

CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS FRATURADOS EM ÁREAS DE RISCO GEOLÓGICO NA CIDADE DE OURO PRETO (MG) COM AUXÍLIO DE LEVANTAMENTO DE INFRAVERMELHO TERMAL

Luis de Almeida Prado Bacellar¹, Dalila dos Santos Matta², Karolaine Maria da Silva³, Wilck Guilherme de Campos⁴; Felipe Câmara Campos⁵, Luiz Henrique Cardoso⁶

Resumo – Escorregamentos constituem um dos principais riscos geológicos em áreas urbanas do Brasil. Na cidade de Ouro Preto já foram mapeadas centenas de áreas de risco, muitas delas envolvendo escorregamentos em taludes com maciços itabiríticos fraturados. Os métodos tradicionais de avaliação de risco a escorregamentos envolvem o emprego de classificações geomecânicas (ex.: RMR/SMR, Sistema Q/Qslope) e de análise cinemática. Em todos estes métodos é necessário reconhecer os parâmetros que influenciam o comportamento mecânico ao longo de descontinuidades (orientação, espaçamento, abertura e material de preenchimento, rugosidade e presença de água). Tais parâmetros são tradicionalmente avaliados em campo ao longo de linhas de varredura, que podem ser substituídos em taludes de grande porte ou de difícil acesso por métodos remotos, como os levantamentos aerofotogramétricos 3D com drones. Contudo, tais levantamento pecam por não permitirem reconhecer facilmente alguns parâmetros dessas descontinuidades, como abertura, material de preenchimento e presença de água. Neste trabalho é apresentada a caracterização geomecânica de um talude, com auxílio de levantamento multitemporal com imageamento com infravermelho termal. Os resultados evidenciaram que o imageamento termal pode ser útil para o zoneamento geomecânico inicial dos taludes e para a melhor caracterização daqueles parâmetros. O talude em questão mostrou elevada suscetibilidade a escorregamentos planares de grande porte, por conjunto de fraturas abertas e com presença de água.

Abstract – Landslides are one of the main geological risks in urban areas in Brazil. In the city of Ouro Preto, hundreds of risk areas have already been mapped, many of them involving landslides on slopes with fractured rock (itabirite) mass. Traditional methods for assessing landslide risk involve the use of geomechanical classifications (e.g., RMR/SMR, Q/Qslope System) and kinematic analysis. In all of these methods, it is necessary to recognize the parameters that influence the mechanical behavior along discontinuities (orientation, spacing, opening and filling material, roughness and presence of water). These parameters are traditionally evaluated in the field along scan lines, which can be replaced in large or difficult-to-access slopes by remote methods, such as 3D aerial photogrammetric surveys with drones. However, such surveys fail to recognize some parameters of these discontinuities, such as opening, filling material and presence of water. This paper presents the geomechanical characterization of a slope using multitemporal surveys using thermal infrared imaging. The results showed that thermal imaging can be useful for the initial geomechanical zoning of slopes and for better characterization of those parameters. The slope in question showed high susceptibility to large-scale planar landslides due to a set of open fractures and the presence of water.

¹ Geólogo, Universidade Federal de Ouro Preto//EM/Departamento de Geologia – bacellar@ufop.edu.br

² Discente, Universidade Federal de Ouro Preto/EM/Departamento de Geologia - dalila.dias@aluno.ufop.edu.br

³ Discente, Universidade Federal de Ouro Preto/EM/Departamento de Geologia - karolaine.silva@aluno.ufop.edu.br

⁴ Discente, Universidade Federal de Ouro Preto/EM/Departamento de Geologia - wilck.campos@aluno.ufop.edu.br

⁵ Discente, Universidade Federal de Ouro Preto/EM/Departamento de Geologia - felipe.camara@aluno.ufop.edu.br

