



UFOP

Universidade Federal
de Ouro Preto

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



Dalila dos Santos Matta

**Avaliação do Potencial da Termografia Infravermelha
para Caracterização de Maciços Rochosos Fraturados na Mina
de Fazendão, Catas Altas (MG)**

Ouro Preto

2026

Dalila dos Santos Matta

Avaliação do Potencial da Termografia Infravermelha
para Caracterização de Maciços Rochosos Fraturados na Mina
de Fazendão, Catas Altas (MG)

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao curso de Engenharia Geológica
da Universidade Federal de Ouro Preto como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Geológica.

Orientador: Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar

Coorientador: MSc. Augusto do Carmo Souza
Davin

Ouro Preto

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M435a Matta, Dalila dos Santos.

Avaliação do potencial da termografia infravermelha para caracterização de maciços rochosos fraturados na Mina de Fazenda, Catas Altas (MG). [manuscrito] / Dalila dos Santos Matta. - 2026.
88 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar.

Coorientador: Me. Augusto do Carmo Souza Davin.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Geotecnia. 2. Termografia. 3. Geomecânica. 4. Hidrogeomecânica.
I. Bacellar, Luis de Almeida Prado. II. Davin, Augusto do Carmo Souza. III.
Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624.13:556.33

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Dalila dos Santos Matta

AValiação DO POTENCIAL DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA PARA CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS FRATURADOS NA MINA DE FAZENDÃO, CATAS ALTAS (MG)

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Geólogo

Aprovada em 13 de julho de 2026

Membros da banca

DSc- Luis de Almeida Prado Bacellar - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

DSc - Pedro Manuel Alameda Hernandez (Universidade Federal de Ouro Preto)

DSc- Daniel Silva Jaques (Universidade Federal de Ouro Preto)

Luis de Almeida Prado Bacellar, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 20 de julho de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **Luis de Almeida Prado Bacellar, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/07/2026, às 10:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1142823** e o código CRC **BF3511D3**.

Dedico esta investigação científica
à minha mãe Margarida Coleta de
Jesus (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela conclusão de mais uma etapa e pelas graças alcançadas.

À minha mãe (*in memoriam*), por todo amor incondicional, pela vida.

Ao meu esposo Cristiano, pela paciência, por todo incentivo, cuidado, carinho e apoio nos momentos bons e nos momentos difíceis.

Aos meus primos e irmãos de coração com quem tive o privilégio de compartilhar a infância, Tico, Julin, Lieta, Nem e Zé. Agradeço às minhas tias Maria, Dorinha, Cida e Creuza por serem inspiração de vida e força.

Aos amigos da geologia que levarei para vida.

À Tereza, Joana, Janaína, Márcia, Amelina, Silvana, Sione, Juliano, Karina, Du, Wilian, Laura, Daiana e Fábio por serem pessoas que fizeram minha jornada na geologia ser mais leve, divertida, com conversas ricas de aprendizados e que, sem dúvidas, me fez ser uma pessoa melhor.

A todos os meus amigos da Geotecnia do Complexo Mariana, em especial à Luisa, pela oportunidade de desenvolvimento de carreira e por confiar no meu potencial. Te agradeço por ser um presente na minha vida. Obrigada ao Leozinho, Kel, Patinho e Igor (Meio Ambiente) pelo carinho e auxílio na aquisição dos dados que foram extremamente importantes para conclusão deste trabalho.

Ao CNPq (processo 309181/2025-9).

Ao Núcleo de Geotecnia (NUGEO/UFOP), por disponibilizar os equipamentos e espaço para os ensaios de emissividade e para coleta de dados em campo.

Ao Departamento de Geologia, à Escola de Minas e à Universidade Federal de Ouro Preto pelo ensino público superior de qualidade oferecido durante toda a minha graduação.

Ao meu coorientador, MSc. Augusto do Carmo Souza Davin, pelo exemplo de profissional dedicado, ser humano simples e inspirador.

Ao meu orientador, Professor Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar, por todos os conhecimentos compartilhados, pela disposição, paciência, persistência, pelas prosas, além de ser um exemplo de profissional apaixonado pelo que faz. Muito obrigada!

"Sometimes I start a sentence and have no idea where it's going. I just hope to find it along the way."

(Michel Scott)

RESUMO

Maciços rochosos com permo-porosidade majoritariamente controlada por descontinuidades, como acamamento, discordâncias, foliação, falhas e juntas, são muito relevantes para a hidrogeologia no estudo de aquíferos fraturados e geotecnia para informações a respeito das condições de estabilidade. A classificação do potencial hídrico e da qualidade geotécnica destes maciços é muito complexa devido a inerente heterogeneidade e anisotropia destes meios. Existem classificações de maciços rochosos muito empregadas em geotecnia, como a RMR (*Rock Mass Rating*), o Sistema Q (*Rock Mass Quality*), e a GSI (*Geological Strength Index*). Estas classificações se baseiam na avaliação dos diversos parâmetros considerados relevantes quanto à qualidade geotécnica, como as condições das descontinuidades. Classificações do potencial hídrico de meios fraturados são de uso mais restrito e específicas para certas aplicações, como escavações subterrâneas, como o Hydro Potential Value (HP-Value). Este trabalho, teve como objetivo avaliar o potencial da termografia infravermelha como contribuição para caracterização geomecânica e hidrogeomecânica de maciços rochosos intensamente fraturados nos taludes das cavas Almas e São Luiz, mina Fazendão. Por meio do índice da taxa de resfriamento (CRI), foi possível quantificar a variação temporal de temperatura superficial de um meio em levantamento termográfico de um dia nos períodos da tarde e noite. Os resultados mostram correspondência linear positiva entre o CRI e o índice Jv e relação linear negativa entre o CRI e o RQD, demonstrando o imageamento infravermelho termal é uma ferramenta valiosa, não destrutiva, rápida e econômica para caracterização geomecânica de maciços fraturados.

Palavras-chave: Termografia infravermelha, CRI, RQD, índice Jv.

ABSTRACT

Rock masses whose permeability and porosity are predominantly controlled by discontinuities, such as bedding planes, unconformities, foliation, faults, and joints, play a fundamental role in hydrogeological studies of fractured aquifers and in geotechnical engineering assessments of slope and excavation stability. The classification of the groundwater potential and geotechnical quality of these rock masses is particularly challenging due to the inherent heterogeneity and anisotropy of fractured media. Several rock mass classification systems are widely used in geotechnical engineering, including the RMR (*Rock Mass Rating*), the Q System (*Rock Mass Quality*), and the GSI (Geological Strength Index). These classification systems are based on the evaluation of several parameters considered relevant to geotechnical quality, such as discontinuity conditions. In contrast, classifications of the groundwater potential of fractured rock masses are more restricted in their application and are generally developed for specific purposes, such as underground excavations, as exemplified by the Hydro Potential Value (HP-Value). This study aimed to evaluate the potential of infrared thermography as a tool to support the geomechanical and hydrogeomechanical characterization of intensely fractured rock masses exposed in the slopes of the Almas and São Luiz open pits at Fazendão Mine. Using the Cooling Rate Index (CRI), it was possible to quantify the temporal variation in surface temperature during a thermographic survey conducted over a single day, encompassing the afternoon and evening periods. The results show a positive linear relationship between the CRI and the volumetric joint count (J_v) and a negative linear relationship between the CRI and the Rock Quality Designation (RQD). These findings demonstrate that infrared thermography is a valuable, non-destructive, rapid, and cost-effective tool for the geomechanical characterization of fractured rock masses.

Keywords: infrared thermography, CRI, RQD, J_v index.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo.	18
Figura 3: Ilustração de um maciço rochoso, indicando algumas características geomecânicas.	20
Figura 4: Orientação das descontinuidades no qual α é a direção do mergulho e β , o mergulho.....	21
Figura 5: Perfis de rugosidade para a determinação de coeficientes de rugosidade.	24
Figura 6: Principais tipos de rupturas.....	31
Figura 7: Espectro eletromagnético.	37
Figura 8: Comportamento da troca de calor em um maciço rochoso durante o dia com influência da radiação solar (a) e no período da noite (b).....	38
Figura 9: Relação positiva entre o CRIm e o Índice Jv e relação negativa entre CRIm e RQD.	40
Figura 10: Mapa regional do Cráton do São Francisco. Em destaque, a localização do QFe.	41
Figura 11: Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.....	42
Figura 12: Caixa de testemunho de sondagem constituída por itabirito friável.....	45
Figura 13: Caixa de testemunho com canga detrítica.	46
Figura 14: Imagem digital de um maciço rochoso constituído de itabirito com imagem digital sobreposta pelo respectivo termograma no modo de captura PIP (<i>Picture in Picture</i>).....	48
Figura 15: Sistema de detecção por varredura (A) e Matriz de Plano Focal (B).	49
Figura 16: Campo de visão (FOV) e campo de visão instantâneo (IFOV) de uma câmera de 160 x 120 pixels, IFOV 3,1 mrad e FOV 28° x 21°.....	49
Figura 17: Operação de campo para captação da radiação infravermelha termal pela câmera termográfica.	50
Figura 18: Etapas da abordagem metodológica realizada para determinar a emissividade dos litotipos. Aplicação da fita isolante na superfície da rocha (A); Aquecimento em estufa por 24 horas (B); Aquisição da temperatura aparente (C) e termohigrômetro (D).	52
Figura 19: Processamento das imagens IRT no software. Função de medição de área na fita isolante (A) e função de medição de área na superfície da rocha (B).	53
Figura 20: Estereograma confeccionado a partir das 131 medidas estruturais.	55
Figura 21: Vista panorâmica do talude da cava Almas com as principais famílias de fratura delimitadas e localização dos setores A1 e A2 do talude para o levantamento geomecânico, hidrogeomecânico e termográfico. A atitude do talude nos setores A1 e A2 é de 70/60 e 80/55, respectivamente.....	56
Figura 22: Vista panorâmica do talude da cava São Luiz com as principais famílias de fratura delimitadas e localização dos setores A1 e A2 do talude para o levantamento geomecânico, hidrogeomecânico e termográfico. A atitude do talude nos setores A1 e A2 é de 90/50 e 110/50, respectivamente.	57

Figura 23: Análise cinemática para os setores dos taludes das cavas Almas e São Luiz.	58
Figura 24: Gráfico estatístico das faixas de emissividade para os quatro litotipos testados. As “whiskers” representam os valores máximos e mínimos, enquanto os pontos indicam a emissividade média para cada tipo de rocha.	63
Figura 25: Áreas definidas para imageamento termográfico. Setores A1 (A) e A2 (B) do talude da cava São Luiz (A) e setores A1 (C) e A2 (D) do talude da cava Almas. O retângulo amarelo delimita a área imageada.	64
Figura 26: Termogramas dos setores do talude da cava Almas. Imagem ótica da área imageada A1 (A). Imagem termal capturada no instante t1 em (B). Imagem ótica, com os conjuntos F1, F2, F3 e F4 delimitados (C). Imagem termal capturada no instante t2 (D). Imagem ótica da área imageada A2 (E). Imagem termal capturada no instante t1 (F). Imagem ótica, com os conjuntos F1, F2, F3 e F4 delimitados (G). Imagem termal capturada no instante t2 (H).	66
Figura 27: Termogramas dos setores do talude da São Luiz. Imagem ótica da área imageada A1 (A). Imagem termal capturada no instante t1 (B). Imagem ótica, com os conjuntos F1, F3 e F4 delimitados (C). Imagem termal capturada no instante t2 (D). Imagem ótica da área imageada A2 (E). Imagem termal capturada no instante t1 (F). Imagem ótica, com os conjuntos F1, F2, F3 e F4 delimitados (G). Imagem termal capturada no instante t2 (H).	67
Figura 28: Anomalias térmicas positivas (cores frias) e negativas (cores quentes) dos setores das cavas São Luiz e Almas. Imagem termal com as anomalias térmicas positivas representadas pela linearidade entre as fraturas F2, F3 e F4 no setor A1 (A) e A2 (B) da Cava Almas e setor A1 (C) e A2 (D) da cava São Luiz. Os tracejados pretos delimitam a superfície oca, enquanto os tracejados amarelos e brancos representam partes intemperizadas e altamente fraturadas, respectivamente.	68
Figura 29: Gráfico das relações entre o índice da taxa de resfriamento médio (CRI_m) e índice Jv (A) e CRI_m e RQD (B).	70
Figura 30: Correlação dos dados de CRI_m e Índice Jv deste trabalho com os dados de e de Pappalardo <i>et al.</i> (2016).	71
Figura 31: Gráfico das relações entre o índice da taxa de resfriamento médio (CRI_m) e a classificação hidrogeomecânica, HP-Value.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação do espaçamento.	22
Tabela 2: Caracterização da persistência ou da extensão das descontinuidades.	23
Tabela 3: Caracterização da abertura das descontinuidades.....	24
Tabela 4: Classificação da resistência ao cisalhamento para rochas.	25
Tabela 5: Caracterização da presença de água nas descontinuidades.	26
Tabela 6: Classificação do maciço rochoso conforme o número de famílias.	27
Tabela 7: Parâmetros e pesos relativos para classificação geomecânica no sistema RMR.....	28
Tabela 8: Detalhamento da condição das descontinuidades para classificação RMR.	28
Tabela 9: Estimativa da resistência à compressão uniaxial de maciços rochosos.....	29
Tabela 10: Índice de qualidade do maciço (RQD).	30
Tabela 11: Índice de descontinuidades (J_n).	33
Tabela 12: Índice de rugosidade (J_r).....	34
Tabela 13: Índice de abertura e forma (J_{af}).	34
Tabela 14: Fator de condutividade hidráulica (J_k).	35
Tabela 15: Fator de circulação de água (J_w).	36
Tabela 16: Medidas das atitudes por família de descontinuidades.....	54
Tabela 17: Orientação média das quatro famílias de descontinuidades.	55
Tabela 18: Valor do índice J_v e RQD calculados a partir das descontinuidades para cava Almas.	59
Tabela 19: Valores de RMR atribuídos aos setores do talude da cava Almas.	59
Tabela 20: Valor do índice J_v e RQD calculados a partir das descontinuidades para cava São Luiz.....	60
Tabela 21: Valores de RMR atribuídos aos setores do talude da cava São Luiz.	60
Tabela 22: Parâmetros obtidos no levantamento hidrogeomecânico dos taludes das cavas Almas e São Luiz.	61
Tabela 23: Valores estimados da emissividade para cada litotipo testado.....	63
Tabela 24: Parâmetros de temperatura, umidade relativa do ar, distância e emissividade utilizados para ajustar a câmera infravermelha.	65
Tabela 25: Valores de temperatura média, variação do tempo, índice da taxa de resfriamento (CRI_m) dos setores analisados.	70
Tabela 26: Equações de regressão e coeficiente de determinação R^2 para as relações entre CRI_m , J_v e RQD	70

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	16
1.1 APRESENTAÇÃO	16
1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	17
1.3 OBJETIVOS.....	18
1.4 JUSTIFICATIVA.....	19
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 MACIÇO ROCHOSO.....	20
2.1.1 Orientação	21
2.1.2 Espaçamento ou frequência	21
2.1.3 Persistência.....	22
2.1.4 Rugosidade.....	23
2.1.5 Abertura e preenchimento das fraturas	24
2.1.6 Resistência das paredes ao cisalhamento	25
2.1.7 Condições Hidrogeológicas	25
2.1.8 Número de famílias	27
2.2 CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS.....	27
2.2.1 Rock Mass Rating (RMR).....	27
2.2.2 Rock Quality Designation (RQD) e Índice Jv	29
2.2.3 Tipos de rupturas.....	31
2.2.4 Hydro Potential Value (HP-Value).....	32
2.3 TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA.....	36
2.3.1 Emissividade	38
2.3.2 Caracterização de Maciços Rochosos por Imageamento Termal	39
CONTEXTO GEOLÓGICO	41
3.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO	41
3.2 LITOESTRATIGRAFIA	41
3.2.1 Supergrupo Minas	42
3.3 GEOLOGIA DA MINA DE FAZENDÃO	43
3.3.1 Estratigrafia	44
MATERIAIS E MÉTODOS	47
4.1.1 Revisão Bibliográfica	47
4.1.2 Trabalho de Campo	47
4.1.3 Estimativa da Emissividade Utilizando Termografia Infravermelha.....	51
4.1.4 Trabalho de Escritório.....	53

RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
5.1 ATITUDES DAS DESCONTINUIDADES.....	54
5.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MACIÇOS ROCHOSOS	58
5.2.1 Talude Cava Almas	59
5.2.2 Talude Cava São Luiz.....	60
5.2.3 Hydro Potential Value (HP-Value).....	61
5.3 TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA	62
5.3.1 Emissividade Utilizando Termografia Infravermelha	62
5.3.2 Imageamento Termográfico	64
5.3.3 Relação entre o Índice da Taxa de Resfriamento (CRI) com as Classificações Geomecânica e Hidromecânica	69
CONCLUSÃO.....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

A partir de 1940, houve avanços importantes nas técnicas de caracterização de maciços rochosos. Os métodos utilizados processam-se, essencialmente, por meio de ensaios estabelecidos internacionalmente, como as classificações RQD (*Rock Quality Designation*), proposta por Deere (1966), a classificação RMR (*Rock Mass Rating*), sugerida por Bieniawski (1973, 1989), o Sistema Q (*Rock Mass Quality*), implementado por Barton (1974) e as classificações hidrogeomecânicas ou geohidráulicas como HP-Value (*Hydro-Potential Value*) de Gates (1995, 1997, 2003), além do índice HC-System (*Rock Mass Hydraulic Conductivity*) desenvolvido por Hsu *et al.* (2008, 2011).

O sistema de classificação é uma ferramenta de grande importância para as investigações geotécnicas que têm como objetivo avaliar o comportamento e as estruturas presentes em um maciço rochoso. Quando se avalia a estabilidade de um maciço, deve-se considerar as propriedades como resistência, deformabilidade, o potencial geohidráulico e a presença de descontinuidades, visto que, ele é mais heterogêneo e anisotrópico que uma rocha intacta (Fiori, 2016). Na mineração, por exemplo, esses fatores influenciam tomadas de decisões durante e após as operações de lavra, podendo impactar o planejamento da lavra, dimensionamento de equipamentos, tráfegos de veículos, estrutura da mina e a segurança dos trabalhadores expostos ao risco.

As técnicas de classificação geomecânicas e hidrogeomecânicas tradicionais podem ser complementadas com outras fontes de informação ao se elaborar e executar um projeto. É comum, por exemplo, utilizar dados integrados de testemunhos de sondagens e levantamentos geofísicos para obter um melhor conhecimento das descontinuidades e do fluxo de água subterrânea. Metodologias remotas para caracterização geométrica de descontinuidades como, estação robótica total, fotogrametria digital e scanner a laser, também são comumente empregadas (Pappalardo *et al.* 2016).

Neste contexto, no presente trabalho propõe-se a avaliação do potencial da termografia infravermelha (IRT) como uma contribuição para o estudo geomecânico e hidrogeomecânico de maciços rochosos fraturados na mina de Fazendão. A IRT é uma técnica não destrutiva, de rápida aplicação, essencial para lugares de difícil acesso. Embora seja amplamente utilizada em

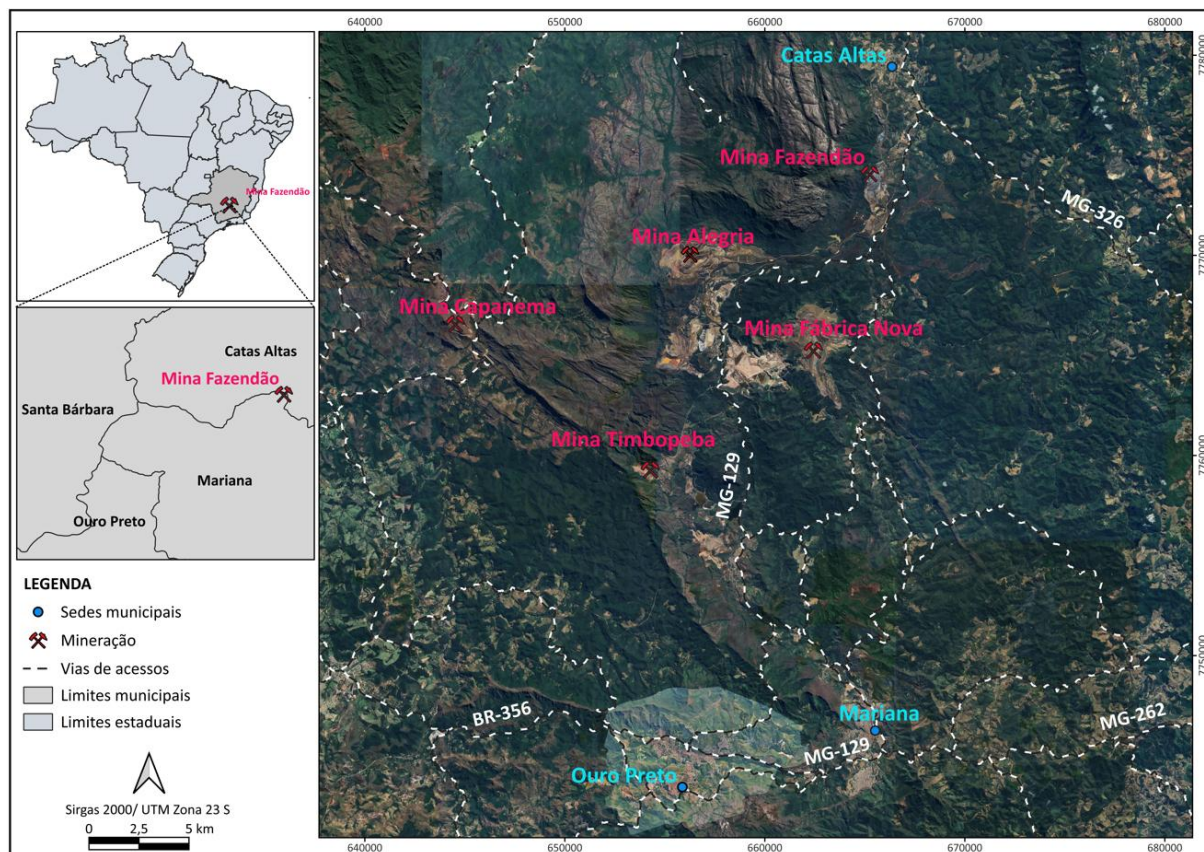
vários ramos científicos, a aplicação para o estudo de maciços rochosos fraturados está em fase de desenvolvimento (Pappalardo *et al.* 2016).

