra do Garrote (Figura 4) (PINHO *et al.*, 2017).

Figura 4: Mapa geológico com Cachoeira do Mascate no centro.



Fonte: Autor.

Figura 5: Coluna estratigráfica do Grupo Canastra (modificado de Dardenne, 2000 e Pereira, 1992), segundo Rodrigues (2008).



Fonte: Pinho *et al.* 2017.

4.1. Contexto Geomorfológico

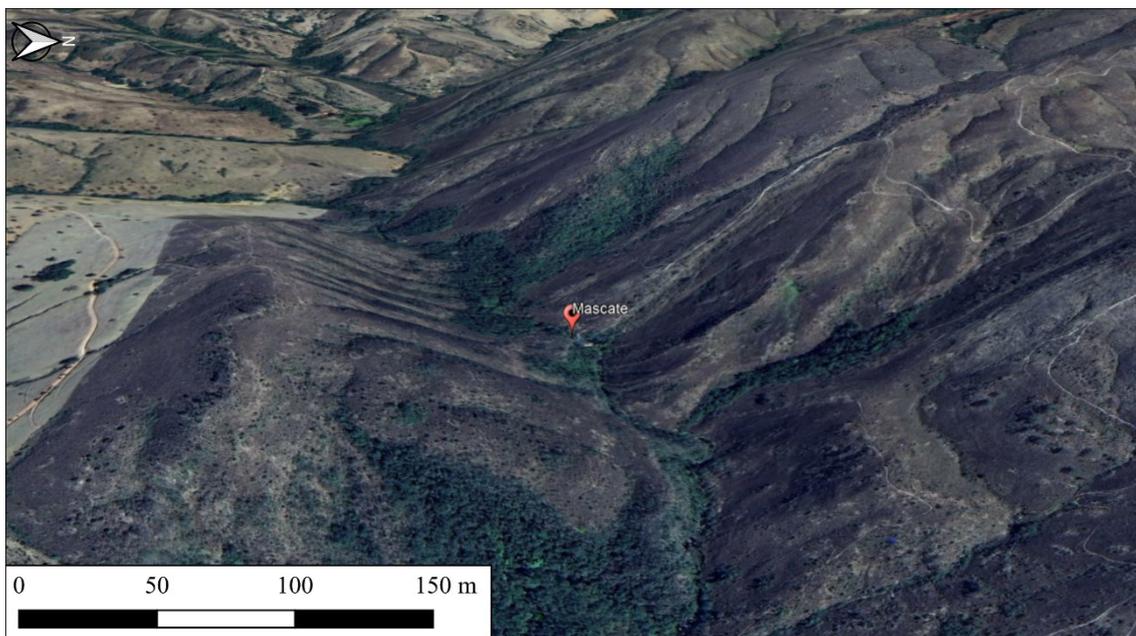
Segundo Pinho *et al.* (2017), no geral, o material geológico da área tende a gerar relevos íngremes a abaulados, com comum peneplanação, ravinamento e formação de superfícies lateríticas. A drenagem tende a possuir padrão dendrítico, com influências tectônicas. O solo

tende a ser arenoso, de granulometria fina a siltosa. A vegetação é principalmente do tipo campo limpo, ocorrendo localmente os cerrados e matas galerias.

Na região próxima à Cachoeira do Mascate, como é indicado pela Figura 4, afloram principalmente rochas parametamórficas, que tendem a apresentar características mais frágeis por derivar de material pelítico ou arenoso. Na Figura 7, captadas pelo programa *Google Earth*, está representado o relevo da área da Cachoeira do Mascate, em visada para oeste e exagero altimétrico de 2 vezes, facilitando a visualização dos pontos onde as cachoeiras se localizam em relação ao relevo e estruturas geológicas de escala regional.

Pode ser observado a partir da Figura 7 a geomorfologia da área. De acordo com os dados disponibilizados pelo IDE-Sisema (baseado em registros do IBGE), a área apresenta relevos de planaltos caracterizados pela dissecação homogênea ou diferencial e topos convexos. A drenagem que forma a queda d'água da Cachoeira do Mascate é denominada pelo IDE-Sisema como Córrego Mascote.

Figura 6: Imagem de satélite com visada para oeste, mostrando a localização da Cachoeira do Mascate.



Fonte: *Google Earth* (Acesso em 04/2024).

5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O processo de caracterização e avaliação de queda d'água exigiu uma revisão de conteúdos teóricos para fazer a verificação adequada da geológica local de acordo com dados históricos e para definir a aplicação correta de cálculos geotécnicos à Cachoeira do Mascate.

5.1. Cachoeiras

De acordo com o Dicionário Geológico-Geomorfológico (Guerra, 1993), cachoeiras podem ser definidas como quedas d'água no curso de um rio formadas pela existência de um degrau ao longo de seu perfil longitudinal. Os desníveis ao longo dos leitos de rios estão relacionados a presença de falhas, dobras, erosão diferencial, diques, dentre outras feições e estruturas (Guerra, 1993).

De acordo com Bennett (2016), cachoeiras são tipicamente formadas devido à diferença de elevação em locais onde se passa a drenagem e seu desenvolvimento está associado à erosão diferencial, passando constantemente por quatro estágios descritos abaixo e ilustrados pela Figura 6:

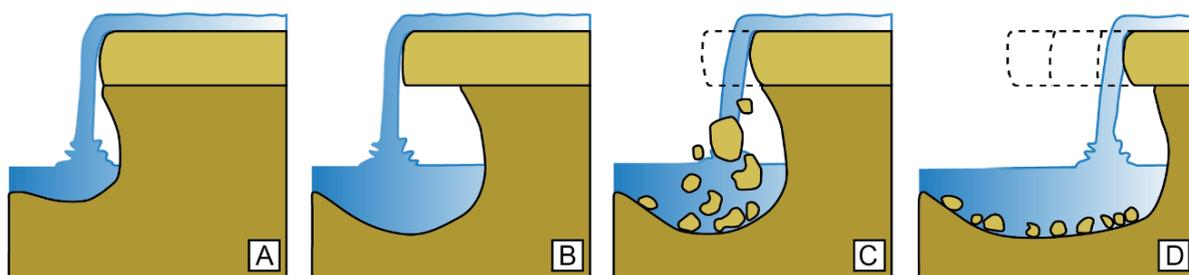
A: Se formam nos estágios superiores de um rio. Ocorrem onde um pacote de rochas duras sobrepõem a rochas menos resistentes. A queda de água e pedaços de rochas desgastam a rocha menos resistente abaixo da cachoeira, criando uma piscina imersiva;

B: A rocha menos resistente é solapada por processos erosivos, como ação hidráulica e abrasão, criando uma piscina onde a água e os detritos circulam, erodindo a rocha por desgaste, aprofundando ainda mais e criando uma saliência;

C: A saliência de rocha dura acima da piscina de imersão desmorona, pois seu peso não é mais suportado;

D: A erosão avança e a cachoeira recua à montante, formando um desfiladeiro.

Figura 7: Diagrama de formação e erosão de cachoeiras.



Fonte: Bennett (2016). (modificado).

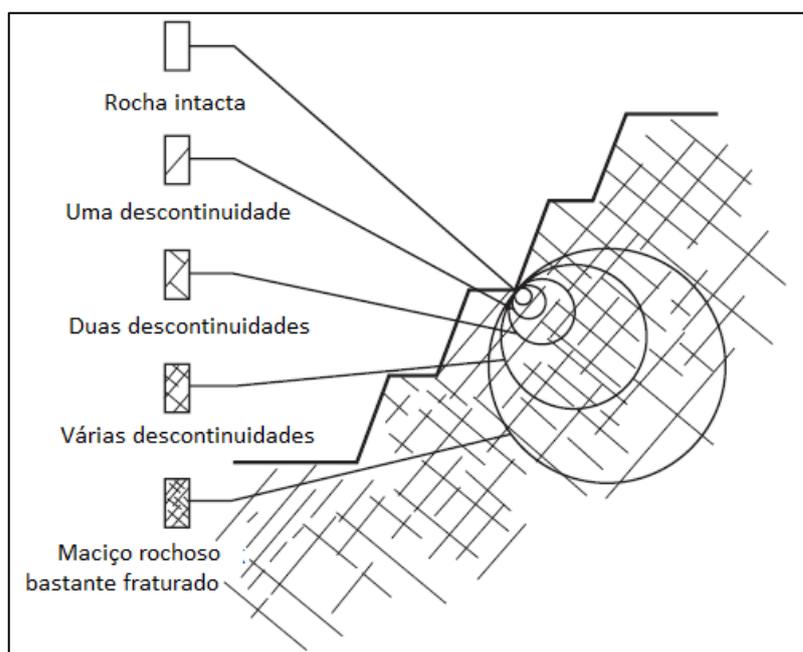
5.2. Maciços rochosos e discontinuidades

Maciços rochosos são formados por uma combinação de blocos de rocha intacta separados por diferentes tipos de planos de fraqueza, ou discontinuidades geológicas, as discontinuidades compreendem juntas, falhas, fraturas, contatos litológicos, acamamento

sedimentar, foliações ígneas e metamórficas, dentre outras feições e estruturas (Bieniawski, 1989). As descontinuidades ocorrem em diferentes escalas, variando desde milimétricas a quilométricas (Hoek, 2002) (Figura 8). Portanto, a análise de maciços rochosos deve ser efetuada considerando-se tanto as características da rocha intacta quanto das descontinuidades presentes. Cabe ressaltar que, para rochas que apresentam planos de fraqueza, as propriedades da rocha intacta são geralmente “ofuscadas” pelas propriedades das descontinuidades. Nesse sentido, a resistência mecânica e deformabilidade de um maciço rochoso é fundamentalmente dependente da presença de descontinuidades no maciço rochoso (Bieniawski, 1989).

A avaliação destes maciços rochosos, neste estudo, ocorre em um talude de uma cachoeira. Gerscovich (2016) define o termo talude como sendo qualquer superfície inclinada ao horizonte, composta por uma massa de solo ou rocha ou a junção de ambos, de origem natural, denominado encosta, ou construído pelo homem.

Figura 8: Representação do feito escala desde a rocha intacta até maciço rochoso bastante fraturado.



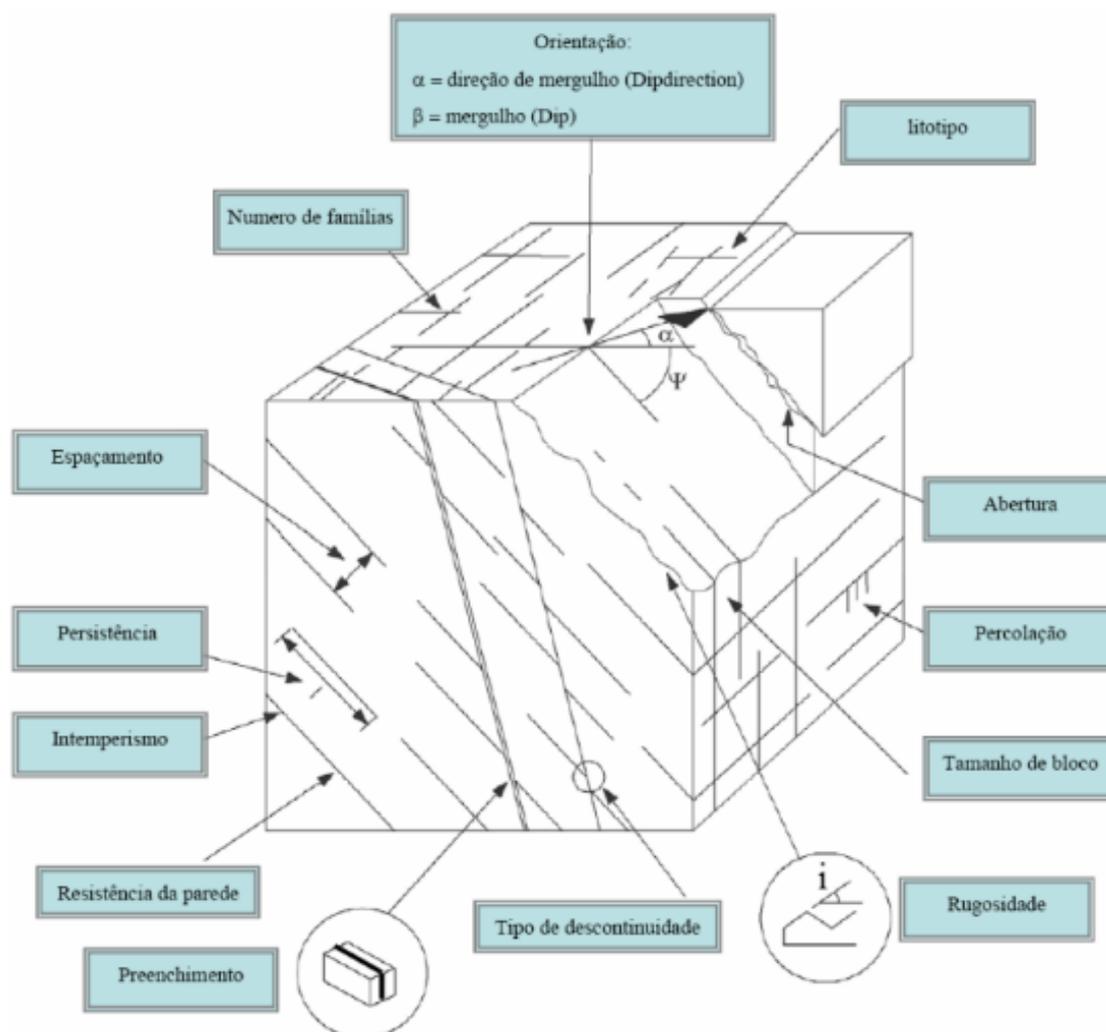
Fonte: Hoek (2002).

A descrição das feições geológico-geotécnicas foi realizada por meio de índices característicos, como (i) rocha, (ii) descontinuidades, e (iii) maciço rochoso. Os três itens são interligados e estão associados ao tipo litológico, estruturas, mineralização, grau de alteração e resistência. Em geociências, deformação significa “a mudança de forma, posição e/ou orientação como o resultado de forças externas” (Fossen, 2012), sendo um importante fator na análise de maciços rochosos.

A caracterização de uma rocha intacta envolve a descrição litológica, combinada com seus graus de alteração e coerência, que por sua vez são influenciados pela ação intempérica. A estimativa do grau de alteração da rocha foi realizada a partir de análise tátil e visual das condições de friabilidade, brilho e cor dos minerais e da rocha conforme as recomendações da Sociedade Internacional de Mecânica de Rochas (1981).

Foi considerado na análise as tensões atuantes, desta forma, as alterações causadas a maciços rochosos foram classificadas em escalas de potencial de riscos e periculosidade. Na Figura 9, são ilustradas algumas das características avaliadas durante o trabalho do estudo geológico-geotécnico das rochas da Cachoeira do Mascate, o litotipo, definido pela origem da rocha, mineralogia, cor e tamanho do grão; a orientação, expressada pelas medidas de direção de mergulho e mergulho de superfícies; número de famílias, onde o número de famílias de descontinuidades que se intersectam influencia na deformação que a rocha suporta até que as falhas se movimentem; espaçamento, em que o espaçamento entre as descontinuidades indica a estabilidade e resistência; persistência, sendo a distância percorrida por uma descontinuidade; abertura, sendo a distância perpendicular entre as paredes rochosas adjacentes; percolação, que informa sobre a abertura por infiltração nas descontinuidades; tamanho do bloco, cujas dimensões são determinadas pelo espaçamento e persistência das descontinuidades e o número de famílias; rugosidade, descrita por uma combinação de características, como a ondulação, aspereza e polimento, por exemplo; resistência da parede, sendo a resistência às tensões do cisalhamento nos pontos de contato; preenchimento, termo para o material entre as paredes rochosas adjacentes; tipo de descontinuidade, que varia juntas de tensão até falhas com vários metros de espessura e comprimento; e intemperismo, representado pela redução de resistência da rocha que também reduz a resistência ao cisalhamento (Wyllie; Mah, 2004).

Figura 9: Parâmetros geomecânicos de descrição de maciço rochoso.

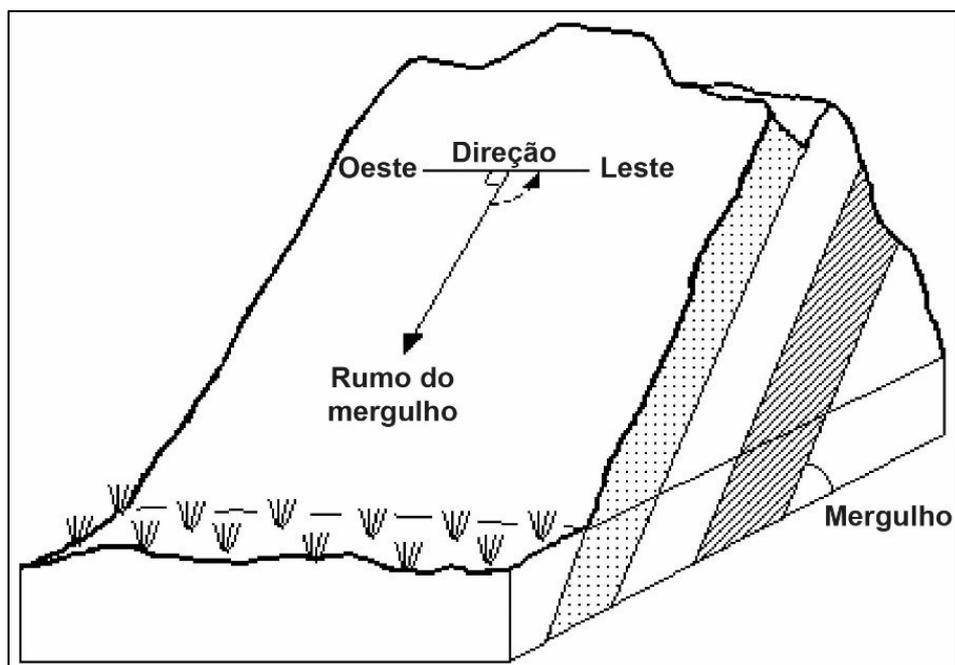


Fonte: Wyllie; Mah (2004).

Os principais parâmetros das descontinuidades utilizados na caracterização geológico-geotécnica de maciços rochosos conforme a *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering* (ISRM) (1978) são:

- **Orientação:** atitude do plano da descontinuidade. Com auxílio de bússola geológica mede-se a direção do mergulho (*dip direction*) e o mergulho (*dip*) da descontinuidade (Figura 10). A diferença nas direções medidas foi o principal parâmetro utilizado para determinar as diferentes famílias de descontinuidades;

Figura 10: Imagem ilustrativa da atitude a ser medida.



Fonte: Hoek (2002).

- Espaçamento ou frequência: distância entre duas descontinuidades adjacentes e com mesma orientação (Figura 11). A distância deve ser medida ao longo de uma linha de varredura (*scanline*) ou de um testemunho de sondagem. A Tabela 3 apresenta as categorias de espaçamentos propostas pela ISRM;

Tabela 3: Descrição do espaçamento das descontinuidades.

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

Fonte: Adaptado de ISRM (1978).