⁶ Engenheiro Geólogo, Defesa Civil de Ouro Preto - lhcardosoop@hotmail.com

1. INTRODUÇÃO

A cidade de Ouro Preto (MG), patrimônio histórico da humanidade, localiza-se na região sul do Quadrilátero Ferrífero, importante província mineral brasileira, entre as serras do Itacolomi e a de Ouro Preto, nome local do flanco sul do Anticlinal de Mariana. A área onde se assenta a cidade encontra-se em grande parte sob condições geológicas e geomorfológicas muito adversas, que a torna suscetível a riscos geotécnicos, especialmente aqueles provocados por movimentos de massa. Entre estes, destacam-se os escorregamentos (Sobreira et al., 1990), que constituem grande das centenas de áreas de risco cadastradas na cidade (Defesa Civil de Ouro Preto, 2025), colocando em elevado risco moradores e benfeitorias

Ao longo da rua Padre Rolim, principal via de acesso ao centro histórico da cidade, observam-se alguns taludes de corte expondo formação ferríferas (itabiritos) variavelmente fraturadas, em situação que configura elevado risco, que já se manifestou no passado envolvendo edifícios públicos importantes, como o da rodoviária e da antiga Santa Casa, provocando inclusive fatalidades.

Em vista, disto, pretende-se neste trabalho investigar um dos maiores taludes nesta via, objetivando investigar o comportamento geotécnico de seu maciço rochoso, integrando análise cinemática, classificações geomecânicas aplicadas à estabilidade de taludes, como SMR, (Romana, 1985 e Qslope (Bar e Barton, 2017), incorporando-se um método inovador, o de imageamento multitemporal infravermelho termal.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

2.1 – O talude estudado

A área de estudo corresponde a um talude de corte localizado no principal acesso à cidade, na rua Padre Rolim, bairro São Cristóvão, no município de Ouro Preto, em Minas Gerais. As coordenadas médias da área são UTM: 655200E e 7745950S (Figura 1). O talude se situa na Serra de Ouro Preto, no setor mediano do flanco que mergulha para sul do Anticlinal de Mariana (Door, 1969). A encosta onde o talude foi cortado para construção da rua apresenta perfil retilíneo e declividade média de 20°.