Atualmente, a IRT tem sido aplicada nas áreas da medicina, botânica e ambiental. Na engenharia civil e arquitetura, mostrou ser uma técnica útil para a detecção de anomalias em edifícios, como pontes térmicas, saídas de ar ou pontos úmidos. Nas Geociências, a IRT é aplicada para monitorar gases vulcânicos de alta temperatura provenientes dos magmas, enquanto na Geologia de Engenharia permite a detecção de fendas e aberturas de cavernas ao longo de uma encosta, com base na diferença da troca de calor entre a parte interna oca e o ambiente externo (Mineo *et al.* 2015a; Pappalardo *et al.* 2016). Na geotecnia, Mineo *et al.* (2015a) utilizaram a IRT como técnica complementar para identificar áreas potenciais de origem de quedas de rochas ao longo de uma encosta instável. Pappalardo *et al.* (2016, 2017) propuseram a IRT para estimar o índice de taxa de resfriamento (CRI) e também para avaliar a condutividade hidráulica em maciços rochosos altamente fraturados.

1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A mina de Fazendão está localizada na porção centro-sul do estado de Minas Gerais, mais precisamente no limite entre os municípios de Mariana e Catas Altas (Figura 1). Partindo de Ouro Preto, as principais vias de acesso à área são a BR-356, sentido Mariana e a MG-129, sentido Catas Altas.

Figura 1: Localização da área de estudo.



Fonte: Construção autoral.

1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar o potencial da termografia infravermelha para auxiliar na caracterização geomecânica e hidrogeomecânica de maciços rochosos fraturados na mina de Fazenda.

Como objetivos específicos podem-se citar:

- Realizar o mapeamento geomecânico com as classificações RMR e o RQD por meio do Índice Jv, além do levantamento hidrogeomecânico por meio da classificação HP-Value em dois afloramentos com condições intempéricas e estruturais distintas;
- Análise cinemática dos taludes dos dois afloramentos;
- Estimativa da emissividade dos litotipos por meio da termografia infravermelha;
- Imageamento multitemporal com termografia infravermelha de afloramentos e estimar o Índice de Taxa de Resfriamento (CRI) condicionado pelas fraturas;
- Estabelecer relações entre o CRI, RQD, Índice Jv e HP-Value.

1.4 JUSTIFICATIVA

A análise e descrição de uma maciço rochoso é fundamental para estudos geotécnicos que pretendem avaliar seu comportamento e estruturas presentes. As discontinuidades são características de uma maciço que se destacam pela influência que exercem na sua estabilidade, já que alteram a resistência mecânica e deformação. Na mineração, por exemplo, esses fatores podem impactar o método de lavra, dimensionamento de equipamentos, tráfegos de veículos e estrutura da mina visando a segurança e otimização dos processos.

A justificativa da pesquisa é baseada no fato da termografia infravermelha ser uma técnica não destrutiva, de rápida execução, baixo custo e remota, capaz de detectar a temperatura de superfície das rochas quando elas começam a transferir calor para o ambiente externo. Quando uma diferença de temperatura significativa é detectada pelas imagens de câmera termal, pode revelar informações sobre as propriedades geomecânicas e hidrogeomecânicas dos maciços rochosos, como grau de intemperismo, umidade e intensidade e interconexão de fraturamento.

Espera-se como resultado determinar e relacionar os principais conjuntos de fraturas, grau de faturamento e condutividade hidráulica do maciço rochoso na mina de Fazendão, com base no índice de taxa de resfriamento (CRI) e comparar com as abordagens amplamente utilizadas na literatura e previamente avaliadas neste estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

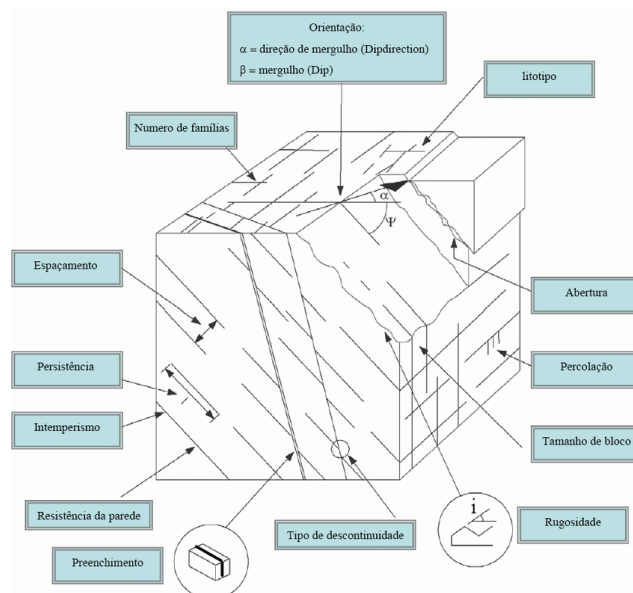
Neste capítulo serão tratados temas importantes para o desenvolvimento desta pesquisa, de maneira a fornecer o embasamento teórico para as discussões, além de introduzir temáticas técnicas para alcançar os objetivos que foram propostos.

2.1 MACIÇO ROCHOSO

Maciço rochoso é um meio descontínuo formado pela rocha intacta e descontinuidades como juntas, falhas e foliações (Wyllie & Mah, 2004; Brady & Brown, 2006; Fiori, 2016). A rocha intacta corresponde aos blocos não fraturados limitados pelas descontinuidades (Zhang, 2017). A presença dessas descontinuidades, assim como o grau de alteração proveniente do processo de intemperismo, exerce influência direta na estabilidade do maciço rochoso (Fiori, 2016).

Os principais atributos das descontinuidades são: orientação, espaçamento ou frequência, persistência, rugosidade, abertura e preenchimento, resistência das paredes ao cisalhamento, percolação de água subterrânea e número de famílias de descontinuidades (Wyllie & Mah, 2004; Fiori, 2016) (Figura 2).

Figura 2: Ilustração de um maciço rochoso, indicando algumas características geomecânicas.

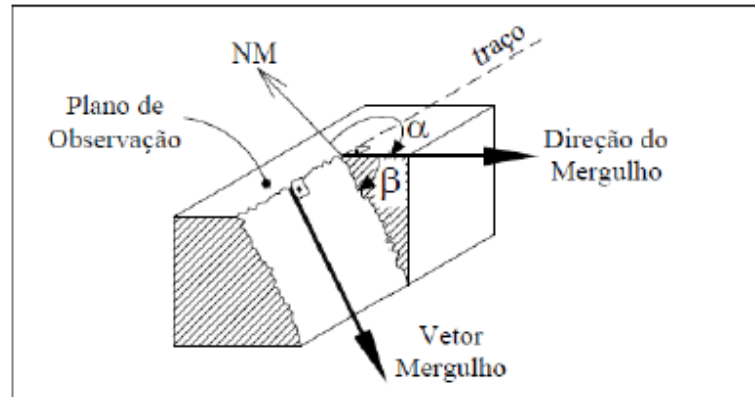


Fonte: Wyllie & Mah (2004).

2.1.1 Orientação

A orientação é a atitude da descontinuidade no espaço e pode ser definida pela direção do mergulho e o maior ângulo do plano da descontinuidade (Figura 3). A atitude pode ser tomada com uma bússola de geólogo (Maia, 2003; Fiori, 2016).

Figura 3: Orientação das descontinuidades no qual α é a direção do mergulho e β , o mergulho.



Fonte: Maia (2003).

2.1.2 Espaçamento ou frequência

A frequência das descontinuidades afeta a qualidade e resistência do maciço rochoso, já o espaçamento afeta o maciço rochoso quando em grande escala, influenciando as propriedades da rocha intacta. O espaçamento também impacta na permeabilidade e percolação do maciço rochoso, sendo a condutividade hidráulica de um sistema de descontinuidades inversamente proporcional ao espaçamento, dependendo assim do tamanho das aberturas das descontinuidades. A frequência (Fd), expressa em número de descontinuidades por metro de linha de varredura, sendo definida segundo Fiori (2016) como:

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

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

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

De modo geral, a frequência de descontinuidades não é constante em todo o maciço rochoso para um dado conjunto, já que estas se agrupam de modo irregular ou aleatório em

relação ao espaçamento. O espaçamento das juntas deve aumentar com a profundidade, exceto em casos onde o maciço rochoso é afetado por falhamentos (Fiori, 2016).

Na Tabela 1, pode-se ver a classificação descritiva do espaçamento médio entre as descontinuidades.

Tabela 1: Classificação do espaçamento.

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

Fonte: ISRM (1983).

2.1.3 Persistência

A persistência é caracterizada como a extensão do traço de uma descontinuidade conforme observado em um afloramento. Em linhas gerais, Fiori (2016) classifica a persistência de uma descontinuidade como uma expressão contínua de sua extensão vertical e horizontal. As continuidades de um sistema particular terão frequentemente maior ou menor continuidade do que aquelas de outro sistema no mesmo maciço rochoso (Figura 2). A persistência é um parâmetro importante, mas que é difícil de ser obtida principalmente se o afloramento é pequeno quando comparado com o comprimento das juntas mais desenvolvidas.

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

Tabela 2: Caracterização da persistência ou da extensão das descontinuidades.

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

Fonte: ISRM (1981).

2.1.4 Rugosidade

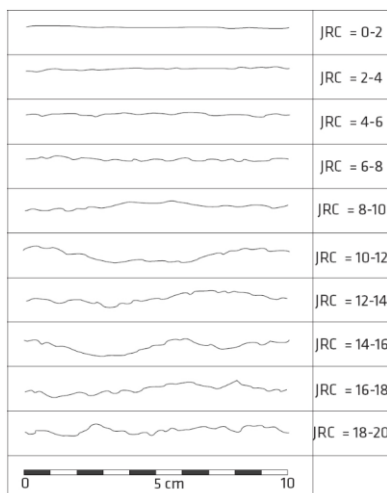
As paredes de uma descontinuidade podem ser irregulares, lisas ou polidas. As irregularidades são diferenciadas em função de duas características principais: de primeira e segunda ordem. A ondulação de primeira ordem resulta em variações na orientação ou atitude ao longo de uma descontinuidade, enquanto a rugosidade na escala de detalhe afeta o ângulo de atrito da descontinuidade (Deere *et al.* 1966; Fiori, 2016).

O cisalhamento das descontinuidades depende da combinação entre a rugosidade, resistência da rocha na superfície, da tensão normal aplicada e de seu deslocamento, assim as descontinuidades respondem ao cisalhamento gerando uma dilatação e nivelamento contínuo das irregularidades (Barton, 1976). Para superfícies rugosas artificiais o fenômeno de cisalhamento pode ser caracterizado pela equação (3) de Barton (1976).

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

Onde:

O valor de *JRC* é o coeficiente de rugosidade de junta, *JCS* a resistência à compressão da rocha na superfície de fratura e σ' a tensão normal efetiva. Os perfis de rugosidade podem ser vistos na Figura 4.

Figura 4: Perfis de rugosidade para a determinação de coeficientes de rugosidade.

Fonte: Barton & Choubey (1976).

2.1.5 Abertura e preenchimento das fraturas

A abertura de uma fratura representa o espaçamento entre suas paredes. No que diz respeito ao preenchimento, as fraturas podem ser classificadas como vazias, parcialmente preenchidas ou completamente preenchidas. A Tabela 3 mostra a classificação da abertura de descontinuidades descrita por ISRM (1981). O efeito do preenchimento na resistência ao cisalhamento depende tanto da espessura quanto das propriedades do material de preenchimento. Se a espessura é maior que 25-50% da amplitude das irregularidades, o contato entre as paredes da descontinuidade pode ser nulo e as propriedades de resistência da fratura serão consideradas como as do material de preenchimento.

Tabela 3: Caracterização da abertura das descontinuidades.

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

Fonte: ISRM (1981).

2.1.6 Resistência das paredes ao cisalhamento

Este parâmetro diz respeito a resistência à compressão das paredes das descontinuidades, sendo um fator importante para determinar a resistência ao cisalhamento e a deformação dos maciços rochosos. A Tabela 4, mostra a resistência ao cisalhamento aplicada para a rocha encaixante.

Tabela 4: Classificação da resistência ao cisalhamento para rochas.

Classificação	Descrição	Identificação de Campo	Valor aproximado da resistência à Compressão Uniaxial (Mpa)
R0	Rocha extremamente fraca	Marcada com a unha	0,25 - 1,0
R1	Rocha muito fraca	Esmigalha-se com golpes firmes com a ponta do martelo de geólogo e pode ser raspada com o canivete	1,0 - 5,0
R2	Rocha fraca	Pode ser raspada com dificuldade pelo canivete; marcas podem ser feitas superficialmente com a ponta do martelo	5,0 - 25
R3	Rocha medianamente resistente	Não pode ser raspada ou riscada com o canivete, mas amostras podem ser fraturadas com simples golpes de martelo	25 - 50
R4	Rocha resistente	As amostras necessitam de mais de um golpe com martelo para fraturar-se	50 - 100
R5	Rocha muito resistente	As amostras necessitam muitos golpes com martelo para romper-se	100 - 200
R6	Rocha extremamente resistente	As amostras podem somente ser lascadas com o uso do martelo	<250

Fonte: ISRM (1981).

2.1.7 Condições Hidrogeológicas

O fluxo de água subterrânea é um dos fatores mais importantes que exercem influência na estabilidade dos taludes (Terzaghi, 1962; Patton & Deere, 1970; Hoek & Bray, 1981). Para esses autores, a percolação de água pode ocasionar aumento de poropressão nos materiais de preenchimento, reduzindo os parâmetros de resistência ao cisalhamento, além de aumentar a pressão hidrostática nas paredes das descontinuidades, reduzindo a tensão normal efetiva, induzindo o deslizamento.

Para Beale & Read (2013), a condutividade hidráulica consiste na facilidade do meio poroso, sendo a rocha ou o solo, de escoar um fluido sob influência de um gradiente de energia. É avaliada numericamente por meio do coeficiente de permeabilidade (K), descrita na Lei de Darcy, conforme a equação (04):

$$q = -K \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (04)$$

No qual, q é a vazão através de uma área unitária do meio perpendicular à direção de fluxo, Δh é a variação da carga hidráulica ao longo da distância Δl e K é a constante de proporcionalidade do meio.

Em geral, as rochas apresentam condutividade hidráulica mais baixa do que os solos e esse valor tende a elevar com o surgimento de fraturas e do grau de alteração da rocha. A classificação qualitativa da percolação de água ao longo de uma descontinuidade com ou sem preenchimento, pode ser realizada conforme a Tabela 5.

Tabela 5: Caracterização da presença de água nas descontinuidades.

Classe	Designação	Descontinuidades sem preenchimento	Descontinuidades com preenchimento
I	Seco	Fratura muito plana e fechada. Descontinuidades aparecem secas e sem possibilidade de percolação de água.	Enchimento muito consolidado e seco. Não é possível percolação de água.
II		Fratura seca e sem evidência de percolação de água.	Enchimento muito consolidado e seco. Não é possível percolação de água.
III	Moderadamente seco	Fratura seca e com evidências de percolação de água.	Enchimento úmido e com presença de gotas ocasionais.
IV	Úmido	Fratura úmida, sem percolação de água livre.	Enchimento que mostra evidência de lavagem e com fluxo de água contínuo.
V	Escorrimentos	Fratura, ocasionalmente gotejando, mas sem fluxo contínuo.	Enchimento localmente lavado e com fluxo considerável.
VI	Fluxo elevado	Fratura com fluxo contínuo de água.	Enchimento completamente lavado e com pressões de água elevadas.

Fonte: ISRM (1981).

2.1.8 Número de famílias

O maciço rochoso pode ser caracterizado de acordo com o número de descontinuidades (ISMR, 1981), como mostra a Tabela 6.

Tabela 6: Classificação do maciço rochoso conforme o número de famílias.

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

Fonte: ISRM (1981).

2.2 CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

Nesta pesquisa, serão utilizados os seguintes sistemas de classificação amplamente reconhecidos na literatura: o *Rock Mass Rating* (RMR), desenvolvido por Bieniawski (1973; 1989); *Rock Quality Designation* (RQD), proposto por Deere *et al.* (1966); e o Índice de Volume de Descontinuidades (J_v), de Palmström (1982; 2005). O levantamento hidrogeomecânico a ser empregado é o Hydro Potential Value (HP-Value), elaborado por Gates (1995, 1997, 2003).

2.2.1 Rock Mass Rating (RMR)

Este sistema foi desenvolvido inicialmente por Bieniawski (1973), para aplicação em escavações subterrâneas mineiras e posteriormente foi modificado por Bieniawski (1989) com o intuito de ampliar as aplicações como fundações e taludes rochosos. O sistema consiste na atribuição de pesos a cinco parâmetros (Tabela 7) considerados significativos para o comportamento do maciço rochoso. A condição das descontinuidades utilizadas para determinar o quarto parâmetro estão detalhadas na Tabela 8.

Tabela 7: Parâmetros e pesos relativos para classificação geomecânica no sistema RMR.

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

Fonte: Bieniawski (1989).

Tabela 8: Detalhamento da condição das descontinuidades para classificação RMR.

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

Fonte: Bieniawski (1989).

A resistência da rocha intacta pode ser determinada em campo conforme a classificação adaptada de ISRM (Tabela 9).

Tabela 9: Estimativa da resistência à compressão uniaxial de maciços rochosos.

ISRM (ADAPTADO)										
ÍNDICE DE RESISTÊNCIA		Descrição	Rc (MPa)	I.S. (MPa)	AVALIAÇÃO DE CAMPO					
					martelo	risco canivete ¹	queda canivete	raspagem canivete ¹	risco unha	pressão manual
R6		Extremamente resistente	>250	>10	lascada	não	não	não	não	não
R5		Muito resistente	250-100	4-10	quebra com dificuldade com varios golpes	não	não	não	não	não
R4		Resistente	100-50	2-4	quebra com vários golpes	risco superficial	-	não	não	não
R3		Medianamente resistente	50-25	1-2	quebra com dificuldade com um golpe		ponto pequeno	com muita dificuldade	não	não
R2	R2 ⁺ (concreto)	Pouco Resistente	25-10	-	quebra com um golpe	risca	ponto grande	com dificuldade	não	não
	R2 ⁻ (solo-cimento)	Branda	10-5		fragmenta com um golpe			produz pó	risco superficial	não
R1	R1 ⁺ (tijolo)	Muito branda superior	5-3	-	risca fundo	ponto grande	com facilidade produz muito pó	risca	quebra pontualmente	
	R1 ⁻ (saprolitos)	Muito branda inferior	3-1		desagrega		corta (separa)	penetra	descasca esculpe	penetra
R0		Extremamente branda	1-0.25	-	-	-	penetra	-	corta	desagrega

¹ varia conforme presença de minerais de hábito lamelar

Método de Avaliação de Campo da Consistência das Rochas					
1- Reação ao golpe com o martelo de geólogo					
2- Resistência ao risco com a ponta do canivete					
3- Reação à queda da ponta do canivete					
4- Reação à raspagem da lâmina do canivete na borda da amostra					
5- Reação ao risco com a unha					
6-Reação à pressão dos dedos					

Índice de Reação ao Método	
	Alta
	Média
	Baixa

Fonte: Adaptada de ISMR (Araújo *et al.* 2014).

A soma dos cinco primeiros parâmetros da classificação RMR (resistência da rocha, RQD, espaçamento das descontinuidades, condição das descontinuidades e água) definem um índice denominado RMR básico, que tem a ver diretamente com a qualidade do maciço rochoso. O RMR é a soma do RMR básico com o valor do 6º parâmetro, que se relaciona com a qualidade do maciço em relação a estrutura (talude, fundação, escavação subterrânea).

O RQD pode ser determinado de acordo com o índice Jv, explicado a seguir.

2.2.2 Rock Quality Designation (RQD) e Índice Jv

Este sistema de classificação proposto por Deere *et al.* (1966) (Tabela 10), é calculado por meio de testemunho de sondagem para quantificar a qualidade do maciço a partir da equação (05):

$$RQD = \frac{\sum x_i}{L} * 100 \quad (05)$$

Sendo L o comprimento do testemunho de sondagem, x_i são os fragmentos maiores que 10 cm. Quando não se tem testemunho de sondagem, Palmström (1982; 2005) sugeriu que o RQD pode ser obtido a partir do contador volumétrico de juntas (J_v). O índice J_v é a soma do número de descontinuidades por metro, dentro de uma unidade de volume do maciço rochoso, definido pela equação (06):

$$J_v = \sum \frac{1}{s_i} + \frac{N_r}{5\sqrt{A}} \quad (06)$$

No qual s_i , é o espaçamento das descontinuidades em metros, N_r é o número de descontinuidades esporádicas e A é a área da janela de amostragem em m^2 . O RQD a partir do índice J_v para blocos placóides, como é o caso dos taludes investigados, pode ser dado pela equação (07). Para blocos cúbicos o RQD pode ser dado pela equação (08).

$$RQD = 115 - 3,3 J_v \quad (07)$$

Para J_v menor que 4,5, o valor de RQD é 100 % e para $J_v > 35$, $RQD = 0$.

$$RQD = 110 - 2,5 J_v; \text{ se } 4 < J_v < 44 \quad (08)$$

Tabela 10: Índice de qualidade do maciço (RQD).

