

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



# JOÃO MARCÍLIO PIRES CAIXETA

# DETALHAMENTO GEOTÉCNICO DE ÁREAS DE RISCO MORRO DA QUEIMADA - SERRA DE OURO PRETO

OURO PRETO – MG

## JOÃO MARCÍLIO PIRES CAIXETA

# DETALHAMENTO GEOTÉCNICO DE ÁREAS DE RISCO MORRO DA QUEIMADA - SERRA DE OURO PRETO

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP, MG), como requisito para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Affonso Ferreira Filho

OURO PRETO – MG 2023

# SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C138d Caixeta, João Marcilio Pires. Detalhamento geotécnico de áreas de risco Morro da Queimada Serra de Ouro Preto. [manuscrito] / João Marcilio Pires Caixeta 2023. 87 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.	
Orientador: Prof. Dr. Flávio Affonso Ferreira Filho. Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .	
1. Geotecnia. 2. Cinemática. 3. Taludes (Mecânica do solo) - Classificação geomecânica. 4. Mapeamento geológico. I. Ferreira Filho, Flávio Affonso. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.	
CDU 624.131.2	

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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO REITORIA ESCOLA DE MINAS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



#### FOLHA DE APROVAÇÃO

João Marcílio Pires Caixeta

#### DDETALHAMENTO GEOTÉCNICO DE ÁREAS DE RISCO MORRO DA QUEIMADA - SERRA DE OURO PRETO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de minas

Aprovada em 11 de agosto de 2023

Membros da banca

Dr. Flávio Affonso Ferreira Filho - Orientador UFOP Dr. César Falcão Barella UFOP Dr. Lucas Pereira Leão UFOP

Flavio Affonso Ferreira Filho, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 31/082023



Documento assinado eletronicamente por **Jose Fernando Miranda**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 31/08/2023, às 14:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do <u>Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015</u>.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <u>http://sei.ufop.br/sei/controlador\_externo.php?</u> <u>acao=documento\_conferir&id\_orgao\_acesso\_externo=0</u>, informando o código verificador **0583901** e o código CRC **BC3C5911**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.011638/2023-68

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163 Telefone: 3135591590 - www.ufop.br

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais e à minha irmã, por todo apoio e incentivo, e por terem feito de tudo para tornar tudo isso possível.

#### AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Regina Célia e Anicésio, e a minha irmã Marília, por serem minha base e os melhores exemplos que eu poderia seguir. Ao Wendell por ser mais do que parte da família. À Camila por todo amor e carinho. Aos meus avós e avôs por mesmo de longe sempre estarem torcendo por mim. A todos os tios e tias, primos e primas das famílias Pires e Caixeta por todo o suporte, torcida e carinho.

Agradeço a todos os amigos de Campinas por estarem comigo desde o início. A todos amigos e colegas que fiz em Ouro Preto, por todo apoio e amizade durante toda essa trajetória.

À SGA, entidade que tive a honra de participar que contribuiu muito para meu crescimento pessoal e profissional.

A todos os professores que tive durante a graduação e que foram fundamentais durante esse período, em especial ao professor Flávio Affonso, por todo suporte no desenvolvimento deste trabalho e por toda paciência e aprendizado nesse tempo. Ao professor Hernani, por todo suporte e pela oportunidade de realizar um projeto de Iniciação Científica em minha área de interesse. À professora Maria Silvia, agradeço por todo suporte e dedicação durante meu período na SGA.

Por fim, às empresas Tetra Tech e WSP e todos os amigos e colegas de trabalho que fiz, pela oportunidade das primeiras vivências profissionais na área que tenho tanto interesse.

#### RESUMO

A história da urbanização da cidade de Ouro Preto é caracterizada por levantes de rápido crescimento populacional decorrentes de atividades mineradoras, sendo a primeira no século XVII e XVIII, devido a mineração dos depósitos de ouro aluvionar, abundantes na região, e o segundo ocasionado por atividades minerárias entre as décadas de 70 e 90 que levou à urbanização de áreas periféricas e já desgastadas pelas anteriores atividades minerárias, como a Serra de Ouro Preto. Devido a isso, muitas áreas urbanizadas do município estão localizadas em regiões suscetíveis a movimentos de massa, de acordo com análises da SBG-CPRM em conjunto com a Defesa Civil de Ouro Preto. No entanto, devido aos baixos orçamentos para realização de estudos geotécnicos em áreas urbanas, essas regiões não contam com muitas investigações diretas. Nesse contexto, o presente trabalho propõe uma metodologia para avaliar as áreas de suscetibilidade a movimentos de massa, em especial o modo de ruptura planar, localizadas no Morro da Queimada e no Morro do Santana. No intuito de detalhar as áreas de risco, foi realizado o mapeamento geológico de campo na região do Morro da Queimada, seguido da classificação geomecânica dos principais taludes pelos métodos RMR e SMR e, por fim, a análise cinemática desses taludes, partir dos dados obtidos no mapeamento geológico. Então, é apresentado o mapa geológico do Morro da Queimada, um mapa temático exibindo o valor de RMR das rochas na área de estudo e as projeções estereográficas seguida das análises cinemáticas dos taludes. Compilando todas essas informações, discorre-se brevemente a cerca de fatores que podem ocasionar movimentos massa nos taludes da região, então o trabalho é finalizado com uma proposta de setorização das áreas de risco, em que se apresenta um mapa onde a região de estudo é dividida em áreas conforme sua suscetibilidade à ruptura planar.

**Palavras-chave**: Análise Cinemática. Classificação Geomecânica. Mapeamento Geológico. Setorização Geotécnica.

#### ABSTRACT

The history of the urbanization of the city of Ouro Preto is characterized by waves of migration resulting from mining activities. The first one was in the 17th and 18th centuries due to the mining of abundant alluvial gold deposits in the region. The second wave was cost by mining activities between the 1970s and 1990s, which led to the urbanization of peripheral areas already worn down by previous mining activities, such as Serra de Ouro Preto. Because of this, many urbanized areas of the municipality are located in regions subject to mass movements, according to the analyses by SBG-CPRM in tandem with the Civil Defense of Ouro Preto. Owing to low budgets for geotechnical studies in urban areas, these regions do not have many investigations. Because of their susceptibilities to mass movements, in particular plane failure, the present study proposes a methodology to evaluate areas in Morro da Queimada and Morro do Santana neighborhoods. To detail the risk areas, the following were carried out: geological mapping in the Morro da Queimada region, the geomechanical classification of the main slopes using the Rock Mass Rating (RMR) and Slope Mass Rating (SMR), and the kinematic analysis of the slopes on the data obtained from the geological mapping. Then, the geological map of Morro da Queimada is presented, a thematic map showing the RMR value of the rocks in the study area and the stereographic projections followed by the kinematic analyzes of the slopes. Compiling all this information, briefly discusses factors that can cause mass movements in the slopes of the region, then the study concludes by proposing the division of the area into sectors, which presents a map where the study area is divided according to their susceptibility to plane failure.

**Keywords:** Kinematic Analysis, Geomechanical Classification, Geological Mapping, Geotechnical Sectorizing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Crescimento populacional de Ouro Preto entre os anos de 1970 e 2010 14
Figura 2 – Ocupação da área urbana de Ouro Preto ao longo dos séculos 14
Figura 3 – Áreas de risco de Ouro Preto
Figura 4 - A esquerda o município de Ouro Preto com destaque para a área de estudo em
vermelho. A direita a imagem de satélite da área de estudo16
Figura 5 – Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero com suas principais minas de ferro e
estruturas tectônicas
Figura 6 – Características das descontinuidades
Figura 7 – Exemplos de representação de um plano de descontinuidade
Figura 8 – Rede de projeção de Schmidt
Figura 9 – Influência do controle estrutural nas rupturas
Figura 10 – Exemplo de projeção estereográfica de um talude sujeito a ruptura planar 26
Figura 11 – Exemplo de projeção estereográfica de um talude sujeito a ruptura em cunha 27
Figura 12 – Tipos de ruptura por tombamento
Figura 13 – Exemplo de projeção estereográfica de um talude sujeito a ruptura por
tombamento flexural
Figura 14 – Exemplo de projeção estereográfica de um talude sujeito a ruptura por
tombamento de blocos
Figura 15 – Exemplo da interface do software OpenStereo 44
Figura 16 – Talude de quartzito (JF02) 50
Figura 17 – Início do primeiro acesso a área, próxima a estação JF03
Figura 18 – Residência próximas aos taludes de saprólito da estação JF05 52
Figura 19 – Afloramento de Itabirito na estação geológica JF1153
Figura 20 – Mapa Geológico do Morro da Queimada55
Figura 21 – Face do talude JF03 setor B 59
Figura 22 - Combinação do mapa geológico com os valores de RMR encontrados 65
Figura 23 – Encanamento localizado na região JF03 67
Figura 24 – Projeção estereográfico do talude JF03 A (Open Stereo)
Figura 25 – Projeção estereográfico do talude JF03 B (Open Stereo)70
Figura 26 – Projeção estereográfico do talude JF11 (Open Stereo)
Figura 27 – Projeção estereográfica do talude JF02 (Open Stereo)

Figura 28 – Projeções estereográficas representadas no mapa de RMR	76
Figura 29 - Proposta de setorização das áreas de risco, conforme suscetibilidade à	i ruptura
planar	