- Persistência ou extensão: extensão percorrida por uma descontinuidade medida em um plano. A persistência pode variar de muito baixa a muito alta. Suas categorias são apresentadas na Tabela 4

Tabela 4: Descrição da persistência.

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

Fonte: Adaptado de ISRM (1978).

- **Abertura:** é a distância média perpendicular que separa duas paredes adjacentes de descontinuidades com mesma orientação (Figura 11). Podem estar preenchidas por água, ar ou materiais diversos. Um mesmo maciço rochoso pode apresentar descontinuidades com diferentes aberturas. A Tabela 5 apresenta os principais tipos de aberturas descritos.

Tabela 5: Descrição de abertura.

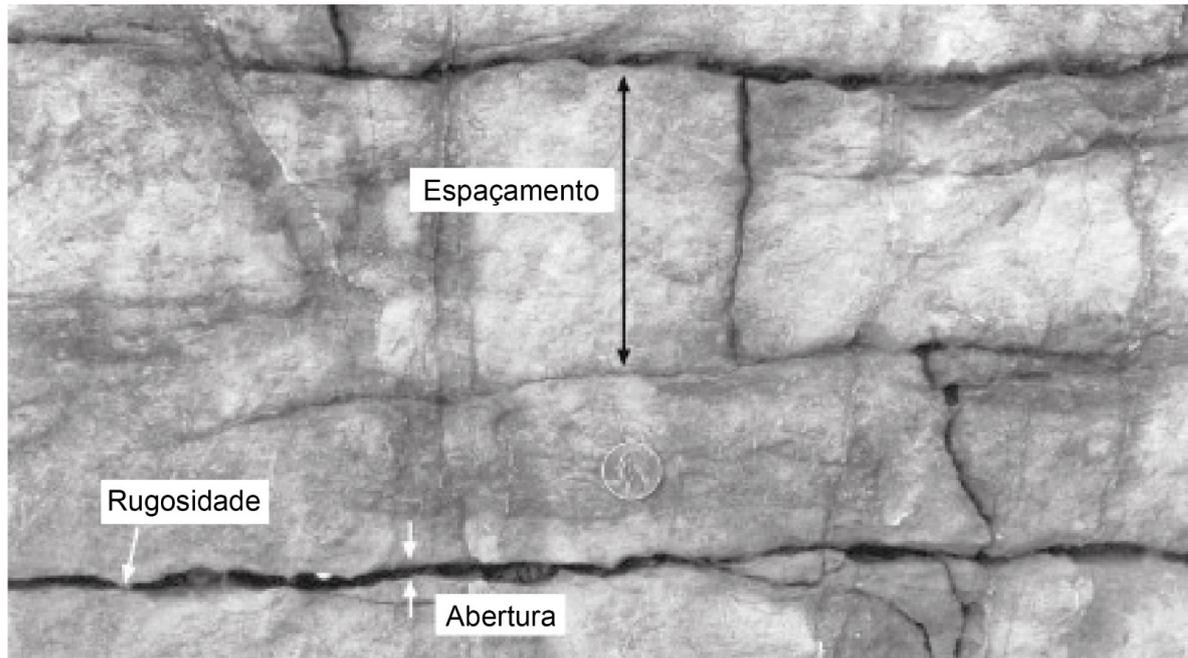
Descrição	Abertura (mm)
Muito fechada	< 0,1
Fechada	0,1 – 0,25
Parcialmente aberta	0,25 – 0,5
Aberta	0,5 – 2,5
Cavernosa	> 10000

Fonte: Adaptado de ISRM (1978).

- **Preenchimento:** material que ocorre preenchendo total ou parcialmente as paredes das descontinuidades. É geralmente composto por materiais de granulometria variada, desde argila a matacão. Portanto, o material de preenchimento pode ser mais ou menos resistente que a rocha intacta. Quando o preenchimento é por material argiloso-siltoso, material geralmente é mais brando que a rocha. Porém, por vezes, cascalhos de rochas mais resistentes podem ocorrer preenchendo descontinuidades (i.e., clastos de gnaiss de tamanho seixo preenchendo descontinuidades com aberturas decimétricas em maciço rochoso formado por rochas sedimentares). As descontinuidades podem também estar preenchidas por material orgânico e/ou vegetal;

- **Rugosidade:** irregularidades e ondulações presentes na superfície das descontinuidades. A rugosidade determina a resistência ao cisalhamento das descontinuidades. Quando as descontinuidades ocorrem fechadas, a rugosidade aumenta a resistência ao cisalhamento; ao passo que com o aumento das aberturas e consequente preenchimento, a rugosidade exerce menor influência na resistência ao cisalhamento (Figura 11);

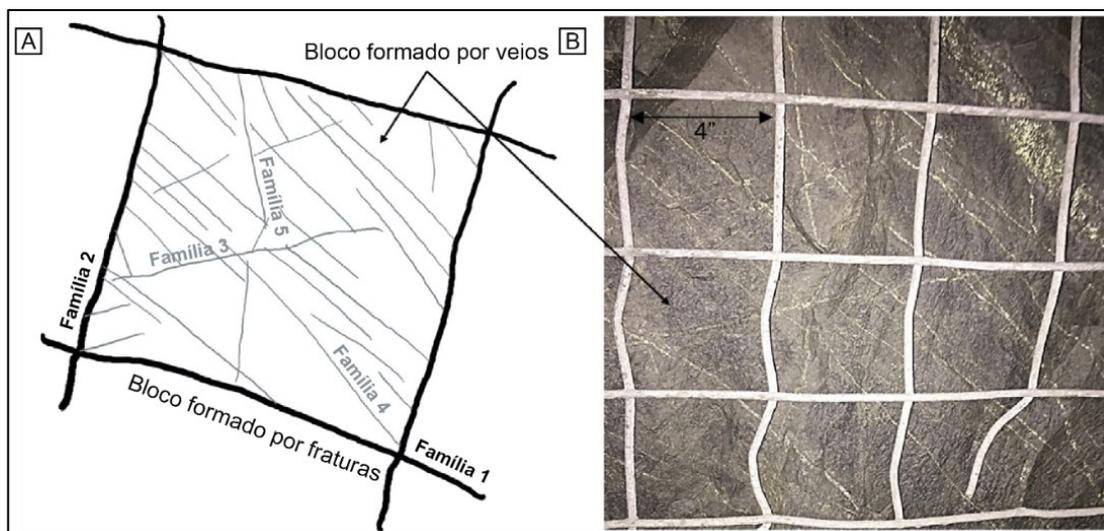
Figura 11: Representação do espaçamento, rugosidade e abertura de descontinuidades.



Fonte: Retirado de Kresic e Stevanovic (2009) (modificado).

- **Percolação:** representa o grau de saturação ou a presença de fluxo de água ou umidade ao longo das descontinuidades;
- **Número de famílias:** cada família é um conjunto de descontinuidades com a mesma orientação e gênese (Figura 12);

Figura 12: Maciço rochoso com blocos articulados delimitados contendo heterogeneidades em forma de descontinuidades divididas em famílias.



Fonte: Bewick R. P; Kaiser P K; Amann.F (2019).

- Grau de fraturamento: representa a quantidade de descontinuidades por metro linear ao longo de uma face do maciço rochoso. Os diferentes graus de fraturamento são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Descrição do grau de fraturamento.

Descrição	Número de fraturas por metro
Ocasionalmente Fraturado	< 1
Pouco fraturado	1 – 5
Medianamente fraturado	6 – 10
Muito fraturado	11 – 20
Extremamente fraturado	> 20

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

- Resistência da parede: Sendo a estimativa de resistência da rocha intacta às tensões do cisalhamento nos pontos de contato, realizadas a partir do teste do martelo de geólogo (Tabela 7), de acordo com as recomendações propostas pela *International Society for Rock Mechanics* (ISRM);

Tabela 7: Grau de resistência da rocha.

Descrição	Características	Resistência à compressão uniaxial (MPa)
Solos estruturados e rijos a rochas muito brandas	Penetrada pela ponta do dedo polegar; moldada pelas mãos; facilmente penetrada pelo canivete e martelo de geólogo; escavada por equipamento manual.	0,25 – 1
Rochas muito brandas	Esmigalha-se facilmente sob o impacto de martelo de geólogo; riscada facilmente pela ponta fina do martelo de geólogo; riscada e raspada facilmente pelo canivete; deslocamentos ao longo da foliação sob pressão dos dedos; bordas dos fragmentos facilmente quebradas pela pressão dos dedos; pequenos fragmentos (2 X 2 X 2 cm) não quebram sob pressão dos dedos; escavação mecanizada	1 – 5
Rochas brandas	Quebra-se sob único impacto do martelo; cavidade rasa sob impacto firme da ponta fina do martelo de geólogo; as bordas dos fragmentos podem ser quebradas pela pressão dos dedos; a lâmina do canivete provoca sulco acentuado na superfície do fragmento; podem ser raspadas pelo canivete; escavação por equipamentos mecanizados, exigindo em alguns casos, fogo de afrouxamento do maciço	5 – 25

Rochas mediamente resistentes	Espécimes de mão podem ser quebrados sob poucos golpes firmes do martelo de geólogo; bordas finas dos fragmentos podem ser quebradas pelas mãos com certa dificuldade; superfície pouco riscável por lâmina de aço; não pode ser raspada pelo canivete; escavada por desmonte a fogo	25 – 50
Rochas resistentes	Espécimes de mão requerem alguns golpes do martelo para serem quebrados; bordas dos fragmentos dificilmente quebradas pelas mãos; superfície dificilmente riscada pelo canivete; escavada por desmonte a fogo	50 – 100
Rochas muito resistentes	Espécimes de mão requerem muitos golpes do martelo para serem quebrados; fragmentos possuem bordas cortantes que resistem ao corte por lâmina de aço; superfície praticamente não riscada pelo canivete; escavada por desmonte a fogo	100 – 250
Rochas extremamente resistentes	Espécimes somente lascados com o uso do martelo	> 250

Fonte: Adaptado de ISRM (1978).

Os resultados gerados pela avaliação deste trabalho passaram por análises qualitativas, definidas como RQD (Proposto por Deere [1963]), RMR (elaborado por Bieniawski [1973]), Sistema Q (proposto por Barton *et al.* [1974]) e GSI (idealizado por Hoek *et al.* [1994]), descritas a seguir.

5.2.1. RQD

O RQD (*Rock Quality Designation*) é um índice quantitativo que descreve a qualidade do maciço rochoso (Tabela 8). É determinado a partir da Equação 1, proposta por Palmström (2005):

Equação 1: $RQD = 110 - 2,5J_v$

Para a determinação do contador volumétrico de juntas (J_v) (Palmström, 1982) foram utilizados os espaçamentos médios das famílias de descontinuidades (S_i) com base na Equação 2:

Equação 2: $J_v = \sum \frac{1}{S_i}$

Tabela 8: Classificação de qualidade do maciço rochoso a partir do RQD.

Classe	Qualidade da rocha	RQD (%)
I	Muito ruim	< 25
II	Ruim	25 – 50
III	Regular	50 – 75
IV	Bom	75 – 90
V	Excelente	90 – 100

Fonte: Adaptado de Deere (1989).

5.2.2. RMR

O RMR (*Rock Mass Rating*) é um sistema de classificação para maciços rochosos (Tabela 9), realizada de acordo com Bieniawski (1989) com base nos seguintes parâmetros:

- I. Resistência da rocha intacta;
- II. RQD;
- III. Espaçamento médio das descontinuidades;
- IV. Condições das descontinuidades;
- V. Condições de fluxo de água e;
- VI. Orientação das descontinuidades e mergulho.

Tabela 9: Classificação de maciços rochosos segundo o sistema RMR.

Parâmetros			Coeficientes						
1	Resistên- cia da rocha intacta	Point Load	>10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Ver compressão uniaxial		
		Compres- são uniaxial	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5- 25 MP a	1-5 MP a	<1 MP a
	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	8	5		
4	Condições das descontinuidades		Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas	Superfícies ligeiramen- te rugosas, separação <1 mm, paredes ligeiramen- te alteradas	Superfícies ligeiramen- te rugosas, separação <1 mm, parede muito alterada	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 compr- imento 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	Completa- mente seco	Água intersticial	Húmido	Escoamen- tos	Entrada de água
	Pesos	15	10	7	4	0
Classificação do maciço rochoso						
	Somatório	100 – 81	80 – 61	60 – 41	40 – 21	< 21
	Classe	I	II	III	VI	V
	Descrição da rocha	Muito boa	Boa	Razoável	Pobre	Muito pobre

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

5.2.3. Sistema Q

Q (*Tunneling Quality Index*) é a avaliação do maciço rochoso por meio de seis parâmetros que estão agrupados em três quocientes multiplicados entre si. São eles:

- I. RQD (Equação 1);
- II. Número de famílias de descontinuidades (J_n) (Tabela 10);
- III. Índice de rugosidade das descontinuidades (J_r) (Tabela 11);
- IV. Grau de alteração das descontinuidades (J_a) (Tabela 12);
- V. Fator de redução de água (J_w) (Tabela 13) e;
- VI. Estado de tensão do maciço (SRF) (Tabela 14).

O cálculo do Sistema Q está representado pela Equação 3, cujo resultado pode ser classificado de acordo com a Tabela 15:

Equação 3:
$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Tabela 10: Valores de J_n .

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

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

Tabela 11: Valores de J_r no sistema Q.

Condição de rugosidade das paredes	Valores de J_r
Fraturas não-persistentes	4
Fraturas rugosas ou irregulares, onduladas	3
Fraturas lisas, onduladas	2
Fraturas polidas, onduladas	1,5
Fraturas rugosas ou irregulares, planas	1,5
Fraturas lisas, planas	1
Fraturas polidas ou estriadas, planas	0,5
Fratura com minerais argilosos. (Sem contato rocha-rocha com afastamento >10 cm)	1
Zonas esmagadas. (Sem contato rocha-rocha com afastamento >10 cm)	1

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

Tabela 12: Valores de J_a no sistema Q.

Condição de alteração das paredes	Valores de J_a
Paredes duras, preenchimentos impermeáveis (quartzo ou epidoto). (Contato rocha-rocha)	0,75

Paredes sem alteração, somente leve descoloração ($\phi = 25 - 35^\circ$). (Contato rocha-rocha)	1
Paredes levemente alteradas, com partículas arenosas e rochas desintegradas não-argilosas ($\phi = 25 - 35^\circ$). (Contato rocha-rocha)	2
Paredes Paredes com películas siltosas ou areno-argilosas ($\phi = 20 - 35^\circ$). (Contato rocha-rocha)	3
Paredes com películas de materiais moles ou com baixo ângulo de atrito (caolinita, clorita, talco, grafita, etc.) e pequena quantidade de minerais expansivos ($\phi = 8 - 16^\circ$). (Contato rocha-rocha)	4
Paredes com partículas de areia e rochas desintegradas, sem argila ($\phi = 25 - 35^\circ$). (Contato rocha-rocha com deslocamento relativo de até 10 cm)	4
Fraturas com preenchimento argiloso sobreconsolidado (espessura < 5 mm) ($\phi = 16 - 24^\circ$). (Contato rocha-rocha com deslocamento relativo de até 10 cm)	6
Fraturas com preenchimento argiloso subconsolidado (espessura < 5 mm) ($\phi = 12 - 16^\circ$). (Contato rocha-rocha com deslocamento relativo de até 10 cm)	8
Fraturas com preenchimento argiloso expansivo (espessura < 5 m) ($\phi = 12 - 16^\circ$). (Contato rocha-rocha com deslocamento relativo de até 10 cm)	8 - 12
Zonas com rochas trituradas ou esmagadas, com argila ($\phi = 6 - 24^\circ$). (Sem contato rocha-rocha)	6 - 8 ou 8 - 12
Zonas siltosas ou areno-argilosas com pequena quantidade de argila. (Sem contato rocha-rocha)	5

Zonas ou bandas contínuas de argila ($\phi = 6 - 24^\circ$). (Sem contato rocha-rocha)	10 – 13 ou 13 - 20
------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

Tabela 13: Valores de J_w no sistema Q.

Condição de afluência de água	Valores de J_w	Pressão de água (kg/cm ²)
Escavação a seco ou com pequena afluência de água (< 5 l/m)	1,0	< 1
Afluência média da água com lavagem ocasional do preenchimento das fraturas	0,66	1,0 – 2,5
Afluência elevada em rochas competentes, sem preenchimento das juntas	0,5	2,5 – 10
Afluência elevada com considerável lavagem do preenchimento das fraturas	0,33	2,5 – 10
Afluência excepcionalmente elevada (ou jatos de pressão), decaindo com o tempo	0,2 – 0,1	> 10
Afluência excepcionalmente elevada (ou jatos de pressão), sem decaimento com o tempo	0,1 – 0,05	> 10

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

Tabela 14: Valores de SRF no sistema Q.

Condições das tensões dos maciços	SRF
Zonas alteradas	
Ocorrência de múltiplas zonas alteradas contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade qualquer)	10
Zona alterada contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade da escavação ≤ 50 m)	5
Zona alterada contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade da escavação > 50 m)	2,5
Múltiplas zonas esmagadas em rocha competente, sem argila (profundidade qualquer)	7,5

Zona esmagada em rocha competente, sem argila (profundidade da escavação $\leq 50\text{m}$)	5
Zona esmagada em rocha competente, sem argila (profundidade da escavação $> 50\text{m}$)	2,5
Fraturas abertas, fraturamento muito intenso (profundidade qualquer)	5
Rocha competente, problemas de tensões de rocha	
Tensões baixas, próximas à superfície ($\sigma_c/\sigma_1 < 200$)	2,5
Tensões médias ($\sigma_c/\sigma_1 = 200$ a 10)	1
Tensões altas ($\sigma_c/\sigma_1 < 10$ a 5)	0,5 – 2
Explosões moderadas de rochas ($\sigma_c/\sigma_1 < < 5$ a 2,5)	5 – 10
Explosões intensas de rochas ($\sigma_c/\sigma_1 < 2,5$)	10 – 20
Rochas incompetentes (comportamento plástico devido aos tipos de deformações)	
Tensões moderadas	5 – 10
Tensões elevadas	10 – 20
Rochas expansivas (atividade expansiva na presença de água)	
Pressão de expansão moderada	5 – 10
Pressão de expansão elevada	10 – 15

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

Tabela 15: Classificação do maciço rochoso no Sistema Q.