RQD	
Valor (%)	Classificação
0-25	Muito Fraco
25-50	Fraco
50-75	Razoável
75-90	Bom
90-100	Muito Bom

Fonte: Gates (1997, 2003; adaptado de Deere *et al.* 1966)

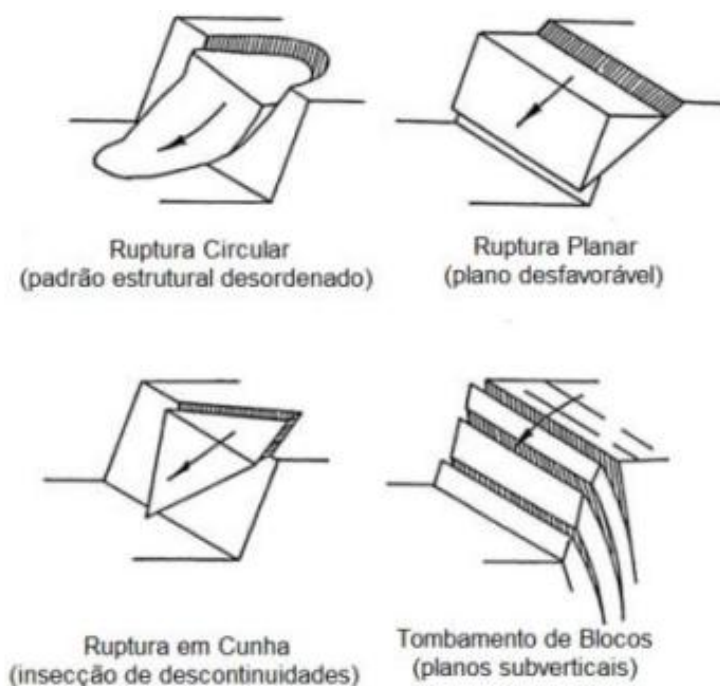
As medidas do RQD via o índice J_v são muito variáveis devido à dificuldade se distinguir descontinuidades de estruturas penetrativas (foliações/acamamento) e de separar aquelas que são naturais das induzidas por atividades antrópicas durante a escavação dos taludes de corte. Pells *et al.* (2017) evidenciaram essa elevada variabilidade de resultados quando 13 profissionais experientes com estes levantamentos classificaram de forma independente três afloramentos de arenitos na Austrália. Ou seja, a obtenção do índice J_v é muito subjetiva, dependente do critérios do profissional.

O nível de subjetividade e incerteza quando se pretende avaliar o grau de fraturamento de um maciço rochoso, também pode ser justificado devido ao fato de existir vários parâmetros capazes de definir este atributo. Mauldon (1998), Zhang & Einstein (1998), Mauldon *et al.* (1999a, 1999b, 2001), por exemplo, introduziram ferramentas que possibilitam a caracterização geométrica de traços de fratura baseadas em *scanlines* circulares (círculos desenhados na superfície de um maciço rochoso, mapa de traços de fratura ou em uma imagem digital) e janelas circulares (regiões delimitadas por uma scanline circular). Essas ferramentas eliminam a maioria dos vieses de amostragem devido à orientação, já que métodos de *scanlines* tradicionais podem introduzir viés de orientação se a *scanline* não for perpendicular ao traço da fratura. Eliminam também viés de censura e comprimento, visto que, a determinação de parâmetros como densidade, intensidade e comprimento médio podem estar sujeitos a partes de traços não visíveis e exposição preferencial de traços mais longos.

2.2.3 Tipos de rupturas

Hoek & Bray (1981), caracterizam quatro principais tipos de rupturas: circular, planar, em cunha e por tombamento de blocos (Figura 5). Esses mecanismos de ruptura são descritos com relação a geometria das discontinuidades com o plano do talude, com exceção da ruptura circular que está condicionada pela baixa resistência do material que compõe o maciço rochoso.

Figura 5: Principais tipos de rupturas.



- **Ruptura circular:** são mais comuns em solos ou em locais onde o material é menos compacto. Também pode ocorrer esse tipo de ruptura em maciços rochosos, quando estão muito fraturados. O rompimento que ocorre é apenas em um plano, com tendência a percorrer um caminho circular.

- **Ruptura planar:** ocorre em descontinuidades que mergulham em mesma direção do talude interceptando a face do mesmo com um ângulo maior que o ângulo de atrito (Fiori, 2016).

- **Ruptura em cunha:** esse tipo de ruptura ocorre quando duas ou mais descontinuidades oblíquas interceptam a superfície do talude, mergulhando no sentido que o talude, através de um mergulho maior que o ângulo de atrito.

- **Tombamento de blocos:** ocorre quando um movimento tem origem na rotação de blocos de rocha sobre uma base fixa.

A possibilidade de instabilização para rupturas planares, em cunha e tombamento, pode ser avaliada pela análise cinemática (Hoek & Bray, 1981; Wyllie, C. & Mah, 2004), que é um método conservador, pois considera somente a componente de atrito na estabilidade.

Para rupturas planares, as condições são: o mergulho da descontinuidade deve ser menor que o mergulho do talude e maior que o ângulo de atrito. O mergulho da descontinuidade também deve ser subparalelo ao mergulho do talude (+/- 20°).

Para ruptura em cunha, as condições são: o caimento da linha de interseção entre duas descontinuidades deve ser para fora do talude e com valor menor que o mergulho deste e maior que o do ângulo de atrito de suas superfícies.

Para ruptura por tombamento flexural: a descontinuidade deve mergulhar diretamente para dentro do talude, com valores elevados, superior a 90° (ângulo de atrito) e manter paralelismo (+/- 20°) com este.

2.2.4 Hydro Potential Value (HP-Value)

O HP-Value é um índice hidrogeomecânico apresentado e desenvolvido por Gates (1995, 1997, 2003) como uma solução para o problema da avaliação da percolação de água subterrânea em maciços rochosos fraturados em obras e projetos de engenharia civil, mineração, escavações em profundidade de túneis e galerias subterrâneas. Este índice permite estimar, de

forma semiquantitativa, rápida e versátil, o potencial hidráulico de um dado maciço rochoso para a circulação de água subterrânea (Meirinhos, 2015).

Por meio dos parâmetros geomecânicos derivados do Q-System (Barton *et al.* 1974), é possível relacionar diferentes características geotécnicas dos maciços rochosos, como a condutividade hidráulica, de forma a prever o comportamento hidrogeomecânico do maciço em estudo. A equação (09) define a relação matemática entre os parâmetros mencionados (Gates, 1995, 2003)

$$HP_{value} = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_k \cdot J_{af}} \cdot J_w \quad (09)$$

Sendo o *RQD* o índice de qualidade do maciço, *J_n* o índice de descontinuidades, *J_r* o índice de rugosidade das descontinuidades, *J_{af}* o fator de abertura e forma das descontinuidades, *J_k* o fator da condutividade hidráulica das descontinuidades e *J_w* o fator de circulação da água das descontinuidades (Meirinhos, 2015).

- **Índice de descontinuidades, J_n:**

As descontinuidades podem ser agrupadas em famílias quando apresentam características semelhantes como a orientação e densidade de fraturas. Num maciço rochoso pode existir a ocorrência de uma ou mais famílias dominantes (Meirinhos, 2015). Dependendo destas condições, o índice J_n pode ser classificado de acordo com a Tabela 11:

Tabela 11: Índice de descontinuidades (*J_n*).

<i>J_n</i>	
Valor	Classificação
0,5 - 1,0	Nenhuma, ou poucas descontinuidades
2	Uma família
3	Uma família com aleatórias
4	Duas famílias
6	Duas famílias com aleatórias
9	Três famílias
12	Três famílias com aleatórias
15	Quatro ou mais famílias com aleatórias muito próximas; maciço altamente fracturado
20	Rocha esmagada, tipo "solo"

Fonte: Gates (1997, 2003; adaptado de Barton *et al.* 1974).

- **Índice de rugosidade, J_r :**

A rugosidade das rochas pode ser classificada desde a mais rugosa e ondulada até a mais lisa e planar. Esta característica é importante pois pode influenciar o percurso da água pelas descontinuidades, assim como a sua abertura (Meirinhos, 2015). A Tabela 12 apresenta a classificação relativa à superfície das descontinuidades:

Tabela 12: Índice de rugosidade (J_r).

J_r	
Valor	Classificação
4	Descontínuas
3	Rugosas ou irregulares, onduladas
2	Lisas, onduladas
2	Estriadas, ondulante
1.5	Rugosas ou irregulares, planas
1.5	Estriadas, planas
1	Lisas, planas, polidas

Fonte: Gates (1997, 2003; adaptado de Barton *et al.* 1974).

- **Fator de abertura e forma, J_{af} :**

Este parâmetro relaciona a forma e tamanho da abertura das descontinuidades (Meirinhos, 2015). O tamanho médio da abertura mecânica das descontinuidades pode ser, por exemplo, medidas no campo usando uma fita graduada. A classificação pode ser realizada de acordo com a Tabela 13.

Tabela 13: Índice de abertura e forma (J_{af}).

J_{af}	
Valor	Classificação
1	Descontinuidades fechadas, < 0,1 mm
1,2	90% das descontinuidades, abertura entre 0,1 ≤ 1,0 mm
1,4	90% das descontinuidades, abertura entre 1,0 ≤ 5,0 mm
1,8	90% das descontinuidades, abertura entre 5,0 ≤ 10,0 mm
2,5	90% das descontinuidades, abertura entre 10,0 ≤ 20,0 mm
5	90% das descontinuidades, abertura entre 20,0 ≤ 50,0 mm
7,5	90% das descontinuidades, abertura entre 50,0 ≤ 100,0 mm
10	90% das descontinuidades, abertura entre 100,0 ≤ 200,0 mm
15	90% das descontinuidades, abertura > 200,0

Fonte: Gates (1997, 2003; adaptado de Barton *et al.* 1974).

- **Fator de condutividade hidráulica, J_k :**

A presença ou ausência de preenchimento nas discontinuidades vai determinar a sua condutividade hidráulica, definido como a taxa de fluxo de água, expresso em metros por dia (m/dia), pois o tipo e a quantidade de preenchimento vão influenciar a circulação da água pelas discontinuidades. Desta forma, uma discontinuidade limpa e aberta terá uma condutividade maior quando comparada com uma discontinuidade com preenchimento mineral e fechada (Meirinhos, 2015). Gates (1997, 2003) propuseram a classificação mostrada na Tabela 14, a partir de classificação inicialmente proposta por Freeze & Cherry (1979)

Tabela 14: Fator de condutividade hidráulica (J_k).

J_k		
Valor	Condutividade hidráulica (m/dia)	Classificação
1	$<10^{-5}$	Todas apertadas ou com preenchimento de calcite/quartzo, sem fluxo de água
2	$10^{-5} - 10^{-2}$	90% das discontinuidades preenchidas com argila, fluxo de água baixo
3	$10^{-2} - 10^{-1}$	90% das discontinuidades preenchidas com areia siltosa, fluxo de água moderado
3,5	$10^{-1} - 10^3$	90% das discontinuidades preenchidas com areia limpa ou com cascalho, fluxo de água moderado a elevado
4	$10^3 - 10^5$	90% das discontinuidades limpas e moderadamente abertas, bom fluxo de água
5	$>10^5$	90% das discontinuidades abertas, limpas, muito bom fluxo de água

Fonte: Gates (1997, 2003; adaptado de Freeze & Cherry, 1979).

- **Fator de circulação de água, J_w :**

Este fator é uma medida de circulação de água nas discontinuidades e está sujeita à ação da pressão de água nos maciços fissurados e nas discontinuidades, sendo maior quanto menor for J_w ; portanto, J_w é inversamente proporcional à pressão da água, segundo Barton *et al.* (1974). As taxas de precipitação anuais, a configuração de fluxos de água subterrânea regionais e reservatórios, no entanto, não impactam diretamente o valor do HP- Value (Meirinhos, 2015). A Tabela 15, resume as descrições e classificações para J_w .

Tabela 15: Fator de circulação de água (J_w).

J_w			
Valor	Gotas/min	L/s	Classificação
1	<1	$<1 \times 10^{-6}$	Seco
0,94	$1 \leq 10$	$1 \times 10^{-6} \leq 1 \times 10^{-5}$	Húmido
0,86	$10 \leq 100$	$1 \times 10^{-5} \leq 1 \times 10^{-4}$	Gotas
0,76	>100	$1 \times 10^{-4} \leq 1 \times 10^{-3}$	Gotejante
0,66		$1 \times 10^{-3} \leq 1 \times 10^{-2}$	Escorrência
0,5		$1 \times 10^{-2} \leq 1 \times 10^{-1}$	Fluxo ligeiro
0,33		$1 \times 10^{-1} \leq 1$	Fluxo moderado
0,2		> 1	Fluxo intenso

Fonte: Gates (1997, 2003; adaptado de Barton *et al.* 1974).

Gates (1997, 2003) observou que maciços rochosos com valores de HP-Value < 3 em escavações subterrâneas estão sujeitos a potenciais problemas de infiltração, assumindo que a água subterrânea está presente no maciço. Por outro lado, maciços rochosos com valores de HP-Value > 3 parecem ter poucos problemas de infiltração. Esta caracterização hidrogeomecânica é uma técnica que aumenta a probabilidade de alocar adequadamente poços, além de prever problemas de infiltração em escavações rochosas, como túneis ou minas (Meirinhos, 2015).

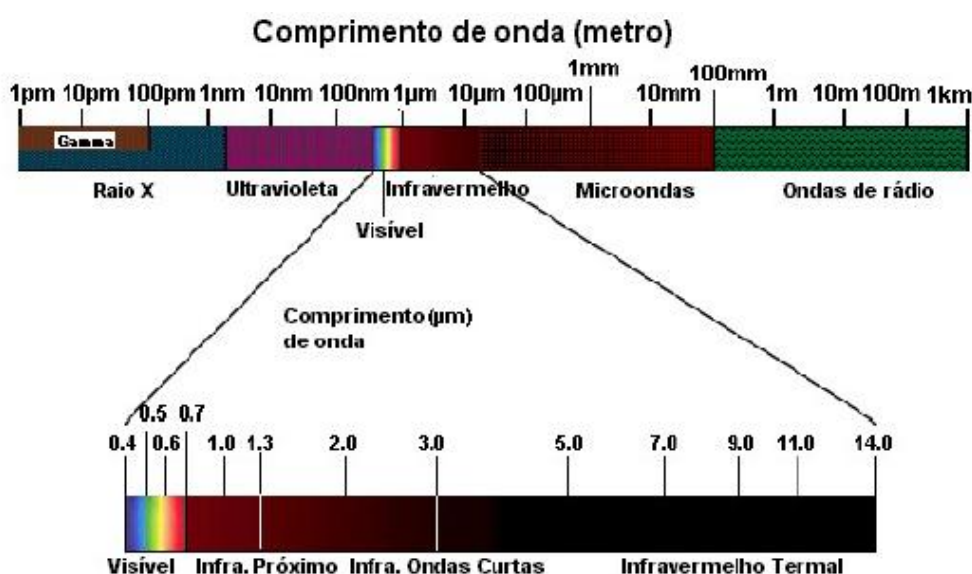
2.3 TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

O princípio da termografia é baseado no fato de que todos os objetos com temperatura acima do zero absoluto ou zero Kelvin ($-273,15^\circ\text{C}$), emitem energia na forma de ondas eletromagnéticas. Isso ocorre porque a radiação térmica é resultado do grau de agitação das moléculas do material. Quanto maior o grau de agitação das moléculas, maior será a temperatura e maior será a emissão de radiação térmica de um objeto (Jensen, 2009; Meneses & Almeida, 2012).

O espectro eletromagnético (Figura 6) é dividido em intervalos de comprimento de onda que variam desde os raios gama ($1 \mu\text{m}$ a $100 \mu\text{m}$) até as ondas de rádio (1m a 1km). Entre as bandas que formam este espectro, a radiação térmica está inserida no intervalo referente às ondas do infravermelho termal que causam ou afetam o estado térmico de um corpo. Os humanos experimentam essa energia térmica por meio do nosso sentido do toque, por exemplo,

quando sentimos a energia radiante térmica do sol ou a energia radiante de um fogo em nosso rosto (Jensen, 2009). No entanto, nossos olhos não conseguem detectar diferenças na energia infravermelha térmica emitida pela superfície dos objetos, porque são sensíveis apenas à luz visível de comprimento de onda curto (0,4 μm a 0,7 μm) (Jensen, 2009). Apesar disso, existem termovisores capazes de detectar essa radiação, converter em sinais elétricos e criar termogramas a partir destes sinais (Jensen, 2009; Meneses & Almeida, 2012; Pappalardo *et al.* 2016; Pappalardo *et al.* 2017).

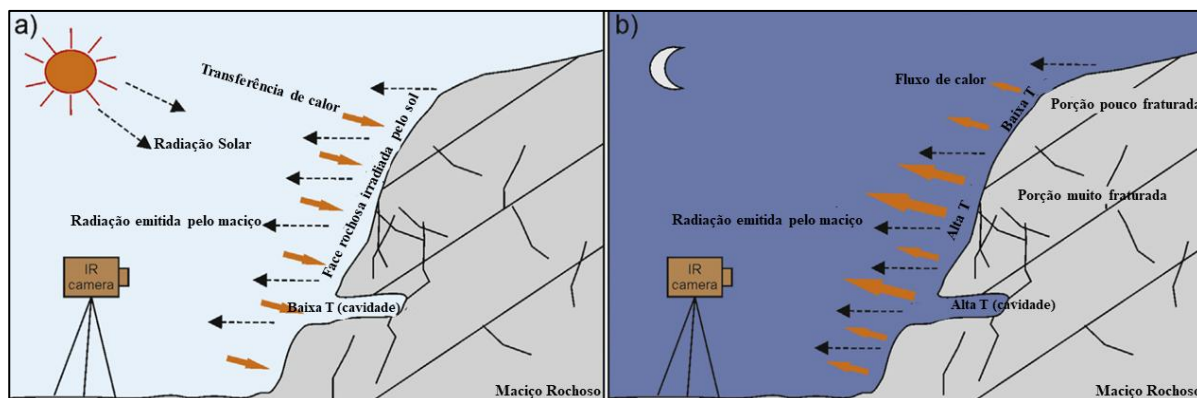
Figura 6: Espectro eletromagnético.



Fonte: Jensen (2009).

A radiação medida pelo termovisor não depende apenas da temperatura do objeto investigado. A variação da temperatura representada nos termogramas sofre influência principalmente do aquecimento solar em materiais no entorno do objeto. Fontes externas como sombra, reflexão e irregularidades na superfície, além de parâmetros de medição como emissividade e a distância entre a câmera e o alvo, também podem interferir nos resultados. É possível observar na Figura 7a que o maciço rochoso possui cavidades, regiões mais ou menos fraturadas e uma superfície irregular que responde distintamente à radiação solar. Para evitar o efeito de radiação difusa, é adequado capturar as imagens termais ao amanhecer, antes da incidência direta da radiação solar na superfície e nos períodos da tarde e noite (Figura 7b), quando a incidência solar tiver cessado (Pappalardo *et al.* 2016), porque são nesses momentos que as condições térmicas do objeto estarão mais próximas do natural.

Figura 7: Comportamento da troca de calor em um maciço rochoso durante o dia com influência da radiação solar (a) e no período da noite (b).



Fonte: Adaptado de Pappalardo *et al.* (2016)

2.3.1 Emissividade

A emissividade é a capacidade de um objeto emitir radiação eletromagnética (Jensen, 2009). É a razão entre a radiação emitida por um corpo real (Mr) e a radiação emitida por um corpo negro (Mb) à mesma temperatura (equação 10), sendo o corpo negro um absorvedor e emissor de radiação perfeito (Jensen, 2009; Pappalardo *et al.* 2016; Mineo & Pappalardo, 2021). A superfície da terra possui vários corpos que irradiam de forma seletiva e emitem somente parte da energia que seria emitida por um corpo negro que estivesse à mesma temperatura (Jensen, 2009; Meneses & Almeida, 2012). Esses corpos possuem emissividade que variam de 0 a 1, sendo que superfícies mais planas tendem a ter valores mais próximos de zero. Esse parâmetro depende de fatores como a composição química, rugosidade da superfície, umidade, entre outros (Meneses & Almeida, 2012).

$$\varepsilon = \frac{Mr}{Mb} \quad (10)$$

Para Meneses & Almeida (2012), pelo fato de a emissividade ser uma característica intrínseca dos corpos reais, os detectores que operam na faixa do infravermelho termal não registram a temperatura real ou cinética (T_{kin}) do terreno, somente a intensidade da radiação emitida por ele, denominada temperatura radiométrica aparente ($Trad$). A Temperatura cinética (T_{kin}), medida com um termômetro, representa o nível de agitação das moléculas do material e como resultado, os objetos emitem radiação eletromagnética. A quantidade de energia que sai de um corpo medida por um sensor, é chamada de fluxo radiante (φ). Para determinar a relação

entre a T_{rad} e a T_{kin} , é necessário utilizar a lei de Stefan-Boltzmann (equação 11), válida para corpos negros.

$$Mr = \varepsilon \sigma T^4 \quad (11)$$

No qual M é a emitância radiante medida em Wm^{-2} , σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,6697 \times 10^8 Wm^{-2} K^{-4}$) e T (K) é a temperatura absoluta que o corpo emite. Combinando as equações 09 e 10 da emissividade e de Stefan-Boltzmann, se obtém a seguinte relação definida pela equação 12:

$$T_{rad} = \varepsilon^{1/4} T_{kin} \quad (12)$$

Como a emissividade ε varia entre 0 e 1, se pode concluir da equação 10 que a temperatura radiométrica medida no sensor sempre será menor que a temperatura cinética do objeto. Os materiais com emissividades próximas a 1 exibem temperaturas radiométricas mais próximas a de suas temperaturas cinéticas. Para materiais com emissividade muito baixa a T_{rad} será muito mais baixa que a sua T_{kin} , dando a impressão de ser uma superfície mais fria o que pode ser um problema na identificação de alguns alvos de estudo (Meneses & Almeida, 2012).

2.3.2 Caracterização de Maciços Rochosos por Imageamento Termal

O levantamento termográfico de maciços rochosos tem sido aplicado, na geologia de engenharia, principalmente para avaliar a presença de descontinuidades, além de investigar a existência de cavidades, quando há diferença significativa de temperatura entre o meio fraturado ou cárstico e o ambiente externo (Rinker, 1975). Wu *et al.* (2005) estudaram a integridade de um maciço rochoso de arenito por meio da presença de cavidades atrás de um talude de concreto projetado. Baroň *et al.* (2014) utilizaram a termografia infravermelha (IRT) como uma técnica para mapear fraturas abertas e fraturas de tensão em áreas instáveis em maciços e falésias. A termografia de infravermelho também tem sido empregada para a detecção de percolação de água em barragens (Po *et al.* 2025).