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estimativa da resistência da rocha intacta	. 31
Tabela 2 - Tabela para definição dos parâmetros e cálculo do RMR	. 37
Tabela 3 - Tabela auxiliar para definição do parâmetro 1 (RMR)	. 38
Tabela 4 - Descrição dos graus de alteração das rochas	. 39
Tabela 5 - Definição de F3 (Slope Mass Rating)	. 41
Tabela 6 - Determinação do SMR	. 42
Tabela 7 - Resumo das probabilidades de ocorrência de rupturas e propostas de métodos	de
suporte a partir do SMR	. 42
Tabela 8 - Definição de JR	. 45
Tabela 9 - Definição do JA	. 46
Tabela 10 - Dados das estações geológicas obtidas em campo	. 48
Tabela 11 - Resumo dos resultados encontrados nas avaliações geomecânicas	. 64
Tabela 12 - Atitude das estruturas do talude JF03 A.	. 67
Tabela 13 - Atitude das estruturas do talude JF03 B.	. 70
Tabela 14 - Atitude das estruturas do talude JF11	. 72
Tabela 15 - Atitude das estruturas do talude JF02	. 74

## SUMÁRIO

RESUMO	. 06
ABSTRACT	. 07
LISTA DE FIGURAS	. 08
LISTA DE TABELAS	. 10
SUMÁRIO	. 11
1. INTRODUÇÃO	. 13
1.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	. 15
1.2. Geologia Regional	. 16
1.3. OBJETIVOS GERAIS	. 18
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	. 18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	. 20
2.1. MACIÇOS ROCHOSOS - CONCEITOS	. 20
2.2. PROJEÇÃO ESTEREOGRÁFICA	. 23
2.3. MODOS DE RUPTURA EM TALUDES DE ROCHA E ANÁLISE CINEMÁTICA	. 24
2.3.1. Ruptura Planar	. 25
2.3.2. Ruptura em Cunha	. 26
2.3.3. Ruptura por Tombamento	. 27
2.3.4. Ruptura Circular	. 29
2.4. ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA DA ROCHA INTACTA	. 30
2.5. MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS	. 31
2.5.1. Rock Mass Rating (RMR) – Bieniawski (1973, 1989)	. 32
2.5.2. Slope Mass Rating (SMR) – Romana (1985)	. 32
2.5.3. Índice de Qualidade de Rocha (RQD)	. 33
3. MATERIAIS E MÉTODOS	. 35
3.1. MAPEAMENTO GEOLÓGICO	. 35
3.2. CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS	. 36
3.2.1. Rock Mass Rating (RMR) – Bieniawski (1973, 1989)	. 36
3.2.2. Slope Mass Rating (SMR) – Romana (1985)	. 40
3.3. ANÁLISE CINEMÁTICA	. 43
3.4. OBTENÇÃO DE PARÂMETROS IN SITU (ÂNGULO DE ATRITO)	. 45
3.5. DETALHAMENTO GEOTÉCNICO DAS ÁREAS DE RISCO	. 47

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1. MAPEAMENTO GEOLÓGICO	48
4.2. CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS	56
4.2.1. JF02	56
4.2.2. JF03	57
4.2.3. JF05	60
4.2.4. JF06	60
4.2.5. JF07	61
4.2.6. JF11	62
4.2.7. JF20	63
4.3. ANÁLISE CINEMÁTICA	66
4.3.1. Talude JF03 A	66
4.3.1.1. Descrição	66
4.3.1.2. Projeção Estereográfica	67
4.3.1.3. Ângulo de Atrito	68
4.3.1.4. Análise Cinemática	69
4.3.2. Talude JF03 B	69
4.3.2.1. Projeção Estereográfica	69
4.3.2.2. Análise Cinemática	71
4.3.3. Talude JF11	71
4.3.3.1. Descrição	71
4.3.3.2. Projeção Estereográfica	71
4.3.3.3. Ângulo de Atrito	73
4.3.3.4. Análise Cinemática	73
4.3.4. Talude JF02	74
4.3.4.1. Descrição	74
4.3.4.2. Projeção Estereográfica	74
4.3.4.3. Ângulo de Atrito	75
4.3.4.4. Análise Cinemática	75
4.4. ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE DE RUPTURA DE ÁREAS DE RISCO	77
5. CONCLUSÃO	80
REFERÊNCIAS	81
APÊNDICE A – Mapa Geológico do Morro da Queimada	84
APÊNDICE B – Mapa Geológico-Geotécnico: Morro da Queimada	85

APÊNDICE C – Proposta de Setorização de Áreas de Risco	86
ANEXO A – Mapa de Risco de Ouro Preto (SBG-CPRM)	87

#### 1. INTRODUÇÃO

A urbanização da cidade de Ouro Preto iniciou-se com a descoberta de ouro na região, no início do século XVII, com a chegada de grupos organizados, com o intuito de explorar o ouro recém encontrado. Ouro Preto se destacou pela abundância de depósitos de ouro aluvionar, que levou a cidade a um rápido processo de urbanização, tornando-se capital da província de Minas Gerais, e o segundo maior centro populacional da América Latina (Fonseca e Sobreira, 2001). A exploração dos depósitos auríferos de Ouro Preto teve seu auge no século XVIII, com catas a céu aberto, próximas aos leitos dos rios, bem como por escavações subterrâneas, realizadas nas encostas da serra de Ouro Preto, onde até hoje é possível observar cicatrizes e marcas deixadas pela mineração da época, em especial poços de investigação, buracos de sarilho, galerias e cortes antrópicos nas rochas da serra.

No entanto, a cidade passou por um esvaziamento, no início do século XX, motivada pela transferência da capital estadual para Belo Horizonte, o que gerou um despovoamento das zonas periféricas, que espacialmente representam as zonas de maior suscetibilidade a movimentos gravitacionais. Nas décadas de 70 a 90, a cidade passou novamente por uma rápida urbanização, como ilustra a Figura 1, motivada em especial pela atividade minerária, além da implantação de indústrias na região. Essa nova urbanização ocasionou em uma maior ocupação não controlada das áreas periféricas de Ouro Preto, incluindo as encostas da serra de Ouro Preto, principal palco das atividades subterrâneas da mineração de ouro nos séculos anteriores. A Figura 2 ilustra a ocupação da área urbana de Ouro Preto ao longa de sua história.

A serra de Ouro Preto possui encostas que apresentam condições geotécnicas desfavoráveis ao uso e ocupação do solo.



Figura 1 – Crescimento populacional de Ouro Preto entre os anos de 1970 e 2010

Fonte: IBGE, 2010.

Figura 2 – Ocupação da área urbana de Ouro Preto ao longo dos séculos



Fonte: Castro, 2006 apud Xavier, 2018.

Dado esse contexto de povoamento de Ouro Preto, o limite norte da cidade que engloba os bairros Morro do Santana, Morro da Queimada, Morro São João, Bairro São Cristóvão, Taquaral, Piedade, entre outros, tem sido alvo de incansáveis trabalhos de mapeamento geotécnico, com delimitação de regiões suscetíveis a movimentos de massa, bem como a identificação das residências localizadas em zonas de risco. Dentre outros trabalhos realizados com esse intuito, destaca-se a carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação para o município de Ouro Preto realizada pelo Serviço Geológico do Brasil – Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (SBG-CPRM) em 2014 (Anexo A), e o mapa de risco de Ouro Preto, também realizada pela CPRM, que apresenta uma delimitação e denominação das áreas de risco alto e muito alto, bem como uma breve descrição destas, detalhando o número de pessoas e imóveis vulneráveis (Figura 3). O Município de Ouro Preto já passou por dois principais estudos para realização do mapa de risco, ambos realizados SBG-CPRM, um em 2011 e o outro em 2016, no entanto, atualmente este mapa está sendo detalhado em projeto desenvolvido pela parceria do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (UFV), e o Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (Marques *et al.*, 2023).





Fonte: Disponível online no site da Defesa Civil, acessado em 03/2023.

## 1.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no município de Ouro Preto - MG, compreendendo parte dos bairros Morro da Queimada, Morro Santana e Morro São João (Figura 4). Esta área possui dois principais acessos, sendo um que liga o bairro Morro Santana, próximo à escola Municipal Professora Juventina Drummond, ao bairro Morro da Queimada, onde observa-se áreas de risco ou taludes susceptíveis a movimentos gravitacionais de massa (demarcadas pela SBG-CPRM e utilizadas pela Defesa Civil de Ouro Preto) e taludes dentro da área de risco demarcada pela SBG-CPRM (2011) nomeada de "Área de Risco: Morro da Queimada, Alto da Cruz, Antônio Dias". O outro acesso é a entrada do Parque Arqueológico do Morro da Queimada pela Rua Rio Piracicaba.

Figura 4 – A esquerda o município de Ouro Preto com destaque para a área de estudo em vermelho. A direita a imagem de satélite da área de estudo 74550C 

Fonte: Google Earth

#### 1.2. Geologia Regional

O Quadrilátero Ferrífero (QFe) (Figura 5) é uma região clássica da geologia précambriana, com minas de ouro e ferro, situada no centro-sul de Minas Gerais, sendo formado por terrenos granito-gnáissicos (embasamento), cinturões de rochas verdes (Supergrupo Rio das Velhas) e sequências supracrustais (Supergrupo Minas).



Figura 5 – Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero com suas principais minas de ferro e estruturas tectônicas

Fonte: Baars e Rosière, 1994

O Supergrupo Minas corresponde a uma sequência de rochas metassedimentares de origem química e clástica, de idade paleoproterozóica, constituída por filitos, xistos, quartzitos, dolomitos e itabiritos, metamorfizada sob condições de fácies xisto verde, sendo subdivido, da base para o topo, em cinco grupos: Tamanduá, Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará (Dorr, 1969).