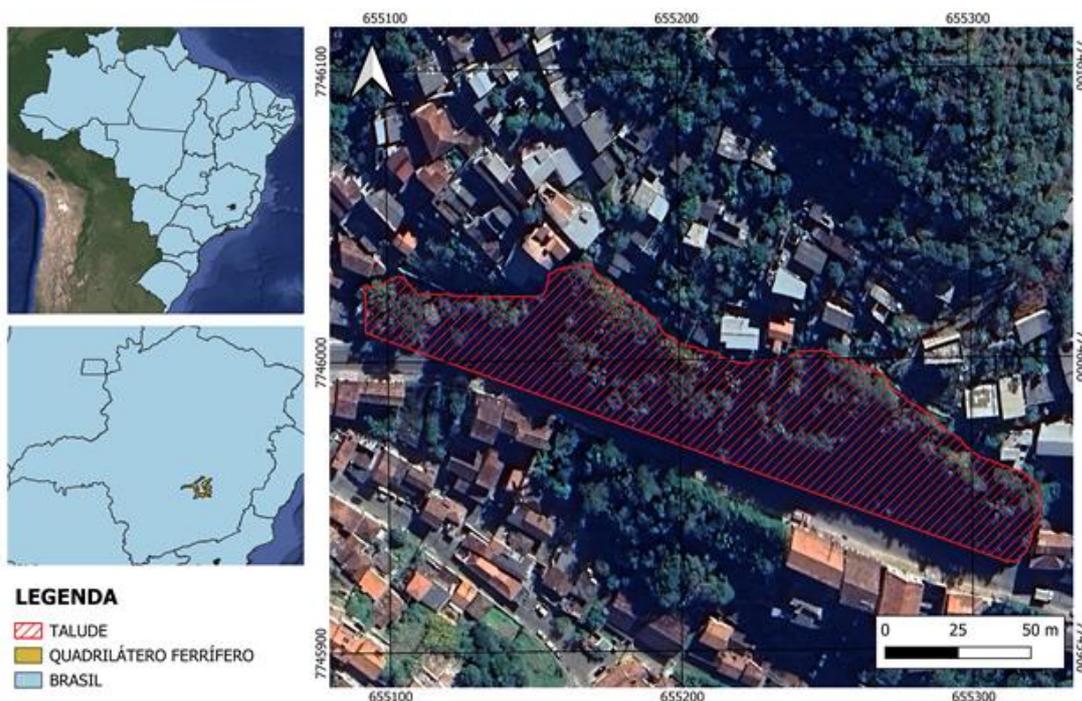


Figura 1 – Mapa de localização do talude estudado

O talude de corte em maciço rochoso apresenta de 2 a 3 metros de altura e atitude média de 200/63, constituído por itabiritos da Formação Cauê, que integra o Grupo Itabira, do Supergrupo Minas, de idade Proterozóica Inferior (Door, 1969; Endo et al, 2019).

O itabirito exhibe alteração mineralógica perceptível, com cores esmaecidas, sobretudo nas fraturas, e se classificada predominantemente como como RAD - Rocha alterada dura (IPT, 1994), com trechos mais alterados. Sobre a rocha intacta ocorre camada de colúvio e tálus em talude natural, com alguns metros de espessura, sobre o qual se instalou vegetação de grande porte e vegetação higrófita (ex.: Lírio do Brejo, conhecido localmente como Mariazinha), que é um indicador de elevado nível de saturação. Embora esta camada possa ser instabilizada sazonalmente por rastejos decorrentes da ascensão da superfície freática em períodos chuvoso, acredita-se que o maior fator de instabilização seja o maciço itabirítico subjacente, tema central deste trabalho

2.2. Classificação geomecânica e análise cinemática

Na classificação expedita da resistência à compressão adaptada da ISRM (Figura 2) o itabirito se enquadra como R4, com resistência à compressão uniaxial entre 50 e 100 Mpa, embora haja trechos localizados com resistência R3.

A foliação do itabirito apresenta atitude média de 194/55, com pequena dispersão provocada por suaves dobramentos. Foram identificados cinco conjuntos de fraturas (F1 a F5, Tabela 1, Figura 2a), com F1 subparalela à foliação metamórfica.

ÍNDICE DE RESISTÊNCIA		Descrição	Rc (MPa)	ISRM (ADAPTADO)						
				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	risco superficial	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	risca fundo		produz pó	risco superficial	não
R1	R1 ⁺ (tijolo)	Muito branda superior	5-3	-	desagrega	risca fundo	com facilidade produz muito pó	risca	quebra pontualmente	
	R1 ⁻ (saprolitos)	Muito branda inferior	3-1		desagrega	corta (separa)	penetra	descasca esculpe	penetra	quebra as bordas
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	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Índice de Reação ao Método</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Alta</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Média</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Baixa</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Índice de Reação ao Método		Alta		Média		Baixa	
Índice de Reação ao Método									
Alta									
Média									
Baixa									
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									

Figura 2 – Classificação expedita de campo adaptada da ISRM (Cella & Brito, apud Amaral Jr et al, 2014)

Realizou-se um levantamento sistemático das condições destes conjuntos de fraturas. O espaçamento médio das fraturas foi de 7 cm (F1), 17 cm (F2 e F3), 33cm (F4) e 200 cm (F5). Com estes valores foi possível estimar o índice volumétrico de juntas (Jv), que resultou num valor de 26, ou seja, de blocos pequenos (Vallejo et al, 2002; Oliveira & Brito, 2018). A partir do Jv determinou-

se indiretamente o RQD (*rock quality designation*), conforme a relação proposta por Palmstrom (2005)

$$RQD = 115 - 3,3 J_v \rightarrow \text{para } J_v > 4,5$$

Ou seja, o valor de RQD foi de 39, evidenciando tratar-se de talude muito fraturado. Também foi feita uma série de *tilt tests* no campo ao longo dos planos das fraturas, resultando num valor de ângulo de atrito próximo a 31°. Com este valor, analisou-se pelo método de Markland a suscetibilidade a escorregamentos planares, em cunha e por tombamento flexural (Vallejo et al, 2002). A única instabilização que se mostrou cinematicamente possível é por ruptura planar pela fratura F1 (Figura 2b), que é subparalela ao talude, mas com mergulhos menores que este e com mergulho superior ao ângulo de atrito. Esta ruptura planar é também favorecida pelas fraturas F2 e F3.