A utilização de IRT como complemento das classificações geomecânicas foi introduzido por Mineo *et al.* (2015a), para avaliar o grau de fraturamento em dois maciços rochosos distintos e intensamente fraturados nas Montanhas Peloritani, nordeste da Sicília, Itália. O estudo alcançou resultados satisfatórios, permitindo correlacionar as temperaturas mais altas dos termogramas às regiões mais fraturadas e às cavidades. Pappalardo *et al.* (2016), posteriormente, complementaram este estudo preliminar em litotipos de calcário, dolomitos e porfiróides na mesma região e desenvolveram o índice de resfriamento específico (CRI).

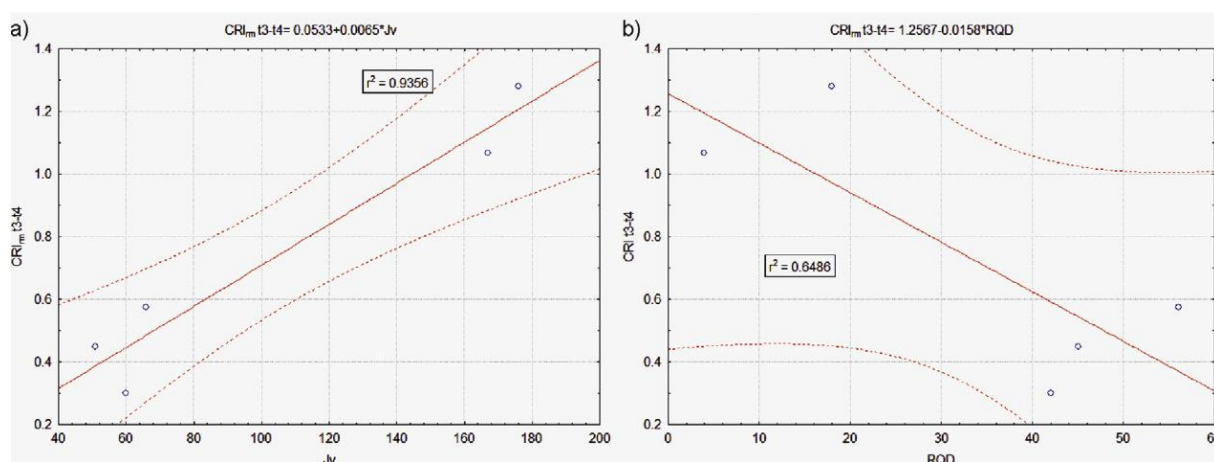
Este índice é obtido por meio do processamento digital das imagens de IRT, onde é possível obter as temperaturas máxima, mínima e média capturadas pela câmera infravermelha. As temperaturas máximas e mínimas estão relacionadas a um ou mais pixel do termograma, enquanto a temperatura média corresponde a um valor ponderado de toda imagem termal. Utilizando a variação da temperatura por unidade de tempo, calcula-se o CRI médio definido pela equação 13:

$$CRI_m = \frac{\Delta T_m}{\Delta t} \quad (13)$$

Onde o ΔT_m é a variação da temperatura média de todo o termograma e Δt é o intervalo de tempo considerado.

Como resultado, Pappalardo *et al.* (2016) identificaram uma relação linear positiva entre o CRI_m e o índice J_v (Figura 8a) e uma relação linear negativa entre o CRI_m e o RDQ (Figura 8b), evidenciando que a termografia infravermelha representa uma técnica remota com grande potencial para auxiliar nas classificações geomecânicas tradicionais.

Figura 8: Relação positiva entre o CRI_m e o Índice J_v e relação negativa entre CRI_m e RDQ.



Fonte: Pappalardo *et al.* (2016).

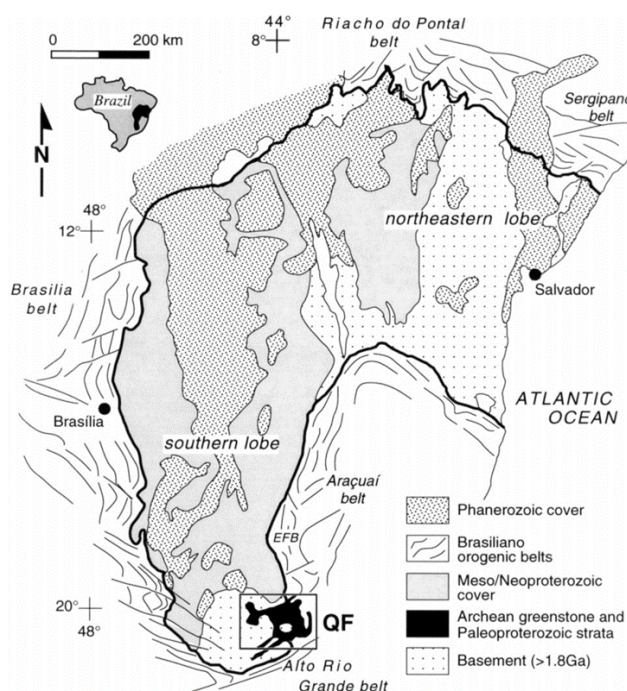
Pappalardo *et al.* (2017) também propuseram a termografia infravermelha como uma alternativa válida ao se avaliar, indiretamente, a condutividade hidráulica de maciços rochosos fraturados das Montanhas Peloritani. A condutividade hidráulica, adquirida por meio de equações empíricas, correlacionada ao CRI, resultou em uma maior taxa de resfriamento para os litotipos de maior condutividade hidráulica.

CONTEXTO GEOLÓGICO

3 CONTEXTO GEOTECTÔNICO

A mina de Fazendão está inserida na borda leste do Quadrilátero Ferrífero (QFe), importante província mineral brasileira, localizada na porção extremo sul do cráton São Francisco (Almeida, 1977) (Figura 9) e parcialmente na Faixa Araçuai de idade brasileira. O QFe é constituído por sucessão do tipo *greenstone belt* neoarqueanas compreendida por rochas metavucanossedimentares do Supergrupo Rio das Velhas, sequências supracrustais do Paleoproterozóico, que englobam as rochas metassedimentares do Supergrupo Minas, rochas metassedimentares e metavulcânicas do Supergrupo Estrada Real e os metarenitos e metaconglomerados do Supergrupo Espinhaço (Endo *et al.* 2020).

Figura 9: Mapa regional do Cráton do São Francisco. Em destaque, a localização do QFe.

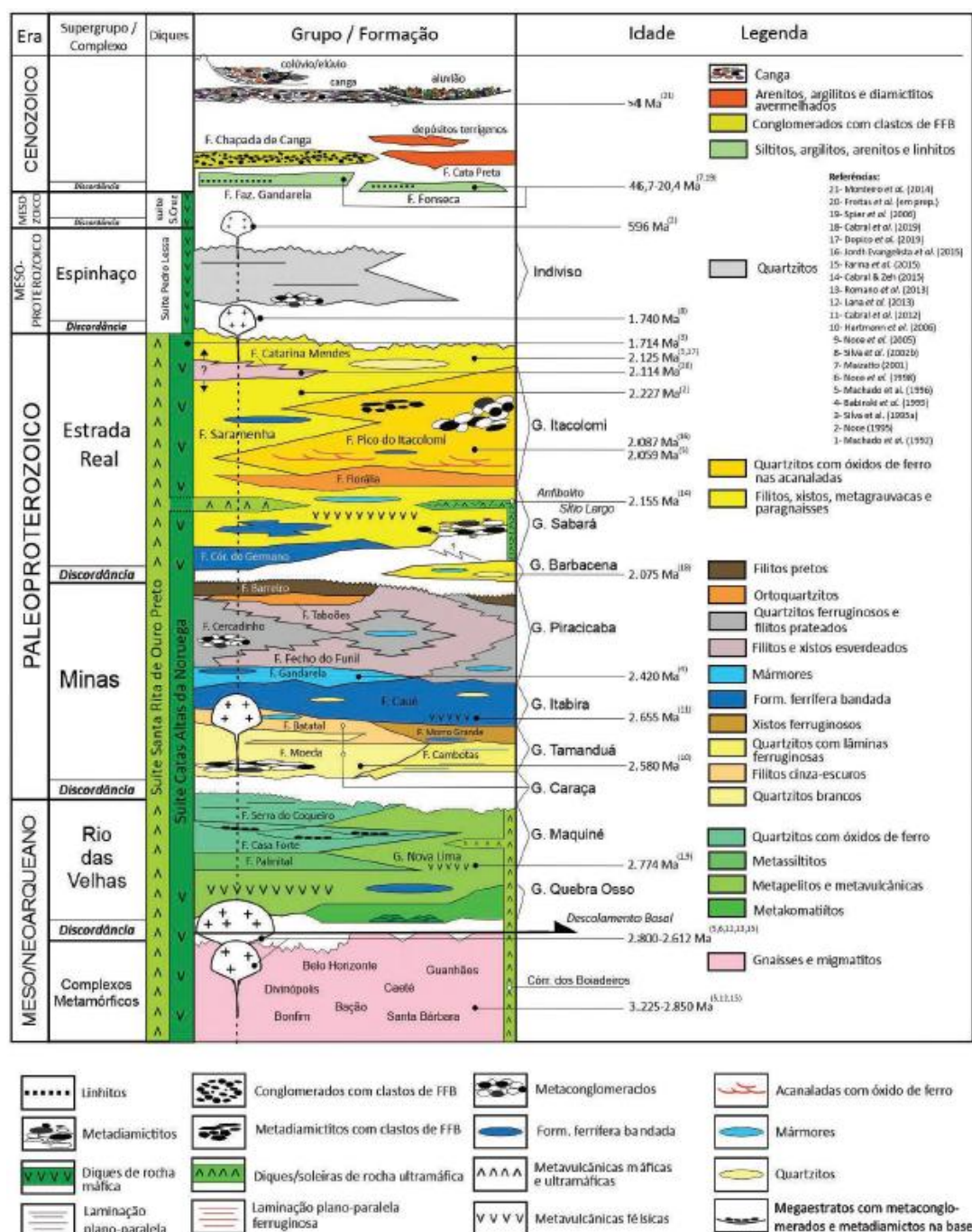


Fonte: Alkmim & Marshak, 1998.

3.1 LITOESTRATIGRAFIA

A coluna estratigráfica do QFe mais recente é a de Endo *et al.* (2020) (Figura 10).

Figura 10: Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: Endo *et al.* 2020.

3.1.1 Supergrupo Minas

A área de estudo está inserida nas rochas do Supergrupo Minas. Este supergrupo é interpretado como uma bacia intracratônica de idade paleoproterozóica, apresenta uma discordância sobre o Supergrupo Rio das Velhas. Da base para o topo é composto pelos grupos Tamanduá, Caraça, Itabira e Piracicaba (Dorr 1969; Endo *et al.* 2020).

Grupo Tamanduá

Endo *et al.* (2020) subdividem o Grupo Tamanduá em duas formações: Formação Cambotas (inferior), composta por quartzitos, ortoquartzitos, quartzitos com lâminas ferruginosas, xistos quartzosos e argilosos, e Formação Morro Grande (superior), composta por xistos filíticos e quartzosos, xistos ferruginosos e formação ferrífera dolomítica.

Grupo Caraça

O Grupo Caraça é compreendido por duas Formações: A Formação Moeda (inferior) composta, da base para o topo, por quartzitos finos a grossos, filitos quartzosos e sericíticos, e a Formação Batatal (superior), constituída por filitos sericíticos e carbonosos (Dorr, 1969).

Grupo Itabira

O Grupo Itabira é composto por duas formações: Formação Cauê constituída de formação hospedeira do minério de Ferro do QFe, composta por itabiritos, itabiritos dolomíticos, itabiritos anfíbolíticos, também por filitos dolomíticos, hematita filitos, quartzitos e mármore. A Formação Gandarela é composta essencialmente por mármore e mármore dolomíticos (Dorr, 1969).

Grupo Piracicaba

O Grupo Piracicaba é composto por quatro formações (da mais antiga para a mais nova): Formação Cercadinho constituída de quartzito e filitos ferruginosos, Formação Fecho do Funil constituído de filitos e xistos esverdeados, Formação Taboões constituída de ortoquartzitos, e a Formação Barreiro constituída de filitos pretos (Endo *et al.* 2020).

3.2 GEOLOGIA LOCAL

As estruturas presentes no Quadrilátero Ferrífero possuem uma complexidade devido a eventos deformacionais que influenciaram o arcabouço estrutural da região. Dentre essas estruturas, se destaca o Sinclinal Santa Rita, no qual está inserida a mina de Fazendão. Uma estrutura cuja geometria ainda é objeto de vários estudos.

Para Endo *et al.* (2020), o sinclinal possui eixo com atitude 110/55 e charneira na região da cava de Almas. O flanco leste é composto por rochas do Supergrupo Minas e estão fortemente seccionadas pela falha de Água Quente. Rossi (2014), por outro lado, sugere que o sinclinal compreende uma dobra de escala sub-regional de direção axial N-S, com raízes no embasamento do Complexo Santa Bárbara e seccionada pela falha de Água Quente.

3.2.1 Estratigrafia

Os principais tipos de rochas e unidades estratigráficas presentes na mina de Fazendão estão associados à formação ferrífera que constituem a Formação Cauê do Grupo Itabira, Supergrupo Minas. O contato de base é marcado pelas rochas metassedimentares das Formação Moeda e Formação Batatal e no topo da sequência estratigráfica por dolomitos, da Formação Gandarela. É comum a presença de diques constituídos por rochas metavulcânicas favoráveis ao enriquecimento do minério de ferro. A cobertura cenozóica é contínua, porém pouco espessa, representada por cangas e lateritas.

Itabirito

O itabirito possui variados aspectos relacionados a sua resistência e composição química. O itabirito friável (IF) é mais rico em teor de ferro, apresenta bandamento e xistosidade bem definidos, é composto por intercalações milimétricas de quartzo (sílica branca) e hematita cinza azulada a negra (Figura 11). O itabirito compacto (IC) possui bandamento e xistosidade bem definidos, constituído por bandas de hematita e quartzo, por vezes com lâminas contendo anfíbólios, este último frequentemente alterado. Possui alto grau de compacidade e ocorre em corpos lenticulares intercalados aos demais tipos de itabirito. O itabirito goethítico (IGO) apresenta coloração avermelhada/amarelada, podendo ainda ser identificadas lâminas formadas por pseudomorfos de anfibólio radial ou acicular. O itabirito manganesífero (IMN) é constituído principalmente por bandas ricas de hematita contendo minerais de óxidos e/ou hidróxidos de manganês, intercaladas com bandas de quartzo.

Figura 11: Caixa de testemunho de sondagem constituída por itabirito friável.



Fonte. Autora.

Filito

Os filitos são representados na cava pela Formação Batatal, quando ocorre na base da Formação Cauê, ou pelo Grupo Piracicaba, quando ocorre no topo. Possuem aspecto multicolorido, variando de tonalidades cinza prateado na base para bege a avermelhado no topo. Em melhores exposições, apresenta-se como o típico Filito Batatal, com sericita, quartzo e finíssimas palhetas de hematita ou grafita, com tonalidade cinza clara. Às vezes encontram-se bandados, mostrando alternância de lâminas mais claras e ricas em sericita com níveis cinza, mais ricos em hematita, carbonatos ou grafita. Os filitos estão localizados juntos a zonas de falhamentos, posicionados por cavalgamentos sobre itabiritos ocre. Devido a essas características, são extremamente suscetíveis a rupturas.

Rochas metavulcânicas

Na mina ocorre também rocha intrusiva básica, de protólito anfibolítico, contendo minerais acessórios de turmalina, rutilo, moscovita/sericita e raro quartzo. Dispõem-se preferencialmente em diques e apófises discretas cortando a formação ferífera. Mostram-se

alterados e apresentam uma coloração vermelha a amarelada quando alteradas e coloração esverdeada quando são.

Canga

Rocha de natureza detrítica gerada pela lixiviação da sílica e concentração do ferro e remobilização a partir da formação ferrífera. Possui espessura pouco significativa, geralmente inferior a 10 metros. Ocorre recobrendo toda a formação ferrífera e também as encaixantes (Figura 12).

Figura 12: Caixa de testemunho com canga detrítica.



Fonte. Autora.

Laterita

Denomina-se laterita na mina ao material argiloso, subordinadamente ferruginoso, com coloração variando de amarela a avermelhada. Localmente ocorrem blocos de formação ferrífera caracterizados por rolados argilosos. Na mina, a laterita é pouco representativa.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido conforme os itens descritos a seguir:

4.1.1 Revisão Bibliográfica

Os principais trabalhos consultados, tornando-se base bibliográfica, foram os artigos de pesquisadores da área da termografia infravermelha aplicada a maciços rochosos, como Pappalardo *et al.* (2016) e Pappalardo (2017). Os trabalhos de Deere (1966), Bieniawski (1973, 1989), Barton (1974), Palmström (1982, 2005) e Fiori (2016) também foram norteadores por possuírem informações técnicas e parâmetros estabelecidos internacionalmente para caracterização geomecânica de maciços rochosos, além das recomendações da *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering* (ISRM, 1981). A avaliação do potencial hídrico foi feita com base nos estudos de Gates (1995, 1997, 2003). Demais artigos e textos de temas relacionados a termografia infravermelha e mecânica das rochas foram consultados durante a preparação desta pesquisa, buscando-se a compreensão das metodologias a serem aplicadas.

4.1.2 Trabalho de Campo

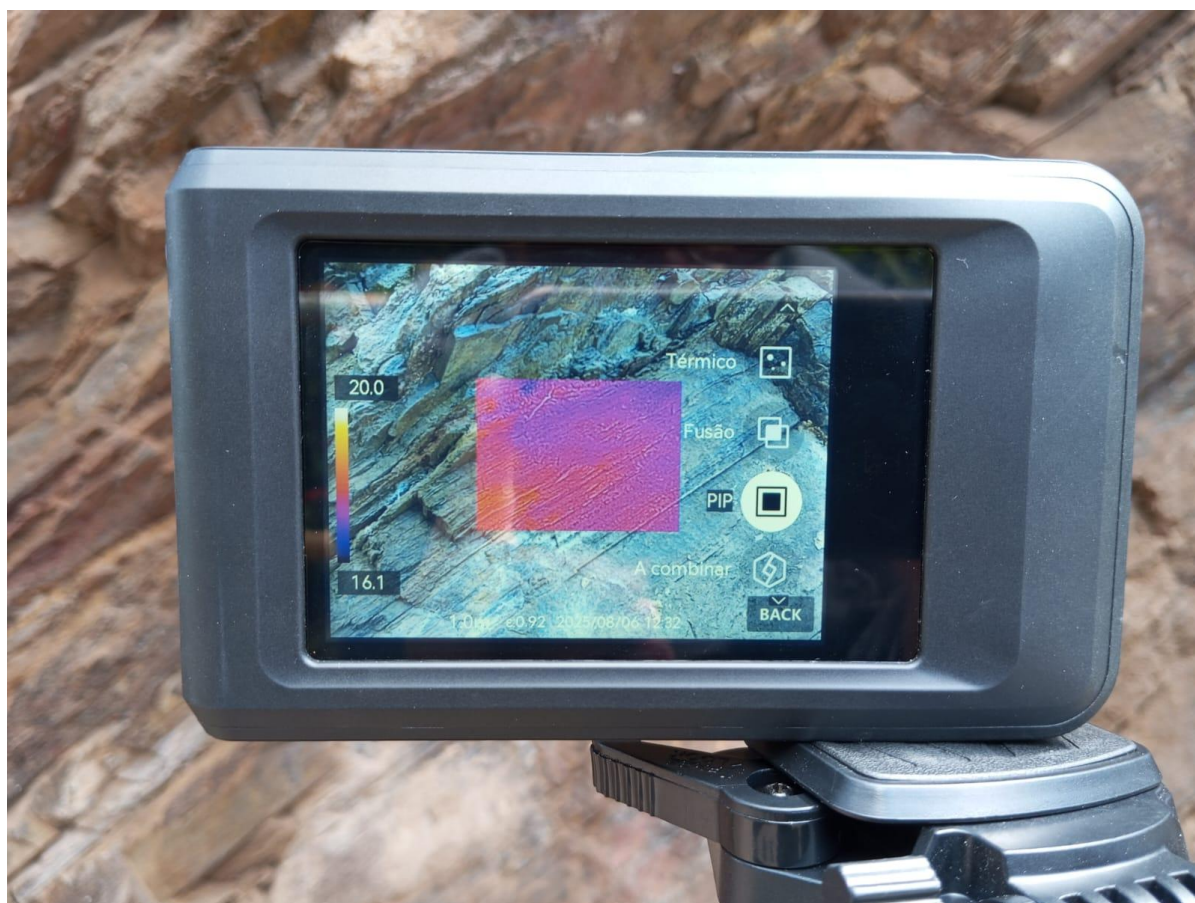
Como parte de reconhecimento de campo e aquisição de dados geológicos e geomecânicos, foram realizadas atividades de campo na mina de Fazendão. Além dos equipamentos de segurança exigidos pela empresa, utilizou-se caderneta de campo, martelo, bússola de geólogo, trena e câmera de infravermelho termal. Os parâmetros obtidos em quatro maciços rochosos de itabirito incluem o arranjo estrutural, condição intempérica, grau de faturamento, condição e espaçamento das fraturas e presença ou não de água. Estes parâmetros têm como objetivo realizar os mapeamentos geomecânico e hidrogeomecânico.

Câmera Termográfica

A câmera termográfica (Figura 13), ou termovisor, é um instrumento que opera na faixa do espectro eletromagnético com comprimentos de onda entre 8 μm e 14 μm . Ela funciona basicamente detectando, por meio de uma lente térmica, a radiação infravermelha emitida por um objeto e o resultado é uma imagem (termograma) em escala de cores, que representa um mapa de variação da temperatura superficial do maciço rochoso ao longo do tempo de exposição

(Jensen, 2009; Meneses & Almeida, 2012; Pappalardo *et al.* 2016). Relacionada ao termograma, a câmera tem como saída uma imagem digital capturada a partir da lente ótica.