O Grupo Caraça é constituído por duas formações: Moeda (base) e Batatal (topo). Tais unidades sobrepõem discordantemente as unidades do Supergrupo Rio das Velhas. A Formação Moeda é caracterizada por quartzitos, quartzitos sericíticos, lentes de metaconglomerados e filitos. Seus estratos resistem à erosão, favorecendo a formação de serras que se elevam acima das regiões menos resistentes do embasamento cristalino. A Formação Batatal é formada por filitos sericíticos de coloração cinza, filitos grafitosos e carbonosos, metacherts e lentes de formação ferrífera.

Em contato gradacional com o Grupo Caraça sobrepõem-se os metassedimentos químicos do Grupo Itabira, que são englobados em duas formações: Cauê (base) e Gandarela (topo). A Formação Cauê é predominantemente caracterizada por itabiritos e, subordinadamente, por lentes de filitos. As mais importantes reservas de minério de ferro do

QFe estão associadas a esta formação. A Formação Gandarela sucede, gradacionalmente, à unidade anterior e é constituída, predominantemente, por dolomitos. A área estudada encontra-se sobre rochas dos grupos Caraça e Itabira.

As principais feições estruturais do QFe são representadas pelos domos (complexos metamórficos do embasamento), sobre e ao redor dos quais se amoldam grandes estruturas sinformais e antiformais. Entre as principais estruturas, destaca-se o anticlinal de Mariana, com eixo de direção NW/SE, caindo para sudeste, e com o flanco sul de direção leste-oeste, com as rochas mergulhando para sul. Este flanco forma a serra de Ouro Preto. Para Nalini Jr. (1993) a nucleação deste anticlinal se deu em função do regime extensional, (final do Transamazônico) devido ao uplift generalizado de blocos do embasamento.

#### 1.3. OBJETIVOS GERAIS

O objetivo do presente trabalho é realizar um detalhamento geotécnico da região de alto risco de Ouro Preto, denominada "MG\_OUROPRE\_SR\_34\_CPRM" pela SBG-CPRM, 2016, localizada no extremo oeste do bairro Morro do Santana, e da área de risco denominada pela SBG-CPRM em 2011 como "Morro da Queimada / Alto da Cruz / Antônio Dias". É necessário entender que as delimitações feitas pela SBG-CPRM em 2011 englobam áreas maiores e é menos detalhada quando comparada com as delimitações realizadas posteriormente.

O detalhamento dessas áreas passa pela caracterização geotécnica dos maciços rochosos, com emprego de sistemas de classificações, levantamento das descontinuidades para estudos de análise cinemática, além do mapeamento geológico, que possibilite um possível zoneamento desta região de alto risco pela avaliação da suscetibilidade a rupturas planares.

#### 1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a classificação dos maciços rochosos pelo sistema Rock Mass Rating (RMR) e Slope Mass Rating (SMR).
- Mapeamento geológico das rochas e descontinuidades que formam os maciços rochosos.
- Realizar a análise cinemática a partir dos dados obtidos em campo.
- Apresentar um zoneamento conforme a suscetibilidade a movimentos gravitacionais.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. MACIÇOS ROCHOSOS - CONCEITOS

Os maciços rochosos podem ser definidos como conjuntos de rocha intacta delimitados por descontinuidades, sendo estas definidas como qualquer quebra mecânica e associadas as fraturas, planos de acamamento, falhas, entre outras estruturas geológicas, que ocorrem de forma natural, a partir das mais diversas origens e processos geológicos (Priest, 1993). A análise, medição e descrição dessas estruturas é de extrema importância para a Mecânica das Rochas, devido fornecer aos maciços rochosos uma menor resistência, quando comparada à rocha intacta, e serem, principalmente em escavações em rocha submetidas a baixas condições de tensão, os principais condicionantes de rupturas em rocha.

#### a) Rocha Intacta

A rocha intacta representa, no contexto de Mecânica das Rochas, a porção do maciço rochoso formada por grãos cristalinos de minerais sólidos relativamente compactados e coesos. Tende a ser o elemento dos maciços rochosos com maior resistência mecânica e homogeneidade, mas podem apresentar anisotropia conforme orientação preferencial dos minerais constituintes. Neste contexto, também podem ser chamadas de matriz rochosa e/ou blocos de rocha, devido a sua delimitação pelas descontinuidades da rocha.

A rocha intacta, ao ser exposta a agentes de intemperismo, entra em processo de desagregação física e alteração química. O material intacto começa a apresentar um fraturamento em sua estrutura, que divide a matriz rochosa em blocos de rocha intacta. Esses blocos, isoladamente, preservam as características originais da rocha intacta, no entanto o maciço rochoso que passou pelo processo de intemperismo passa a se comportar como um material heterogêneo devido às estruturas de fraturamento, chamadas de descontinuidades. Então, devido ao processo de intemperismo, as propriedades físicas e mecânicas da rocha intacta são alteradas, levando a diminuição da resistência do maciço rochoso.

#### b) Descontinuidades

De forma geral, descontinuidade é o termo genérico utilizado para nominar quaisquer estruturas geológicas que geram descontinuidades mecânicas nos maciços rochosos, e que apresentam uma baixa ou nula resistência à tração (ISRM, 1978). Esse termo engloba as

estruturas nominadas como juntas, planos de bandamento, planos de xistosidade, falhas e planos de fraqueza, em geral.

Uma dificuldade relacionada a caracterização *in situ* das descontinuidades é o fato desde procedimento ser subjetivo, dependendo da *expertise* do geotécnico ou engenheiro geólogo. No geral, é recomentado que a caracterização das descontinuidades seja realizada seguindo os seguintes parâmetros (ISRM, 1978), ilustrados na Figura 6.



Figura 6 - Características das descontinuidades

Fonte: Hudson e Harrison (1997)

1. Orientação: representa a atitude geológica da descontinuidade no espaço, medida pela direção de mergulho e pelo mergulho da descontinuidade. A representação, pela projeção estereográfica, permite a definição das famílias das descontinuidades presentes em um talude de rocha (Figura 7).



Figura 7 – Exemplos de representação de um plano de descontinuidade

Fonte: Maciel Filho, 2007.

2. Espaçamento: indica a distância perpendicular entre descontinuidades de uma mesma família. Importante parâmetro para a determinação do grau de fraturamento, tamanho dos blocos e *Rock Quality Designation* (RQD) (Deere, 1989).

3. Família: conjunto de descontinuidades com a mesma orientação e gênese.

4. Persistência: refere-se à continuidade do traço de uma descontinuidade.

5. Rugosidade: parâmetro referente a ondulação e a aspereza da superfície da descontinuidade. Importante na resistência ao cisalhamento da descontinuidade.

6. Abertura: refere-se a distância perpendicular entre as paredes da descontinuidade, cujo interior é preenchido por algum tipo de material, água ou ar.

7. Preenchimento: é o nome dado ao material sólido que ocupa uma descontinuidade. Os materiais mais comuns de preenchimento são areias, siltes, argilas, óxido de ferro, calcita, veios de quartzo, entre outros. Devido as grandes variações de materiais de preenchimento, os comportamentos dos preenchimentos, em relação à resistência ao cisalhamento, são muito variáveis.

8. Resistência das paredes: este parâmetro equivale à resistência à compressão da parede de uma descontinuidade. Essa resistência tende a ser diferente e menor que a resistência a compressão apresentada pela rocha intacta, tendo em vista às alterações e intemperismo sofridas pela parede que delimita o plano da descontinuidade. Este parâmetro é um importante condicionador da resistência ao cisalhamento do maciço rochoso (ISRM, 1978).

9. Percolação de água: referente a vazão ou não presença de água na descontinuidade.

#### 2.2. PROJEÇÃO ESTEREOGRÁFICA

A projeção estereográfica é um método utilizado para o estudo e visualização de planos e retas que passam por um mesmo ponto. Um exemplo comum de aplicação da projeção estereográfica em projetos de engenharia é sua utilização na geologia estrutural para identificar a orientação e o mergulho de estruturas como falhas, estratos geológicos, lineações, entre outras. Em projetos de geotecnia, em especial relacionados à estabilidade de taludes de rocha, a utilização da projeção estereográfica visa estudar a relação entre os planos das descontinuidades, observadas no talude, entre si e com o plano da face do talude. Apesar de que na maioria desses casos os planos não tenham um ponto em comum, a aplicação da

projeção estereográfica auxilia um estudo de ruptura hipotética do talude, tendo em vista que a relação entre os planos de descontinuidades com a face do talude pode indicar, ou não, direções preferenciais de movimento. Esta parte do estudo de estabilidade de um talude é denominada como Análise Cinemática.

A apresentação da projeção desses planos é normalmente realizada na rede de projeção de Schmidt (Figura 8), em que é possível obter as informações de mergulho e direção de mergulho das descontinuidades a partir de arcos e/ou polos.





Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Para a ocorrência de determinados modos de ruptura em taludes de rocha, algumas condições geométricas devem ser satisfeitas. Essas condições são facilmente visualizadas e interpretadas a partir da projeção dos planos de descontinuidades no círculo de Schmidt.

A seguir será descrito os diferentes modos de ruptura em taludes, as condições geométricas que devem ser satisfeitas para a ocorrência da ruptura e a projeção estereográfica padrão de cada modo.

## 2.3. MODOS DE RUPTURA EM TALUDES DE ROCHA E ANÁLISE CINEMÁTICA

As descontinuidades são as principais condicionantes de rupturas em talude de rochas resistentes, em escavações superficiais, por serem estruturas de menor resistência, quando comparadas com as porções de rocha intacta, e por delinearem as superfícies suscetíveis ao

movimento, como ilustrado na Figura 9. Visto que as características de uma descontinuidade podem indicar os aspectos geométricos, bem como favorecer uma ruptura, entende-se a importância de mapear, medir, descrever e classificar essas características dos maciços rochosos.