Tabela 1 – Atitudes dos cinco conjuntos de fraturas (DM = direção do mergulho; M = mergulho).

F1		F2		F3		F4		F5	
DM	M	DM	M	DM	M	DM	M	DM	M
184	60	70	50	295	62	15	60	110	90
201	60	82	35	320	52	6	56	101	88
158	49	54	52	290	70	18	45	85	83
200	50	61	56	292	68	17	28	104	82
170	55	62	55	290	66	12	40	106	87
190	60	28	75	308	69	12	32	105	90
210	57	31	74	294	72	22	43	98	86
216	54	81	72	292	65	25	43	106	82
214	50	68	56	310	66	15	58		

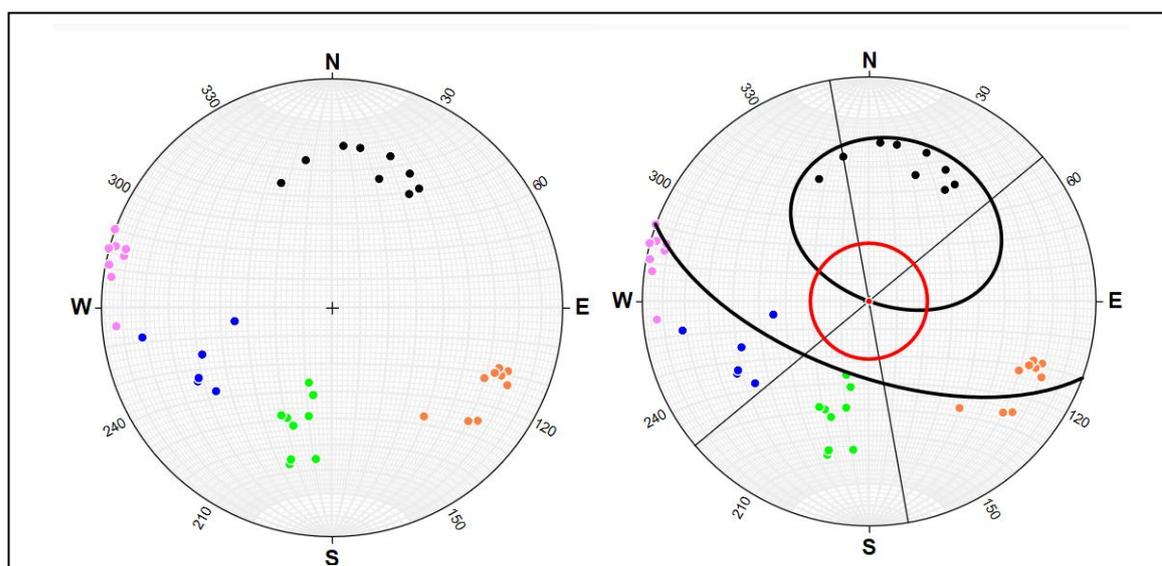


Figura 03 – a) Polos dos conjuntos de discontinuidades identificadas no talude (negro (F1); azul (F2); vermelho (F3); verde (F4); rosa (F5). B) Análise cinemática (método de Markland) mostrando que o conjunto F1, subparalelo à foliação do itabirito, é o único suscetível a ruptura planar. O talude está representado pela linha negra espessa, o cone de atrito em vermelho e limites laterais estabelecidos em 30°.