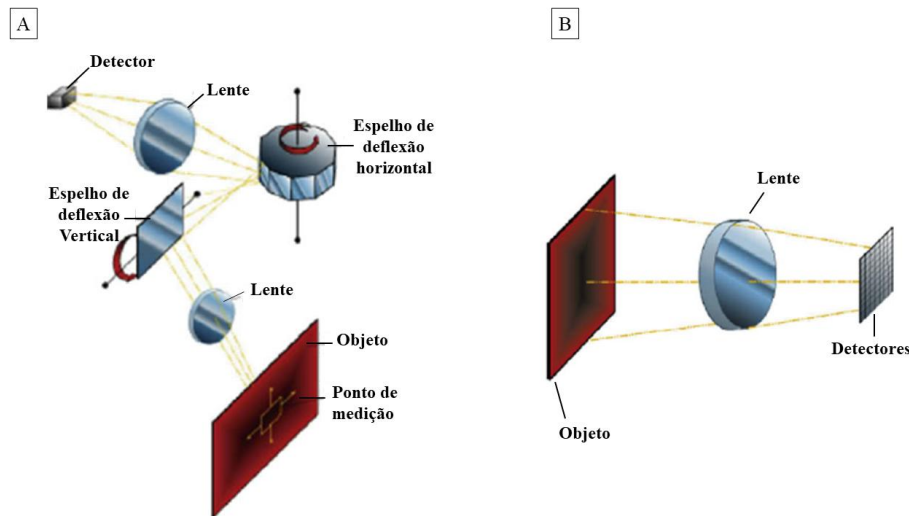
Figura 13: Imagem digital de um maciço rochoso constituído de itabirito com imagem digital sobreposta pelo respectivo termograma no modo de captura PIP (*Picture in Picture*).



Fonte: Autora.

Tan *et al.* (2009) caracterizam o sistema de detecção dos termovisores em dois tipos: sistema de detecção por varredura (*scanning system*) ou sistema fixo de detecção (*staring system*), sendo este último utilizado no instrumento desta pesquisa. O sistema de detecção por varredura realiza o mapeamento de uma área a partir de espelhos e prismas rotativos. Esse sistema necessita de um detector ou um arranjo linear de detectores, como ilustrado na Figura 14A. O sistema de detecção fixo ou Matriz de Plano Focal ou FPA (*Focal Plane Array*) (Figura 14B), por outro lado, possui detectores posicionados em forma de matriz bidimensional, de modo que a radiação incidente é diretamente captada.

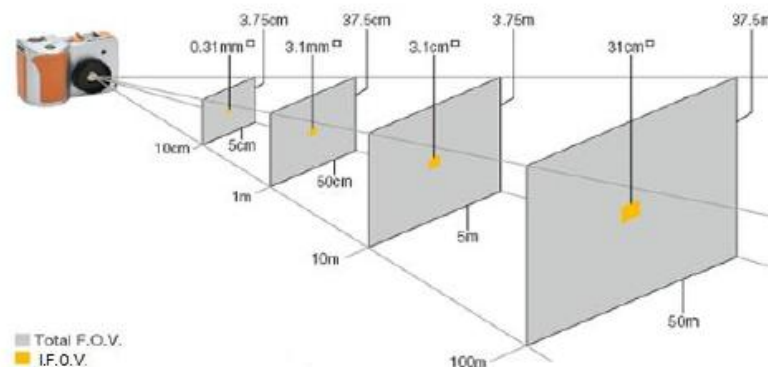
Figura 14: Sistema de detecção por varredura (A) e Matriz de Plano Focal (B).



Fonte: Adaptado de Tan *et al.* (2009).

Em relação ao campo de visão, o IFOV (*Instantaneous Field of View*) é um parâmetro que representa o menor detalhe que a câmera pode captar. É medido em radiano e diz respeito à projeção de um pixel no objeto observado. O conjunto de IFOV corresponde o FOV (*Field of View*) (Figura 15), que é a maior área que a câmera consegue captar em uma determinada distância ou o tamanho da imagem projetada na tela LCD do termovisor (Meneses & Almeida, 2012; Caldeira, 2016).

Figura 15: Campo de visão (FOV) e campo de visão instantâneo (IFOV) de uma câmera de 160 x 120 pixels, IFOV 3,1 mrad e FOV 28° x 21°.



Fonte: Caldeira (2016).

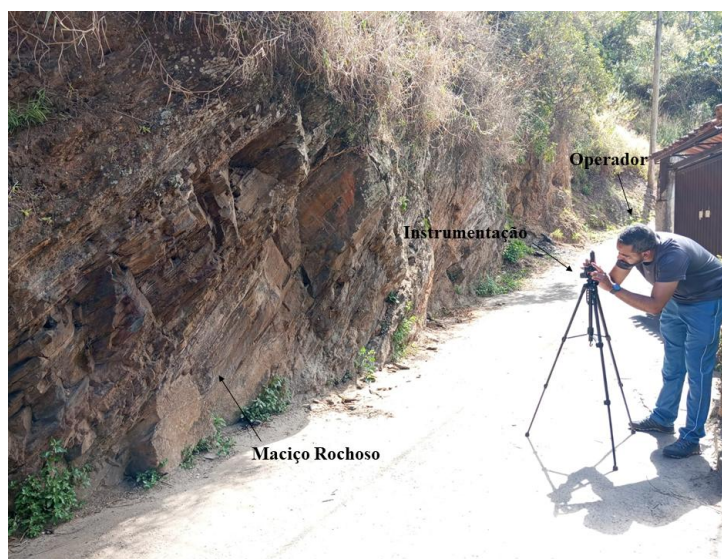
Imageamento com Câmera Termográfica

O mapeamento térmico dos maciços rochosos foi realizado durante o levantamento de um dia em Itabirito com condições intempéricas distintas, para obter a variação espacial do

CRI (cooling rate index) da rocha intacta e das discontinuidades geológicas. A aquisição de imagens foi conduzida com uma câmera infravermelha Hickmicro, modelo Pocket 2, resolução IR 256 x 192 pixels, precisão de temperatura calibrada dentro de ± 2 °C da leitura, faixa de medição de temperatura entre -20 ° e +400 °C, faixa espectral de 7,5 a 14. O campo de visão amplo (FOV) é de 50° x 37,2°, resolução espacial (IFOV) de 3,43 mrad, distância focal de 3,5 mm e sensibilidade para captar a menor variação térmica (NETD) de 40 mK.

Um tripé com posição marcada no chão foi utilizado para garantir a estabilidade da câmera durante o levantamento, enquanto a área imageada do maciço estava a 2 metros de distância do instrumento (Figura 16). A dimensão da área imageada (aproximadamente 4 M²) foi baseada na resolução da câmera termográfica, que não era muito elevada como a empregado por Pappalardo *et al* (2016). A posição do tripé e a área imageada foram marcados para garantir a captura das imagens no mesmo ponto de disparo. Um sensor portátil foi empregado para medir a temperatura ambiente e a umidade relativa, enquanto o coeficiente de emissividade foi assumido de acordo o ensaio de estimativa de emissividade utilizando a termografia infravermelha.

Figura 16: Operação de campo para captação da radiação infravermelha termal pela câmera termográfica.



Fonte: Autora.

A escolha dos maciços rochosos de itabirito foi feita com base nas características estruturais, grau de intemperismo distinto e influência da radiação solar de modo que a rocha sofra exposição e realize a troca de calor com o ambiente. Para evitar que câmera termográfica capte radiação difusa de fontes adjacentes ao maciço os levantamentos foram realizados após a

incidência solar, nos períodos da tarde e noite quando a radiação solar estivesse cessada (Meneses & Almeida, 2012; Mineo *et al.* 2015a; Pappalardo *et al.* 2016).

4.1.3 Estimativa da Emissividade Utilizando Termografia Infravermelha

A metodologia para estimar a emissividade da rocha é baseada na comparação das suas características ópticas com as de um corpo negro com temperatura semelhante, simulado por uma fita isolante (Barreira *et al.* 2021; Mineo & Pappalardo, 2021). Os litotipos analisados neste estudo incluem duas amostras de itabirito com grau de alteração e composição distintos, sendo uma coletada na cava Almas e outra na cava São Luiz, além de uma amostra de xisto e uma amostra de mármore para comparação.

O experimento foi realizado utilizando uma fita isolante com emissividade conhecida ($\epsilon = 0,96$), câmera infravermelha Hickmicro, modelo Pocket 2, cujas especificações técnicas foram anteriormente detalhadas e um termo-higrômetro digital Exbom (Figura 17D), com precisão de temperatura calibrada dentro de $\pm 1^\circ\text{C}$ da leitura, faixa de medição de temperatura ambiente e externa entre -10° e $+50^\circ\text{C}$, leitura da umidade relativa do ar entre 10% e 99%, com precisão de ± 5 UR.

Antes de se obter a emissividade dos litotipos é necessário determinar a temperatura aparente refletida, um parâmetro usado para compensar a radiação refletida no objeto. Essa estimativa foi realizada de acordo com o “método do refletor”, que consiste em amassar um pedaço de papel alumínio, desamassá-lo e colá-lo em um pedaço de papelão do mesmo tamanho. Feito isto, o papelão é colocado em frente a rocha para enquadramento, com o lado contendo o papel alumínio amassado voltado para a câmera infravermelha com a emissividade ajustada para 1,0 (Mineo & Pappalardo, 2021) (Figura 17C). Sem influência de luz, a temperatura aparente do papel alumínio é então medida.

Para a determinação da emissividade, primeiramente foi aplicado a fita isolante na superfície de cada litotipo (Figura 16A). Posteriormente, as rochas foram aquecidas em estufa por 24 horas para alcançar, pelo menos, 20 K acima da temperatura ambiente (Figura 17B). Para compensar os efeitos da reflexão, distância e condições atmosféricas, a câmera infravermelha foi ajustada com os parâmetros de temperatura ambiente e aparente, umidade relativa e distância até o alvo (Barreira *et al.* 2021). Logo após, a imagem IRT foi capturada para cada amostra.

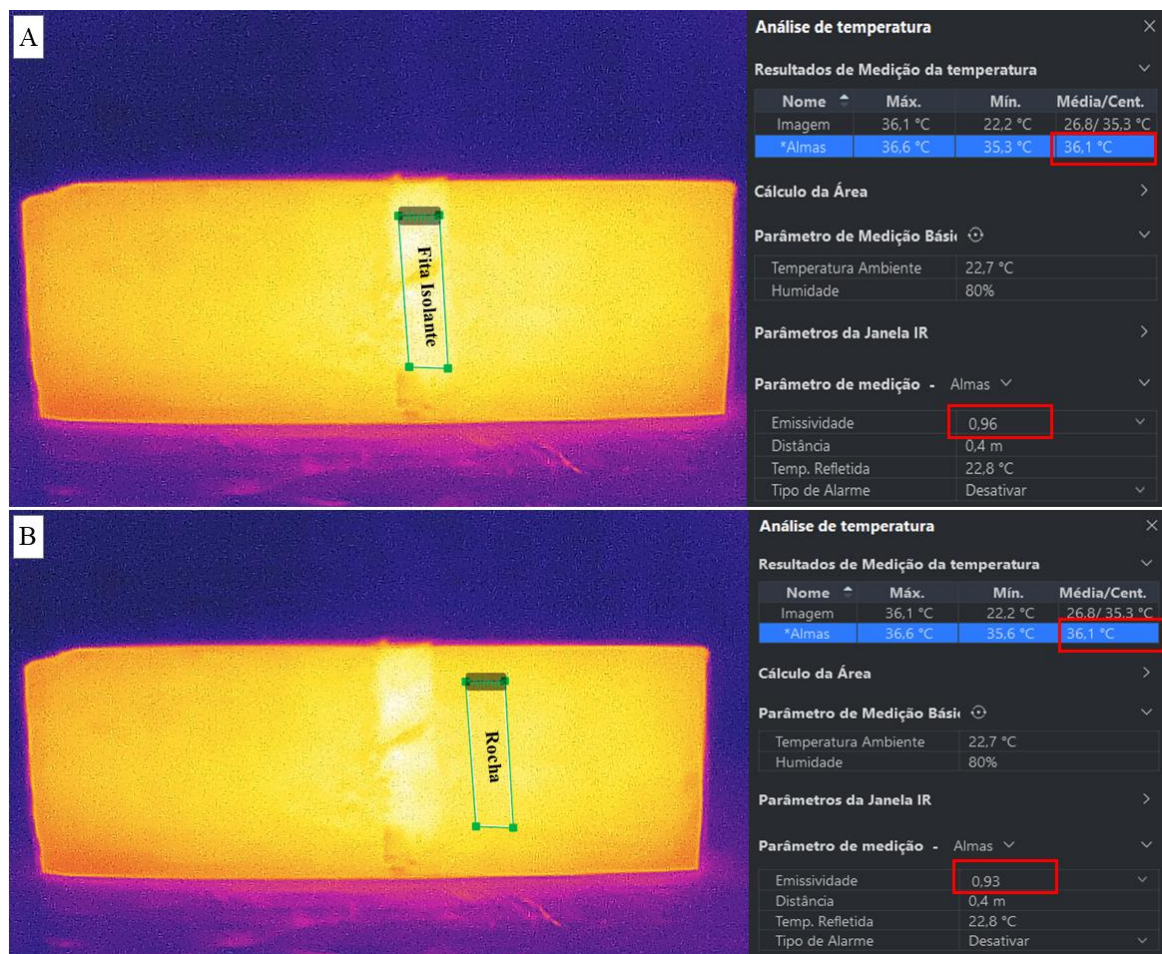
Figura 17: Etapas da abordagem metodológica realizada para determinar a emissividade dos litotipos. Aplicação da fita isolante na superfície da rocha (A); Aquecimento em estufa por 24 horas (B); Aquisição da temperatura aparente (C) e termohigrômetro (D).



Fonte. Autora.

As imagens IRT foram processadas pelo software livre *Hickmicro Analyzer*. A temperatura da fita isolante foi medida em “função de área” (Figura 18A), indicada para superfícies com emissividade variável devido a porosidade e composição mineralógica distinta nas rochas (Mineo & Pappalardo, 2021). Posteriormente, a função de medição foi movida para a superfície da amostra e o ajuste da configuração de emissividade foi feito até que a mesma temperatura média da fita isolante fosse registrada (Figura 18B). Logo, a emissividade correspondente à temperatura média da fita detectada na superfície da rocha é a emissividade da rocha testada.

Figura 18: Processamento das imagens IRT no software. Função de medição de área na fita isolante (A) e função de medição de área na superfície da rocha (B).



Fonte. Autora.

As medições foram realizadas no mínimo em três porções distintas da mesma superfície da amostra analisada e o experimento foi feito em uma sala de laboratório com influência mínima de luz natural e artificial.

4.1.4 Trabalho de Escritório

Nesta etapa foi realizado o estudo da análise cinemática por meio do software *Stereonet*, além do processamento dos dados termográficos com software livre *Hickmicro Analyzer* para comparação destes dados com o levantamento geomecânico e hidrogeomecânico. O software livre *Hickmicro Analyzer* permite isolar faixas de temperaturas específicas, detectar anomalias térmicas, medir diferença de temperatura entre pixels e escolher paleta de cores que mais se adequa a investigação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados os resultados e parâmetros obtidos no presente trabalho. O mapeamento de campo das famílias de descontinuidades, a classificação geomecânica e hidrogeomecânica e o ensaio de emissividade permitiram avaliar o potencial da termografia infravermelha para caracterização de maciços rochosos fraturados.

5.1 ATITUDES DAS DESCONTINUIDADES

Verificou-se grande uniformidade estrutural nos dois setores dos taludes das duas cavas. De fato, durante os trabalhos de campo foram identificadas quatro famílias de fraturas nos taludes de itabirito da cava Almas (Figura 20) e São Luiz (Figura 21) definidas como F1, F2, F3 e F4, sendo F1 paralela à foliação metamórfica (S_n). As medidas das atitudes estão compiladas na Tabela 16. A foliação do itabirito apresenta atitude média de 80/58. As orientações médias das fraturas, definidas a partir do estereograma da Figura 19, estão apresentadas na Tabela 17.

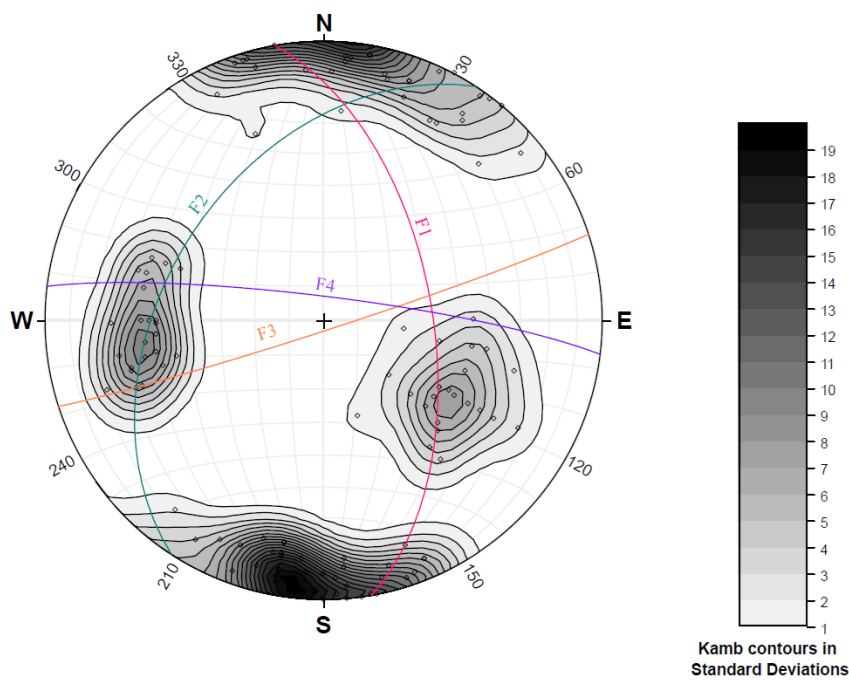
Tabela 16: Medidas das atitudes por família de descontinuidades.

F1// S_n	F2	F3	F4
105/58	320/50	194/80	342/87
80/63	290/45	186/84	299/69
89/65	314/48	185/64	002/87
78/55	299/43	155/78	010/70
70/60	310/40	182/78	340/86
74/50	285/60	190/86	347/84
70/58	310/34	185/82	337/82
76/45	300/40	176/79	004/88
83/54	276/24	164/87	360/80
75/60	300/50	160/60	355/90
79/51	312/46	163/87	357/88
76/60	260/30	161/87	350/90
72/70	263/43	165/83	337/82
90/50	269/39	190/75	349/90
100/55	305/30	210/80	010/80
105/55	275/34	200/85	340/80
90/55	280/45	190/85	010/82
89/50	310/25	175/85	004/80
110/50	320/55	172/90	010/74
85/50	300/45	218/75	015/80
100/45	270/45	190/70	355/75
110/55	280/45	200/75	010/80
-	300/55	195/70	015/80

F1//S _n	F2	F3	F4
-	300/60	220/90	010/80
-	-	190/89	007/88
-	-	205/88	005/80
-	-	217/89	350/90
-	-	230/82	355/78
-	-	215/76	357/82
-	-	208/70	004/88
-	-	214/78	025/76
-	-	210/74	010/74
-	-	225/68	012/74
-	-	200/80	360/90
-	-	190/86	010/80
-	-	215/88	355/75
-	-	190/86	005/75
-	-	185/84	340/75
-	-	170/90	345/80
-	-	190/86	355/75
-	-	200/80	005/75
-	-	195/78	-

Fonte: Autora.

Figura 19: Estereograma confeccionado a partir das 131 medidas estruturais.



Fonte: Autora.

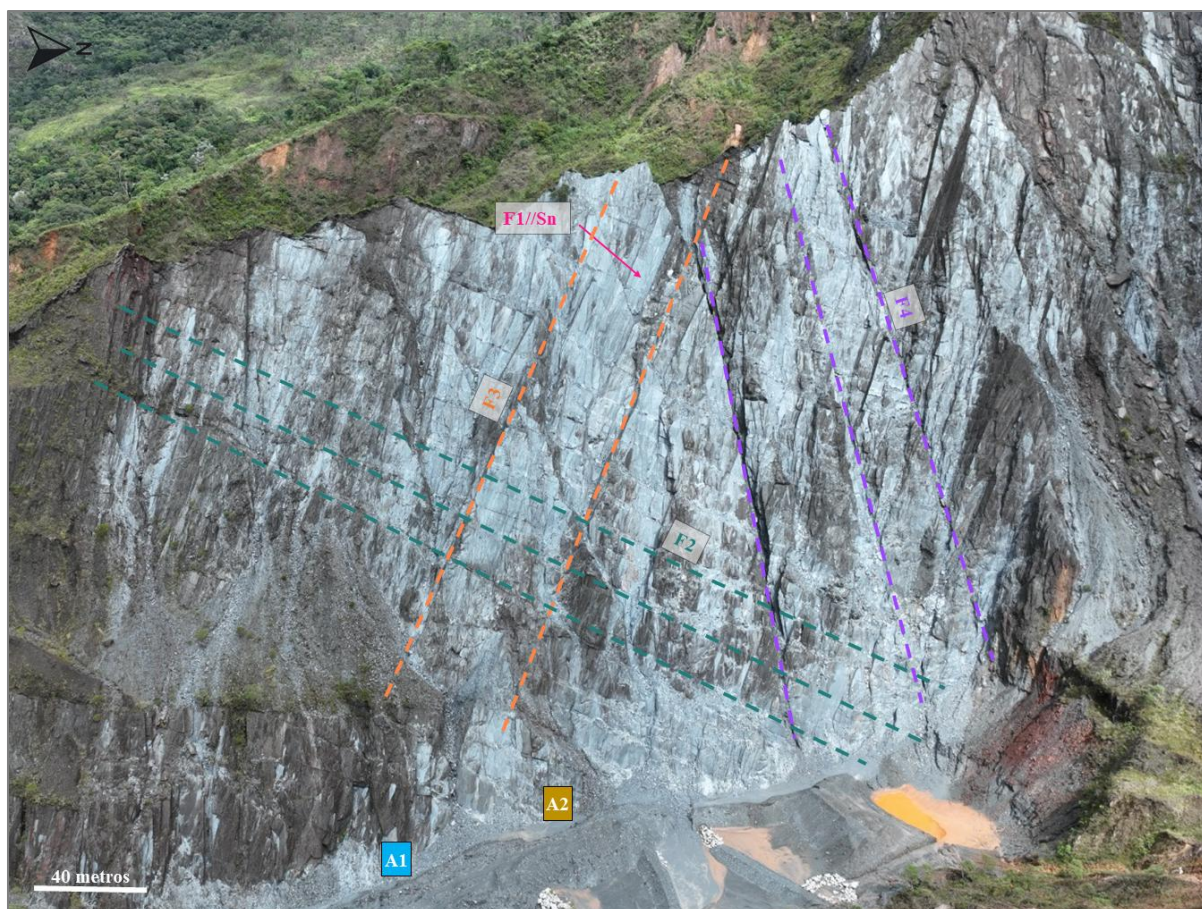
Tabela 17: Orientação média das quatro famílias de descontinuidades.