Os modos de ruptura podem ser divididos em rupturas sem controle estrutural, quando o maciço rochoso se apresenta como um meio contínuo e isotrópico, geralmente quando apresenta-se extremamente fraturado, ou até se tratando de um talude de solo (ruptura circular); e ruptura com controle estrutural, que ocorre com o maciço rochoso que se comporta como um meio descontínuo e anisotrópico, tratando-se de rupturas regidas pelas descontinuidades. Os modos de ruptura com controle estrutural são classificados, de acordo com sua geometria em relação a geometria do talude, em três grupos: planar, cunha e tombamento. Destaca-se que as rupturas com controle estrutural devem ser estudadas pelo método das projeções estereográficas, para a análise de suas condições de movimento (análise cinemática). Os detalhes envolvendo cada tipo de ruptura serão comentados a seguir e as condições para os modos, planar, cunha e tombamento, foram estudadas e descritas por Markland (1972).

Figura 9 – Influência do controle estrutural nas rupturas



Fonte: Pinotti e Carneiro, 2015.

#### 2.3.1. Ruptura Planar

Ocorre quando a família crítica de descontinuidade, que se define por ser a principal condicionante para o evento de ruptura, é interceptada por outras duas famílias, responsáveis

pela liberação do bloco unitário criado. Os principais fatores condicionantes do movimento do bloco são: o peso do bloco, a pressão da água na superfície de deslizamento e na fenda da fratura de liberação (fratura de tração), as características da rugosidade, o grau de alteração da parede da descontinuidade, e o ângulo de atrito básico do material.

As condições que devem ser satisfeitas para a ocorrência dessa ruptura são:

• Direção do plano de deslizamento deve ser praticamente paralela à direção da crista do talude, com uma diferença de até 20° (Goodman, 1989) (equação 2.1).

$$\alpha_p = \alpha_f \pm 20^\circ, \tag{2.1}$$

Sendo  $\alpha_p$  a direção da descontinuidade e  $\alpha_f$  a direção do talude.

O ângulo de mergulho da descontinuidade (ψ<sub>p</sub>) deve ser inferior ao mergulho da face do talude (ψ<sub>f</sub>) (equação 2.2).

$$\psi_p < \psi_f \tag{2.2}$$

O ângulo de mergulho da descontinuidade (ψ<sub>p</sub>) deve ser menor que o ângulo de atrito da descontinuidade (φ), pois se for igual ou maior (equação 2.3), ocorrerá a ruptura.

$$\psi_p \ge \varphi \tag{2.3}$$

Caso todas as condições geométricas citadas sejam satisfeitas, o talude apresentará uma projeção estereográfica similar à apresentada na Figura 10.

Figura 10 – Exemplo de projeção estereográfica de um talude sujeito a ruptura planar.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

#### 2.3.2. Ruptura em Cunha

A ruptura em cunha ocorre quando duas famílias de descontinuidades distintas se interceptam e proporcionam a ruptura do talude, direcionando o material rompido, de forma aproximadamente tetraédrica, segundo a linha de interseção entre as descontinuidades. Pode ser uma cunha simétrica ou assimétrica.

As condições que devem ser satisfeitas para a ocorrência desse modo de ruptura são:

- A linha de maior declividade do talude e a interseção entre as descontinuidades devem apresentar a mesma direção, ou um ângulo de até 20°;
- O mergulho da interseção entre as descontinuidades (φ<sub>i</sub>) deve ser menor que o mergulho da face do talude (ψ<sub>f</sub>) (equação 2.4);

• 
$$\phi_i < \psi_f$$
 • (2.4)

O mergulho da interseção entre as descontinuidades (φ<sub>i</sub>) deve ser maior ou igual ao ângulo de atrito das descontinuidades (φ) (equação 2.5).

• 
$$\phi_i \ge \phi$$
 • (2.5)

Um talude de rocha, que essas condições geométricas, tende a apresentar uma projeção estereográfica similar à apresentada na Figura 11.

Figura 11 – Exemplo de projeção estereográfica de um talude sujeito a ruptura em cunha.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

#### 2.3.3. Ruptura por Tombamento

As rupturas por tombamento ocorrem quando a família crítica de descontinuidades tem direção paralela à face do talude e mergulho contrário ao mergulho da face do talude. Os tipos de tombamento são: flexural e blocos (Figura 12).



Figura 12 – Tipos de ruptura por tombamento.

Fonte: Goodman e Bray (1976)

O tombamento flexural acontece quando as descontinuidades, com mergulho alto, formam colunas contínuas de rocha, que, por cisalhamento, se flexionam e quebram. O início desse processo pode se dar pelo aumento da tensão do talude, refletido pelo aumento de sua altura, criando uma região de baixa resistência que pode funcionar como o ponto de rotação da coluna. Esse tombamento é comumente verificado em filitos, xistos e ardósias, ou seja, rochas com bandamento composicional, ou anisotrópicas.

As condições que devem ser satisfeitas para a ocorrência de tombamento flexural são:

- A descontinuidade que condiciona a ruptura deve estar pouco espaçada;
- A rocha deve apresentar propriedade de se deformar plasticamente;
- A direção do mergulho da descontinuidade (αp) deve ser oposta à direção de mergulho da face do talude (αf), com um ângulo entre elas de no máximo 30°, como mostra a equação 2.6.

$$\alpha_{p} = \left(\alpha_{f} \pm 180^{\circ}\right) \pm 30^{\circ} \tag{2.6}$$

 O mergulho da descontinuidade deve respeitar a seguinte condição com relação ao mergulho do talude e ângulo de atrito

$$\left(90^{\circ} - \psi_{p}\right) \le \left(\psi_{f} - \varphi\right) \tag{2.7}$$

O tombamento de blocos acontece a partir de descontinuidades espaçadas, delimitando blocos. Geralmente os blocos do pé do talude recebem esforços dos blocos acima, fazendo-os tombar, que pode levar à ruptura do talude. Esse fenômeno é geralmente identificado em arenitos, calcários, quartzitos, i.e., rochas mais resistentes.

As condições que devem ser satisfeitas para que ocorra tombamento de blocos são:

- Deve haver duas famílias de descontinuidades que se interceptam de forma basicamente perpendicular, inclinadas uma a favor e outra contra a inclinação do talude;
- A família de descontinuidades que mergulha contra a inclinação da face do talude deve estar inclinada segundo ângulos maiores que (90° - φ), sendo φ o ângulo de atrito;
- A família de descontinuidades que mergulha a favor deve ter inclinações menores que o ângulo de atrito (φ);
- A direção de mergulho desses planos deve se situar dentro de 20° da direção de mergulho da face do talude.

A seguir, a Figura 13 e Figura 14 ilustram exemplos de projeções estereográficas de taludes sujeitos a ruptura por tombamento, flexural e de blocos, respectivamente.

Figura 13 - Exemplo de projeção estereográfica de um talude sujeito a ruptura por



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)



Figura 14 – Exemplo de projeção estereográfica de um talude sujeito a ruptura por

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

#### 2.3.4. Ruptura circular

Trata-se de uma ruptura sem controle estrutural, comum em maciços rochosos contínuos e isotrópicos, extremamente fraturados, taludes de solo e em maciços rochosos muito alterados, seguindo uma superfície em forma de concha. As rupturas de taludes rochosos de maior altura, tendem a ser circulares.

## 2.4. ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA DA ROCHA INTACTA

Normalmente, essa resistência é obtida através de ensaios como: ensaios de compressão puntiforme e ensaios compressão uniaxial. Esses ensaios necessitam de coleta de amostras para análise em laboratório, ou de equipamentos específicos para ensaio em campo, o que dificulta sua aplicação para situações em que não há possibilidade da coleta de amostras e/ou os equipamentos não estão disponíveis.

Para essas situações utilizam-se tabelas de consistência (Tabela 1), correlacionáveis a resistência da rocha, para estimar e obter uma faixa de valores para a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta.

Grau	Descrição	Características	Resistência à compressão uniaxial
R0	Solos estruturados e rijos à rochas muito brandas	Penetrada pela ponta do dedo polegar; moldada pelas mãos; facilmente penetrada pelo canivete e martelo de geólogo; escavada por equipamento manual	0,25 – 1,0 MPa
R1	Rochas muito brandas	Esmigalha-se facilmente sob o impacto de martelo de geólogo; riscada facilmente pela ponta fina do martelo de geólogo; riscada e raspada facilmente pelo canivete; desplacamentos ao longo da foliação sob pressão dos dedos; bordas dos fragmentos facilmente quebradas pela pressão dos dedos; pequenos fragmentos (2 X 2 X 2 cm) não quebram sob pressão dos dedos; escavação mecanizada	1,0 – 5,0 MPa
R2	Rochas brandas	Quebra-se sob único impacto do martelo; cavidade rasa sob impacto firme da ponta fina do martelo de geólogo; as bordas dos fragmentos podem ser quebradas pela pressão dos dedos; a lámina do canivete provoca sulco acentuado na superfície do fragmento; podem ser raspadas pelo canivete; escavação por equipamentos mecanizados, exigindo em alguns casos, fogo de afrouxamento do maciço	5,0 – 25,0 MPa
R3	Rochas medianamente resistentes	Espécimes de mão podem ser quebrados sob poucos golpes firmes do martelo de geólogo; bordas finas dos fragmentos podem ser quebradas pelas mãos com certa dificuldade; superficie pouco riscável por lámina de aço; não pode ser raspada pelo canivete; escavada por desmonte a fogo	25,0 – 50,0 MPa
R4	Rochas resistentes	Espécimes de mão requerem alguns golpes do martelo para serem quebrados; bordas dos fragmentos dificilmente quebradas pelas mãos; superfície dificilmente riscada pelo canivete; escavada por desmonte a fogo	50,0 – 100,0 MPa
R5	Rochas muito resistentes	Espécimes de mão requerem muitos golpes do martelo para serem quebrados; fragmentos possuem bordas cortantes que resistem ao corte por lámina de aço; superficie praticamente não riscada pelo canivete; escavada por desmonte a fogo	100,0 – 250,0 MPa
Rő	Rochas extremamente resistentes	Espécimes somente lascados com o uso do martelo	>250,0 MPa

Tabela 1 –	- Estimativa	da	resistência	da	rocha	intacta.
I uoonu I	Louinauva	uu	resistencia	uu	roonu	mucu

Fonde. Moundado de ISKM, 1976	Fonte:	Modificado	de ISRM,	1978
-------------------------------	--------	------------	----------	------

A principal vantagem desse método está relacionada a facilidade de sua aplicação. No entanto, sua aplicação depende da experiência de quem o utiliza.