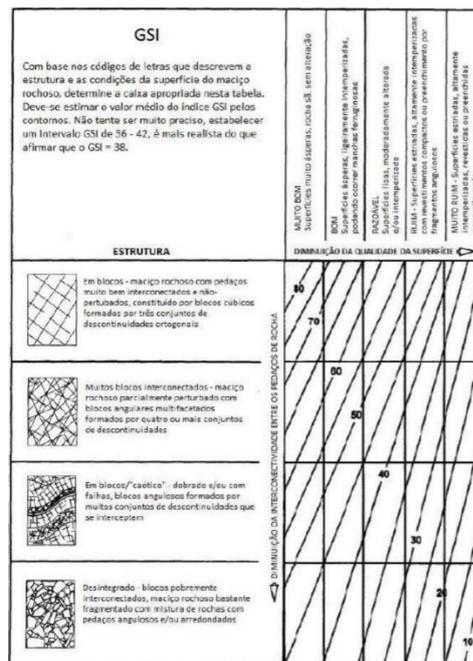
Classe	Padrão geomecânico do maciço	Valores de Q
IX	Péssimo	0,0001 – 0,01
VIII	Extremamente ruim	0,01 – 0,1
VII	Muito ruim	0,1 – 1
VI	Ruim	1 – 4
V	Regular	4 – 10
IV	Bom	10 – 40
III	Muito bom	40 – 100
II	Ótimo	100 – 400
I	Excelente	> 400

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

5.2.4. GSI

O GSI (*Geological Strength Index*) é um sistema usado para estimar as propriedades mecânicas do maciço rochoso e a redução da resistência de uma rocha intacta, o resultado é obtido a partir do ábaco da Figura 13.

Figura 13: Ábaco para obtenção de valores do GSI.



Fonte: Santos (2015).

5.3. Análise Cinemática

Diversos estudos demonstram que rochas duras possuem uma elevada resistência, onde a ruptura por influência da gravidade, só é possível, caso a descontinuidade permita o movimento de massa sobre a sua superfície formada (Silva, 2013).

Descontinuidades são definidas por Priest (1993) como qualquer quebra mecânica significativa ou fratura de baixa resistência à tensão presente em um maciço rochoso. Esta definição pode ser interpretada como um plano de fraqueza na rocha, que a torna um plano descontínuo. Esta característica influencia a estabilidade da rocha, pois as descontinuidades favorecem a ocorrência de uma ruptura ao longo dessa superfície descontínua.

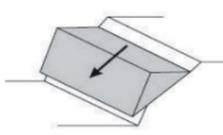
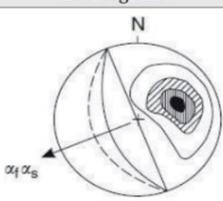
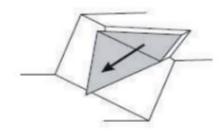
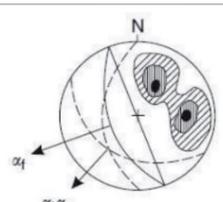
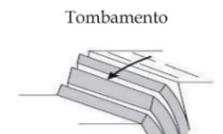
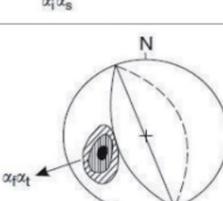
O termo cinemática, refere-se ao estudo do movimento sem haver uma preocupação com as forças que o fazem se mover. A partir dessa abordagem, a análise cinemática visa avaliar qualitativamente os prováveis modos de ruptura do talude rochoso (Silva, 2013).

Um dos primeiros passos antes da realização de análises cinemáticas, é a obtenção da orientação das discontinuidades e do talude para que, posteriormente, essas orientações sejam plotadas em um estereograma e, possa ser dada sequência a interpretação de suas condições cinemáticas (Wyllie, 2017). Foi determinado por Hoek e Bray (1977) e Goodman (1989), que a inclinação destas medidas favorece diretamente no movimento de massa para um dado modo de ruptura, tornando necessária as avaliações qualitativas de taludes rochosos.

No presente estudo, foram identificados três modos de ruptura que influenciam a Cachoeira do Mascate, sendo elas as rupturas planar, em cunha e tombamento (representados na tabela 16). Nestes três modos de ruptura, a orientação da superfície descontínua em relação à face livre do talude, desempenha um papel bastante importante nas condições de estabilidade (Goodman, 1989).

As rupturas são representadas por estereogramas individualmente, a partir da projeção do talude da cachoeira, as discontinuidades medidas e seus polos (Tabela 16). Cada tipo de ruptura possui uma zona crítica na projeção estereográfica, que aponta as discontinuidades que estão em uma posição espacial que favorece a ocorrência da ruptura, descritas nos tópicos 5.3.1, 5.3.2 e 5.3.3.

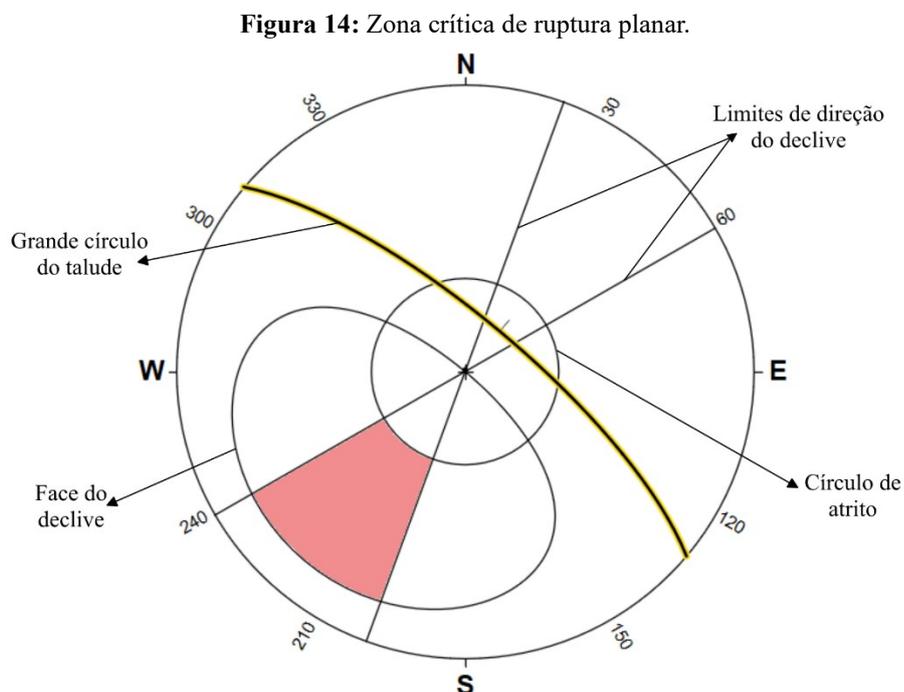
Tabela 16: Tipos de ruptura e condições de instabilidade.

Tipo de Ruptura	Estereograma	Condições Estruturais
<p>Planar</p> 		<ul style="list-style-type: none"> - Descontinuidade apresenta ângulo de mergulho menor que o do talude e direção paralela à face do talude. - Mergulho da descontinuidade maior que o ângulo de atrito.
<p>Em Cunha</p> 		<ul style="list-style-type: none"> - Direção da intersecção dos planos de descontinuidade próxima da direção do mergulho do talude. - O mergulho da intersecção menor que o mergulho do talude e maior que o ângulo de atrito.
<p>Tombamento</p> 		<ul style="list-style-type: none"> - Rocha resistente contendo descontinuidades com mergulho alto para dentro do talude. - Normal ao plano de tombamento com mergulho menor que a inclinação do talude e menor que o ângulo de atrito
<p>Legenda:</p>  Concentração dos polos  Grande círculo representando a face do talude  Grande círculo representando as descontinuidades.		<p>α_f Direção do mergulho da face do talude α_s Direção de deslizamento α_t Direção de tombamento α_i Direção do mergulho da linha de intersecção</p>

5.3.1. Ruptura planar

A ruptura planar é um tipo de movimento de massa que ocorre sobre uma superfície descontínua perpendicular à face livre do talude, essa superfície forma um plano com inclinação suave e menor do que o da face livre do talude (Silva, 2013). Como ilustrado na tabela 16, as descontinuidades que geram uma ruptura planar possuem inclinação menor que o mergulho da face livre do talude e maior que o ângulo de atrito. A descontinuidade em questão deve emergir na face livre do talude e o topo do talude ou uma fenda de tração simultaneamente (Silva, 2013).

A figura 14 indica a zona crítica (área vermelha) para a ruptura planar em relação ao talude (destacado de amarelo). Para um polo de descontinuidade estar representado na zona crítica, a direção do plano desta deve ser aproximadamente perpendicular ao talude.



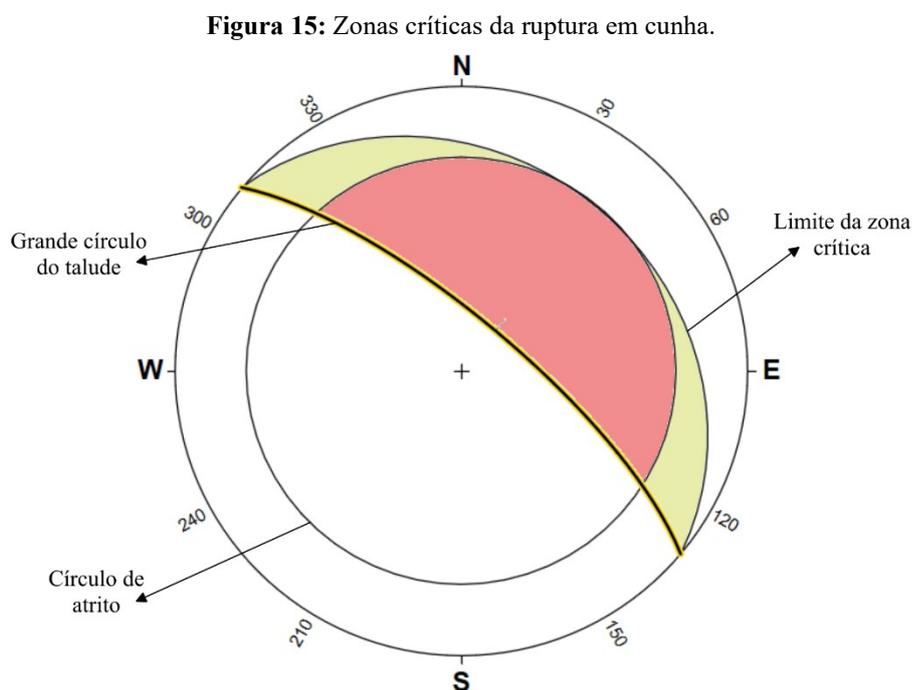
Fonte: Autor (baseado nas diretrizes de Wyllie e Mah, 2004).

5.3.2. Ruptura em cunha

A ruptura em cunha é um movimento de massa que ocorre quando duas descontinuidades se cruzam formando um tetraedro. A superfície gerada é uma espécie de cunha, com orientação formada pela linha de interseção entre as duas superfícies descontínuas, se diferenciando da ruptura planar apenas por ocorrer entre duas superfícies descontínuas (Silva, 2013). Como ilustrado na tabela 16, as descontinuidades que geram uma ruptura em

cunha possuem a inclinação da interseção de seus planos menor que o mergulho da face livre do talude e maior que o ângulo de atrito. Esta interseção deve emergir na face livre do talude e cruzar o topo do talude ou uma fenda de tração simultaneamente (Silva, 2013).

A Figura 15 indica as zonas críticas (áreas vermelha e amarela) para a ruptura em cunha em relação ao talude (destacado de amarelo). O cunhamento entre discontinuidades representa um potencial para ruptura caso a interseção dos planos no estereograma ocorrer dentro das zonas críticas.



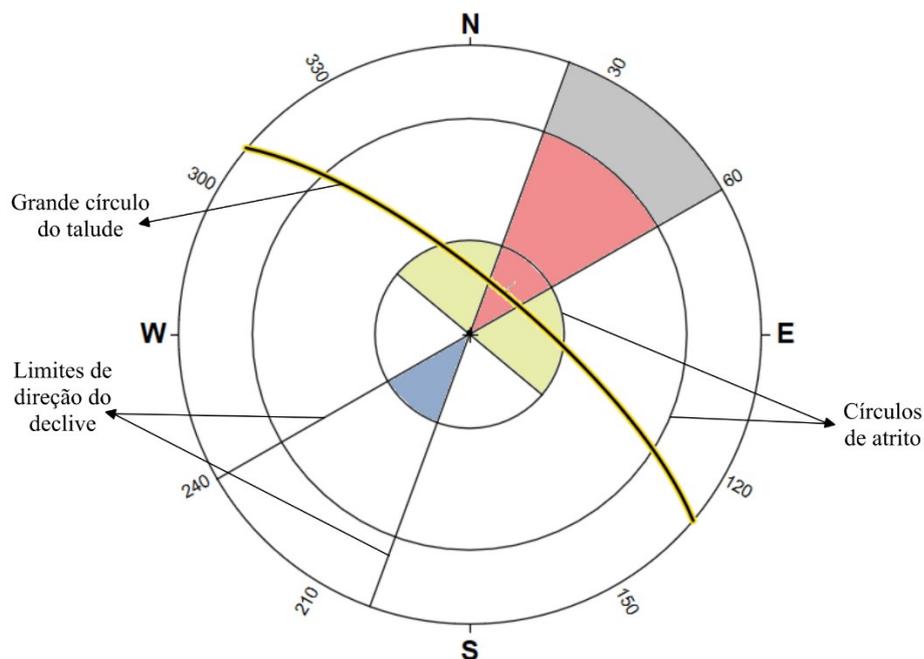
Fonte: Autor (baseado nas diretrizes de Silva, 2023).

5.3.3. Ruptura por tombamento

A ruptura por tombamento pode ser dividida em 4 tipos: tombamento direto, tombamento oblíquo, tombamento flexural e tombamento em blocos (Wyllie e Mah, 2004). A tabela 16 ilustra o comportamento geral deste tipo de ruptura, onde as discontinuidades que geram uma ruptura por tombamento possuem uma orientação contrária à face livre do talude (Silva, 2013).

A Figura 16 indica as zonas críticas das rupturas por tombamento (áreas vermelha, amarela, cinza e azul) em relação ao talude (destacado de amarelo).

Figura 16: Zonas críticas das rupturas por tombamento.

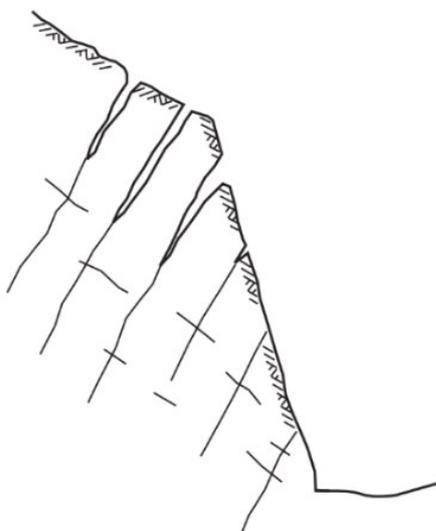


Fonte: Autor (baseado nas diretrizes de Wyllie e Mah, 2004).

5.3.3.1. Tombamento direto

O tombamento direto, representado pela área vermelha da Figura 16, ocorre quando as discontinuidades possuem uma orientação contrária à face livre do talude (Figura 17). Estas discontinuidades apresentam mergulhos baixos a medianos e seus planos são paralelos a subparalelos em relação a este talude.

Figura 17: Perfil ilustrativo do tombamento num talude.



Fonte: Modificado de Wyllie e Mah (2004).

5.3.3.2. *Tombamento oblíquo*

O tombamento oblíquo, representado pela área amarela da Figura 16, ocorre quando as descontinuidades possuem uma orientação contrária e oblíqua à face livre do talude.

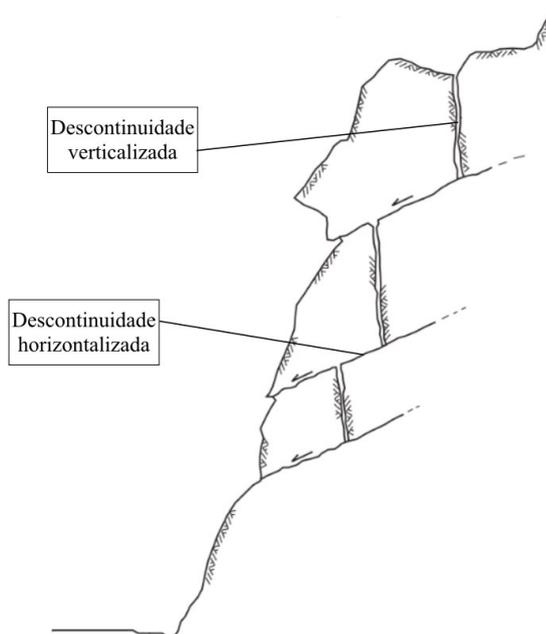
5.3.3.3. *Tombamento flexural*

O tombamento flexural, representado pela área cinza da Figura 16, ocorre quando as descontinuidades possuem uma orientação contrária à face livre do talude (Figura 17). Estas descontinuidades apresentam mergulhos altos a verticais e seus planos são paralelos a subparalelos em relação a este talude.

5.3.3.4. *Tombamento em blocos*

O tombamento em blocos, representado pela junção das áreas cinza e azul da Figura 16, ocorre quando existem duas descontinuidades conjuntas, uma que pode ser classificada como tombamento flexural e outra que possui a mesma orientação relacionada a face livre do talude com mergulhos baixos a sub-horizontais (Figura 18).

Figura 18: Perfil de um talude apresentando fraturas do tombamento em blocos.



Fonte: Retirado de Wyllie e Mah (2004).

5.4. Fator de Segurança

O fator de segurança (FS), é definido por Wyllie e Mah (2004) como a estabilidade quantificada pelo equilíbrio limite da inclinação, que é estável caso $FS > 1$. Este cálculo é efetuado através do Método do Equilíbrio Limite (MEL), desenvolvido por Hoek e Bray (1981), expresso pela Equação 4. As equações a seguir foram escritas com base em Wyllie e Mah (2004).

Equação 4:
$$FS = \left(\frac{C_a X + C_b Y}{\gamma H} \right)^3 + \left(A - \frac{\gamma_w}{2\gamma} X \right) \text{tg} \phi_a + \left(B - \frac{\gamma_w}{2\gamma} Y \right) \text{tg} \phi_b$$

O cálculo do FS, se baseia em medidas das rupturas em cunha. Para efetuar o cálculo, é necessário o uso dos seguintes coeficientes:

- C_a : Coesão do plano da família da descontinuidade F_a ;
- C_b : Coesão do plano da família da descontinuidade F_b ;
- γ : Densidade específica da rocha;
- γ_w : Densidade específica da água;
- H: Altura do talude;
- ϕ_a : Ângulo de atrito do plano F_a ;
- ϕ_b : Ângulo de atrito do plano F_b ;
- X, Y, A e B: Constantes de Hoek-Bray.

Inerente aos coeficientes supracitados, são necessários os demais coeficientes:

- σ_c : Resistência a compressão uniaxial;
- a: Constante material para resistência do maciço rochoso;
- s: Constante material para resistência do maciço rochoso;
- GSI: Índice de Resistência Geológica;
- D: Fator de perturbação da resistência do maciço rochoso;
- m_b : Constante material para resistência do maciço rochoso;
- m_i : Constante material para rochas intactas;
- σ_{3n} : Tensão principal menor máxima dividida pela resistência a compressão uniaxial.