Fratura	Orientação Média	Número de Medidas
F1//S _n	80/58	22

Fratura	Orientação Média	Número de Medidas
F2	303/43	26
F3	162/87	42
F4	007/83	41

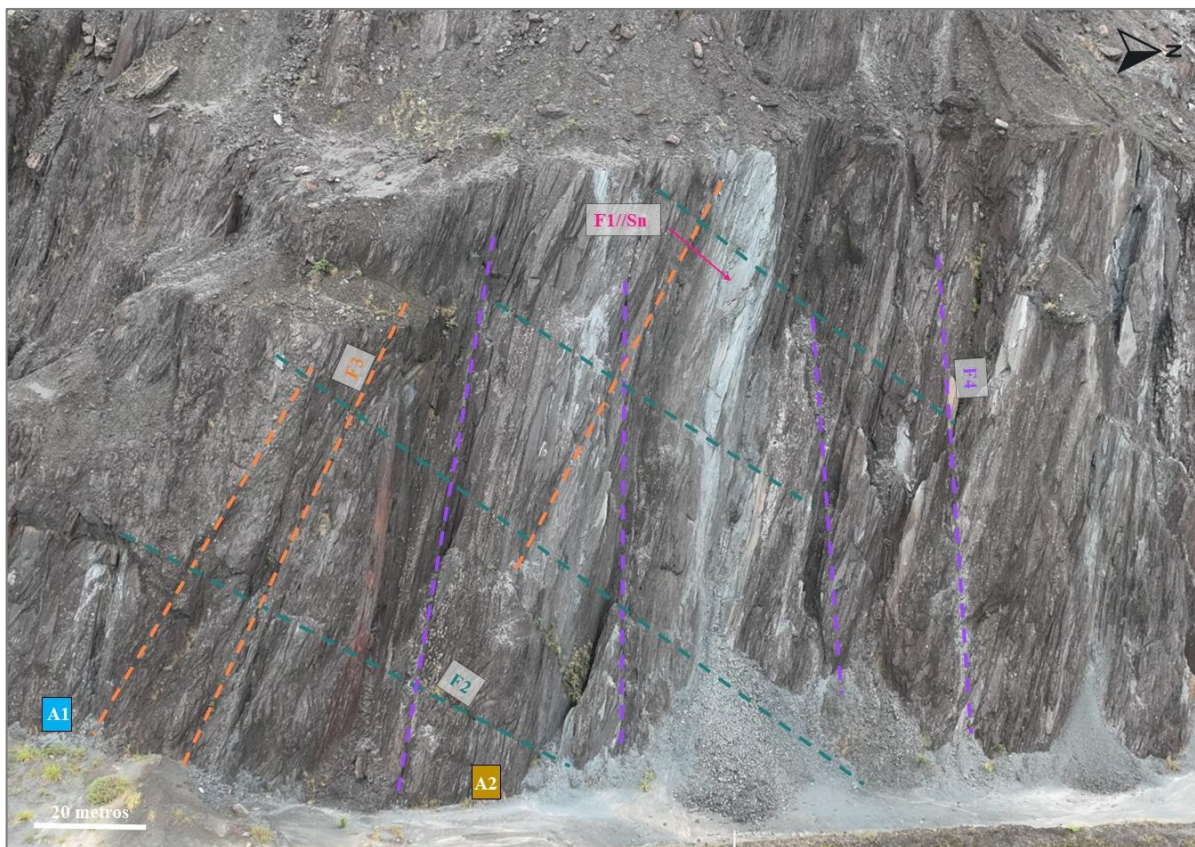
Fonte: Autora.

Figura 20: Vista panorâmica do talude da cava Almas com as principais famílias de fratura delimitadas e localização dos setores A1 e A2 do talude para o levantamento geomecânico, hidrogeomecânico e termográfico. A atitude do talude nos setores A1 e A2 é de 70/60 e 80/55, respectivamente.



Fonte: Autora.

Figura 21: Vista panorâmica do talude da cava São Luiz com as principais famílias de fratura delimitadas e localização dos setores A1 e A2 do talude para o levantamento geomecânico, hidrogeomecânico e termográfico. A atitude do talude nos setores A1 e A2 é de 90/50 e 110/50, respectivamente.



Fonte: Autora.

Adotando-se um ângulo de atrito de 30°, constatou-se que o principal mecanismo de ruptura nos quatro taludes seria por ruptura planar pela descontinuidade F1.

Cava Almas

Setor A1: Aproximadamente 50% dos polos de F1 na área instável para escorregamento planar, 10 de 20 medidas (Figura 22A).

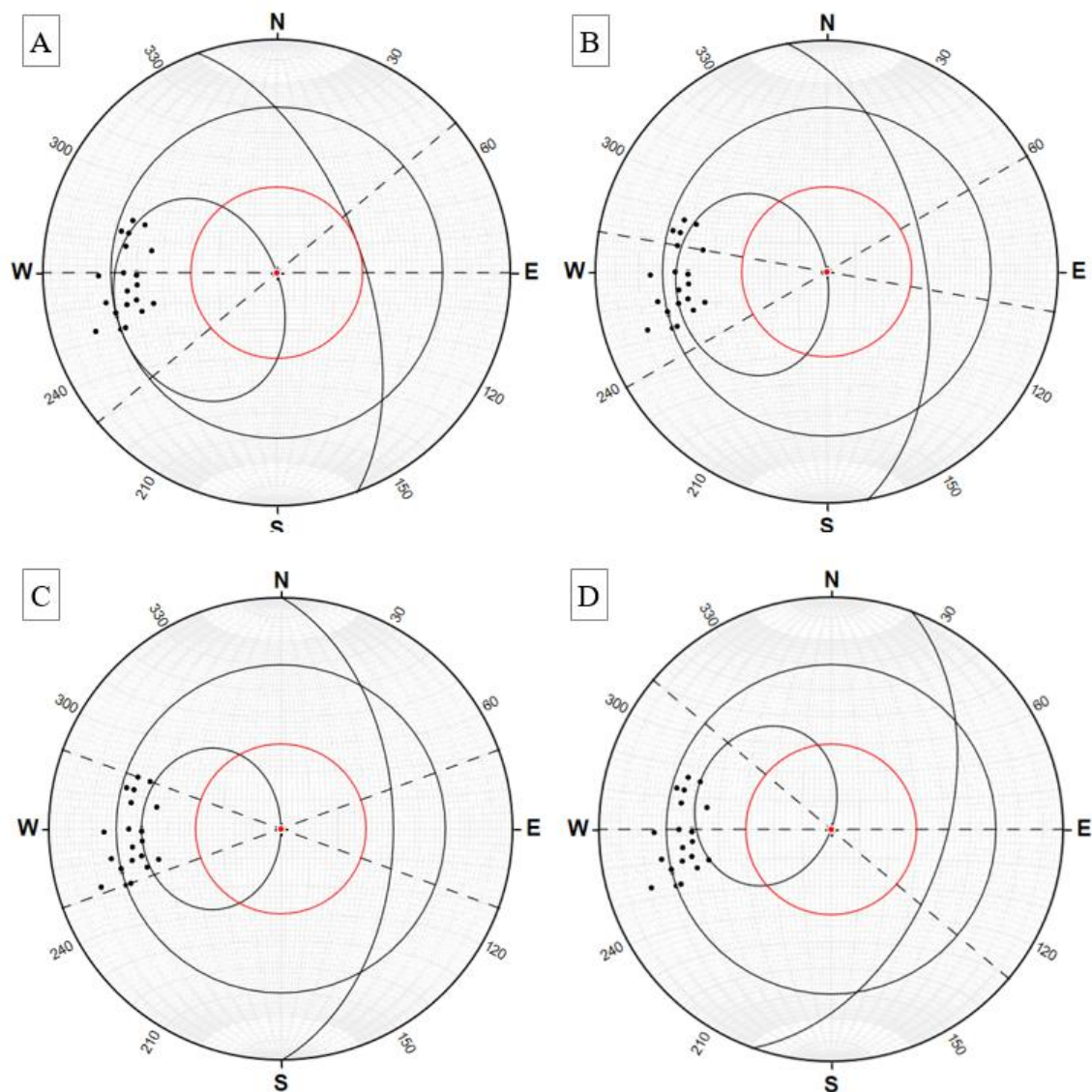
Setor A2: Aproximadamente 35% dos polos de F1 na área instável para escorregamento planar, 7 de 20 medidas (Figura 22B).

Cava São Luiz

Setor A1: Aproximadamente 20 % dos polos de F1 na área instável para escorregamento planar, 4 de 20 medidas (Figura 22C).

Setor A2: Aproximadamente 10% dos polos de F1 na área instável para escorregamento planar, 2 de 20 medidas (Figura 22D).

Figura 22: Análise cinemática para os setores dos taludes das cavas Almas e São Luiz.



Fonte: Autora.

5.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MACIÇOS ROCHOSOS

A seguir, são apresentadas as classificações determinadas a partir de todos os parâmetros obtidos nos trabalhos de campo para os taludes das cavas Almas e São Luiz, respectivamente.

Cabe destacar, que embora a obtenção do índice J_v e do RQD derivado sejam muito sujeitos a variações, devido a subjetividade na identificação de descontinuidades, no presente caso, todos os levantamentos foram feitos com os mesmos critérios, pela autora.

5.2.1 Talude Cava Almas

Na classificação expedita da resistência à compressão adaptada da ISRM (Araújo *et al.* 2014), o itabirito da cava Almas se enquadra como R2⁻, com resistência à compressão uniaxial entre 5 e 10 Mpa. O levantamento sistemático das condições dos conjuntos de fratura permitiu estimar o índice volumétrico de juntas (Jv), que resultou em 13 para o setor A1 e 25 para o setor A2. A partir do Jv determinou-se indiretamente o RQD (*rock quality designation*), conforme a relação proposta por Palmström (2005). O valor de RQD foi de 78,7 % para o setor A1 e 32,5 % para o setor A2, evidenciando tratar-se de talude bom em A1 e fraco em A2. Os valores estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18: Valor do índice Jv e RQD calculados a partir das descontinuidades para cava Almas.

Descontinuidade	Setor A1	Setor A2	Jv		RQD	
	Nº de Descontinuidades / Metro	Nº de Descontinuidades / Metro	A1	A2	A1	A2
F1	6	8	11	25	78,7	32,5
F2	2	8				
F3	2	5				
F4	1	4				

Fonte: Autora.

De forma geral, nos setores A1 e A2 as descontinuidades F1, consideradas as mais críticas, apresentam espaçamento médio de 17,6 cm (A1) e 12,5 cm (A2), persistência de 2 a 5 metros, abertura maior que 5 mm, quase lisas. Não há material de preenchimento, as fraturas são muito alteradas e sem presença de água. Na classificação Bieniawski (1973, 1989), o RMR foi de 49 (Classe III) para A1 e 45 (Classe III) para A2 (Tabela 19).

Tabela 19: Valores de RMR atribuídos aos setores do talude da cava Almas.

Parâmetros	Valor Atribuído	Peso Atribuído
RCU (Mpa)	5 a 10	2
RQD (%)	A1: 78,7 / A2: 32,5	A1: 17/ A2: 8
Espaçamento das descontinuidades (cm)	A1: 12,5 / A2: 17,6	8
Persistência (m)	2 a 5	2
Rugosidade	Quase Liso	1
Abertura (cm)	> 5mm	0
Preenchimento	Nenhum	6
Grau de alteração	Muito Alterada	1
Presença de água	Completamente Seco	15
RMR	A1: 52 / A2: 43	-

Fonte: Autora.

5.2.2 Talude Cava São Luiz

O itabirito da cava São Luiz se enquadra como R2⁺, na classificação da resistência à compressão adaptada da ISRM (Araújo *et al.* 2014), com resistência à compressão uniaxial entre 10 e 25 Mpa. O levantamento sistemático das condições dos conjuntos de fratura permitiu estimar o índice volumétrico de juntas (Jv), que resultou em 17 para o setor A1 e 15 para o setor A2. A partir do Jv determinou-se indiretamente o RQD (*rock quality designation*), conforme a relação proposta por Palmström (2005). O valor de RQD foi de 65,5 % para o setor 1 e 58,9 % para o setor 2, tratando-se de talude com qualidade razoável para os dois setores. Os valores estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20: Valor do índice Jv e RQD calculados a partir das descontinuidades para cava São Luiz.

Descontinuidade	Setor A1	Setor A2	Jv		RQD	
	Nº de Descontinuidades / Metro	Nº de Descontinuidades / Metro	A1	A2	A1	A2
F1	5	13	15	17	65,5	58,9
F2	-	2				
F3	4	-				
F4	6	2				

Fonte: Autora.

De forma geral, nos setores A1 e A2 a descontinuidade F1, considerada a mais crítica, apresenta espaçamento de aproximadamente, 20 cm (A1) e 8 cm (A2) persistência de 2 a 5 metros, abertura maior que 5 mm, ligeiramente rugosas. O material de preenchimento foi observado somente em uma pequena porção da fratura F3 no setor A1, o itabirito é muito alterado e sem presença de água. Na classificação de Bieniawski (1973, 1989), o RMR para os dois setores foi de 45 (Classe III) (Tabela 21).

Tabela 21: Valores de RMR atribuídos aos setores do talude da cava São Luiz.

Parâmetros	Valor Atribuído	Peso Atribuído
RCU (Mpa)	10 a 25	2
RQD (%)	A1: 65,5 / A2: 58,9	A1: 13/ A2: 13
Espaçamento das descontinuidades (cm)	A1: 20 / A2: 8	8
Persistência (m)	2 a 5	2
Rugosidade	Ligeiramente Rugoso	3
Abertura (cm)	> 5mm	0
Preenchimento	Nenhum	6
Grau de alteração	Muito Alterada	1
Presença de água	Completamente Seco	15
RMR	A1: 48 / A2: 48	-

Fonte: Autora.

Portanto, os quatro taludes investigados são constituídos por maciços rochosos de qualidade razoável segundo a classificação RMR.

5.2.3 Hydro Potential Value (HP-Value)

Devido à ausência de exfiltração de água subterrânea nos taludes, o parâmetro J_w desta classificação é indeterminado, atribuindo-se um valor médio de 0,86 para todos os afloramentos, considerando a grande uniformidade estrutural deles e pelo fato de todos se encontrem na parte danificada do talude, onde se espera ao menos gotejamento pelas fraturas caso houvesse exfiltração de água subterrânea.

Cava Almas

No setor A1 da cava Almas, o índice de descontinuidade (J_n) foi de 12, índice de rugosidade (J_r), 1, fator de abertura e forma (J_{af}), 5, fator de condutividade hidráulica (J_k), 4 e fator de circulação de água (J_w), 0,86. O valor de índice de descontinuidade (J_n) é 15 para ambos os setores, visto que, possuem quatro famílias de fraturas, resultando em valores de HP-Value de 0,22 para o setor A1 e 0,09 para o setor A2.

Cava São Luiz

No setor A1 da cava São Luiz, o índice de descontinuidade (J_n) foi de 12, índice de rugosidade (J_r), 1,5, fator de abertura e forma (J_{af}), 5, fator de condutividade hidráulica (J_k), 5 e fator de circulação de água (J_w), 0,86. O setor A2 diferencia-se somente pelo índice de descontinuidade (J_n) de 15, uma vez que, A1 possui três famílias de fraturas e A2, quatro, resultando em valores de HP-Value de 0,28 para o setor A1 e 0,20 para o setor A2. Os parâmetros hidrogeomecânicos estão representados na Tabela 22.

Tabela 22: Parâmetros obtidos no levantamento hidrogeomecânico dos taludes das cavas Almas e São Luiz.

Parâmetro	Talude Cava Almas		Talude Cava São Luiz	
	A1	A2	A1	A2
RQD	78,7	32,5	65,5	58,9
Índice de Descontinuidades (J_n)	15	15	12	15
Índice de Rugosidade (J_r)	1	1	1,5	1,5
Fator de Abertura e Forma (J_{af})	5	5	5	5
Fator de condutividade Hidráulica (J_k)	4	4	5	5
Fator de Circulação de Água (J_w)	0,86	0,86	0,86	0,86
HP-Value	0,23	0,09	0,28	0,20

Fonte: Autora.

O valor do índice de descontinuidades (J_k) entre os taludes da cava Almas e São Luiz, diferenciam-se pelo fato das descontinuidades serem menos abertas em Almas quando comparado à cava São Luiz. Além disso, no setor A1 da cava São Luiz, possui preenchimento em uma pequena porção ao longo da fratura F3. O índice de rugosidade (J_r), por outro lado, diferencia-se entre os taludes pois as fraturas na cava Almas são quase lisas, enquanto na cava São Luiz, ligeiramente rugosas.

Na classificação hidrogeomecânica desenvolvida por Gates (1995, 1997, 2003), para a avaliação de percolação de água subterrânea, os taludes da cava Almas e São Luiz apresentam valores de HP-Value menores do que 3, podendo ser considerados taludes com potenciais problemas de percolação.

As áreas com menores valores de RQD, apresentaram menores valores de HP-Value e, portanto, com menores probabilidades de percolação de água com relação as áreas de maior RQD. A variação dos valores de HP-Value se deve principalmente em função do número de família de fraturas, fator de condutividade hidráulica, RQD e parâmetro de rugosidade.

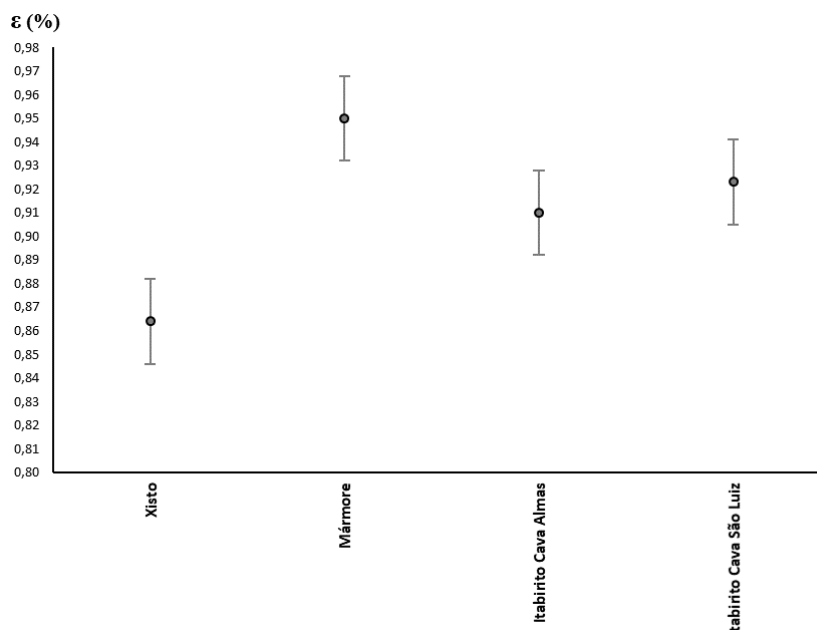
5.3 TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

Neste tópico serão apresentados o ensaio de estimativa de emissividade utilizando a termografia infravermelha e os dados do CRI adquirido por meio do imageamento termográfico realizado nos setores A1 e A2 dos taludes das cavas Almas e São Luiz.

5.3.1 Emissividade Utilizando Termografia Infravermelha

Foi determinada a emissividade dos dois tipos dominantes de itabirito que ocorrem nestes taludes e de duas outras rochas (xisto e mármore) para balizar os resultados. Os valores de emissividade (ϵ) estimados estão dentro de uma faixa estreita de emissividade variando de 0,85 a 0,97. O xisto representa o litotipo afetado pelo intervalo mais estreito ($0,85 < \epsilon < 0,88$), seguido pelo itabirito da cava Almas ($0,89 < \epsilon < 0,93$), itabirito da cava São Luiz ($0,91 < \epsilon < 0,94$) e a maior faixa representada pelo mármore ($0,93 < \epsilon < 0,97$) (Figura 23). Os valores resultantes para cada tipo de rocha estão listados na Tabela 23.

Figura 23: Gráfico estatístico das faixas de emissividade para os quatro litotipos testados. As “whiskers” representam os valores máximos e mínimos, enquanto os pontos indicam a emissividade média para cada tipo de rocha.



Fonte: Autora.

Tabela 23: Valores estimados da emissividade para cada litotipo testado.

Rocha	Faixa de Emissividade	Emissividade Média
Xisto	0,85 – 0,88	0,86
Itabirito Cava Almas	0,89 – 0,93	0,91
Itabirito Cava São Luiz	0,91 – 0,94	0,92
Mármore	0,93 – 0,97	0,95

Fonte: Autora.

A emissividade mensurada variou devido à heterogeneidade (composição e presença de poros) da rocha, o que impede a aquisição de um único resultado de emissividade (Mineo & Pappalardo, 2021). O valor da emissividade média do mármore ($\varepsilon = 0,95$) está de acordo com os dados disponíveis na literatura para este tipo de rocha (Mineo & Pappalardo, 2021). Os resultados obtidos para o xisto e para o itabirito, no entanto, representam valores de emissividade que, até o momento, não foram encontrados na literatura.