## 2.5. MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

Os sistemas de classificação têm por objetivo quantificar a qualidade dos maciços rochosos, com base em seu comportamento geotécnico, a partir da caracterização de parâmetros do maciço rochoso. De acordo com algoritmos simples, os maciços rochosos são agrupados em classes. As classes encontradas, a partir da classificação, podem ser utilizadas

para indicar um contexto geotécnico para o maciço rochoso estudado, para a estimativa de parâmetros, a partir de correlações, e para avaliações de projeto de engenharia.

#### 2.5.1. Rock Mass Rating (RMR) – Bieniawski (1973, 1989)

O RMR é um método de classificação de maciços rochosos, também conhecido como Classificação Geomecânica, desenvolvido por Bieniawski (1973, 1989). Passou por atualizações e adequações, conforme sua utilização para diferentes tipos de estruturas geotécnicas e operações em rocha (túneis, taludes de mina, fundações etc.). Esse método é, historicamente, o mais utilizado e difundido, sendo que inicialmente, o intuito da classificação utilizando RMR era estimar uma relação de vão livre de túneis e seu tempo de sustentação sem suporte. Posteriormente também foi utilizado para estimar coesão e ângulo de atrito dos maciços rochosos.

O método leva em consideração 5 parâmetros: a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, ao valor de RQD do maciço rochoso, o espaçamento da descontinuidade crítica, as condições da descontinuidade e a condição da água subterrânea. Além disso, o valor do RMR pode ser ajustado conforme a orientação das descontinuidades em relação a orientação das escavações. A classificação através desse método atribui uma pontuação ao maciço rochoso que varia de 0 a 100, sendo o menor valor atribuído a uma menor qualidade do maciço rochoso, e vice-versa. A partir desses valores os maciços rochosos são divididos em 5 classes diferentes: maciço excelente, bom, regular, ruim e péssimo.

A principal limitação deste método se dá em sua aplicação em maciços rochosos com comportamento mecânico dominado pelo estado de tensões.

#### 2.5.2. Slope Mass Rating (SMR) – Romana (1985)

Outro sistema de classificação considerado é o SMR, proposto por Romana (1985), que leva em conta o valor do RMR básico da rocha com fatores de correção relativos às condições geométricas da rocha e do talude. Este método proporciona uma definição mais detalhada do RMR a partir dos fatores de correção, no entanto é um sistema que se aplica apenas a taludes de rocha.

#### 2.5.3. Índice de Qualidade de Rocha (RQD)

O RQD é um método de caracterização geotécnica de maciços rochosos, introduzido por Deere et al. (1967) para aplicação em testemunhos de sondagens. Esse método busca quantificar a qualidade do maciço rochoso pela análise das porções de rocha, maiores que 10cm. Seu valor é dado em porcentagem, e é calculado segunda a equação 2.8, em caixas de testemunhos.

$$RQD = \frac{\sum porções de rocha intacta com mais de 10 cm}{comprimento total do testemunho} X100$$
(2.8)

Portanto, valores maiores de RQD tendem a indicar rocha de maiores competência e vice-versa. No entanto, destaca-se que é um método simples, que não leve em consideração outros importantes fatores que podem influenciar na resistência geotécnica da rocha, como a orientação e características das descontinuidades, presença de água, característica da rocha intacta, alteração do meio, entre outros fatores. Devido a isso, sua análise isolada não é adequada para se fazer uma classificação geotécnica do maciço rochoso. Outros importantes fatores que influenciam o valor calculado de RQD são a orientação da sondagem e o tamanho do testemunho, como apresentados nos estudos de Choi & Park (2004) e Zangh et al. (2012).

Na ausência de furos de sondagem, é possível estimar o valor de RQD através de correlações com o espaçamento das descontinuidades. Neste estudo considerou-se para o cálculo do RQD as equações desenvolvidas por Palmström (1982) apresentadas a seguir.

$$RQD = 115 - 3.3J_v \tag{2.9}$$

$$RQD = 110 - 2,5J_{\nu} \tag{2.10}$$

Sendo a equação 2.9 utilizada para situações em que os blocos de rocha tendem a apresentar formatos aproximados de paralelepípedo, e a equação 2.10 utilizada para blocos de formatos cúbicos. Tem-se que  $J_v$  é o contador volumétrico de juntas, que mede o número de descontinuidades em um determinado volume, calculado através da equação 2.11.

$$J_{\nu} = \sum \frac{1}{S_i} \tag{2.11}$$

Onde  $S_i$  é o espaçamento das descontinuidades de uma específica família de descontinuidades, nota-se que todas as famílias de descontinuidades presentes no maciço devem ser contabilizadas para o cálculo do  $J_v$ .

A principal vantagem do uso desse método é sua fácil aplicação, quando não há testemunhos de sondagem disponível, além de se obter um valor que pode ser utilizado em outras metodologias de classificação geomecânica.

#### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Apresenta-se, nesse capítulo, os materiais utilizados, assim como os métodos e sistemas de classificação de maciços rochosos adotados para a realização do mapeamento geológico-geomecânico do Morro da Queimada, serra de Ouro Preto.

Será também fornecida as bases adotadas para a identificação dos taludes críticos a rupturas, pelas técnicas de análise cinemática, e para a definição de parâmetros associados as descontinuidades que formam os maciços rochosos e determinam os possíveis modos de ruptura.

#### 3.1. MAPEAMENTO GEOLÓGICO

O mapa geológico da área, considerado uma ferramenta básica para qualquer trabalho de Geotecnia, foi feito pelo caminhamento em campo, com levantamento das estações geológicas, descrição das rochas e medição das principais estruturas geológicas impressas nos maciços rochosos. O mapa geológico produzido foi digitalizado no *software* QGIS, utilizando-se dados disponibilizados pela Serviço Geológico do Brasil – Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (SGB-CPRM), contendo informações sobre a topografia da cidade de Ouro Preto, os limites das áreas urbanizadas, as principais vias rodoviárias e drenagens da área de estudo e, a setorização das áreas de risco. O mapeamento geológico foi realizado nos dias: 03/09/2022, 28/01/2023, 29/01/2023 e 25/02/2023, totalizando 4 dias de trabalho de campo.

Durante as atividades de campo, para a elaboração do mapa geológico, caracterizouse geológica e geotecnicamente diversos maciços rochosos de interesse. Foram anotadas as coordenadas geográficas, no sistema Universal Transversa de Mercator (UTM), de cada estação geológica-geomecânica com GPS Garmin eTrex 32x. Realizou-se uma descrição do entorno do ponto definido, abrangendo o talude natural, o tipo de rocha e as descontinuidades (estruturas geológicas), tomando as atitudes destas, direção e mergulho. Foram considerados pontos de interesse: taludes de rocha, nas já delimitadas áreas de risco; regiões de contato entre litologias; afloramentos em regiões de interesse, próximos às drenagens naturais; regiões com notáveis mudanças no maciço rochoso, em especial o tipo de rocha, intemperismo e atitude das descontinuidades; e pontos de controle, para manter a distribuição de locais analisados e realizar comparações com demais pontos da área. Nos taludes, destinados à análise cinemática, foi realizada a classificação geomecânica. Em alguns outros pontos da região foram realizadas classificações geomecânicas, visando o aferimento dos maciços rochosos formadores dos taludes.

Com os dados de litologias e estruturas geológicas, em especial o acamamento So, foram desenhados os traços das camadas de rochas, definindo-se assim, o mapa geológico da área, em campo, na escala de 1:5000. Este método constou da localização dos pontos geológicos, com base nas coordenadas apontadas pelo GPS, e situando estes em mapa, com o suporte de um escalímetro. Os contatos entre litologias foram estimados, associando estes a feições topográficas, tais como paredões, vales, entre outras. As litologias foram pintadas no mapa de diferentes cores, facilitando a visualização. Em escritório, os dados obtidos no mapeamento geológico foram plotados no *software* QGIS para facilitar o manuseamento e a reprodução do mapa, devido a possibilidade de sobrepor as informações geológicas com imagens de satélite, aumentando, consideravelmente, a compreensão geológica da área. O mapa impresso para a utilização em campo está disponibilizado nos apêndices desse documento.

#### 3.2. CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

Considerando a aplicabilidade e vantagens dos métodos de classificação de maciços rochosos, foram utilizados, neste trabalho, o *Rock Mass Rating* (RMR ou Classificação Geomecânica) e *Slope Mass Rating* (SMR).