Na projeção de taludes rochosos, a rocha é considerada um material de Coulomb, no qual a resistência ao cisalhamento da superfície de deslizamento é expressa em termos de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) (Coulomb, 1773). A coesão (Equação 5) é medida em kPa.

$$\text{Equação 5: } c = \frac{\sigma_c[(1+2a)s+(1-a)m_b\sigma_{3n}](s+m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+[6amb(s+m_b\sigma_{3n})^{a-1}]/[(1+a)(2+a)']}}$$

O ângulo de atrito (ϕ) é expresso pela Equação 6 é medida em graus e a utiliza os valores de J_r e J_a (tabelas 11 e 12 respectivamente).

$$\text{Equação 6: } \phi = \tan^{-1}\left(\frac{J_r}{J_a}\right)$$

A resistência a compressão uniaxial (σ_c) foi definida no tópico 5.2 e foi estabelecida pela Tabela 7. O GSI também foi definido no tópico 5.2 representado pela Figura 13. Os valores de densidade específica (γ) da água e da rocha são conhecidos e devem ser calculados em kN/m³. A altura do talude (H) é calculada *in loco* em metros (Figura 19A).

A contante a (Equação 7), medida pela aceleração do solo em m/s² e a constante s (Equação 8), medida pelo espaçamento de descontinuidade em metros, utilizadas no cálculo da coesão estão expressas abaixo:

$$\text{Equação 7: } a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}}\right)$$

$$\text{Equação 8: } s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}}$$

A constante material para resistência do maciço rochoso (m_b) (Equação 9) é um valor reduzido da constante material para rochas intactas (m_i) (Tabela 17):

$$\text{Equação 9: } m_b = m_i \times e^{\frac{GSI-100}{28-14D}}$$

A tensão principal menor máxima dividida pela resistência a compressão uniaxial (σ_{3n}) é expressa em kPa e pode ser determinada pelas seguintes equações (Equação 10):

Equação 10: $\sigma_{3n} = 0,47\left(\frac{\sigma_c}{\gamma_H}\right)^{-0,94}$ ou $0,72\left(\frac{\sigma_c}{\gamma_H}\right)^{-0,91}$

Tabela 17: Valores de m_i para rocha intacta.

Tipo de rocha		Valores de m_i			
		Textura grosseira	Textura média	Textura fina	Textura muito fina
Sedimentar	Clástica	Conglomerado			Argilito 4±2
		21±3	Arenito	Siltito	Folhelhos
		Brecha	17±4	7±2	6±2
		19±5			Margas 18±3
Sedimentar	Carbonática	Calcário cristalino	Calcário esparítico	Calcário micrítico	Dolomito 9±3
		12±3	10±2	9±2	
	Evaporitos		Gipsita 8±2	Anidrito 12±2	
Sedimentar	Orgânicas				Giz 7±2
	Ígnea	Granito			
		32±3			
Granodiorito					
29±3					
Intrusivas		Gabro			
		27±3			
Diorito					
25±5					
Norito					
22±5					
Ígnea	Hipabissal	Pórfiro		Dolerito	Peridotito
		20±5		16±5	25±5
Ígnea	Vulcânica	Aglomerção	Andesito	Basalto	Obsidiana
		19±3	25±5	25±5	19±3

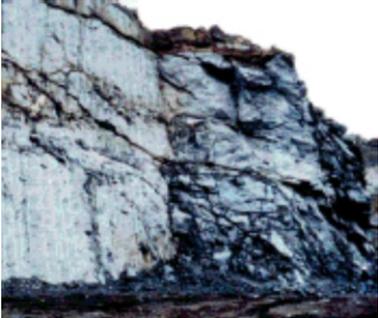
		Riolito	Tufo		
		16±5	13±5		
Metamórfica	Foliada	Gnaisse	Xisto	Filito	Ardósia
		28±5	12±3	7±3	7±4
	Levemente foliada	Migmatito	Anfibolito		
		29±3	26±6		
	Sem foliação	Mármore	Metarenito	Quartzito	
		9±3	19±3	20±3	

Fonte: Fonte: Adaptado de Hoek (2002).

O fator de perturbação da resistência do maciço rochoso (D) é um fator que depende da perturbação que o maciço rochoso está exposto para o desmorte (Tabela 18).

Tabela 18: Diretrizes para estimar o fator de perturbação D.

Aparência do maciço rochoso	Descrição do maciço rochoso	Valor sugerido de D
	A detonação ou escavação com controle de qualidade excelente feita por uma máquina de perfuração de túneis resulta em perturbação mínima na massa rochosa confinada ao redor do túnel.	D = 0
	Escavação mecânica ou manual em massas rochosas de baixa qualidade (sem detonação) resulta em perturbação mínima na massa rochosa ao redor. Onde problemas de compressão resultam em elevação significativa do piso, a perturbação pode ser severa, a menos que um investimento	D = 0 D = 0,5 Sem inversão

	temporário, como mostrado na fotografia, seja colocado.	
	Uma detonação de qualidade muito baixa em um túnel de rocha dura resulta em danos locais graves, que se estendem por 2 ou 3 m, na massa rochosa circundante.	D = 0,8
	Pequenas explosões em encostas de engenharia civil resultam em danos modestos à massa rochosa, particularmente se explosões controladas forem usadas, como mostrado no lado esquerdo da fotografia. No entanto, o alívio de tensões resulta em alguma perturbação.	D = 0,7 Detonamento bom D = 1,0 Detonamento ruim
	Encostas de minas a céu aberto muito grandes sofrem perturbações significativas devido a explosões de produção pesadas e também devido ao alívio de tensões da remoção de sobrecarga. Em algumas rochas mais macias, a escavação pode ser realizada por meio de rasgo e escavação, e o grau de dano às encostas é menor.	D = 1,0 Detonamento de produção D = 0,7 Escavação mecânica

Fonte: Wyllie e Mah (2004).

Outras constantes necessárias para calcular o FS são as constantes de A, B, X e Y, que são medidas a partir da geometria dos planos que formam o cunhamento (Figura 19A) e são

calculadas com a utilização de um estereograma (Figura 19B), onde são necessários os valores de mergulho dos planos (ψ) e a distância, em graus, dos pontos indicados nas equações.

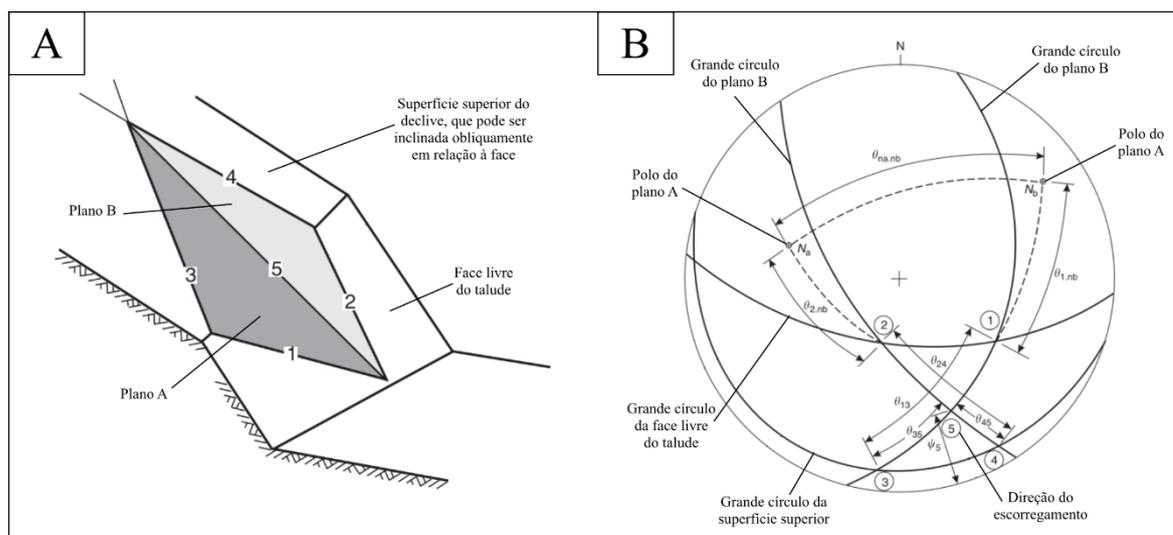
$$\text{Equação 11: } A = \frac{\cos\psi_a - (\cos\psi_b \times \text{sen}\theta_{na.nb})}{\text{sen}\psi_5 \times \text{sen}^2\theta_{na.nb}}$$

$$\text{Equação 12: } B = \frac{\cos\psi_b - (\cos\psi_a \times \text{sen}\theta_{na.nb})}{\text{sen}\psi_5 \times \text{sen}^2\theta_{na.nb}}$$

$$\text{Equação 13: } X = \frac{\text{sen}\theta_{24}}{\text{sen}\theta_{45} \times \text{sen}\theta_{2.na}}$$

$$\text{Equação 14: } Y = \frac{\text{sen}\theta_{13}}{\text{sen}\theta_{35} \times \text{sen}\theta_{1.nb}}$$

Figura 19: (A) Vista ilustrativa da cunha mostrando a numeração das linhas de intersecção e planos (traduzido); (B) Estereograma de dados necessários para análise de estabilidade de cunha (traduzido).



Fonte: Wyllie e Mah (2004) (modificado).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

O presente estudo apresentou de maneira inédita os primeiros resultados sobre possíveis riscos geológicos no município de Coromandel, detentor de uma ampla gama de atrativos naturais. A aplicação de técnicas e métodos clássicos em análise de maciços rochosos na Cachoeira do Mascate mostrou-se extremamente eficaz para a avaliação de possíveis acidentes envolvendo movimentação de blocos rochosos.

Após a análise e interpretação dos resultados produzidos pela avaliação geológico-geotécnica-cinemática da Cachoeira do Mascate, são apontadas duas medidas simples que podem ser implementadas com o intuito de reduzir situações potenciais de risco, a saber: i) visitação à cachoeira sob medidas de cautela em épocas de alta pluviosidade (entre os meses outubro e março) ou realizada juntamente com guia local habilitado e ii) instalação de placas informativas a respeito da possibilidade de queda de blocos rochosos próxima à face e nas laterais da cachoeira.

Finalmente, recomenda-se que outros atrativos ecoturísticos de Coromandel passem por avaliações geológico-geotécnicas contínuas e voltadas à prevenção, mitigação e resposta a potenciais desastres geológicos, havendo monitoramentos periódicos, antes e após as chuvas.

7. REFERÊNCIAS

- BARTON, N. *et al.* 1974. **Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support**. *Rock mechanics*, v. 6, p. 189-236.
- BENNETT A. 2016. **Landforms in the upper course of a river**. *Internet Geography*. Disponível em: <https://www.internetgeography.net/topics/landforms-in-the-upper-course-of-a-river/>.
- BEWICK R. P.; KAISER P. K.; AMANN F. 2019. **Strength of massive to moderately jointed hard rock masses**. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- BIENIAWSKI, Z.T. 1973. **Engineering Classification of Jointed Rock Masses**. *Transaction of the South African Institution of Civil Engineers*, 15, 335-344.
- BIENIAWSKI, Z. T. 1989. **Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering**. J. Wiley & Sons.
- COULOMB, C. A. 1773. **Sur une application des règles de Maximis et Minimis a quelques problèmes de statique relatifs à l'Architecture**. *Acad. Roy. Des Sciences Memoires de math. et de physique par divers savans*, 7, 343–82.
- DARDENNE, M.A. 2000. **The Brasília Fold Belt**. *In: Cordani, U.G.; Milani, E.J.; Tomas Filho, A. and CAMPOS, D.A., Editors, 2000. Tectonic Evolution of South America. Proceedings of the XXXI International Geological Congress (Rio de Janeiro)*, pp.231-263.

- DEERE, D.U. 1963. **Technical description of rock cores for engineering purposes**. In Rock mechanics and engineering geology.
- DEERE, D. U. 1989. **Rock Quality Designation (RQD) After Twenty Years**. National Technical Information Service. Gainesville, Florida. 22 p.
- DIAS, G. P.; SOUZA, G. M.; RODRIGUES, J. G. 2024. **Avaliações geotécnicas em atrativos geoturísticos: Parque Nacional de Jericoacoara, CE**. Serviço Geológico do Brasil
- FOSSEN, H. 2012. **Geologia Estrutural** (trad. Fábio R. D. de Andrade). Editora Oficina de Textos. São Paulo.
- GERSCOVICH, D. 2016. **Estabilidade de taludes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos. p. 11-34.
- GOODMAN, R. E. 1989. **Introduction to rock mechanics**. 2th. ed. Chichester: John Wiley & Sons.
- GUERRA, A. T. 1993. **Dicionário Geológico-Geomorfológico**. 8ª Edição. Ministério de Planejamento, Orçamento e Gestão. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística–IBGE. Rio Janeiro.
- GUIDICINI *et al.* 1972. **Um método de classificação geotécnica preliminar de meios rochosos**. Semana Paulista de Geologia Aplicada, v.4.
- HOEK *et al.*, 1994. **Strength of rock and rock masses**, ISRM News J, 2(2), 4-16
- Hoek, E.; Bray, J. 1977. **Rock slope engineering**. 2th. ed. London: Institution of Mining and Metallurgy. p. 402.
- Hoek, E.; Bray, J. 1981. **Rock Slope Engineering**, 3rd edn, Inst. Mining and Metallurgy, London, UK.
- HOEK, E. 2002. **Rock Mass Properties for Underground Mines**. Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME). Littleton, Colorado. 21 p.
- ISRM - SOCIEDADE INTERNACIONAL DE MECÂNICA DE ROCHAS. 1978. **Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Mass**. Grã Bretanha, v. 15. 319 - 368 p.
- ISRM - SOCIEDADE INTERNACIONAL DE MECÂNICA DE ROCHAS. 1981. **Rock Characterization Testing and Monitoring**. Brown, E., Ed., Pergamon Press, Oxford, 211 p.

- JAEGER, J. C.; COOK, N. G. W. 1969. **Fundamentals of rock mechanics**. Matheus & Co. Ltd. 11 New Fetter Lane. London E. C. 4. e Barnes & Noble, New York, N.Y.
- KRESIC, N; STEVANOVIC, Z. (Ed.). 2009. **Groundwater hydrology of springs: engineering, theory, management and sustainability**. Butterworth-heinemann.
- MORAES, C. C. M.; OLIVEIRA, I. B. F.; ADAMY, A. 2023. **Avaliações geotécnicas em atrativos geoturísticos: Rondônia**. Serviço Geológico do Brasil - CPRM.
- OLIVEIRA M. A. *et al.* 2022. **Avaliação geotécnica nos atrativos geoturísticos de Presidente Figueiredo, AM**. Serviço Geológico do Brasil - CPRM.
- PALMSTRÖM, A. 1982. **The Volumetric Joint Count a Useful and Simple Measure of the Degree of Jointing**. Proceedings of 4th International Congress IAEG, New Delhi, 10-15 December 1982, 221-228.
- PALMSTRÖM, A. 2005. **Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD)**. Tunnelling and Underground Space Technology, v. 20, n. 4.
- PENG, S. H.; WANG, K. Risk evaluation of geological hazards of mountainous tourist area: a case study of Mengshan, China. **Natural Hazards**, v. 78, n. 1, p. 517-529, 2015.
- PEREIRA, L. 1992. **Relações Tectono-Estratigráficas entre as Unidades Canastra e Ibiá na Região de Coromandel, MG**. Dissertação de Mestrado. IG-UnB, 73p. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/1196>>.
- PINHO J. M. M. *et al.* 2017. **Geologia e recursos minerais das folhas: Cabeceira Grande, Unaí, Ribeirão Arrojado, Serra da Aldeia, Serra da Tiririca, Paracatu, Guarda-Mor, Arrenegado, Coromandel, Lagamar, Monte Carmelo e Patos de Minas**. Escala 1:100.000. Serviço Geológico do Brasil - CPRM.
- PIRES, B. H. G. *et al.* 2016. **Classificação geomecânica e análise de estabilidade de taludes da Mina Vau Novo (SP) com ênfase na análise de descontinuidades**. ABGE. São Paulo.
- PIRES, P. S. 2000. **Dimensões do ecoturismo**. São Paulo: Editora Senac, 272 p.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE COROMANDEL. 2012. **Coromandel: impossível te conhecer e não se render aos seus encantos**. Coromandel-MG, 4p.
- PRIEST, S. D. 1993. **Discontinuity analysis for rock engineering**. London: Chapman & Hall. 473p.

- QADARYATI, N. 2020. **Geohazard Risk Management on Geotourism, Case Study: Pindul Cave, Gunung Kidul-Yogyakarta**. In: Proceedings of the International Conference of Geological Engineering Faculty. p. 10-17.
- RODRIGUES, J.B. 2008. **Proveniência de Sedimentos dos Grupo Canastra, Ibiá, Vazante e Bambuí - Um estudo de zircões detríticos e Idades-Modelo Sm-Nd**. 128p., 2008. Tese (Doutorado) - Instituto Geociências, Universidade de Brasília, Brasília.
- ROCHA M. 1976. **Alguns problemas relativos a Mecânica das Rochas dos materiais de baixa resistencia**. Geotecnia. Revista de Sociedade Portuguesa de Geotecnia. Disponível em: <<https://impactum-journals.uc.pt/geotecnia/article/view/11757/8611>>.
- SANTOS, T. B. 2015. **Aplicabilidade das Classificações Geomecânicas e Retroanálise para Estimação das Propriedades dos Maciços Rochosos**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia de Minas, Ouro Preto.
- SILVA D. J. 2023. **Diretrizes para a realização de análises de estabilidade de taludes utilizando os métodos de projeção estereográfica e análise cinemática e de sensibilidade**. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental.
- SILVA, M. D. 2013. **Caracterização Geotécnica do Maciço Rochoso e Fundações em Estacas Embutidas em Rocha**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Recife.
- TERZAGHI, K. 1950. **Mechanism of Landslides**. Application of geology to engineering practice, Geoleological Socociety America. p. 83-125. Harvard University.
- UNWTO - UNITED NATIONS WORLD TOURISM ORGANIZATION. 2014. **Tourism Highlights: 2014 edition. Madrid: 2014**. UNWTO News Conference HQ, Madrid, Spain, 20 January 2014b, v. 12.
- WYLLIE, D. C. 2017. **Rock Slope Engineering: Civil Applications**. 5. ed. Boca Raton: CRC Press. 620 p.
- WYLLIE D. C.; MAH C. W. 2004. **Rock Slope Engineering Civil and Mining**. Spoon Press, London – New York. 4ª Edição.

ANEXO 1 – E-mail de confirmação de submissão do artigo científico “Avaliação geológico-geotécnica e análise cinemática da Cachoeira do Mascate como subsídio ao ecoturismo em Coromandel, Minas Gerais” ao periódico Geologia USP – Série Científica.

 Outlook

Obrigado pela submissão para Geologia USP. Série Científica

De Daniel Machado via Portal de Revistas da USP <portalderevistas@usp.br>

Data Seg, 28/10/2024 17:06

Para Luciano Alessandretti <luciano.alessandretti@ufu.br>

Prezado(a) Luciano Alessandretti,

obrigado por submeter o manuscrito, "Avaliação geológica-geotécnica e análise cinemática da Cachoeira do Mascate como subsídio ao ecoturismo em Coromandel, Minas Gerais" ao periódico Geologia USP. Série Científica. Com o sistema de gerenciamento de periódicos on-line que estamos usando, você poderá acompanhar seu progresso através do processo editorial efetuando login no site do periódico:

URL da Submissão: <https://www.revistas.usp.br/guspssc/workflow/access/230851>

Usuário: lucianoalessandretti

Se você tiver alguma dúvida, entre em contato conosco. Agradecemos por considerar este periódico para publicar o seu trabalho.