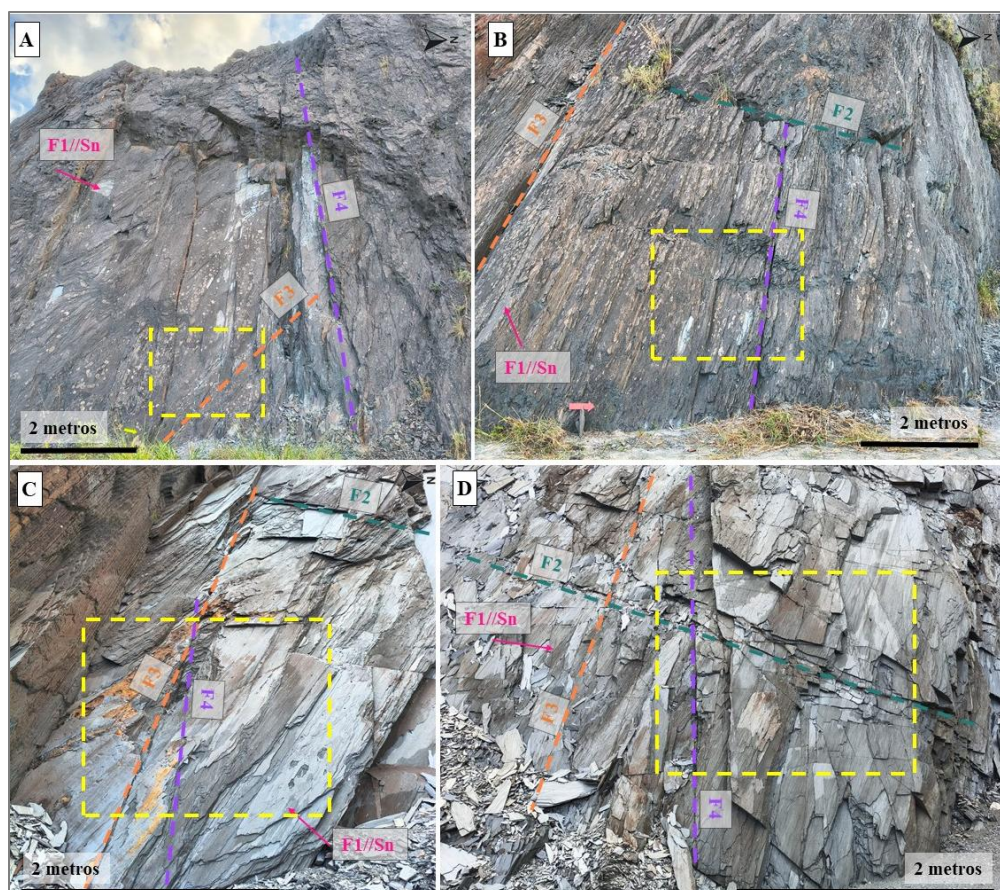
A variação da faixa de emissividade do itabirito da cava Almas em relação ao itabirito da cava São Luiz é baixa, entretanto, pode ser justificada principalmente pela diferença composicional do litotipo, uma vez que o itabirito da cava Almas possui hematita especularita, ausente no itabirito da cava São Luiz.

5.3.2 Imageamento Termográfico

A escolha das áreas para aquisição dos termogramas foi baseada em sua orientação, condição das fraturas e intemperismo distinto. As faces dos taludes estudados estão voltadas para NNE, sendo atingidas pela radiação solar pela manhã e permanecendo na sombra durante a tarde. As imagens foram obtidas em dois momentos distintos do mesmo dia nos setores A1 (Figura 24A) e A2 (Figura 24B) da cava Almas e setores A1 (Figura 24C) e A2 (Figura 24D) da cava São Luiz.

Ressalta-se que o tamanho da área imageada para os quatro setores, de aproximadamente 4 m², foi definida em função de dois aspectos importantes: imagens termais capturadas a uma distância superior a 2 metros, não são eficientes para distinguir os conjuntos de fraturas com a resolução máxima da câmera empregada no imageamento. Além disso, as condições de estabilidade dos taludes são desfavoráveis para caracterização geomecânica nas porções mais elevadas. Para estas posições, recomenda-se a aquisição de imagens em termovisores embarcados em drones.

Figura 24: Áreas definidas para imageamento termográfico. Setores A1 (A) e A2 (B) do talude da cava São Luiz (A) e setores A1 (C) e A2 (D) do talude da cava Almas. O retângulo amarelo delimita a área imageada.



Fonte: Autora.

As Figura 25C e 23G e Figura 26C e 23G representam as áreas imageadas com as famílias de fraturas delimitadas dos taludes A1 e A2 das cavas Almas e São Luiz, respectivamente. No primeiro momento, t1 (Figura 25B e 23F) e (Figura 26B e 24F), as imagens foram registradas à tarde, quando a face rochosa havia esfriado lentamente por algumas horas, liberando calor do interior em direção ao ambiente externo principalmente por meio das fraturas. No segundo momento, t2 (Figura 25D e 23H) e (Figura 26D e 23H), as imagens foram capturadas à noite. Todos os termogramas foram capturados quando a incidência solar nas faces dos taludes já havia cessado para que não houvesse interferências com os resultados (Meneses & Almeida, 2012; Mineo *et al.* 2015a; Pappalardo *et al.* 2016; Bacellar *et al.* 2025).

Os parâmetros de temperatura ambiente, umidade, distância do alvo e emissividade utilizados para ajustar a câmera infravermelha estão representados na Tabela 24.

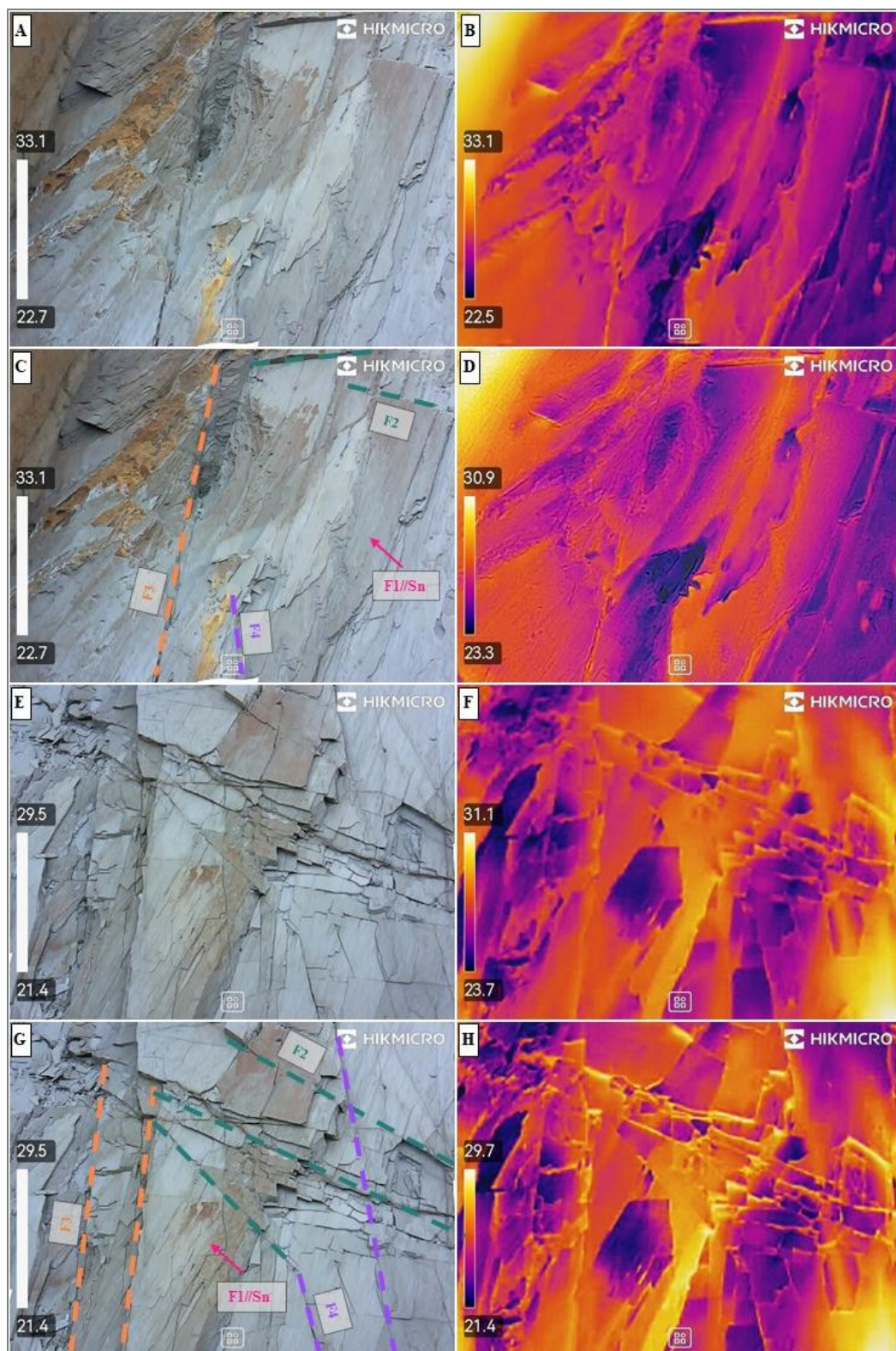
Tabela 24: Parâmetros de temperatura, umidade relativa do ar, distância e emissividade utilizados para ajustar a câmera infravermelha.

Parâmetro	Talude Cava Almas				Talude Cava São Luiz			
	A1		A2		A1		A2	
	t1	t2	t1	t2	t1	t2	t1	t2
Distância (m)	2	2	2	2	2	2	2	2
Temperatura Ambiente (° C)	25,8	25,0	26,4	25,0	25,0	21,8	25,6	21,8
Emissividade	91	91	91	91	92	92	92	92
Umidade (%)	70	76	72	76	76	84	74	84

Fonte: Autora.

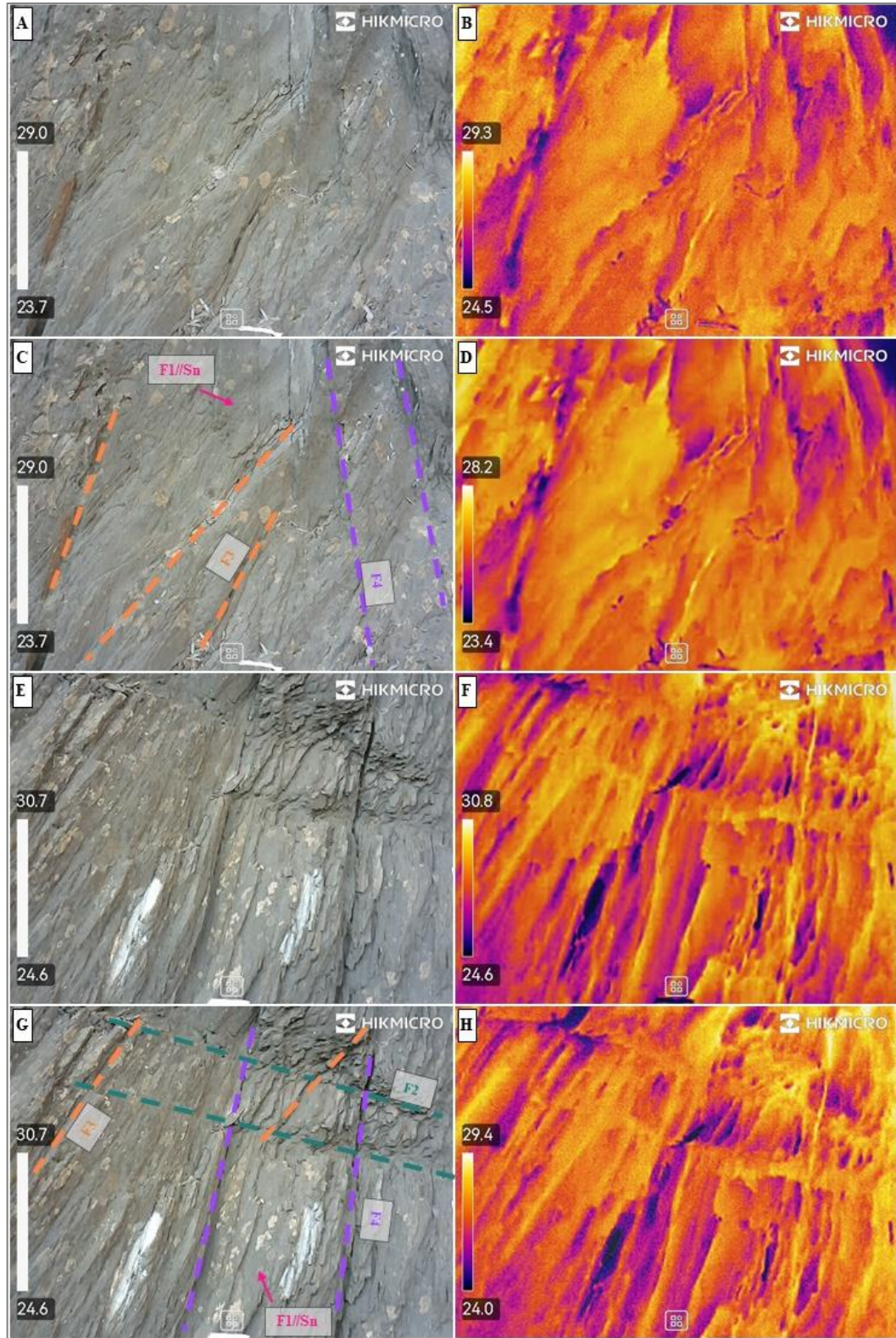
Os termogramas obtidos a uma distância de 2 metros mostram os valores de temperatura nos maciços rochosos pesquisados, destacando as diferenças em uma imagem de escala de cores, em uma área de aproximadamente 4 m². É possível observar que as irregularidades dos taludes resultam em um aquecimento não uniforme da rocha e, portanto, as porções mais salientes são irradiadas pelos raios solares, ganhando calor e projetando sua sombra nas partes mais deprimidas, nas reentrâncias (Pappalardo *et al.* 2016).

Figura 25: Termogramas dos setores do talude da cava Almas. Imagem ótica da área imageada A1 (A). Imagem termal capturada no instante t1 em (B). Imagem ótica, com os conjuntos F1, F2, F3 e F4 delimitados (C). Imagem termal capturada no instante t2 (D). Imagem ótica da área imageada A2 (E). Imagem termal capturada no instante t1 (F). Imagem ótica, com os conjuntos F1, F2, F3 e F4 delimitados (G). Imagem termal capturada no instante t2 (H).



Fonte: Autora.

Figura 26: Termogramas dos setores do talude da São Luiz. Imagem ótica da área imageada A1 (A). Imagem termal capturada no instante t1 (B). Imagem ótica, com os conjuntos F1, F3 e F4 delimitados (C). Imagem termal capturada no instante t2 (D). Imagem ótica da área imageada A2 (E). Imagem termal capturada no instante t1 (F). Imagem ótica, com os conjuntos F1, F2, F3 e F4 delimitados (G). Imagem termal capturada no instante t2 (H).

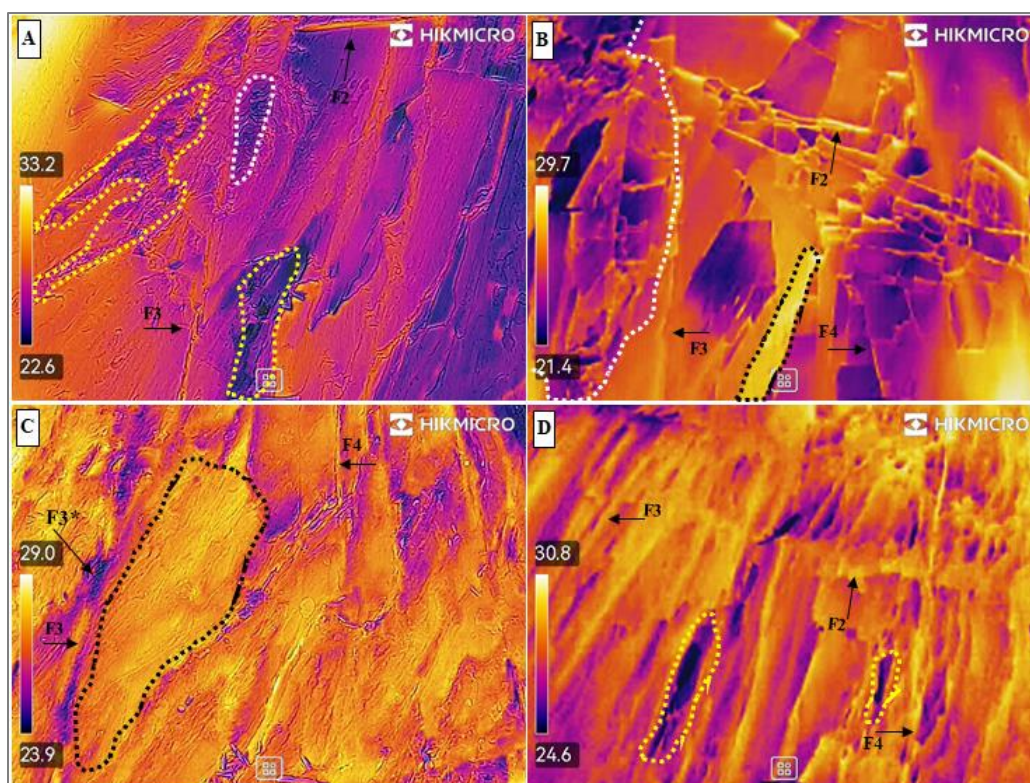


Fonte: Autora.

Observa-se a partir dos termogramas apresentados, que o resfriamento da rocha ocorre quando o calor absorvido durante o dia é liberado com o passar do tempo preferencialmente por meio dos conjuntos de descontinuidade. Nota-se também que, como esperado para o comportamento da radiação térmica em superfícies irregulares, as anomalias térmicas positivas, representadas pelas cores mais quentes, são resultantes das saídas de calor a partir do conjunto de fraturas, principalmente F2, F3 e F4 e pelas cavidades. Essas fraturas são bem definidas nos termogramas e mostram uma relação de interseção entre si, enquanto os tracejados pretos delimitam porções quentes do termograma sem geometria bem definida nas partes com reentrâncias.

Por outro lado, as anomalias térmicas negativas, representadas pelas cores mais frias, estão relacionadas à rocha intacta (partes mais planas do maciço rochoso). Além disso, estão associadas às regiões mais intemperizadas representadas pelos tracejados amarelos (Figura 27A e 25D), fraturas preenchidas (F3*) (Figura 27C) ou mais fechadas como a fratura F4 na Figura 27B.

Figura 27: Anomalias térmicas positivas (cores frias) e negativas (cores quentes) dos setores das cavas São Luiz e Almas. Imagem termal com as anomalias térmicas positivas representadas pela linearidade entre as fraturas F2, F3 e F4 no setor A1 (A) e A2 (B) da Cava Almas e setor A1 (C) e A2 (D) da cava São Luiz. Os tracejados pretos delimitam a superfície oca, enquanto os tracejados amarelos e brancos representam partes intemperizadas e altamente fraturadas, respectivamente.



Fonte: Autora.

Ao contrário do que foi observado por Pappalardo *et al.* (2016), as regiões intensamente fraturadas nos termogramas (tracejados brancos) estão associadas às anomalias térmicas negativas (Figura 27A e 25B), que pode ser justificado pela diferença de grau de fraturamento, dos litotipos e do clima distinto da região onde foram capturados os termogramas.

Os contrastes dos termogramas aumentam ao decorrer do anoitecer e assim como observado por Bacellar *et al.* (2025), o maior contraste ocorre ao longo das fraturas mais abertas e sem preenchimento. As capturas dos termogramas realizadas no instante t2, possuem melhor resolução também pelo fato de, nesse momento, nenhuma fonte de iluminação incidir sobre o talude e, portanto, as temperaturas mais altas estão relacionadas apenas aos principais sistemas de descontinuidade e as cavidades, onde às vezes é difícil definir bem as estruturas pela baixa definição dos termogramas (Pappalardo *et al.* 2016).

5.3.3 Relação entre o Índice da Taxa de Resfriamento (CRI) com as Classificações Geomecânica e Hidromecânica

O processamento digital das imagens de IRT foi realizado por meio do *software* livre *Hickmicro Analyzer*. Por meio das temperaturas registradas nos termogramas, foi calculado o índice de resfriamento específico (CRI), desenvolvido por Pappalardo *et al.* (2016), utilizando a variação da temperatura por unidade de tempo, definido pela equação 14:

$$CRI_m = \frac{\Delta T_m}{\Delta t} \quad (14)$$

Onde o ΔT_m é a variação da temperatura média e Δt é o intervalo de tempo considerado.

Este índice da taxa de resfriamento foi correlacionado com os principais parâmetros geoestruturais, relacionados ao grau de fraturamento da rocha para cada setor dos taludes estudados. A variação da temperatura média (ΔT_m) para o setor A1 da cava Almas foi de 0,4 °C, o intervalo de tempo (Δt) foi de 1 h e CRI médio (CRI_m) foi de 0,4 °C/h. Para o setor A2, o ΔT_m foi 1,5 °C, o Δt de 0,9 h e CRI_m , 1,7 °C/h.

Para o setor A1 do talude da cava São Luiz, o ΔT_m foi 0,7 °C, o Δt de 0,9 h e o CRI_m , 0,8 °C/h, enquanto para o setor A2, o ΔT_m foi 1,2 °C, Δt de 0,9 h e CRI_m de 1,3 °C/h.

Os dados referentes à variação da temperatura média, o intervalo de tempo e CRI_m estão representados na Tabela 25.