A obtenção do valor de RMR, possibilita, além da classificação do maciço conforme sua competência geotécnica, a análise isolada e conjunta de fatores fundamentais para o entendimento das condições geotécnicas, como por exemplo as condições de água subterrânea e espaçamento das descontinuidades no maciço rochoso. O SMR por ser um método que utiliza o valor do RMR básico, porém com fatores de correção para a aplicação em taludes, se faz útil para este estudo.

### 3.2.1. Rock Mass Rating (RMR) – Bieniawski (1973, 1989)

Para definição do valor de RMR atribuído aos taludes investigados, a Tabela 2 foi utilizada como base, ela mostra de forma resumida como o RMR do maciço rochoso é calculado a partir dos parâmetros e características da rocha.

	Parâmetros de classificação						
	Resistência da	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	>250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	$ \begin{array}{c}   5 - 1 - \\   25 5 \end{array} <  $
1	rocha intácta	Valores	15	12	7	4	2 1 0
0		Valores	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	<25
2	RQD (%)	valores	20	17	13	8	3
2	Descontinuida	Valores	>2	0,6 - 2	0,2 - 0,6	0,06 - 0,2	<0,06
3	des (m)	valores	20	15	10	8	5
	es	Comprimento descontinuidad e (m)	<1	1 - 3	3 - 10	10 - 20	>20
	nuidad	Valores	6	4	2	1	0
	sconti	Abertura (mm)	Nenhuma	<0,1	0,1 - 1	1 - 5	>5
	s de	Valores	6	5	4	1	0
	rão da:	Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Ligeirament e rugosa	Ondulada	Suave
	Pad	Valores	6	5	3	1	0
		Preenchimento (mm)	Nenhuma	Duro <5	Duro> 5	Mole <5	Mole> 5
		Valores	6	4	2	2	0
4		Meteorização	Inalterada	Ligeirament e alterada	Moderada mente alterada	Muito alterada	Decompost a
		Valores	6	5	3	1	0
	Durante	Condições gerais do maciço	Seco	Ligeirament e húmido	Húmido	Escorriment os	Fluxo abundante
5	Fresença de água	Valores	15	10	7	4	0

Tabela 2 - Tabela para definição dos parâmetros e cálculo do RMR.

Fonte: Traduzido de Bieniawski, 1989.

O valor do RMR, para os maciços rochosos estudados, foi calculado em campo. Como já definido neste documento, o valor final de RMR é realizado através da soma de 5 parâmetros: resistência da rocha intacta, valor do RQD, espaçamento da descontinuidade considerada crítica, padrão da descontinuidade e ação da água subterrânea no maciço. Ressalta-se que, como a região e os taludes estudados não contam com investigações diretas, como furos de sondagens e coleta de amostras para ensaios em laboratório, o valor de alguns parâmetros foram estimados, tendo como suporte tabelas auxiliares (Tabela 3 e Tabela 4).
Para a definição do parâmetro 1 (resistência da rocha intacta), fez-se necessário estimar uma faixa de valores de resistência a compressão uniaxial. Tal estimativa foi realizada com o auxílio do teste do martelo de geólogo, como a batida do martelo na rocha, tentativa de desintegração do material com a mão e tentativa de provocar riscos e sulcos na superfície da rocha com o auxílio de canivete. Então compara-se o comportamento da rocha submetida a esses testes com a Tabela 3, para uma estimativa da resistência à compressão uniaxial da rocha. Com essa estimativa, volta-se a tabela principal do RMR para definir o peso que será atribuído a esse parâmetro.

Consistencia (particularidade do material rochoso)					
Grau	Descrição				
	- Penetrável pelo polegar. Marcado com a unha.				
<b>Extremamente</b> - Esfarela facilmente sob pressão dos dedos e dissolve-se completam					
Macia	agitado em água.				
	- R0 (Tc 0,25 a 1 MPa).				
	- Lâmina provoca sulcos profundos, desagregáveis manualmente.				
Macia	- Esfarela ao golpe do martelo.				
	- R1 (Tc 1 a 5 MPa).				
	- Facilmente penetrável por lâmina; quebra-se facilmente a um golpe do martelo.				
Média Macia	- Somente as bordas do fragmento podem ser quebradas pela pressão dos dedos.				
	- R2 (Tc 5 a 25 MPa).				
	- Quebra-se com relativa facilidade ao golpe do martelo, as bordas dos fragmentos				
Mádia	não podem ser quebradas pela pressão dos dedos.				
Ivieula	- A lâmina de aço provoca sulcos rasos na superfície.				
	- R3 (Tc 25 a 50 MPa).				
	- A lâmina de aço dificilmente prova sulcos na superfície.				
Média Dura	- Quebra-se a um golpe do martelo.				
	- R4 (Tc 50 a 100 MPa).				
	- Quebra-se com vários golpes do martelo.				
Dura	- Não riscável pela lâmina de aço.				
	- R5 (Tc 100 a 250 MPa).				
	- São impenetráveis por lâminas de aço; os fragmentos possuem bordas ásperas e				
Extremamente	cortantes.				
Dura	- Quebra-se com dificuldade a vários golpes do martelo.				
	- R6 (Tc > 250 MPa)				

Tabela 3 - Tabela auxiliar para definição do parâmetro 1 (RMR).

Fonte: ISRM (1978)

O parâmetro 2 é diretamente ligado ao valor de RQD do maciço rochoso. Como não há testemunhos de sondagem para realizar o cálculo de RQD, seu valor foi estimado conforme a equação 2.11 (Palmström, 1982), visto que os blocos de rocha na região apresentam formatos aproximados de paralelepípedos, e não formatos cúbicos. Para o cálculo, por essa equação, foi necessário a determinação do Jv, que foi realizada conforme a equação 2.12

durante os campos. Com a estimativa de valor de RQD, volta-se a tabela de RMR para determinar o peso atribuído a esse parâmetro. Nos casos em que se foi realizada a classificação geomecânica em saprólitos aflorantes o peso atribuído ao parâmetro 2 foi igual a 0, já que o RQD não se aplica para saprólitos (W5) e solo residuais (W6) devido a seu elevado grau de alteração. Visando facilitar a identificação desses materiais, a Tabela 4 foi utilizada em campo.

Grau de Alteração do Maciço Rochoso (Particularidade do material Rochoso)				
Grau de				
Alteração da	Descrição			
Rocha	3			
	- Nenhum sinal visível de material rochoso alterado.			
	- Rocha sã, alteração mineralógica nula a incipiente.			
Emograp	- Minerais preservam as características originais de brilho, cor e clivagem (W1).			
r resca	- Descoloração sutil das principais descontinuidades.			
	- Nas FFB tanto as bandas silicosas quanto as ferruginosas estão coesas e sem presença			
	de alteração.			
	- Descoloração leve indicando alteração da rocha e das descontinuidades.			
	- Todo material pode estar descolorido.			
Levemente	- Alteração mineralógica perceptível.			
Alterado	- Menos de 5% do maciço rochoso está alterado.			
Alterada	- Cores esmaecidas. Perda do brilho dos minerais (W2).			
	- Nas FFB tanto as bandas silicosas quanto as ferruginosas estão coesas, presença de			
	oxidação nas bandas ferruginosas e nas descontinuidades.			
	- Menos da metade do material rochoso está decomposto, a rocha fresca ou descolorida			
	está presente como uma estrutura descontínua ou em pedaços.			
	- Toda matriz apresenta-se com evidências de oxidação, caulinização.			
Moderadamente	- Pode ocorrer material mais alterado e ou solo ao longo e/ou solo ao longa das			
Alterada	descontinuidades (W3).			
	- Nas FFB tanto as bandas silicosas quanto as ferruginosas apresentam-se menos coesas			
	(principalmente as bandas silicosas), presença acentuada de oxidação nas bandas			
	ferruginosas, nas descontinuidades e filmes de hidróxidos de ferro nas bandas silicosas.			
	- Mais da metade do material rochoso está decomposto, a rocha fresca ou descolorida			
	está presente como um estrutura descontínua ou em pedaços.			
Altamente	- Alteração mineralógica muito acentuada; Cores bastante modificadas.			
Alterada	- Possivel presença de núcleos rochosos menos alterados (W4).			
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	- Nas FFB tanto as bandas silicosas quanto as terruginosas apresentam-se com baixa			
	coesao e as bandas ferruginosas apresentam-se menos coesas com presença acentuada de			
	oxidação, nas bandas sincosas aparecem nimes de indroxidos de ferro.			
	- Todo material está decomposto, porém com a estrutura original preservada.			
Completamente	- Saprolito ( $W$ <b>5</b> ).			
Alterada	- Nas FFB tanto as bandas sincosas quanto as bandas ferruginosas apresentam-se com			
	baixa coesao (silica liberada) e as bandas ferruginosas apresentam alto indice de			
	Oxidação (Innonitizados).			
	- 1 odo material esta decomposio e a estrutura original esta destruída.			
Solo Residual	- Solo lominado por aneração <i>in suu</i> . ( <b>VVO)</b> . Nas EER as bandas da sílica antão liberadas com filma da hidróvido do forro, os bandas			
	- Ivas FFD as banuas de sinca então noeradas com mine de indioxido de lerro, as bandas			
	renugmosas estao completamente muratadas.			

Tabela 4 - Descrição dos graus de alteração das rochas.

Fonte: ISRM (1978)

Para a determinação do peso atribuído ao parâmetro 3 (espaçamento das descontinuidades), identificou-se a família crítica de descontinuidades e então foi calculado em campo seu espaçamento. Com o valor de espaçamento foi possível atribuir o peso desse parâmetro para o cálculo de RMR pela Tabela 2.