2.3. Imageamento multitemporal por infravermelho

Neste trabalho foi feito um levantamento direto em campo com o tradicional método de bússola em linhas de varredura (*scanlines*), mas cada vez mais são empregados levantamentos remotos, com emprego de fotogrametria, muitas vezes com drones (Sant'anna et al, 2020), especialmente em taludes de grande porte ou com acesso complexo. Se por um lado, o levantamento remoto de alguns destes parâmetros é rápido e eficaz, como orientação, espaçamento, persistência, outros são mais difíceis, como abertura, material de preenchimento e presença de água.

Uma das opções para superar esta dificuldade é a adoção de imageamento de infravermelho termal, uma vez que este tem o potencial de identificar fraturas abertas ou com material de preenchimento e presença de água, pois nestes casos a fratura responderá distintamente devido a diferenças na condutividade térmica (Pappalardo et al, 2016).

Para testar o potencial deste método, foram adquiridas imagens do talude investigado com câmera de infravermelho termal da HICKMicro, modelo Pocket 2, com resolução IR de 49152 pixels, acurácia de 2% e que capta no intervalo de 7.5 to 14 μm . Foram três imagens multitemporais, tiradas em abril pela manhã, em intervalos de 0 (t_1), 30 minutos (t_2) e 60 minutos (t_3), alguns dias após evento chuvoso. Todas as imagens foram extraídas antes da incidência solar direta no afloramento, para não alterar os resultados (Pappalardo et al, 2016).

Na figura 4 são apresentadas imagens óticas e termais tiradas a uma distância de 5 metros de trecho do afloramento. Na imagem 5a está delimitada por linhas pontilhadas a porção central, onde a rocha alterada dura (RAD) e resistente (R4, Figura 2) encontra-se exposta. Na base da imagem, a rocha se encontra um pouco mais alterada, como rocha alterada mole (RAM) ou solo, com vegetação rala. Acima da rocha alterada dura ocorre também rocha alterada mole e solo, sobre a qual se desenvolve vegetação de porte médio. Na figura 4b encontra-se marcadas os principais conjuntos de fraturas, com exceção de F1, paralelo à foliação, e que mergulha para fora do talude. As imagens 4c e 4d representam imagens termais tiradas à 07:11 e 8:10 da manhã, respectivamente. Notar que o trecho com rocha alterada dura manteve temperaturas mais frias que as com rocha alterada molde/solo, com o contraste aumentando após 60 minutos. Verifica-se que as imagens termais podem ser muito úteis para distinção de maciços com rochas com grau de intemperismo distintos. Contudo, na distância de 5 metros as imagens termais não foram eficientes para distinguir os conjuntos de fraturas com a resolução máxima da câmera empregada.

Na figura 5 estão representadas imagens óticas e térmicas tiradas à distância de 2,5 metros de parte das imagens da figura 4, onde aflora rocha alterada dura. Notar que nesta menor distância, os conjuntos de fraturas identificadas nas imagens óticas (Figura 5a e 5b), de melhor resolução, também são identificadas nas imagens termais, com o contraste aumentando no decorrer do amanhecer, quando a temperatura da rocha intacta se eleva numa taxa maior que ao longo das fraturas. Verificou-se no campo que o maior contraste ocorreu ao longo das fraturas com maior condutância térmica, seja por estarem mais abertas ou com percolação de água. Por exemplo, a fratura do conjunto F3, mostra menor contraste onde está fechada (1) do que onde se encontra mais aberta (2).