ANEXO 2 – Artigo científico.

Avaliação geológica-geotécnica e análise cinemática da Cachoeira do Mascate como subsídio ao ecoturismo em Coromandel, Minas Gerais

Geological-geotechnical evaluation of the Mascate's Waterfall as subsidy for ecotourism in Coromandel, Minas Gerais.

Avaliação geológica da Cachoeira do Mascate

Samuel Fonseca Oliveira¹; Luciano Alessandretti²; José Carlos Paranhos³.

¹ Curso de Graduação em Geologia, Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Avenida do Contorno 670, Triângulo, CEP 38500-000, Monte Carmelo, Minas Gerais, Brasil, Tel.: (34) 98809-4509. (samuel.oliveira@ufu.br). ORCID: 0009-0001-2452-0487.

² Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Monte Carmelo, Minas Gerais (luciano.alessandretti@ufu.br). ORCID: 0000-0002-7050-2554.

³ Themag Engenharia e Gerenciamento, Belo Horizonte, Minas Gerais (zparanhos@gmail.com). ORCID: 0009-00007-7404-7716.

RESUMO

Este artigo apresenta uma avaliação geológica-geotécnica e análise cinemática da Cachoeira do Mascate, localizada na Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, e possíveis implicações para o ecoturismo regional. O maciço rochoso é formado por exclusivamente por um quartzito com foliação incipiente e diferentes graus de resistência, que possui camadas orientadas segundo a direção 210°N e mergulhos entre 16° e 54°. O talude da cachoeira possui direção 45°N e mergulha em média 75°. O cálculo do índice *Rock Quality Designation* indicou que a qualidade do maciço pode ser considerada regular. De acordo com o índice *Rock Mass Rating*, o maciço está enquadrado na Classe III (Razoável). As análises cinemáticas indicam possibilidades de rupturas dos tipos em cunha (29%), por tombamentos direto (26%), flexural (3%), oblíquo (1%) e planar (9%). As rupturas planares identificadas são controladas majoritariamente por fraturas orientadas aproximadamente na direção NW-SE e mergulhos sub-verticais. Ruptura por tombamentos direto e oblíquo ocorre ao longo dos planos da foliação metamórfica. O Fator de Segurança de 1,37 indica condições de estabilidade do talude da cachoeira com relação aos diferentes tipos de rupturas. Porém, períodos de pluviosidade intensa entre os meses de novembro a março certamente levam a condições de maior instabilidade do talude e, portanto, favoráveis à ruptura, de fato, a base da cachoeira é rodeada por inúmeros matacões caídos que evidenciam movimentos de massa gravitacionais. Nesse sentido, recomenda-se que a visita à Cachoeira do Mascate seja realizada em períodos de estiagem, a fim de evitar possíveis acidentes envolvendo riscos geológicos.

Palavras-chave: cachoeira; geotecnia; análise cinemática; fator de segurança; estabilidade de taludes; ecoturismo.

ABSTRACT

This paper presents a geological and geotechnical evaluation, along with a kinematic analysis of Mascate Waterfall, located in the Triângulo Mineiro and Alto Paranaíba mesoregion. It also discusses the potential implications for regional ecotourism. The rock massif is composed exclusively of quartzite, exhibiting incipient foliation and varying degrees of weathering. The quartzite beds have a dip direction of 210°N, with dips

ranging from 16° to 54°. The waterfall slope has a direction of 045°N with and an average dip of 75°. The Rock Quality Designation (RQD) index indicates that the quality of the rock mass is considered regular, while the Rock Mass Rating (RMR) classifies it as Class III (Reasonable). Kinematic analyses suggest the potential for several failure types: wedge (29%), direct toppling (26%), planar (9%), flexural toppling (3%) and oblique toppling (1%). The identified planar failures are primarily controlled by fractures oriented approximately NW-SE with sub-vertical dips. Direct and oblique toppling failures occur along the metamorphic foliation. The safety factor of 1.37 indicates stable conditions for the waterfall slope regarding different types of ruptures. However, heavy rainfall from November to March can lead to greater slope instability, increasing the likelihood of rupture. The base of the waterfall is surrounded by numerous fallen boulders, suggesting significant gravitational mass movements. Therefore, it is recommended that visits to Mascate Waterfall occur during dry seasons to minimize the risk of geological hazards.

1. INTRODUÇÃO:

O conceito de turismo envolve as atividades de pessoas que se deslocam voluntariamente para lugares afastados de suas residências habituais, ou que lá permanecem por até um ano consecutivo (OMT, 2003). A prática do turismo é realizada por diferentes razões, mas principalmente por pessoas que buscam descansar, realizar atividades esportivas e/ou ao ar livre, conhecer culturas diferentes, ou simplesmente fugir da rotina (Moreira, 2014). Com o passar dos anos, as atividades geoturísticas foram cada vez mais sendo segmentadas devido à crescente demanda por novas alternativas de turismo. Nesse sentido, considerando apenas o turismo realizado em áreas naturais, podem ser considerados o turismo ecológico e o turismo de aventura (Pires, 2000). O turismo ecológico é alvo de pessoas que apreciam o contato com a natureza, respirar ar puro e fotografar paisagens, flora e fauna (Moreira, 2014). O turismo de aventura é procurado por aqueles que buscam experiências ricas em emoções e “adrenalina” (Moreira, 2014). Nos anos 1990, a expressão “turismo ecológico” deu lugar à outra, “ecoturismo”, que foi definido pela Agência Brasileira de Promoção Internacional do Turismo (EMBRATUR) em 1994 como:

[...] Turismo desenvolvido em localidades com potencial ecológico, de forma conservacionista, procurando conciliar a exploração turística com o meio ambiente, harmonizando as ações com a natureza, bem como oferecer aos turistas um contato íntimo com os recursos naturais e culturais da região, buscando a formação de uma consciência ecológica. (EMBRATUR, 1994, p. 5).

Segundo a Organização Mundial do Turismo (OMT), o ecoturismo é considerado o segmento de maior crescimento no setor do turismo, com um aumento de 5% ao ano (EMBRATUR, 2024). De acordo com o relatório do *Ecotourism Global Market Report*, espera-se que o tamanho do mercado de ecoturismo deva ampliar a taxa de crescimento anual em 5,8% em 2023 para 13,4% em 2027 (EMBRATUR, 2024). Além disso, governos, empresas privadas e públicas e cidadãos comprometidos com o meio ambiente têm utilizado o ecoturismo como uma ferramenta extremamente eficiente para financiar e garantir a proteção de ecossistemas. Porém, para que o ecoturismo seja praticado de maneira sustentável, é necessário planejamento, administração, equipamentos, serviços e infraestrutura adequados, visando a conservação da natureza e a segurança dos visitantes (Moreira, 2014), e é justamente neste âmbito que os atrativos turísticos naturais

brasileiros ainda carecem de uma série de estudos, incluindo aqueles de avaliação dos riscos geológicos.

No dia 8 de janeiro de 2022, a queda de um bloco de rocha no Cânion de Furnas, em Capitólio, Minas Gerais, atingiu embarcações de turistas provocando a morte de 10 pessoas e ferindo outras 27. Após tal acidente catastrófico, o Serviço Geológico do Brasil-CPRM (SGB-CPRM) iniciou ações emergenciais visando o levantamento e sistematização dos riscos geológicos que possam ocorrer em feições naturais como cânions, cachoeiras, falésias e maciços rochosos em todo o território brasileiro (Oliveira *et al.*, 2022). O município de Coromandel (Figura 1), localizado na Mesorregião do Triângulo Mineiro-Alto Paranaíba, oeste de Minas Gerais, possui uma série de atrativos turísticos naturais como cavernas, rios, cachoeiras e corredeiras que recebem visitantes ao longo de todo o ano. Desses atrativos, a Cachoeira do Mascate, objeto central deste estudo, é um dos pontos turísticos que mais recebe visitantes. E, assim como a tendência geral de crescimento do ecoturismo em escala global (Vincent e Thompson, 2002), é possível que os atrativos turísticos naturais de Coromandel convirjam na mesma direção, impulsionados principalmente pela ampla divulgação dos pontos de interesse em redes abertas de televisão e diversas redes sociais. No entanto, as dezenas de atrativos catalogados no município (vd. Oliveira, 2015) ainda carecem de pesquisas voltadas a possíveis riscos geológicos e segurança de seus visitantes. Nesse sentido, este artigo apresenta de maneira inédita análises geológico-geotécnicas e cinemáticas da Cachoeira do Mascate com vistas a obtenção do fator de segurança e implicações para o ecoturismo em Coromandel.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1. Localização e vias de acesso

A Cachoeira do Mascate (Figuras 1C e 2) está localizada a sudeste de Coromandel, a cerca de 7,5 km de distância do centro da cidade. Suas coordenadas geográficas são 18° 30' 9.90" S e 47° 7' 54.14" O. A partir da zona urbana do município, o melhor trajeto a ser percorrido para se ter acesso à cachoeira é através da Rodovia MG-188 (sentido Patrocínio), onde se percorre cerca de 9,8 km em estrada asfaltada. Deve-se então seguir por estrada de terra por três quilômetros, sentido E-NE, até a entrada da Fazenda Mascate. O tempo total aproximado de viagem em carro está estimado entre 20 e 30 minutos. A partir desse ponto é necessário percorrer trilha de nível médio, com rumo para o norte e distância aproximada de 590 metros (Figura 1C). Ao longo da trilha de acesso à cachoeira, os ganhos e perdas de elevação são, respectivamente, de 15 e -54,9 metros, com inclinação máxima durante a subida de 17,3% e durante a descida é de 30,3%.

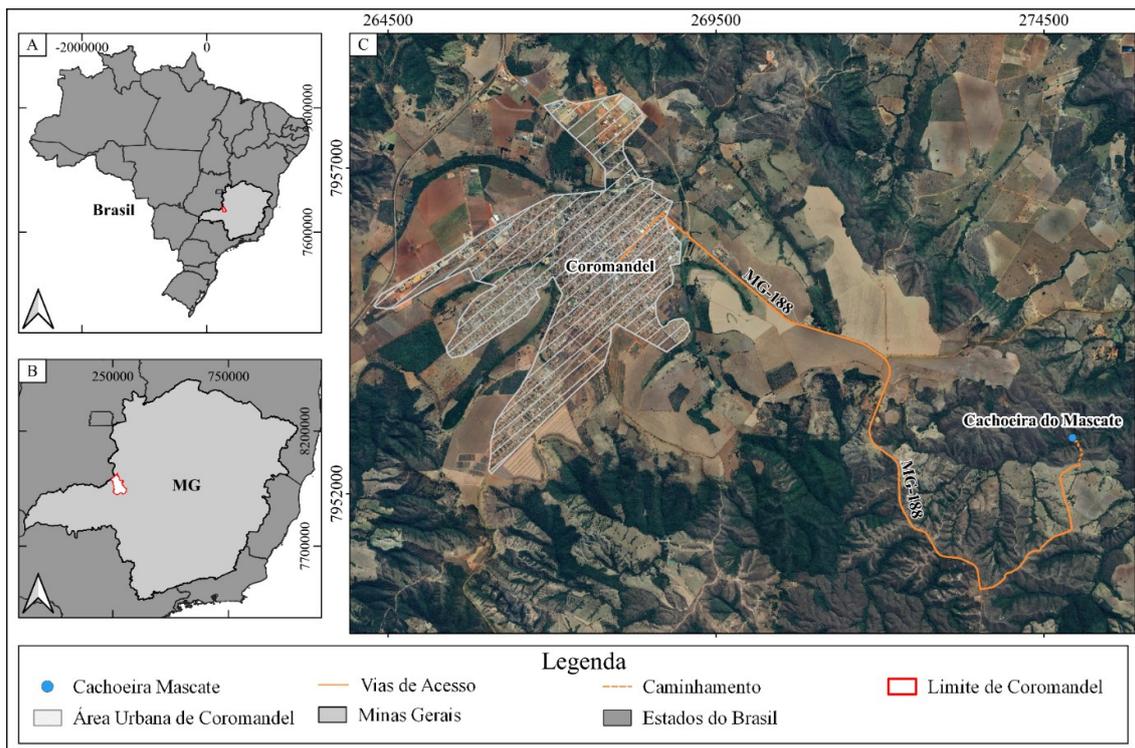


Figura 1: (A) Localização de Minas Gerais na região sudeste do Brasil. (B) Localização do município de Coromandel na Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. (C) Localização da Cachoeira do Mascate a sudeste de Coromandel.

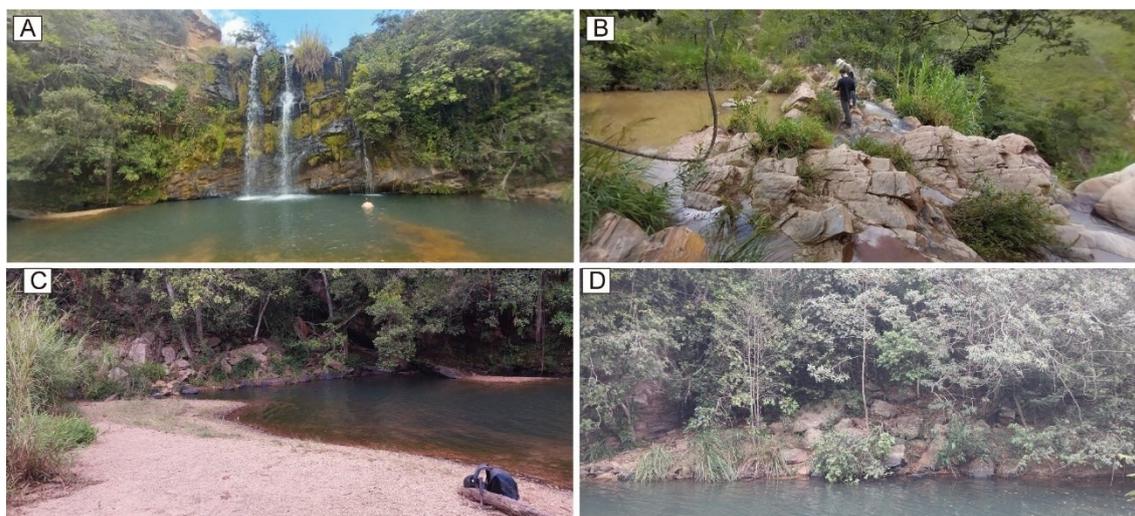


Figura 2: (A) Visada para SE da Cachoeira do Mascate. (B) Maciço rochoso quartzítico aflorante no topo da cachoeira. (C) Blocos caídos na margem esquerda da cachoeira. (D) Blocos caídos na margem direita da cachoeira.

2.2. Geologia local

As rochas que afloram na Cachoeira do Mascate são atribuídas à Formação Chapada dos Pilões (Grupo Canastra) (Figura 3), da Faixa de Dobramentos Brasília. Essa unidade é majoritariamente constituída por quartzitos esbranquiçados, de granulação fina

a média, bandados, foliados e laminados. Sericita filitos, filitos carbonosos e quartzitos ferruginosos ocorrem intercalados (Pinho *et al.*, 2017). A sul da cachoeira, em contato por falha com a Formação Chapada dos Pilões, afloram metarritmitos, filitos e xistos da Formação Rio Verde (Figura 3). Nos sentidos norte e leste da cachoeira, afloram principalmente siltitos e siltitos carbonosos com lentes de quartzito intercaladas, atribuídos ao Membro Serra do Andrequicé da Formação Serra do Garrote (Figura 3) (Pinho *et al.*, 2017).

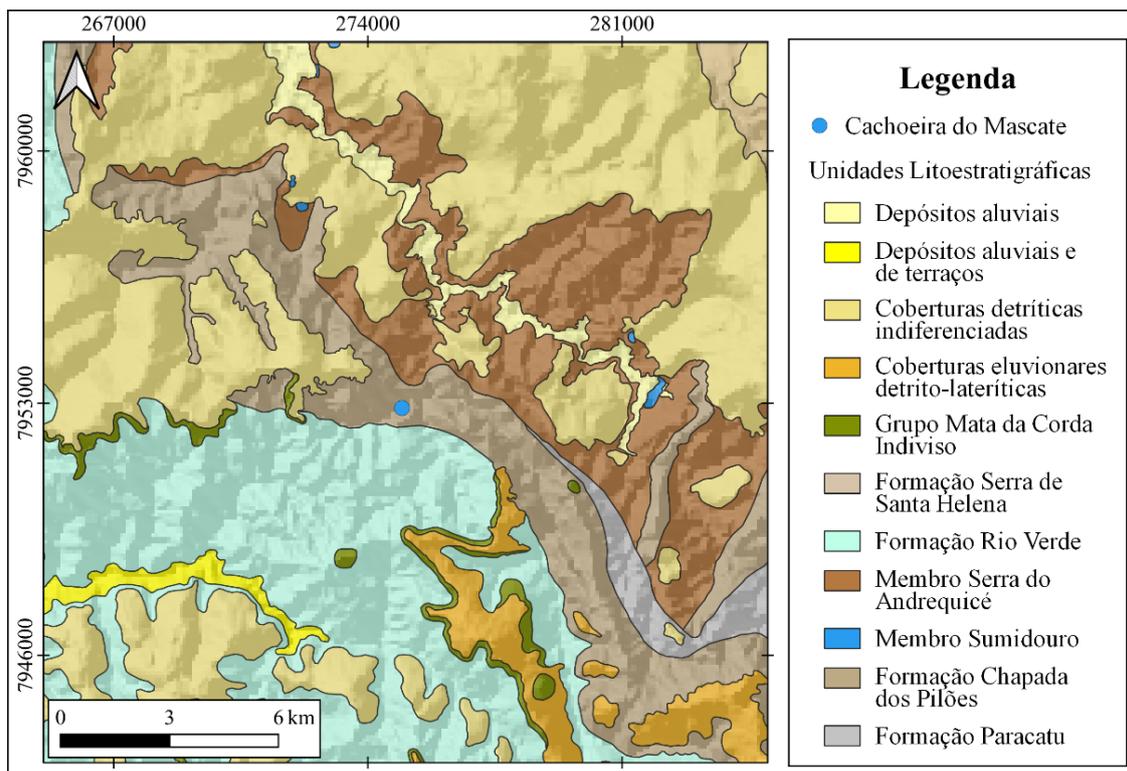


Figura 3: Mapa geológico simplificado das adjacências da Cachoeira do Mascate.