O parâmetro 4 (padrão das descontinuidades) foi calculado pela análise de 5 características das descontinuidades: persistência, abertura, rugosidade, qualidade e espessura do preenchimento e grau de intemperismo da descontinuidade. Esses padrões, identificados em campo, possuem suas próprias condições e pesos para o cálculo do valor final atribuído ao parâmetro 4.

Para o cálculo do parâmetro 5, relacionado à ação da água subterrânea, não foi possível medir a vazão ou pressão da água nas juntas, portanto sendo estimado conforme as condições gerais observadas em campo. Cada condição possui um peso atrelado, conforme apresentado na Tabela 2, que é utilizado para o cálculo do parâmetro 5.

Além da definição do valor de RMR, a obtenção destes parâmetros se faz importante no intuito de estudar e entender o comportamento do maciço rochoso e sua atitude em um cenário de instabilidade.

Com os valores de RMR, obtidos através da soma de todos os parâmetros, foi possível identificar a classe em que o maciço rochoso está incluído, bem como uma descrição geomecânica.

#### 3.2.2. Slope Mass Rating (SMR) – Romana (1985)

O SMR é um método de classificação geomecânica, proposto por Romana em 1985, para a utilização específica em taludes, em especial em taludes de corte de rodovias para prever problemas de estabilidade e propor remediações. Esse sistema de classificação consiste na aplicação de fatores de correção, relacionados às direções das descontinuidades em relação à direção de mergulho do talude, a partir do valor de RMR básico do maciço, conforme equação 3.1.

$$SMR = RMR + (F_1, F_2, F_3) + F_4$$
 (3.1)

(2,1)

Para a determinação dos fatores é necessário considerar a direção de mergulho e o mergulho da família de descontinuidade crítica e do talude considerado. Para o SMR a descontinuidade crítica é aquela condicionante de ruptura planar ou ruptura por tombamento.

O valor do fator 1 (F1) é atribuído a partir da relação entre as direções de mergulho, segundo as condições

$$\left|\alpha_{i}-\alpha_{s}\right| \tag{3.2}$$

Para taludes sujeitos a rupturas planares e:

$$\left|\alpha_{i}-\alpha_{s}-180\right| \tag{3.3}$$

Para taludes sujeitos a rupturas por tombamento. Sendo  $\alpha$ j a direção de mergulho da descontinuidade e  $\alpha$ s a direção de mergulho da face do talude.

O valor do fator 2 (F2) é relacionado ao ângulo de mergulho, sendo que, para rupturas planares, quando menor o angulo, menor o valor de F2, variando de 0,15 a 1,0. Para rupturas por tombamento o valor de F2 é constante e igual a 1,0.

O fator 3 (F3) se dá a partir da relação entre os ângulos de mergulho da descontinuidade crítica e da face do talude. Para ruptura planar se considera a condição 3.4 e para ruptura por tombamento se considera a condição 3.5.

$$\beta_i - \beta_s \tag{3.4}$$

$$\boldsymbol{\beta}_{j} + \boldsymbol{\beta}_{s} \tag{3.5}$$

Sendo  $\beta$ j e  $\beta$ s o ângulo de mergulho da descontinuidade condicionante da ruptura e o ângulo da face do talude, respectivamente. O valor encontrado a partir dessas equações é comparado com a Tabela 5 para definir o valor do fator 3.

$F_3$ (Ruptura Planar)	>10°	10°-0°	0°	0-(-10°)	<(-10°)
$F_3$ (Tombamento)	<110°	110°-120°	>120°	-	-
	_				
Valor de F <sub>3</sub>	0	-6	-25	-50	-60

Tabela 5 - Definição de F3 (Slope Mass Rating).

Fonte: Romana, 1985

Por fim, o Fator 4 é um ajuste que leva em conta o método de escavação do talude. Seu valor depende se o corte do talude foi feito de forma mecânica, através de explosões ou se se trata de um talude natural.

Essa metodologia também divide o talude rochoso em classes, e tem como principal vantagem a aplicação específica para taludes, utilizando o valor de SMR definido para indicar propostas de remediação, além de apresentar uma estimativa da probabilidade de ocorrência

de ruptura planar, cunha, tombamento e deslizamento de massa. A Tabela 6 e a Tabela 7 apresentam, de forma resumida, como o cálculo de SMR é feito, as probabilidades de ruptura e as propostas de remediação.

Тірс	o de situação	Muito favorável	Favorável	Normal	Desfavorável	Muito desfavorável
Р	$ \alpha_j - \alpha_s $	>30	20 - 20	10 - 20	5 - 10	~5
Т	α <sub>j</sub> -α <sub>s</sub> -180	/30	20-30	10-20	5-10	< >
P/T	F1	0,15	0,4	0,7	0,85	1
P/T	β <sub>j</sub>	<20	20 - 30	30 - 35	35 - 45	>45
Р	50	0,15	0,4	0,7	0,85	1
Т	T F2	1	1	1	1	1
Р	$\beta_j$ - $\beta_s$	>10	0 - 10	0	010	<-10
Т	$\beta_j + \beta_s$	<110	110 - 120	>120	-	-
P/T	F3	0	-6	-25	-50	-60

Tabela 6 - Determinação do SMR.

Fonte: Romana, 1985 (adaptado por Freitas, 2011).

Em que:

- P: Ruptura planar;
- T: Ruptura por tombamento;
- $\alpha_s$ : Direção de mergulho do talude;
- α<sub>j</sub>: Direção de mergulho da junta;
- $\beta_s$ : Mergulho do talude, e
- $\beta_j$ : Mergulho da junta.

Tabela 7 - Resumo das probabilidades de ocorrência de rupturas e propostas de métodos de suporte a partir do SMR.

SMR	0 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100
Descrição	Muito Ruim	Ruim	Regular	Boa	Muito boa
Estabilidade	Completamente instável	Instável	Parcialmente instável	Estável	Completamente estável
Roturas	Deslizamento de massa por planos contínuos	Rupturas planares ou rupturas por cunhas de grandes dimensões	Algumas rupturas planares ou muitas rupturas por cunhas	Queda de alguns blocos	Baixa probabilidade à ocorrência de rupturas
Sustimento	Re-escavação	Drenagem	Reforço com	Reforço e	Nenhum

Fonte: Romana, 1985 (adaptado por Freitas, 2011).

O cálculo do SMR foi realizado em campo a partir da Tabela 6. Para chegar ao valor de SMR é necessário a obtenção de outros fatores, dentre eles o RMR básico. Como a aplicabilidade desse método de classificação é restrita a taludes, ele não foi aplicado em afloramentos que não representavam encostas. A aplicação deste método foi dividida em duas etapas, a obtenção do valor através da definição dos fatores, e análise das propostas de remediação, bem como a probabilidade de ocorrência dos modos de ruptura (planar ou tombamento), como mostrado na Tabela 7.

O cálculo dos fatores F1 a F3 depende do modo de ruptura do qual o talude está sujeito (planar ou tombamento), considerando as descontinuidades críticas do talude. Considerando as descrições das áreas de risco realizadas pela SBG-CPRM, e como observado em campo, os taludes da região estão especialmente sujeitos a rupturas planares devido ao mergulho e direção de mergulho de suas principais descontinuidades, portanto para o cálculo dos fatores (F1 a F3) o cenário de ruptura por tombamento foi desconsiderado.

Com os valores de mergulho e direção de mergulho das descontinuidades críticas dos taludes, medidos com a bussola, foi possível calcular os fatores de F1 a F4, conforme as condições apresentadas na Tabela 6. Então, através da equação 3.1, chegou-se ao valor de SMR.

O valor de SMR foi aplicado na Tabela 7, que estima a possibilidade de ocorrência de determinadas rupturas no talude, e propõe métodos de engenharia, para a remediação. Anotou-se e discorreu-se sobre as probabilidades de ruptura encontradas e analisou-se a efetividade e viabilidade das propostas de remediação indicadas para o talude em análise.

### 3.3. ANÁLISE CINEMÁTICA

Para a avaliação geotécnica das áreas de risco, foi realizada a análise cinemática em alguns taludes, com o objetivo de analisá-las perante as características observadas em campo e às descrições feitas pela SBG-CPRM e Defesa Civil.

Para isso, inicialmente definiu-se os taludes dos quais seriam realizados estudos acerca do seu provável modo de ruptura. O principal critério para essa definição foi a identificação de taludes nas regiões de risco.

Feito essa definição, a etapa seguinte foi medir a orientação da face do talude, seguida pela identificação das principais descontinuidades dos taludes e a coleta de seus dados de orientação (mergulho e direção de mergulho). Esses valores foram obtidos em campo com a

utilização de bússola geológica. Importante salientar que o volume de dados de orientação obtidos para cada família de descontinuidade está diretamente relacionado com sua abundância na face do talude. Esses dados, além de fundamentais para a realização da projeção estereográfica, são importantes para o entendimento do fenômeno de ruptura e formação de blocos de rocha no talude.

Os taludes com alto grau de alteração, portanto material decomposto e desagregado, não passaram por essa etapa de medição das orientações das descontinuidades, visto que uma possível ruptura nesses taludes não seria regida pelas descontinuidades (juntas), isto é, para esses casos, em teoria, o maciço rochoso se comporta como um meio contínuo equivalente, caracterizando uma ruptura circular. O principal balizador para essa identificação foram os resultados obtidos das classificações geomecânicas, visto que os maciços rochosos classificados como classes IV e V, segundo o RMR, apresentam essas características.

Com os dados coletados de orientação das descontinuidades, procedeu-se a análise cinemática. Para isso o software utilizado foi o OpenStereo (Figura 15), desenvolvido pela Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. Trata-se de um software aberto para análises de geologia estrutural, nele foi desenhado as projeções estereográficas dos taludes analisados.