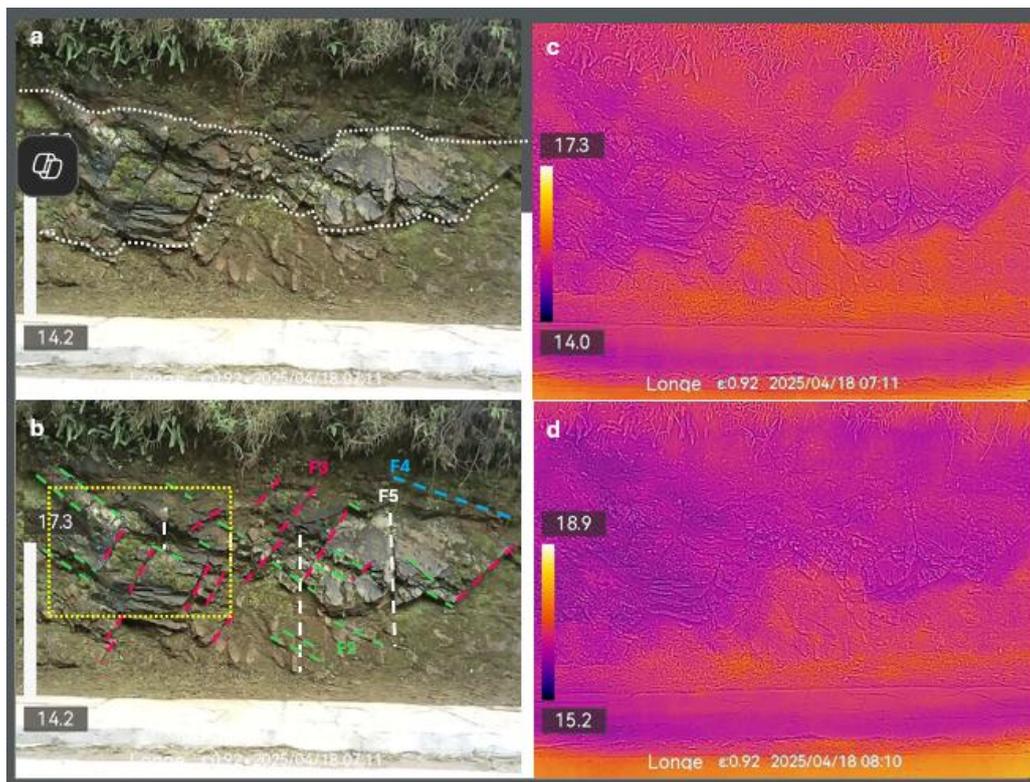


Figura 4. a) Imagem ótica com delimitação (linha pontilhada branca) da parte central, com rocha alterada dura (RAD); b) Imagem ótica, com os conjuntos F2, F3, F4 e F5 marcados. O retângulo amarelo delimita a área imageada mostrada na figura 5; c) Imagem termal tirada no instante t1 =0 (07:11); d) Imagem termal tirada no instante t3 (08:10).