3. METODOLOGIA

Com o intuito de auxiliar a análise geológico-geotécnica realizou-se a fotointerpretação de lineamentos estruturais em escala 1:140,000 em um raio de 10 km a partir da Cachoeira do Mascate (Figura 4A). Os lineamentos foram traçados em mapas de relevo sombreado do Satélite LANDSAT 8, adquiridas no sítio eletrônico do Serviço Geológico Americano (Unites States Geological Survey), utilizando o software livre QGIS, versão 3.28, gerando dados armazenados em tabelas Excel. Após, as medidas adquiridas foram plotadas em diagramas de rosetas através do software Stereonet, versão 11.6.3 (Figuras 4B, 4C e 4D). Através da fotointerpretação foram obtidas as direções dos principais lineamentos estruturais da região, possibilitando a integração e comparação dos dados de escala regional aos dados locais de mesoescala obtidos na cachoeira. Os dados de cartografia geológica apresentados na Figura 2 e no capítulo 2.2 foram extraídos das cartas geológicas Coromandel (SE.23-Y-A-II) (Ribeiro e Féboli, 2013) e Monte Carmelo (SE.23-Y-A-V) (Féboli e Pinheiro, 2015) e seus respectivos relatórios técnicos. Durante a etapa de trabalho de campo foram descritos e identificados os litotipos constituintes do maciço rochoso aflorante do no topo base e nas proximidades da cachoeira.

A análise geológico-geotécnica foi realizada com base nas classificações de Bieniawski (1989), Barton *et al.* (1974), Rocha (1976), Palmström (2005) e da Sociedade

Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM, 1981). Os parâmetros geomecânicos de maciços rochosos analisados incluíram litotipo, orientação e número de famílias, espaçamento, persistência, abertura, percolação, tamanho do bloco, rugosidade, resistência da parede, preenchimento, tipo de descontinuidade, e intemperismo definidos por Wyllie e Mah, (2004). Os materiais utilizados em campo foram: caderneta de campo, martelo petrográfico, lupa de bolso com aumento de 30x, fita métrica, régua graduada, GPS e smartphone com aplicativo (FieldMove Clino) de bússola geológica.

Os dados obtidos em campo foram compilados em tabelas Excel, analisados de forma qualitativa e calculados através dos métodos, *Rock Mass Rating* (RMR) (Bieniawski, 1973) e Sistema Q (Tunneling Quality Index) (Barton *et al.*, 1974). A determinação das probabilidades de ruptura foi realizada através de análises cinemáticas no software Stereonet, versão 11.6.3, e de acordo com a proposta de Hoek e Bray (1981). O Fator de Segurança (FS) foi calculado de forma geral para o talude da cachoeira seguindo a metodologia de Hoek e Bray (1981) e Wyllie e Mah (2004).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Fotointerpretação

A fotointerpretação possibilitou a visualização dos principais lineamentos estruturais presentes na região (Figura 4A). Foi analisada uma área de 10 km² em escala 1:140.000, tendo como ponto central a Cachoeira do Mascate. Os lineamentos principais possuem direções NE-SW. Secundariamente ocorrem lineamentos com direções N-S, E-W e NW-SE (Figura 4A). De forma menos expressiva, foram identificados lineamentos com direções NE-SW, E-W, NW-SE, NNW-SSE (Figura 4A).

Com os dados coletados das descontinuidades locais da cachoeira foi gerado um estereograma com os contornos dos polos das descontinuidades (Figura 4B). Através da análise desses dados, foram distinguidas cinco famílias de descontinuidades, cujas orientações se assemelham aos lineamentos inferidos regionalmente. A correlação resultada entre os diagramas de roseta (Figuras 4C e 4D) indicam semelhança entre dados em escala regional e local.

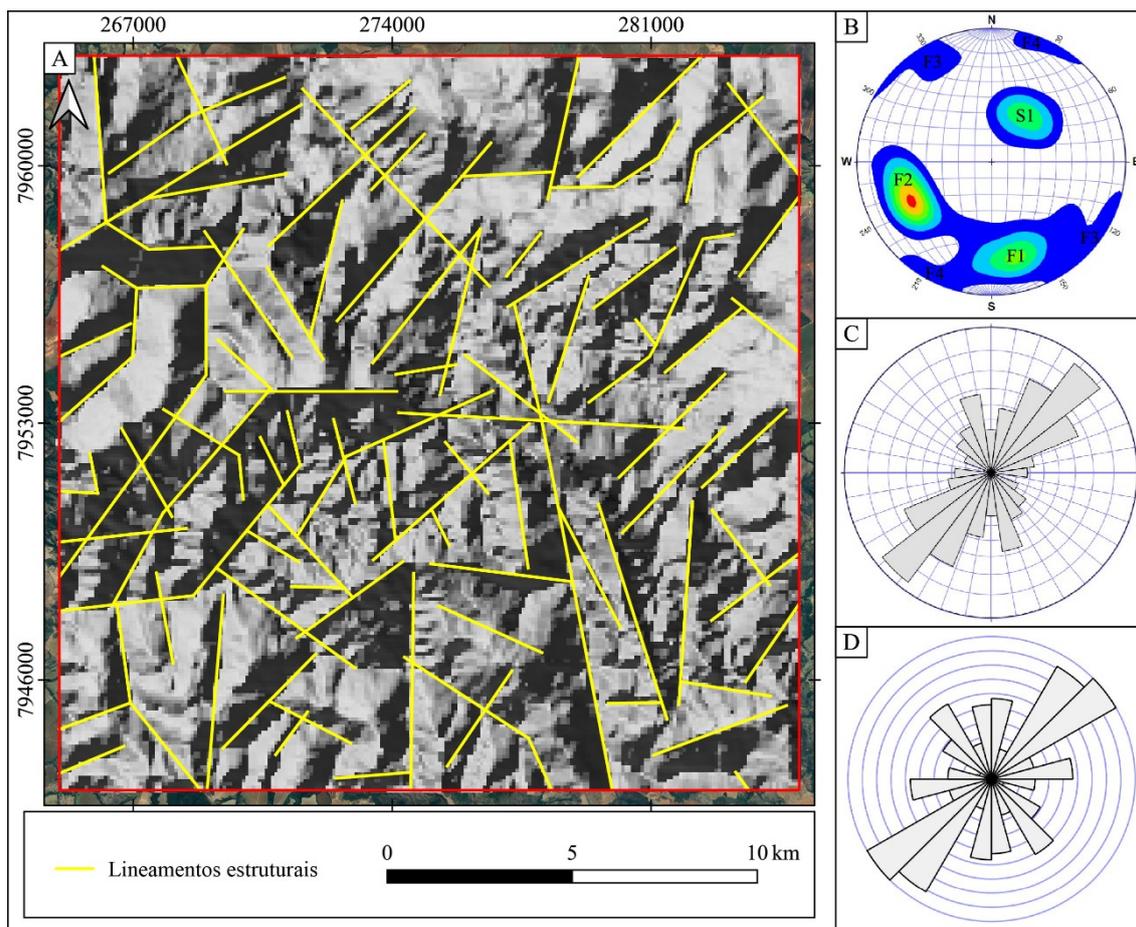


Figura 4. (A) Mapa de lineamentos estruturais em um raio de 10 km a partir da Cachoeira do Mascate. (B) Estereograma de polos das descontinuidades medidas em campo. (C) Diagrama de roseta das descontinuidades medidas em campo. (D) Diagrama de roseta dos lineamentos fotointerpretados. S1: foliação metamórfica; F1: família 1; F2: família 2; F3: família 3; F4: família 4.

4.2. Mapeamento geológico-geotécnico

O maciço rochoso aflorante no topo da cachoeira é constituído por um quartzito esbranquiçado com foliação metamórfica incipiente. Com base no teste de resistência à compressão uniaxial (teste do martelo) (ISRM, 1978), o quartzito requereu alguns golpes de martelo para ser quebrado, estando inserido na categoria de “Rocha resistente”. Sentido à base da cachoeira, aflora um quartzito amarelado, com menor grau de resistência quando comparado àquele do topo. A diferença entre os quartzitos do topo e da porção intermediária até a base da cachoeira sugerem um fator geomorfológico envolvendo erosão diferencial em sua gênese. Na base da cachoeira e em seu entorno (margens SE e NW) ocorrem blocos de rocha caídos com dimensões decimétricas a métricas (Figuras 2C-D), indicando a ocorrência de eventuais movimentos de massa gravitacionais do maciço rochoso da face da cachoeira. A face (talude) da cachoeira possui orientação NW-SE e mergulho médio de 75° (Figura 6). Os quartzitos possuem foliação metamórfica incipiente com planos mergulhando para SW (216° N) e mergulhos médios de 34° (Figura 6).

Com base no mapeamento geológico-geotécnico, foi possível definir o comportamento estrutural do maciço, evidenciando suas predominâncias, orientações medias e suas variações. Desta forma, associando os dados da fotointerpretação com os

dados coletados em campo, verificou-se a existência de cinco famílias de descontinuidades incluindo foliação metamórfica (S1) e fraturas (F1, F2, F3 e F4) (Tabela 1 e Figura 4B).

A Família 1 (F1) possui orientação E-W e planos mergulhando para NW (direção 351°N), variando entre 41° e 70°. As descontinuidades que constituem a Família 2 (F2) possuem orientação NNW-SSE e planos que mergulham para NE (direção 70°N), variando entre 46° e 68°. A Família 3 (F3) é representada por descontinuidades de orientação NE-SW e planos que alternam seus mergulhos entre NW (direção 308°N) e SE (direção 148°N), variando entre 56° e 88°. A Família 4 (F4) é representada por descontinuidades de orientação WNW-ESE e planos que alternam seus mergulhos entre NE (direção 18°N) e SW (direção 202°N), variando entre 55° e 88°. A Tabela 1 apresenta as atitudes médias das famílias de descontinuidades presentes no topo da cachoeira.

Tabela 1: Valor médio das atitudes por família de descontinuidade.

Família	Atitude média
Família S1 (S1)	216/34
Família 1 (F1)	351/57
Família 2 (F2)	068/54
Família 3 (F3)	138/89
Família 4 (F4)	020/85

Os espaçamentos médios (S_i) para as famílias 1, 2, 3 e 4 são, respectivamente, 14,8 cm, 20,1 cm, 17,5 cm e 26,1 cm (Figura 6A). De acordo com a tabela de espaçamento das descontinuidades da ISRM (1978), as descontinuidades da Família 1 são classificadas como “Extremamente próximas”, enquanto àquelas das famílias 2, 3 e 4 são consideradas “Muito próximas”. Valores médios de 1,05 cm, 4,8 cm, 1,06 cm e 1,25 cm foram obtidos para as aberturas das famílias 1, 2, 3 e 4, respectivamente (Figura 6B). Tais valores são indicativos de aberturas do tipo “Aberta”. Dessa forma, todas as famílias apresentam condição para percolação de água em suas descontinuidades. As persistências médias para as famílias 1, 2, 3 e 4 são, respectivamente, 1,0 m, 0,4 m, 1,2 m e 0,7 m (Figura 6C). As famílias 1 e 3 possuem persistência “Baixa” (entre 1 e 3 metros), enquanto as famílias 2 e 4 possuem persistência “Muito baixa” (< 1 metro). Todas as famílias apresentam fraturas lisas e onduladas e, portanto, índice de rugosidade (J_r) igual a 2. O número de descontinuidades por metro linear (grau de fraturamento) situa-se entre 13 e 14, estando o maciço rochoso inserido na classe “Muito fraturado”.

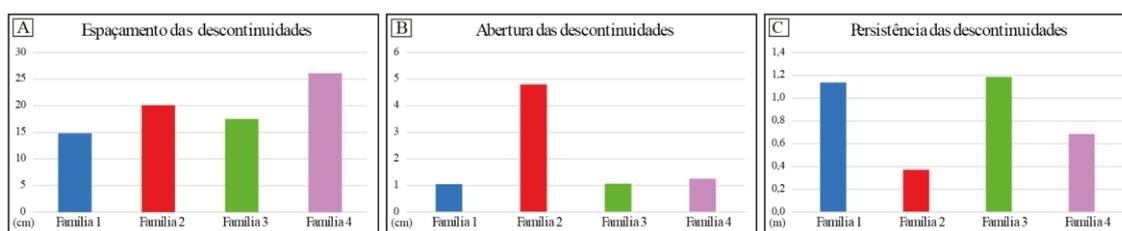


Figura 5. Espaçamentos, aberturas e persistências médias das famílias de descontinuidades F1, F2, F3 e F4.

A partir do espaçamento médio das descontinuidades (Figura 5A), determinou-se o valor do contador volumétrico de juntas (J_v) (Palmström, 1996) através da seguinte fórmula:

Fórmula 1: $J_v = \sum \frac{1}{S_i} = \frac{1}{0,148} + \frac{1}{0,201} + \frac{1}{0,175} + \frac{1}{0,261} = 6,75 + 4,97 + 5,71 + 3,83 = 21,26$

A partir da equação desenvolvida por Palmström (2005) (Fórmula 2), a qualidade do maciço rochoso (RQD) foi estabelecida como “Regular” (valores padrão entre 41 e 60).

Fórmula 2: $RQD = 110 - 2,5J_v = 110 - (2,5 \times 21,26) = 110 - 53,15 = 56,85$

Para o cálculo do RMR, utilizaram-se os seguintes parâmetros: (i) valores de resistência da rocha intacta; (ii) RQD; (iii) espaçamento das descontinuidades; (iv) condições das descontinuidades; e (v) condições de percolação de água. O parâmetro de condição das descontinuidades foi definido pela leve rugosidade, separações de até 1mm e alteração das paredes das descontinuidades (peso 20). Por estar presente em uma drenagem e constante presença de água, foi identificado escoamento no maciço rochoso (peso 4). O RMR obtido para a Cachoeira do Mascate foi de 52, classificando o maciço rochoso como Classe III, definida como “Razoável” (Tabela 2).

Tabela 2: Classificação RMR da Cachoeira do Mascate.

Parâmetros	Características	Peso
Resistência da rocha intacta	50-100 MPa	7
RQD	Regular (56,85)	13
Espaçamento	60-200 mm	8
Condições das descontinuidades	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1 mm, parede muito alterada	20
Condição de água	Escoamentos	4
Classificação RMR		Total: 52

A avaliação do Sistema Q (Barton *et al.*) da cachoeira foi elaborada a partir da utilização dos parâmetros RQD, estado de tensão do maciço (SRF), grau de fraturamento (J_n), condição de rugosidade das paredes (J_r), condição de alteração das paredes (J_a) e condição de afluência de água (J_w). Devido ao maciço estar presente na superfície, definiu-se seu SRF como “Baixo”, com valor de 2,5. As quatro famílias de descontinuidades identificadas atribuem peso 15 para o J_n (n° de famílias de fraturas). As paredes das descontinuidades possuem partículas de areia e rochas desintegradas, conferindo condição de alteração das paredes (J_a) igual a 4. A afluência elevada nas fraturas, com considerável lavagem de seus preenchimentos, sugere valor de 0,33 para o J_w (condição de afluência de água). A Tabela 3 apresenta sumariamente as características e pesos dos coeficientes utilizados na aplicação do Sistema Q.

Tabela 3: Coeficientes estabelecidos para a Cachoeira do Mascate utilizados no Sistema Q.

Coeficientes	Características	Peso
J_n	Quatro famílias	15
J_r	Fraturas lisas e onduladas	2
J_a	Paredes com partículas de areia e rochas desintegradas	4
J_w	Afluência elevada com considerável lavagem do preenchimento das fraturas	0,33
SRF	Tensões baixas, próximas à superfície	2,5

O Sistema Q considera a medida dos parâmetros dimensões dos blocos (RQD/Jn), resistência ao cisalhamento entre blocos (Jr/Ja) e a tensão ativa nas vizinhanças do talude (Jw/SRF) através da fórmula abaixo para a determinação das características do maciço rochoso:

$$\text{Fórmula 3: } Q = \frac{RQD}{J_v} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} = \frac{56,85}{15} \times \frac{2}{4} \times \frac{0,33}{2,5} = 3,79 \times 0,5 \times 1,132 = 2,145$$

O valor obtido para o Sistema Q da Cachoeira do Mascate posiciona o maciço rochoso na Classe VI (Tabela 3), designado como “Ruim”.

4.3. Análise Cinemática

A análise cinemática foi desenvolvida a partir de estereogramas estruturais com a indicação da zona crítica da Cachoeira do Mascate para rupturas dos tipos planar, em cunha e tombamentos, através de todas as medidas das discontinuidades obtidas, utilizando como referência a atitude do talude 045/75° (Figura 6).

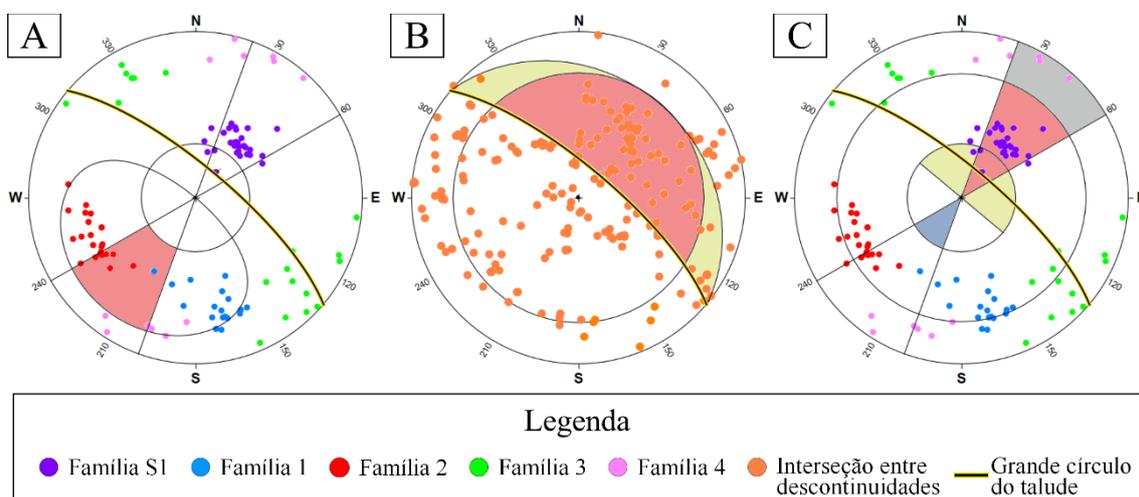


Figura 6: (A) Estereograma apresentando a zona crítica da ruptura do tipo planar. (B) Estereograma apresentando as zonas críticas da ruptura do tipo cunha. (C) Estereograma apresentando as zonas críticas da ruptura do tipo por tombamento.

4.3.1. Ruptura planar

Analisando-se todas as discontinuidades, a probabilidade de ruptura planar ao total é de cerca de 9% e envolve somente as famílias F1 e F2. A ruptura planar para as famílias F1 e F2 pode ser inferida a partir da localização de parte de seus polos de discontinuidades no interior da zona crítica para a Cachoeira do Mascate (Figura 7). Quando analisadas de forma isolada, a F2 apresenta probabilidade de 38% de ruptura planar, enquanto a F1 apresenta probabilidade de aproximadamente de 6%. Os polos da foliação metamórfica (S1) e das famílias 3 e 4 possuem polos fora da zona crítica e, portanto, não indicam possibilidade de ruptura do tipo planar (Figura 7).

As rupturas planares identificadas são controladas principalmente por interseções de fraturas orientadas aproximadamente na direção NW-SE e mergulhos sub-verticais. Sendo verificadas também tendo interseções de fraturas orientadas segundo a direção ENE-WSW e com mergulhos sub-verticais.