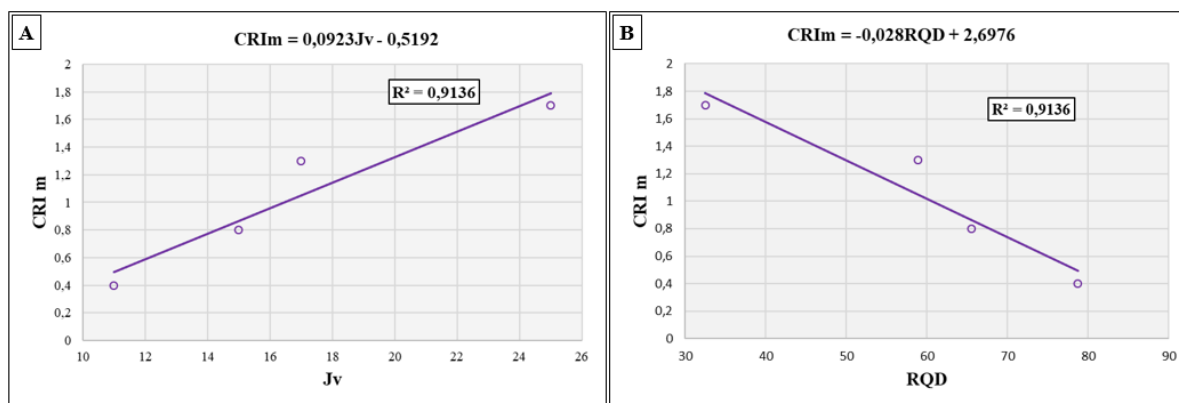
Tabela 25: Valores de temperatura média, variação do tempo, índice da taxa de resfriamento (CRI_m) dos setores analisados.

	Talude Cava Almas		Talude Cava São Luiz	
	A1	A2	A1	A2
ΔT_m (°C)	0,4	1,5	0,7	1,2
Δt (h)	1	0,9	0,9	0,9
CRI_m (°C/h)	0,4	1,7	0,8	1,3
J_v	11	25	15	17
RQD	78,7	32,5	65,5	58,9

Fonte: Autora.

Ao se plotar os valores de CRI_m calculados para os setores dos taludes de Itabirito das cavas Almas e São Luiz, foi encontrada relações lineares positiva e negativa (Figura 27). À medida que o valor do índice J_v aumenta, o resfriamento da rocha acontece de forma mais rápida como observado na Figura 28A. Da mesma forma, uma relação linear negativa foi observada entre o CRI_m e o RQD. À medida que o RQD aumenta, o CRI_m diminui (Figura 28B). As equações de regressão e coeficiente de determinação R^2 , estão representadas na Tabela 26.

Figura 28: Gráfico das relações entre o índice da taxa de resfriamento médio (CRI_m) e índice J_v (A) e CRI_m e RQD (B).



Fonte: Autora.

Tabela 26: Equações de regressão e coeficiente de determinação R^2 para as relações entre CRI_m , J_v e RQD

Relação	Equação de Regressão Linear	R^2
$CRI_m \times J_v$	$CRI_m = 0,0923J_v - 0,5192$	$R^2 = 0,91$
$CRI_m \times RQD$	$CRI_m = -0,028RQD + 2,6976$	$R^2 = 0,91$

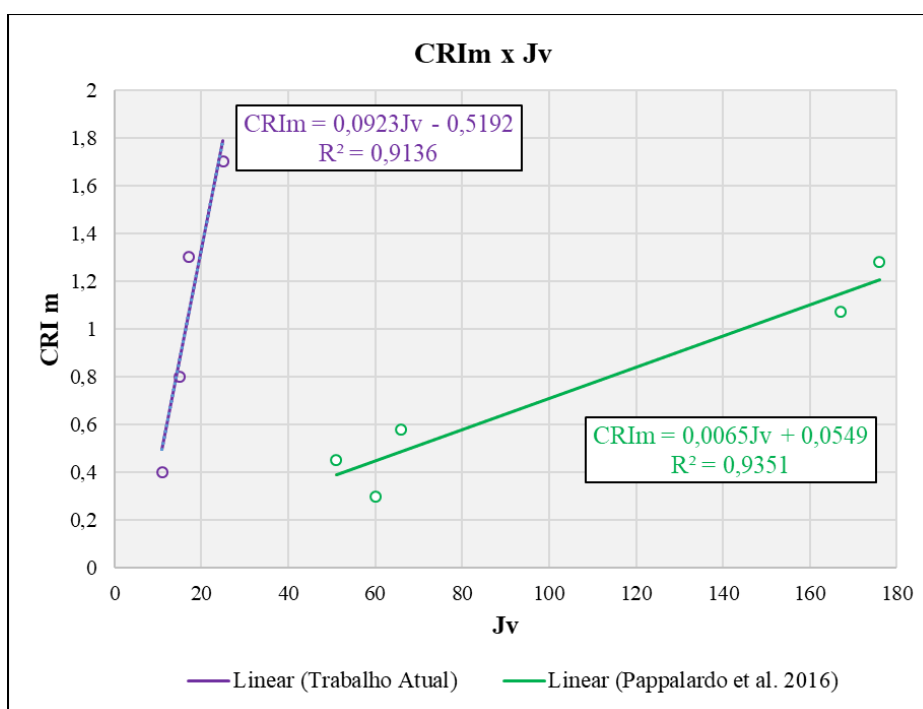
Fonte: Autora.

A relações entre CRI_m e o índice J_v e CRI_m e RQD representam as condições dos maciços rochosos, uma vez que, os maciços dos setores A2 intensamente fraturados das cavas

Almas e São Luiz possuem os maiores valores de J_v e maiores valores de CRI_m . Os taludes dos setores A1 dessas cavas possuem os maiores valores de RDQ e, portanto, são taludes compostos por rochas mais intactas, com CRI_m baixo, por se tratar de maciços ruins para conduzir calor pelas fraturas (Pappalardo *et al.* 2016).

Quando se compara os valores obtidos neste trabalho com os de Pappalardo *et al.* (2016), verifica-se que ambos mostram correlação positiva entre os índices CRI_m e J_v (Figura 29). Contudo, os dados obtidos por Pappalardo resultaram numa correlação com um coeficiente angular maior, o que pode ser resultado dos diferentes tipos litológicos e do maior grau de fraturamento dos afloramentos estudados por esses autores.

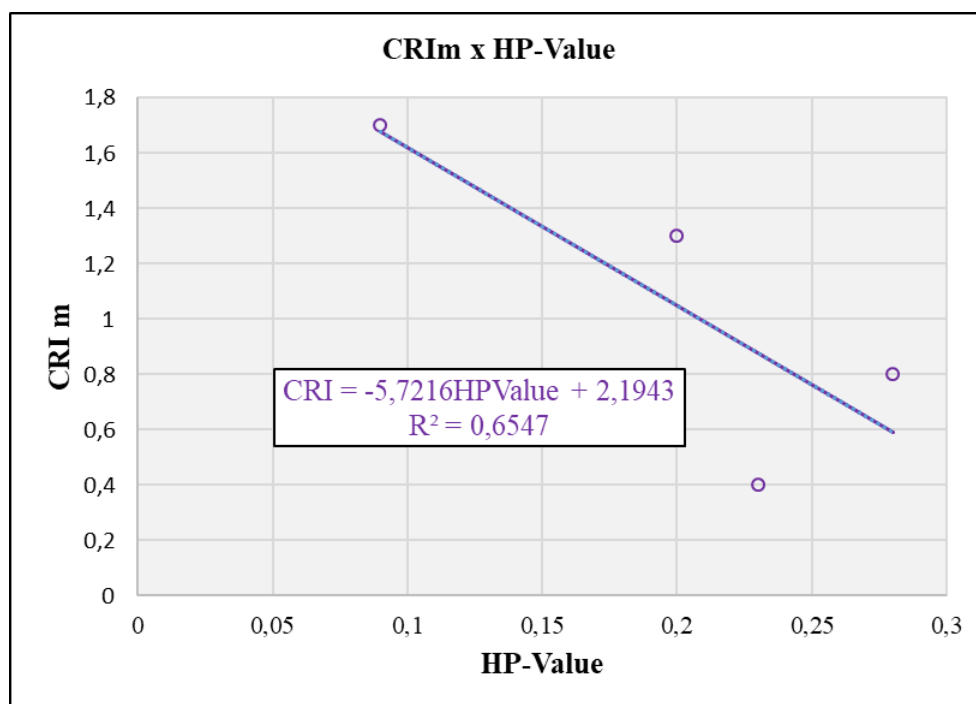
Figura 29: Correlação dos dados de CRI_m e Índice J_v deste trabalho com os dados de e de Pappalardo *et al.* (2016).



Fonte: Autora.

Embora o maciço rochoso nos taludes se encontre seco e haja certa dúvida dos parâmetros de entrada da classificação HP-Value, sobretudo do índice J_w , foi feita uma tentativa de correlação entre este parâmetro e o CRI (Figura 30).

Figura 30: Gráfico das relações entre o índice da taxa de resfriamento médio (CRI_m) e a classificação hidrogeomecânica, HP-Value.



Fonte: Autora.

Verifica-se que aos resultados foram satisfatórios, visto que, foi encontrada uma correlação negativa ($R^2 = 0,65$), como previsto, ou seja, quanto mais produtivo o aquífero (menores valores de HP-Value), maior o CRI_m . Contudo, estudos adicionais são necessários, de maciços fraturados com dados mais confiáveis dos parâmetros de entrada da classificação HP-Value para confirmar se há de fato uma relação desta com o índice CRI_m .

Em resumo, os resultados corroboram as conclusões dos trabalhos de Pappalardo *et al.* (2016), evidenciando que o CRI_m é um índice que possibilitou avaliar a qualidade dos maciços rochosos fraturados de diferentes litotipos sob diversas condições estruturais. Cabe destacar que diferentemente do índice J_v , que é muito dependente do operador (Pells *et al.* 2017), o CRI_m é obtido de forma automatizada. Portanto, percebe-se um grande potencial deste índice para auxiliar na caracterização geomecânica de maciços fraturados de forma remota, quando adquirido por termovisores em superfície ou acoplados em drones.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve por finalidade avaliar o potencial da termografia infravermelha para caracterização geomecânica e hidrogeomecânica nos taludes de itabirito das cavas Almas e São Luiz, na mina Fazendão, sendo que todos os objetivos foram alcançados.

O levantamento das descontinuidades permitiu identificar quatro principais famílias de fraturas nos setores A1 e A2 estudados nas cavas, além da obtenção de parâmetros utilizados nas classificações RMR, RQD e HP-Value. O imageamento infravermelho termal nos setores, possibilitou o cálculo do índice de taxa de resfriamento (CRI).

Os maciços dos setores das duas cavas se mostraram como de qualidade razoável pela classificação RMR. Pela análise cinemática, verificou-se que o principal mecanismo de instabilidade é por ruptura planar pela descontinuidade paralela à foliação (F1).

Com o ensaio de emissividade foi possível estimar a faixa de emissividade dos itabiritos para calibração da câmera termográfica. No entanto, como não foram encontrados dados disponíveis na literatura para fins de comparação, recomenda-se investigações futuras em amostras distintas para refinar os dados. Cabe destacar que a obtenção da emissividade das rochas é fundamental para obter resultados mais fidedignos de termometria.

No que diz respeito à correspondência geomecânica, uma relação linear positiva foi encontrada ao se plotar o CRI médio (CRI_m) e o índice J_v . Da mesma forma, uma relação linear negativa foi encontrada ao se plotar o CRI_m e o RQD. Os dados da temperatura média dos termogramas avaliados nos tempos t_1 e t_2 , mostram que, à medida que o valor do índice J_v aumenta, o resfriamento da rocha acontece de forma mais rápida. Por outro lado, à medida que o RDQ aumenta, o CRI_m diminui e o resfriamento da rocha ocorre de forma mais lenta.

Apesar da classificação HP-Value mostrar potencial para a caracterização de aquíferos fraturados, segundo a literatura, nos taludes estudados não foi observada exfiltração de água subterrânea, o que dificultou a obtenção dos parâmetros de entrada desta classificação, sobretudo do índice J_w - Fator de circulação de água. Isto talvez explique a baixa correlação entre o índice J_v e o HP-Value para os casos estudados. Apesar disso, uma boa correlação linear negativa foi observada ao se plotar o CRI e o HP-Value.

A termografia infravermelha, no presente trabalho, provou ser uma nova técnica valiosa, com alta confiabilidade, rápida, não destrutível e econômica para avaliar, de forma independente, as condições geomecânicas, como o grau de fraturamento de maciços rochosos,

por meio do cálculo do CRI_m e relação entre os parâmetros RQD e índice Jv. Além disso, verificou-se que as imagens termais podem ser muito úteis para distinção de maciços com rochas com grau de intemperismo distintos. O imageamento termográfico tem o potencial de identificar os traços das fraturas abertas ou com material de preenchimento, persistência, regiões altamente fraturadas/ trituradas e com presença de cavidades, pois nesses casos as fraturas responderam de maneiras distintas devido às diferenças na condutividade térmica. É recomendável aplicar a técnica em maciços de diferentes litologias além do itabirito e contextos estruturais e condições intempéricas distintas.

Diferentemente do índice Jv e do índice através deste derivado, o RQD, o índice CRI_m é obtido de forma automatizada, eliminando a subjetividade proveniente do operador encontrada na obtenção daqueles. Portanto, o emprego da termovisores em superfície ou em drones mostram um potencial elevado para auxiliar na classificação geomecânica de maciços rochosos fraturados.

Devido ao nível de incerteza e subjetividade pelo fato de existir vários parâmetros capazes de definir o grau de fraturamento do maciço rochoso, recomenda-se realizar estudos futuros que comparem o CRI_m com outros parâmetros, como a caracterização por *scanlines* e janelas circulares.

Recomenda-se estudos em mais taludes, com diversas condições litológicas e estruturais para confirmar os resultados deste estudo preliminar. Recomenda-se também empregar uma câmera termal de melhor resolução espacial e embarcados em drones de forma a permitir adquirir imagens de áreas maiores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALKMIM, F.F. & MARSHAK, S. 1998. **Transamazonian Orogeny in Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brasil: Evidence for Paleoproterozoic Collision and Colapse in the Quadrilátero Ferrífero**. *Precambrian Research*, 90: 29-58.
- ALMEIDA F. F. M. 1977. **O Cráton de São Francisco**. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, 7(4): 349-364.
- ARAUJO, T.P.; AMARAL JR, A. F.; AMARAL, C.G.; ZENÓBIO, A.A. **Estudo da resistência de maciços de rocha branda em taludes de mineração**. *Mecânica das Rochas para Recursos Naturais e Infraestrutura SBMR 2014 – Conferência Especializada ISRM CBMR/ABMS e ISRM*, 2014.
- BACELLAR, L.D.A.P.; MATTA, D.S.; DA SILVA, K.M.; DE CAMPOS, W.G.; CAMPOS, F.C.; CARDOSO, L.H.; **Caracterização de Maciços Rochosos Fraturados em Áreas de Risco Geológico na Cidade de Ouro Preto (MG) com Auxílio de levantamento Infravermelho Termal**. 18º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. 2025. 8p.
- BAROŇ, I; BEČKOVSKÝ, D; MÍČA, L. **Application of infrared thermography for mapping open fractures in deep-seated rockslides and unstable cliffs**. *Landslides*, 2014. v. 11, n. 1, p. 15-27.
- BARREIRA, E.; ALMEIDA, R. MSF.; SIMÕES, M. L. 2021 **Emissividade de materiais de construção para medições infravermelhas**. *Sensores*, v. 21, n. 6, pág. 196.
- BARTON, N. The shear strength of rock and rock joints. *In: ELSEVIER. International Journal of rock mechanics and mining sciences & Geomechanics abstracts*. 1976. v. 13, n. 9, p.255–279.
- BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J.J.R.M. **Classificação de engenharia de maciços rochosos para o projeto de suporte de túneis**. *Mecânica das Rochas*. 1974 v. 6, n. 4, p. 189-236.
- BARTON, N.; CHOUBEY, V. **The shear strength of rock joints in theory and practice**. *Rock mechanics*, v. 10, n. 1, p. 1-54, 1977.
- BIENIAWSKI, Z. T. **Classificação de engenharia de maciços rochosos articulados**. *Engenharia Civil = Siviele Ingenieurswese*. 1973. v. 12, p. 335-343.

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

BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. Rock mechanics and mining engineering. *In: **Rock Mechanics for underground mining: Third edition***. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006. 1-16.

CALDEIRA, M. M. **Aplicação da termografia infravermelha para identificação de danos na aderência entre concreto e polímero reforçado com fibras**. 2016. 230p. Tese de Doutorado. Florianópolis. 2016.

CHERRY, J. A.; FREEZE, R. A. **Groundwater**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1979.

DEERE, D.U. *et al.* Design of surface and near-surface construction in rock. *In: **ARMA US rock mechanics/geomechanics symposium***. ARMA, 1966. p. ARMA-66-0237.

DORR J. V. N. II. **Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero**, Minas Gerais, Brazil. USGS/DNPM. Professional Paper. 1969. 641-A. 110p.

ENDO, I.; CASTRO, P. T. A. & GANDINI, A. L. **Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos**. Belo Horizonte, Universidade Federal de Ouro Preto. 2020. 480p.

FIORI, A. P. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas**. Oficina de Textos, 2016. 334–356 p.

GATES, W.C.B. The hydro-potential (HP) value: a proposed rock classification technique for evaluation of the groundwater potential in fractured bedrock. *In: **Abstracts from the 1st symposium on the hydrogeology of Washington State, Washington Department of Ecology***, 1995. 142p.

GATES, W.C.B. **The hydro-potential value: a rock classification technique for examination of groundwater potential in fractured bedrock**. Environmental Engineering and Geoscience, 1997.19973: 231-267.

GATES W.C.B. The Hydro-Potential (HP) Value: a rock classification technique for estimating seepage into excavations. *In: **Culligan P.J., Einstein H.H., Whittle A.J., eds, Proceedings, 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering***, 2003.p. 1283-1290.

HOEK, E.; BRAY, J. D. **Engenharia de taludes rochosos**. CRC press, 1981.

HSU, S. M. *et al.* Um esquema de classificação de maciços rochosos para estimar a condutividade hidráulica de rochas fraturadas. *In: GeoCongress 2008: Caracterização, Monitoramento e Modelagem de Geosistemas* . 2008. p. 452-459.

HSU, S. M. *et al.* **Condutividade hidráulica de maciços rochosos estimada por dois modelos empíricos**. Desenvolvimentos em pesquisa de condutividade hidráulica. 2011. p. 1-27.

ISRM (INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS) – **Rock characterization, testing and monitoring** – ISRM suggested methods. E.T.Brown, 1981. 211 p

ISRM (INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS). **Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock mechanics**. *Internacional Journal of Rock Mechanics Science and Geomechanics*. Abstract. 1983. 15:319-368.

JENSEN, JR. **Sensoriamento remoto do meio ambiente: uma perspectiva dos recursos terrestres 2 edição**. Pearson Education Índia. 2009.

MAIA, J.A.C. **Métodos probabilísticos aplicados à estabilidade de taludes e cavidades em rocha**. Dissertação (Mestrado em geotécnia). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 196p. 2003.

MENESES, P. R., & ALMEIDA, T. D. 2012. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Universidade de Brasília, Brasília. 2012.

MINEO, S., CALCATERRA, D., ZAMPELLI, SP, & PAPPALARDO, G..**Aplicação da Termografia Infravermelha para levantamento de taludes rochosos intensamente fraturados**. *Rendiconti Online da Società Geologica Italiana* , 2015a. 35 (35), 212-215.

MINEO, S. *et al.* **Integrated geostructural, seismic and infrared thermography surveys for the study of an unstable rock slope in the Peloritani Chain (NE Sicily)**. *Engineering Geology*, v. 195, p. 225-235, 2015b.

MINEO, S.; PAPPALARDO, G. **Medição de emissividade de rochas para aplicações geológicas de engenharia termográfica infravermelha**. *Ciências Aplicadas*, v. 11, n. 9, p. 3773, 2021.

MEIRINHOS, J. M. F. **Hidrogeomecânica para engenharia de rochas: acoplando avaliação hidrogeomecânica subterrânea e mapeamento hidrogeotécnico em maciços rochosos**

fraturados. 2015.163p. Dissertação de Mestrado. Instituto Politécnico do Porto (Portugal). 2015.

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

PALMSTROM, A. Medições e correlações entre tamanho de bloco e designação de qualidade de rocha (RQD). **Tunnelling and Underground Space Technology**. 2005. v. 20, n. 4, p. 362-377.

PAPPALARDO, G.*et al.* **InfraRed Thermography proposed for the estimation of the Cooling Rate Index in the remote survey of rock masses**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 83, p. 182-196, 2016.

PAPPALARDO, G. **First results of infrared thermography applied to the evaluation of hydraulic conductivity in rock masses**. Hydrogeology Journal, v. 26, n. 2, p. 417-428, 2017.

PATTON, F. D.; DEERE, D. U. Significant geologic factors in rock slope stability. **Planning Open Pit Mines: AA Balkema, Capetown, South Africa**, p. 143-151, 1970.

PELLS, P. J.; BIENIAWSKI, Z. T.; HENCER, S.R.; PELLIS, S. E. **Rock quality designation (RQD): time to rest in peace**. Canadian Geotechnical Journal. 54 (6). 2017. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0012>.

PO, L.; TANG, L.; ZHANG, S.; LUAN, P.; TIAN, H. **Analysis and identification of the temperature field of dam leakage based on infrared thermal imaging**. Scientific Reports. 15. 2025. 10.1038/s41598-025-95117-4.

RINKER, JN. **Detecção térmica infravermelha aerotransportada de cavernas e fendas. Engenharia fotogramétrica e sensoriamento remoto**. 1975. v. 44, n. 11.

READ, J.; BEALE, G. **Diretrizes para avaliação da água na estabilidade de taludes de poços**. Csiro Publishing, 2013.

ROSSI D. Q. **Estratigrafia e Arcabouço Estrutural da região de Fábrica Nova, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. 2014.103p. Dissertação de mestrado, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

TAN, J. H. *et al.* **Termografia infravermelha na temperatura da superfície ocular: uma revisão**. Física e tecnologia do infravermelho, v. 52, n. 4, p. 97-108, 2009.

TERZAGHI, K. **Estabilidade de encostas íngremes em rochas duras não intemperizadas.** Geotechnique, v. 12, n. 4, p. 251-270, 1962.

WU, J. H.; Lin, H. M.; Lee, D. H. & Fang, S. C. **Integrity assessment of rock mass behind the shotcreted slope using thermography.** Engineering geology. 2005. 80(1-2), p.164-173.

WYLLIE, C. & MAH, W. **Rock Slope Engineering Civil and Mining.** Spon Press Taylor & Francis Group, London and New York, 2004. 431 p.

ZHANG, L. **Engineering properties of rocks.** Butterworth-Heinemann, 2017.