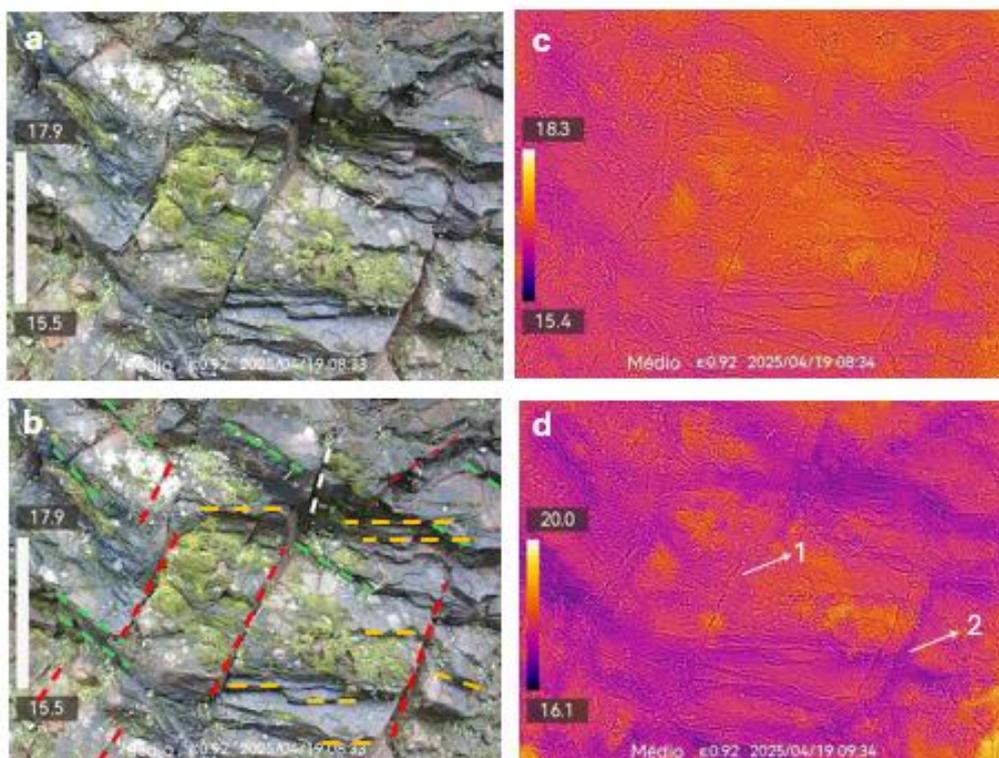


Figura 5 – a) Imagens óticas e térmicas tiradas a 2,5 m de trecho do talude delimitado pelo retângulo amarelo da figura 4b; b) Imagem ótica com as fraturas F1 (laranja), F2 (verde), F3 (vermelho) e F5 (branco); c) Imagem térmica tirada no instante t1; d) imagem térmica tirada após 60 minutos (t3).

A comparação de diversas imagens óticas e termais de vários trechos do afloramento evidenciaram que as últimas podem ser úteis para o zoneamento preliminar do maciço e para

identificar alguns atributos das descontinuidades, fundamentais para avaliação de sua qualidade. O tratamento das análises térmicas multitemporais, com o desenvolvimento de coeficientes que exprimem as taxas de resfriamento ou aquecimento (Pappalardo et al, 2016) podem ser muito úteis para uma análise com maior acurácia.

2.4 Classificação geomecânica

Por fim, para confirmar a suscetibilidade a movimento de massa neste maciço fraturado, o talude foi avaliado conforme duas classificações geomecânicas, a SMR (Romana, 1985) e Qslope (Bar & Barton, 2017). A classificação SMR e a Qslope constituem adequações para análise de estabilidade de taludes das conhecidas classificações RMR (Bieniawski, 1989) e do sistema Q (Barton et al, 1974), respectivamente.

Para o desenvolvimento destas classificações, faz-se necessário identificar as características das descontinuidades, especialmente da mais crítica, no caso a F1, como apontada pela análise cinemática, objetivando determinar o RMR básico (Romana, 1985). As características predominantes do conjunto F1 determinados em campo e com apoio de imageamento termal foram: espaçamento médio – 7 cm; persistência de 1 a 3 m; abertura > 5 mm; rugosidade - quase liso; material de preenchimento: - nenhum; grau de alteração das paredes - moderadamente alteradas; presença de água - úmido a escorrimento, quando chove. O levantamento com imagens térmicas confirmaram que as fraturas deste conjunto são abertas e permitem fluxo de água após eventos chuvosos.

Na classificação de Romana (1985), o RMR básico foi de 41 e os fatores de correção foram: $F1 = 1$; $F2 = 0,7$; $F3 = -50$; e $F4 = 0$. Com estes dados, o talude apresentou um valor de SMR total de 6, ou seja, de um maciço rochoso muito ruim, totalmente instável para rupturas planares grandes.

No sistema Qslope os pesos dos parâmetros foram: $J_n = 15$; $J_r = 2$; $J_a = 2$; Fator O = 0,75; $J_{\text{twice}} = 0,1$; $SRF_{\text{slope}} = 2,5$. Com estes pesos, o Qslope final foi de 0,026, indicando um maciço muito instável, que seria estável apenas se o mergulho do talude fosse abatido para um valor inferior a 42° , muito inferior aos atuais 63° .