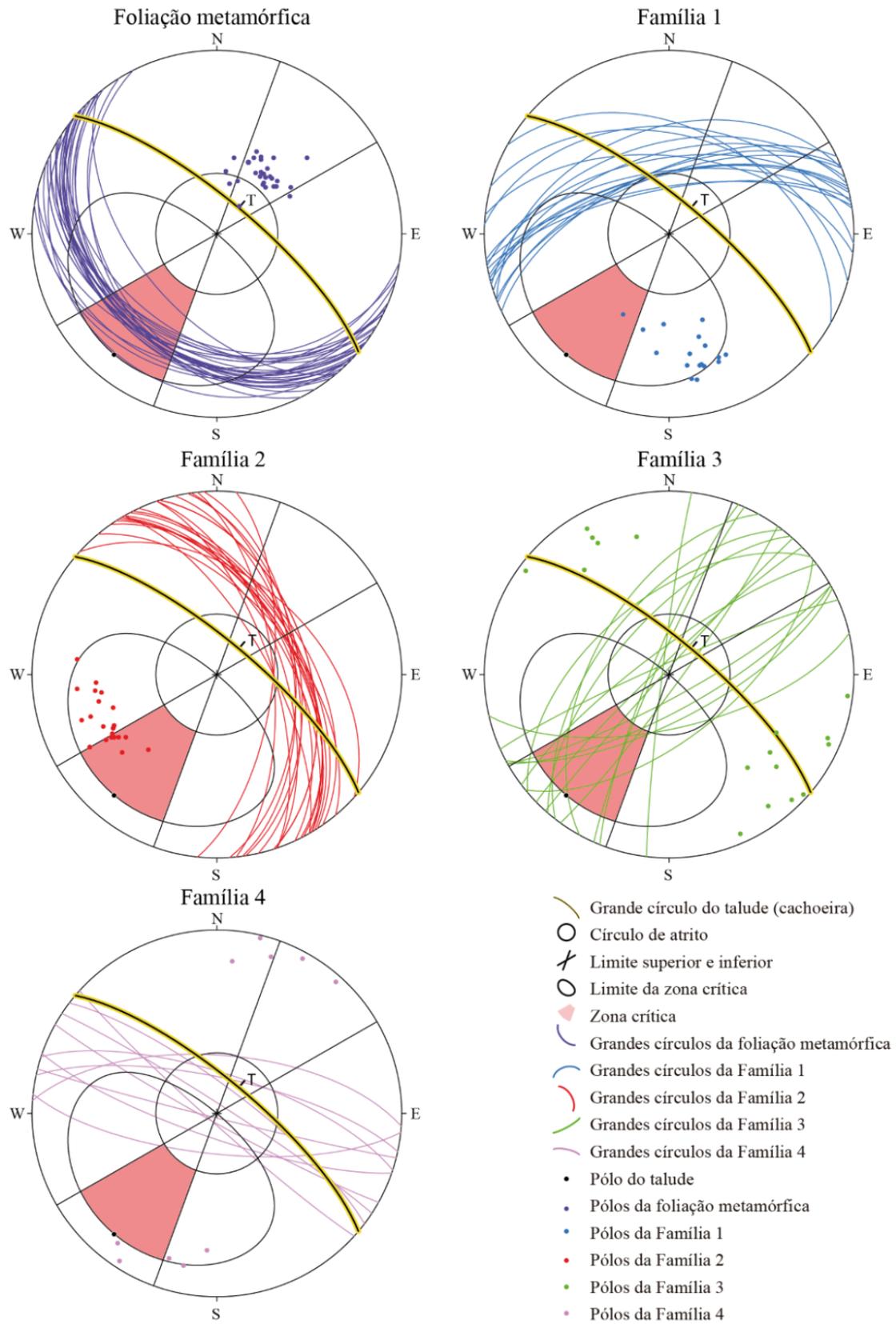


Figura 7: Análise cinemática para ruptura planar da foliação metamórfica (S1) e famílias de descontinuidades 1, 2, 3 e 4 da Cachoeira do Mascate.

4.3.2. Ruptura em cunha

Para a análise da ruptura em cunha, é necessário fazer as interseções de todas as descontinuidades medidas e comparar a posição destes pontos de interseções no estereograma com relação à zona crítica (Silva, 2023). A fim de delimitar a zona crítica no estereograma, calculou-se o ângulo de atrito (ϕ_r). Com base no índice de rugosidade (J_r) e no grau de alteração das descontinuidades (J_a), obteve-se o valor do ângulo de atrito através da Fórmula 4:

Fórmula 4: $\phi_r = \tan^{-1}\left(\frac{J_r}{J_a}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{2}{4}\right) = 26,5$

O estereograma da Figura 6B apresenta a análise cinemática de todas as descontinuidades da cachoeira para ruptura em cunha e sua zona crítica. Considerando os polos de todas as interseções entre as descontinuidades mapeadas, a cachoeira apresenta uma probabilidade de 29% de ruptura em cunha.

Na Figura 8, foram distinguidas todas as interseções das famílias de descontinuidades isoladamente e, a partir delas, calculadas as respectivas probabilidades de ruptura com base em sua posição com relação à zona crítica. Considerando-se as interseções entre a foliação metamórfica (S1) e as demais famílias de descontinuidades, verificou-se que somente as interseções entre S1 e F2 e S1 e F4 possuem probabilidades de ruptura, com 22% e 11%, respectivamente. As interseções entre as famílias F1 e F2, F1 e F3, F2 e F3, F2 e F4, e F3 e F4 apresentaram probabilidades de ruptura de 100%, 55%, 83%, 49% e 30%, respectivamente. Interseções entre descontinuidades internas às famílias indicaram probabilidade de ruptura de 100% para F2, 6% para F3 e 20% para F4. Os polos das demais interseções encontram-se afastados da zona crítica no estereograma, indicando inexistência de probabilidade de ruptura. Os valores das probabilidades para rompimento em cunha encontram-se sumarizados na Tabela 4.

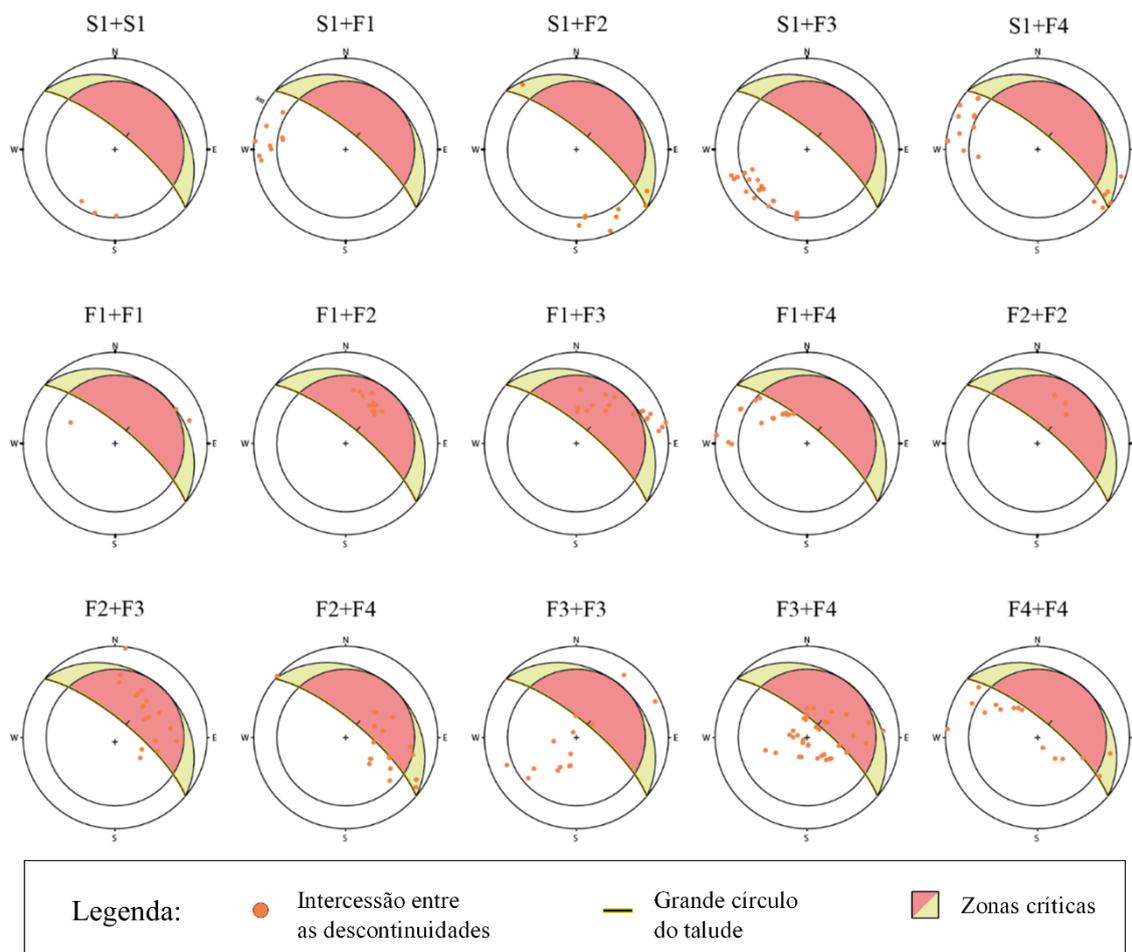


Figura 8: Análise cinemática para ruptura em cunha da Cachoeira do Mascate considerando-se pares envolvendo foliação metamórfica e as quatro famílias de descontinuidades.

Tabela 4: Probabilidades de ruptura das interseções das famílias de descontinuidades.

Interseções de famílias de descontinuidades	Probabilidade de ruptura (%)
S1 + S1	0%
S1 + F1	0%
S1 + F2	22%
S1 + F3	0%
S1 + F4	11%
F1 + F1	0%
F1 + F2	100%
F1 + F3	55%
F1 + F4	0%
F2 + F2	100%
F2 + F3	83%
F2 + F4	49%
F3 + F3	6%
F3 + F4	30,5%
F4 + F4	20%

4.3.3. Ruptura por tombamento

As figuras 6C e 9 apresentam a análise cinemática para ruptura por tombamento das descontinuidades da Cachoeira do Mascate. Foi identificado que a foliação metamórfica (S1) e a Família 4 possuem descontinuidades que podem causar ruptura do

tipo tombamento. No geral, a probabilidade desta ruptura é de 22,5% e envolve somente as famílias S1 e F4.

Vale notar que o tombamento que ocorrem nas famílias S1 e F4 são diferentes. Individualmente, a S1 apresenta 87% de probabilidade de ruptura por tombamento direto e aproximadamente 3% de probabilidade de ruptura por tombamento oblíquo. A F4 apresenta 25% de probabilidade de ruptura por tombamento flexural.

Ruptura por tombamentos direto e oblíquo foi constatada ao longo dos planos da foliação metamórfica (S1), que possui mergulhos sub-horizontais e planos orientados segundo a direção NW-SE. Verificou-se ruptura por tombamento flexural em fraturas com direção aproximada ESSE-WNW e mergulhos aproximadamente verticais.

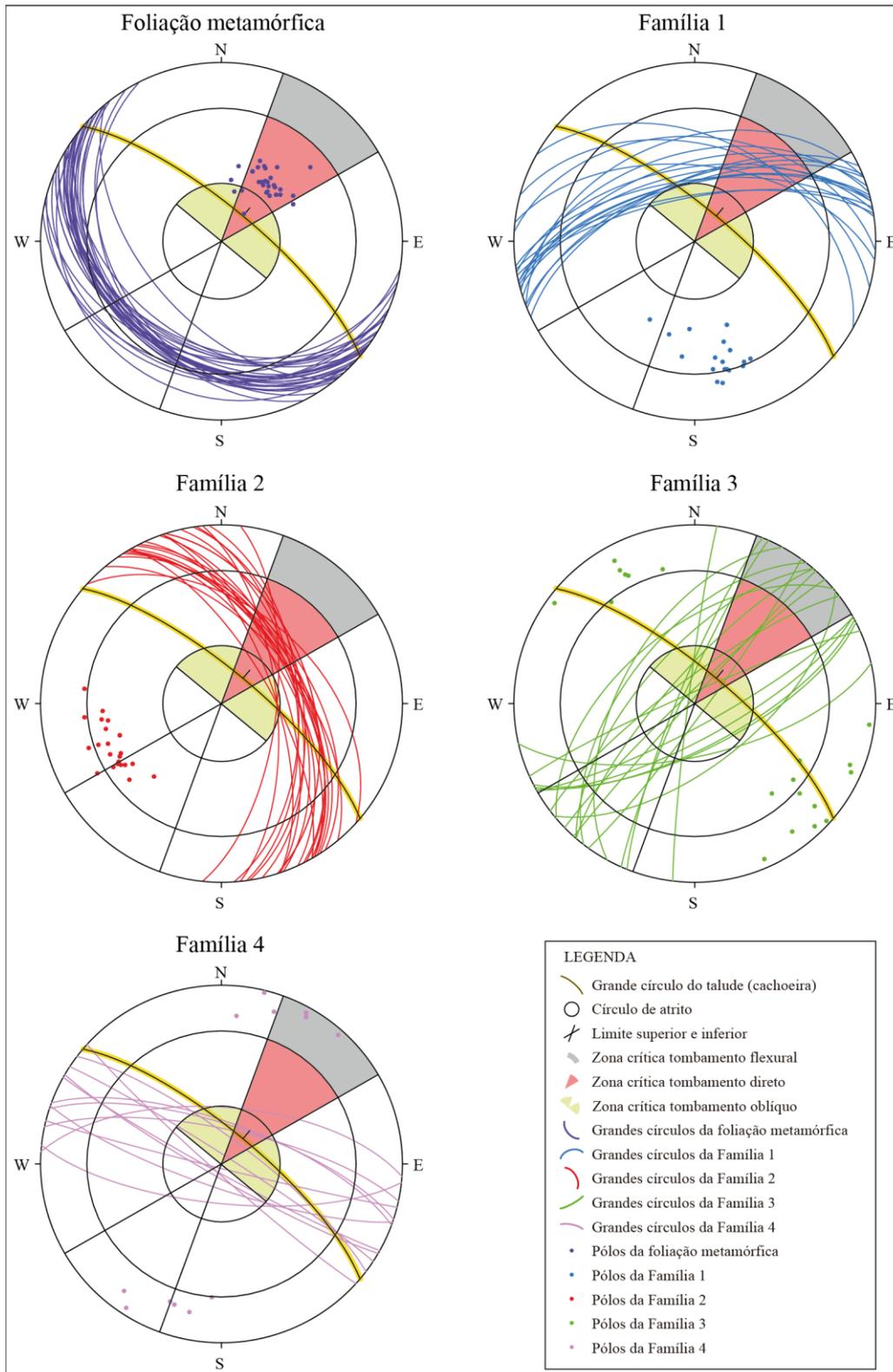


Figura 9: Análise cinemática para tombamento da Cachoeira do Mascate.

4.4.Fator de segurança

Associando os resultados geotécnicos e cinemáticos da Cachoeira do Mascate, calculou-se o Fator de Segurança, através do Método do Equilíbrio Limite, definido por

Hoek e Bray (1981) expressa pela Fórmula 5, que define o limite do fraturamento que o talude é capaz de suportar sem que haja movimento de massa.

$$\text{Fórmula 5: } FS = \left(\frac{(CaX + CbY)^3}{\gamma H} \right) + \left(A - \frac{\gamma_w}{2\gamma} X \right) \text{tg}\phi_a + \left(B - \frac{\gamma_w}{2\gamma} Y \right) \text{tg}\phi_b$$

Esta fórmula utiliza os seguintes coeficientes:

C_a : Coesão da Família 2;

C_b : Coesão da Família 1;

γ : Densidade específica da rocha;

γ_w : Densidade específica da água;

H: Altura da cunha;

ϕ_a : Ângulo de atrito da Família 2;

ϕ_b : Ângulo de atrito da Família 1;

X, Y, A e B: Constantes de Hoek-Bray.

Foi utilizado como base as descontinuidades das famílias 1 e 2, que representam o principal cunhamento da Cachoeira do Mascate (Figura 6B e 8). A partir desta equação, foi possível obter o resultado $FS=1,37$, indicando estabilidade do talude.

$$\text{Fórmula 6: } FS = \frac{(1,9088 \times 2,6199 + 1,9088 \times 1,2601)^3}{2,7 \times 16} + \left(0,5602 - \frac{1}{2 \times 2,7} 2,6199 \right) \text{tg}26,5^\circ + \left(0,4674 - \frac{1}{2 \times 2,7} 1,2601 \right) \text{tg}26,5^\circ = \frac{22,6713}{2,7 \times 16} + 0,0374 + 0,1166 = 1,3792.$$

5. IMPLICAÇÕES E RECOMENDAÇÕES PARA O ECOTURISMO EM COROMANDEL

Os principais fatores que podem contribuir para futuros eventos de instabilidade dos maciços rochosos presentes na cachoeira incluem: 1) descontinuidades com aberturas centimétricas a decimétricas; 2) presença de descontinuidades preenchidas por material areno-cascalhoso, o qual evidencia a ocorrência periódica de correntes fluviais carregadas de sedimentos; 3) ocasionais fraturas com percolação de água, favorecendo o intemperismo e reduzindo o atrito; e 4) presença de vegetação abundante em boa parte da face e do topo da cachoeira.

O município de Coromandel possui períodos de estiagem e estações chuvosas bem definidos (Figura 10). A trilha que dá acesso à base e à piscina natural da cachoeira atravessa o leito da drenagem próximo ao topo da queda d'água, onde o quartzito é extremamente resvaladiço, mesmo quando em condições secas. Portanto, o aumento da vazão relacionado às altas precipitações pluviométricas entre os meses de outubro e março pode representar eminente perigo aos turistas. O escoamento de grandes volumes de água também pode ser responsável pela movimentação de blocos de rocha e possíveis acidentes geológicos.

Com base na análise geológico-geotécnica-cinemática da Cachoeira do Santuário e exemplos de estudos em outros atrativos ecoturísticos brasileiros, duas medidas simples podem ser implementadas com o intuito de reduzir potenciais situações de risco geológico, como: (i) visitação da cachoeira preferencialmente em épocas de estiagem (de abril a setembro) e (ii) instalação de placas informativas sobre a possibilidade de queda de blocos de rocha próxima à queda d'água e nas laterais da cachoeira.

Recomenda-se ainda que as próximas etapas da pesquisa envolvendo riscos geológicos nos atrativos turísticos de Coromandel envolva o imageamento de seus

diversos atrativos turísticos, com auxílio de drone, com o intuito de produzir modelos tridimensionais de alta resolução para subsidiar futuras análises geomecânicas. Todos estes fatores corroboram para que sejam feitas vistorias periódicas na cachoeira, considerando o constante desgaste pela água, a influência do intemperismo físico e químico, através da vegetação presente, que se enraíza nas fraturas.

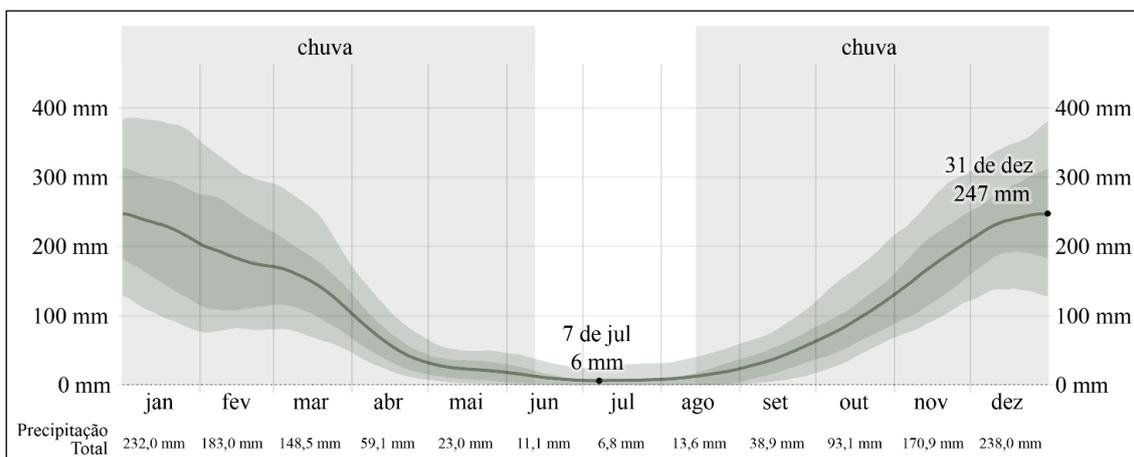


Figura 10: Chuva média mensal e total em Coromandel. Precipitação média (linha contínua) acumulada durante o período contínuo de 31 dias. Os dias 7 de julho e 31 de dezembro correspondem às mínimas e máximas pluviométricas, respectivamente. Fonte: Modificado de weatherspark.com.

6. CONCLUSÃO

As classificações do maciço rochoso da Cachoeira do Mascate foram feitas através das classificações RMR e sistema Q e indicaram similaridade dos dados com relação aos valores medianos. O índice de qualidade da rocha (RQD) calculado foi de 56,85%, designando a qualidade da rocha como regular. O RMR foi de 52 pontos, pertencendo a Classe III, classificando o maciço rochoso como razoável. Correlacionando ao Sistema Q obteve-se 23,83 pontos, indicando pertencer a Classe VI, classificando o maciço rochoso como ruim.

O mapeamento das descontinuidades da cachoeira e seu posterior tratamento estatístico em estereogramas estruturais permitiram a determinação dos principais tipos de ruptura de seu talude. A análise cinemática, também indicou as porcentagens das ocorrências dessas rupturas, sendo 29% para rupturas em cunha, 26% para o tombamento direto, 9% para rupturas planares, 3% e 1% para os tombamentos flexural e oblíquo respectivamente, envolvendo todas as descontinuidades de todas as rupturas.

A aplicação de técnicas e métodos clássicos de mapeamento geológico-geotécnico mostrou-se uma ferramenta fundamental para auxiliar a avaliação de riscos geológicos na Cachoeira do Mascate. Com o intuito de caracterizar as atuais condições geológica-geotécnicas e avaliar o nível de segurança da Cachoeira do Mascate, recomenda-se que estudos e avaliações geológicas-geotécnicas sejam realizados de maneira ampliada nas diversas cavernas, cachoeiras e corredeiras do município, possibilitando a identificação de cenários seguros e determinando pontos de controle para mitigar possíveis acidentes nos atrativos naturais de Coromandel, através da aplicação das técnicas e procedimentos aqui apresentados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradem a Gustavo Henrique Pereira Nielsen e Olavo Ribeiro Amorim pela ajuda durante a obtenção dos dados de campo.

7. REFERÊNCIAS

- Barton, N., Lien, R., Lunde, J. J. R. M. (1974). *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Rock mechanics, v. 6, p. 189-236.
- Bieniawski, Z. T. (1973). *Engineering Classification of Jointed Rock Masses*. Transaction of the South African Institution of Civil Engineers, 15, 335-344.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. J. Wiley & Sons.
- EMBRATUR - Instituto Brasileiro de Turismo. (1994). *Diretrizes para uma política nacional do ecoturismo*. BRASIL.
- EMBRATUR - Instituto Brasileiro de Turismo. (2024). *Infográfico - Turismo de Natureza*. BRASIL.
- Féboli W. L., Pinheiro M. A. P. (2015). *Carta Geológica de Monte Carmelo - Folha SE.23-Y-A-V*. Escala 1:100.000. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/CPRM.
- Hoek, E., Bray, J. (1981). *Rock Slope Engineering, 3rd edn*. Inst. Mining and Metallurgy, London, UK.
- ISRM - Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas. (1978). *Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Mass*. Grã-bretanha, v. 15. 319 - 368 p.
- ISRM - Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas. (1981). *Rock Characterization Testing and Monitoring*. Brown, E., Ed., Pergamon Press, Oxford, 211 p.
- Moreira, J. C. (2014). *Geoturismo e interpretação ambiental*. Editora UEPG.
- Oliveira, P. C. A. (2015). *Avaliação do patrimônio geomorfológico potencial dos municípios de Coromandel e Vazante, MG*. Tese (Doutorado em Ciências Humanas) – Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais.
- OMT - Organização Mundial De Turismo. (2003). *Guia de desenvolvimento do turismo sustentável*. Tradução de Sandra Netz. Porto Alegre: Bookman, 168p.
- Palmström, A. (2005). *Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD)*. Tunnelling and Underground Space Technology, v. 20, n. 4.
- Pinho, J. M. M., Féboli, W. L., Signorelli, N., Tuller, M. P., Brito, D. C., Ribeiro, J. H., Baptista R. N., Silva, R. N. (2017). *Geologia e recursos minerais das folhas: Cabeceira Grande, Unaí, Ribeirão Arrojado, Serra da Aldeia, Serra da Tiririca, Paracatu, Guarda-Mor, Arrenegado, Coromandel, Lagamar, Monte Carmelo e Patos de Minas*. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/CPRM.
- Rocha M. (1976). *Alguns problemas relativos a Mecânica das Rochas dos materiais de baixa resistência*. Geotecnia. Revista de Sociedade Portuguesa de Geotecnia.
- Pires, P. S. (2000). *Dimensões do ecoturismo*. São Paulo: Editora Senac, 272 p.
- Ribeiro J. H., Féboli W. L. (2013). *Carta Geológica de Coromandel - Folha SE.23-Y-A-II*. Escala 1:100.000. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/CPRM.
- Silva D. J. (2023). *Diretrizes para a realização de análises de estabilidade de taludes utilizando os métodos de projeção estereográfica e análise cinemática e de sensibilidade*. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental.
- Vincent, V. C., Thompson, W. 2002. *Assessing community support and sustainability for ecotourism development*. Journal of Travel Research, v. 41, n. 2, p. 153-160.
- Wyllie D. C., Mah C. W. (2004). *Rock Slope Engineering Civil and Mining*. Spoon Press, London – New York. 4ª Edição.

ANEXO 3 – Atitudes das famílias de descontinuidades.

Família S1	Família 1	Família 2	Família 3	Família 4
210/40	350/56	96/65	316/85	18/72
202/25	349/70	55/50	292/82	199/79
206/38	345/64	72/49	311/66	209/86
217/32	351/69	86/55	141/62	222/86
217/43	339/64	59/56	167/66	29/42
204/35	006/55	81/53	323/79	33/86
189/28	342/54	59/59	336/85	37/78
218/37	339/42	90/83	308/59	186/72
223/31	347/63	58/55	294/84	194/88
220/16	338/62	65/57	151/80	012/74
227/30	335/62	77/55	152/70	
230/54	004/64	57/53	312/88	
195/23	346/63	71/61	126/85	
216/34	015/45	71/66	299/56	
198/26	005/64	62/53	151/74	
213/32	352/62	82/56	277/87	
216/34	344/49	63/52	320/56	
223/35	003/41	60/55	152/70	
218/34		72/49		
211/39		84/65		
204/35		42/46		
230/33		50/56		
218/34		60/68		
213/32				
221/33				
229/36				
238/39				
223/30				
243/37				
232/34				
225/35				
206/41				
193/35				

Fonte: Autor.

ANEXO 4 – Espaçamentos das descontinuidades.

Família S1	Família 1	Família 2	Família 3	Família 4
5,0	11,5	7,5	14,5	13,5
2,5	8,0	9,5	20,0	13,0
8,0	7,5	8,0	18,0	16,0
0,5	7,0	8,0	20,0	14,5
4,0	10,0	10,0	9,0	
3,5	6,5	9,0	27,0	
2,0	11,0	8,0		

Fonte: Autor.

ANEXO 5 – Persistências das discontinuidades.

Família S1	Família 1	Família 2	Família 3	Família 4
235	68	34	157	69
157	70	45	71	60
127	23	30	128	77
138	235	27		77,5
110,0	200	35		68
140	127	24		
173	153	56		
	235	35		
	52	46		
	54	40		
	34	20		
	106	38		
	120,5	24		
	370	29		
	342	26		

Fonte: Autor.

ANEXO 6 – Aberturas das descontinuidades.

Família S1	Família 1	Família 2	Família 3	Família 4
2,0	0,5	<1mm	0,5	<1mm
9,0	1,0		1,0	0,2
32,0				
3,0				
47,0				

Fonte: Autor.

ANEXO 7 – Preenchimentos das descontinuidades.

Família S1	Família 1	Família 2	Família 3	Família 4
Material arenoso e cascalhoso com vegetação	Sem preenchimento	Sem preenchimento	Sem preenchimento	Sem preenchimento

Fonte: Autor.

ANEXO 8 – Rugosidades das paredes das descontinuidades.

Família S1	Família 1	Família 2	Família 3	Família 4
Média asperidade	Baixa asperidade	Baixa asperidade	Baixa asperidade	Baixa asperidade

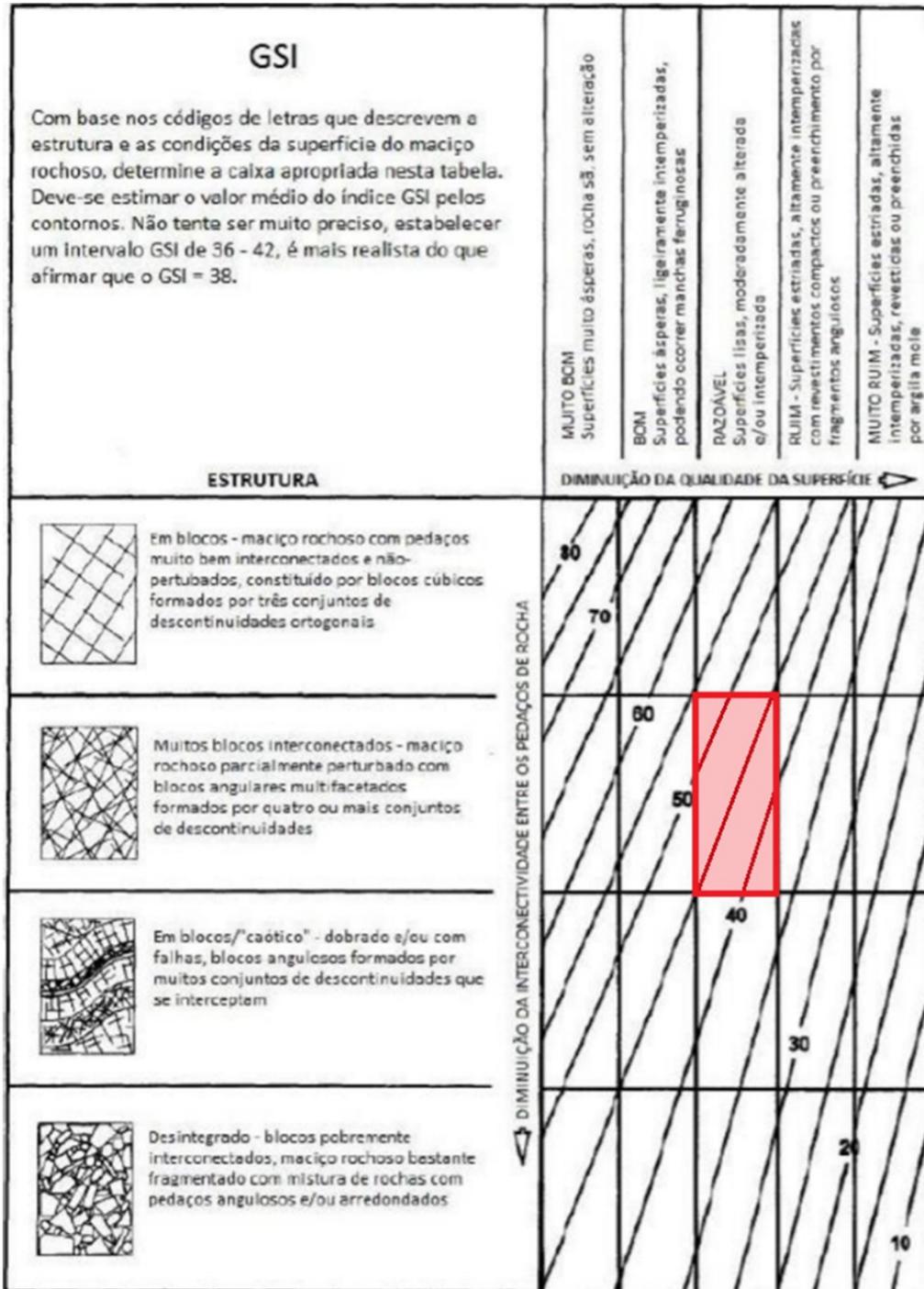
Fonte: Autor.

ANEXO 9 – Percolação nas descontinuidades.

Família S1	Família 1	Família 2	Família 3	Família 4
Apresenta	Apresenta	Apresenta	Apresenta	Apresenta

Fonte: Autor.

ANEXO 10 – Resultado da classificação geomecânica do índice GSI da Cachoeira do Mascate.



Fonte: Adaptado de Santos (2015).

ANEXO 11 – Equações utilizadas para o cálculo do FS e demais coeficientes.

- O valor do GSI foi determinado no Anexo 9 com o valor de 45;
- O valor de m_i foi determinado a partir da Tabela 17 com o valor de 20;
- O valor de D foi determinado a partir da Tabela 18 com o valor de 0,8;
- O valor de σ_c foi determinado a partir da Tabela 7 com o valor de 75;
- H se refere à altura total do talude. Possui 16 metros (medido *in loco*);
- A densidade específica da água (γ_w) e da rocha (γ_r) foram determinadas de acordo com valores conhecidos. A densidade específica da água pode ser definida como 1 g/cm³ e a densidade específica da rocha é determinada como 2,7 g/cm³ para os quartzitos que compõem o talude;
 - O ângulo de atrito (ϕ) foi calculado no tópico 6.4.2 (Equação 18) e é o mesmo para as Famílias 1 e 2, pois ambas são sustentadas pelo mesmo tipo de rocha;
 - a: Constante material para resistência do maciço rochoso;

Equação 15: $a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{45}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) = 0,508085$

- s: Constante material para resistência do maciço rochoso;

Equação 16: $s = e^{\frac{45-100}{9-(3 \times 0,8)}} = 0,0002403$

- A constante m_b foi calculada a partir da Equação 9;

Equação 17: $m_b = 20 \times e^{\frac{45-100}{28-(14 \times 0,8)}} = 0,757238$

- σ_{3n} : tensão principal menor máxima dividida pela resistência a compressão uniaxial (calculada a partir da primeira opção da Equação 10);

Equação 18: $\sigma_{3n} = 0,47 \times \left(\frac{75}{2,7 \times 16} \right)^{-0,94} = 0,279830$

- C_a e C_b : Coesão do plano da família da descontinuidade F_a e F_b ;

Equação 19: $c =$

$$\frac{0,27983 \times [(1 + (2 \times 0,508085)) \times 0,0002403 + (1 - 0,508085) \times 0,757238 \times 0,27983] (0,0002403 \times 0,757238 \times 0,27983)^{0,508085-1}}{(1 + 0,508085)(2 + 0,508085) \sqrt{\frac{1 + [6 \times 0,508085 \times 0,757238 \times (0,0002403 + 0,757238 \times 0,27983)]^{0,508085-1}}{(1 + 0,508085)(2 + 0,508085)}}}}$$

6,12648

- X, Y, A e B: Constantes de Hoek-Bray, calculada com o apoio do estereograma (Figura 20).

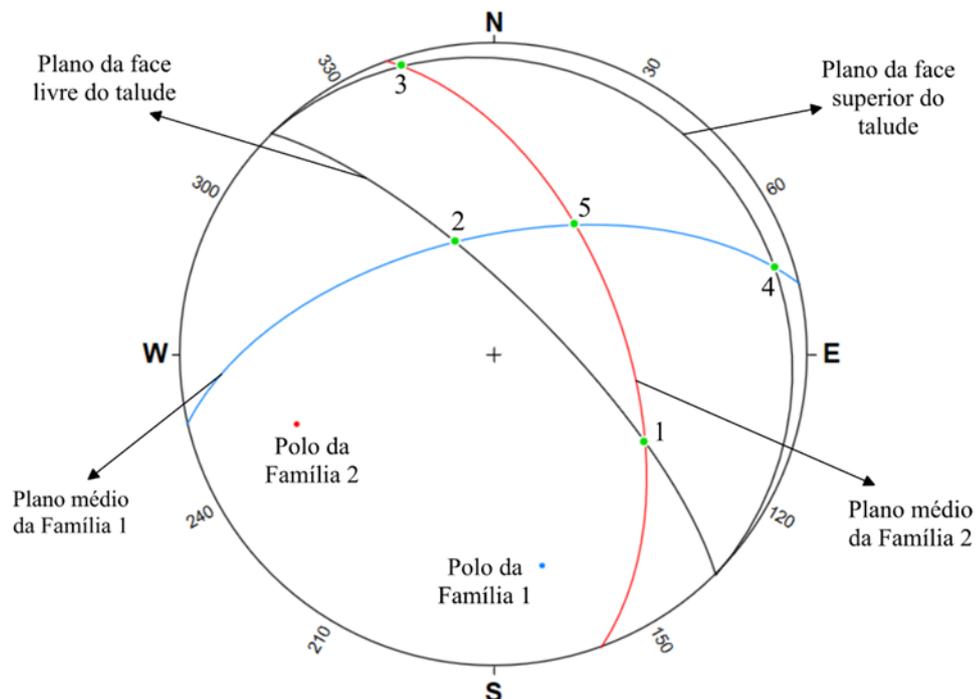
Equação 20: $A = \frac{\cos(56) - (\cos(59) \times \cos(68))}{\text{sen}(49,5) \times \text{sen}^2(68)} = 0,5602$

Equação 21: $B = \frac{\cos(59) - (\cos(56) \times \cos(68))}{\text{sen}(49,5) \times \text{sen}^2(68)} = 0,4674$

Equação 22: $X = \frac{\text{sen}(84,6)}{\text{sen}(54,3) \times \cos(62,1)} = 2,6199$

Equação 23: $Y = \frac{\text{sen}(119,5)}{\text{sen}(62,1) \times \cos(38,6)} = 1,2601$

Figura 20: Estereograma utilizado para realizar o cálculo dos coeficientes A, B, X e Y.



Fonte: Autor.