3. CONCLUSÕES

O maciço rochoso constituído predominantemente por itabiritos resistentes e seccionado por cinco conjuntos de fraturas se mostra em situação de elevada instabilidade para escorregamentos planares de grandes dimensões, seja pela análise cinemática como também por duas classificações geomecânicas, a SMR e a Qslope. Sobreposto ao maciço rochoso ocorre uma camada constituída por solo residual e colúvio/tálus que podem tornar a suscetibilidade ainda maior.

Os levantamentos com imagens multitemporais com câmeras de infravermelho termal se mostram promissoras para melhorar a eficiência dos mapeamentos geomecânicos de maciços rochosos fraturados, auxiliando num zoneamento inicial e na identificação de alguns parâmetros relevantes das fraturas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, à FAPEMIG (Projeto APQ-01613-22), ao CNPq (processo 313840/2021-0), a UFOP e a Defesa Civil de Ouro Preto. Especial agradecimento também a Mônica Pessoa Neves e a outros discentes do curso de Engenharia Geológica que auxiliaram na aquisição dos dados de campo.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, T.P.; AMARAL JR, A. F.; AMARAL, C.G.; ZENÓBIO, A.A. (2014) 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*
- BAR, N., BARTON, N. (2017) The Q-Slope Method for Rock Slope Engineering. *Rock Mech Rock Eng* **50**, 3307–3322. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1305-0>
- BARTON N., LIEN R., LUNDE J. (1974) Engineering Classification of Rock Masses for Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics*, 6: 189-236
- BIENIAWSKI, Z.T. (1989) *Engineering Rock Mass Classifications: a Complete Manual*. New York: John Wiley and Sons, 251p.
- Defesa Civil de Ouro Preto, 2025. Portal da Prefeitura de Ouro Preto. Defesa Civil em Números. <https://defesacivil.ouropreto.mg.gov.br/#mapas>. Acessado em 12.03.2025
- DORR II J.V.N. (1969) Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Geological Survey Professional Paper, 641-A. Washington D.C., U.S. Government Printing Office, 110. Available online at: <https://pubs> . <https://doi.org/10.3133/pp641A>.
- ENDO, I., DELGADO, C.E.R., OLIVEIRA, M.M.F., ZAPPAROLI A.C., CARLOS, D.U., GALBIATTI, H. (2019) Castro P.T., Suita, M.T., Barbosa, M.S.C., Lana, C.E., Moura L.G.B. Estratigrafia e Arcabouço Estrutural do Quadrilátero Ferrífero: Nota Explicativa do Mapa Geológico, Minas Gerais, Brasil, Escala 1:150,000, Ouro Preto, UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (1984) “*Estudos Geológico-geotécnicos para caracterização e classificação de maciços rochosos para projetos de engenharia (túneis, lavra a céu aberto, e barragens)*”. São Paulo. Relatório, 19569.
- OLIVEIRA, A M. S. E BRITO, S. N. (2018). *Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE 912p.
- PALMSTROM, A. (2005) Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology*. 20(4): 362-377.
- PAPPALARDO, G., MINEO, S., ZAMPELLI, S. P., CUBITO, A.; CALCATERRA, D. (2016) 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*, 83, 182-196.
- ROMANA M. (1985) New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. In: ISRM, Int. Symp. on the role of rock mechanics in Excavations for mining and civil works. Proceedings, Mexico City, p.: 49-53.
- SANT’ANNA, S. N.; ALAMEDA-HERNÁNDEZ, P.M; BACELLAR, L.A.P. (2020) Uso da fotogrametria digital terrestre na classificação de maciços rochosos fraturados. *Rev. Geociênc. Nordeste*, .6(1): 1-6.
- SOBREIRA, F.G.; ARAÚJO, L.G.; BONUCCELLI, T. J. (1990) “*Levantamento de Soluções Estruturais para a Contenção de Encostas em Ouro Preto*”. Ouro Preto. Relatório Técnico, IPHAN/UFOP/MinC, Ouro Preto, 91p.
- VALLEJO, L., ABAD, L., GIJÓN, M. E MAZO, C. (2002) – *Ingeniería Geológica*, Prentice-Hall, 715 p.