Figura 15 – Exemplo da interface do software OpenStereo

Fonte: IGC-USP, 2023

#### OBTENÇÃO DE PARÂMETROS IN SITU (ÂNGULO DE ATRITO) 3.4.

O angulo de atrito é um importante parâmetro para a análise cinemática. Quando não se possui investigações diretas para determinação do ângulo de atrito, seu valor é determinado através de estimativas para a realização de análises e modelos. Nesse contexto, a seguinte equação é proposta para a estimativa do ângulo de atrito (Barton, 2002).

$$\varphi = \tan^{-1}(\mathbf{J}_r / \mathbf{J}_a) \tag{2.8}$$

Sendo "Jr" e "Ja" os valores atribuídos às descontinuidades referentes a suas condições de alteração e rugosidade, respectivamente. Esses valores podem ser obtidos a partir da Tabela 8 e Tabela 9, proposta por Barton (2002).

	Número de Rugosidade da Junta	Jr
Tipo	Descrição	Valor
А	Juntas descontínuas.	4
В	Rugosa ou irregular, com ondulação.	3
C	Lisa, com ondulação.	2
D	"Slickensided", com ondulação.	1.5
Е	Rugosa, irregular, planar.	1.5
F	Lisa, planar.	1
G	"Slickensided", planar.	0.5
Н	Presença de minerais argilosos espressos o suficiente para evitar o contato entre as paredes sob cisalhamento.	1

Tabela o - Dellinção de Jr	Tabela	8 -	Definição	de	JR
----------------------------	--------	-----	-----------	----	----

Fonte: Barton, 2002.

	Número de Alteração da Junta	Ja	
Tipo	Descrição	Φ aprox.	Valor
А	Preenchimento bem curado, duro, não amolecido e		0.75
	impermeável, ou seja, quartzo ou epídoto.		
В	Paredes de juntas inalteradas, apenas coloração	25 - 35°	1
	superficial.		
С	Paredes ligeiramente alteradas. Revestimentos minerais	$25 - 30^{\circ}$	2
	que não amolecem, partículas arenosas, rochas		
	desintegradas sem argila.		
D	Revestimentos argilosos siltosos ou arenosos, pequena	$20 - 25^{\circ}$	3
	fração argilosa ("non-softening").		

	Número de Alteração da Junta	Ja	
Е	Revestimentos argilosos ou de baixa fricção, ou seja,	8 – 16°	4
	caulinita ou mica. Também clorita, talco, gesso, grafite,		
	etc., pequenas quantidades de argilas expansíveis.		
F	Partículas arenosas, rocha desintegrada, sem argila, etc.	25 – 30°	4
G	Preenchimentos com argilominerais fortemente	16 – 24°	6
	consolidados e "non-softening" (contínuos, com		
	espessura <5 mm).		
Н	Preenchimentos de argilominerais de média ou baixa	12 – 16°	8
	consolidação e comportamento "non-softening"		
	(contínuos, e com espessura $<5$ mm).		
J	Preenchimento com argilas como montmorillionita	6 – 12°	8 - 12
	(contínua, mas com espessura <5 mm). O valor de Ja		
	depende da porcentagem de partículas de argila.		
Κ	Zonas ou camadas de rocha desintegrada ou fraturada.	16° - 24°	6
	Fortemente consolidado.		
L	Zonas ou camadas de argila, rocha desintegrada ou	$12 - 16^{\circ}$	8
	fraturada. Preenchimento médio ou mal consolidado ou		
	preenchimento com comportamento "non-softening"		
М	Zonas ou camadas de argila, rocha desintegrada ou	6 – 12°	8 - 12
	fraturada. Argila saturada. Ja depende da porcentagem		
	de argila.		
Ν	Zonas espessas e contínuas ou camadas de argila.	$12 - 16^{\circ}$	10
	Fortemente consolidado.		
0	Zonas espessas e contínuas ou camadas de argila. Média	$12 - 16^{\circ}$	13
	a baixa consolidação.		
Р	Zonas espessas e contínuas ou camadas de argila. Argila	6 – 12°	13-20
	saturada. Ja depende da porcentagem de argila.		

Fonte: Tradução de Barton, 2002.

## 3.5. DETALHAMENTO GEOTÉCNICO DAS ÁREAS DE RISCO

Com a caracterização geológico-geotécnica das áreas, mapeamento dos contatos geológicos, medição da atitude geológica dos estratos rochosos e descrição das áreas, apresentada no mapa geológico da região, juntamente aos valores de classificação geomecânica realizados nos maciços rochosos dos entornos e nas áreas de risco, somados à interpretação da projeção estereográfica e análise cinemática dos taludes das áreas de risco, se fez possível apresentar um maior detalhamento das áreas de risco do Morro da Queimada, município de Ouro Preto.

Uma forma de propor esse detalhamento da área envolveu a segregação da mesma, conforme maior ou menor susceptibilidade a ruptura de taludes. Isto foi determinado levando em conta a direção dos taludes, o contato entre litologias e a diferença no comportamento geotécnico das rochas. Um dos principais balizadores para a determinação das mudanças de direção dos taludes, além dos valores já calculados em campo, são as curvas de nível topográfico. A análise delas, aliada a litologia e as orientações de suas descontinuidades, proporcionaram um maior detalhamento da área de risco. Tal proposta é apresentada em mapa, com os limites externos das áreas àqueles definidos pela SBG-CPRM e Defesa Civil.

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. MAPEAMENTO GEOLÓGICO

O mapeamento geológico da região, realizado a partir de observações e medições de campo, no intuito de fornecer a caracterização geológica para ser a base do projeto de detalhamento das áreas de risco.

Como base cartográfica foi utilizado as curvas de nível topográfico de 20 m, as delimitações de áreas de risco, sendo ela a área de risco "Morro da Queimada / Alto da Cruz / Antônio Dias" (SBG-CPRM, 2011) e as áreas de riscos delimitadas pelo mapa de risco da cidade de Ouro Preto (SBG-CPRM, 2016), as principais vias da região, as drenagens naturais e os limites das áreas urbanas edificadas. A base de dados utilizada é disponibilizada de forma online pela SBG - CPRM.

A Tabela 10 compila as informações das estações geológicas obtidas em campo.

Estação	Coordenad	Litologia		
Geológica	<b>X</b> ( <i>m</i> ) <b>Y</b> (m) <b>Z</b> (m)			
JF01	657.312	7.745.612	1.330	Contato
JF02	657.342	7.745.637	1.317	Quartzito Moeda
JF03	657.629	7.745.558	1.315	Itabirito Cauê
JF04	657.600	7.745.589	1.350	Quartzito Moeda
JF05	657.648	7.745.656	1.326	Quartzito Moeda
JF06	657.533	7.745.602	1.303	Quartzito Moeda
JF07	657.181	7.745.617	1.366	Canga Estruturada
JF08	657.221	7.745.552	1.362	Canga

Tabela 10 - Dados das estações geológicas obtidas em campo.

				Estruturada
JF09	657.260	7.745.542	1.361	Filito
JF10	657.699	7.745.566	1.328	Canga Rolada
JF11	657.611	7.745.589	1.334	Itabirito Cauê
JF12	657.580	7.746.226	1.406	Quartzo- Mica-Xisto
JF13	657.038	7.746.105	1.446	Quartzo- Mica-Xisto
JF14	657.154	7.746.097	1.447	Contato
JF15	657.215	7.746.071	1.443	Quartzito Moeda
JF16	657.277	7.745.970	1.408	Canga Rolada
JF17	657.269	7.745.888	1.385	Quartzito Moeda
JF18	657.431	7.745.802	1.361	Canga Rolada
JF19	657.508	7.745.758	1.332	Canga Rolada
JF20	657.516	7.745.710	1.328	Quartzito Moeda
JF21	657.550	7.745.669	1.328	Quartzito Moeda
JF22	657.724	7.745.385	1.279	Itabirito Cauê
JF23	656.803	7.745.230	1.178	Itabirito Cauê
JF24	656.703	7.745.323	1.177	Quartzito Moeda

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A seguir, será apresentado uma breve descrição das estações geológicas apresentadas acima e dos dados obtidos em campo:

**JF01:** Estação localizada em afloramento de Itabirito Cauê canguificado, localizado próximo à trilha do primeiro acesso. A direção de mergulho e o mergulho dessa rocha (Sn) foi medido como 185°/17°. Este local está próximo ao contato entre o Itabirito Cauê e Quartzito Moeda. Foi observado próximo ao local pequenos fragmentos de filito dispersos.

**JF02**: Estação localizada em talude do Quartzito Moeda, também localizado próximo à primeira trilha de acesso. A face do talude tem ângulo de mergulho praticamente vertical (90°) e, ao longo de sua extensão a direção de mergulho varia de 150° a 220°. O mergulho e a direção de mergulho das camadas de quartzito (Sn) foram medidos em 170°/20°, as famílias de descontinuidade Frx e Fry tem atitudes de 145°/90° e 80°/80°. Também foi observado gotejamento na parede da face do talude (Figura 16). Devido à representatividade desse talude na área de risco Morro da Queimada, Alto da Cruz, Antônio Dias, foram realizadas classificações dos maciços rochosos pelos métodos de RMR e SMR.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

**JF03**: Estação localizada no início da primeira trilha (caminho representado na Figura 17), próxima à escola Professora Juventina Drummond, onde se encontra um talude natural de Itabirito Cauê médio a brando, porém bastante fraturado, onde observa-se blocos de itabirito solto no pé do talude. O local é próximo a residência do bairro e é notável a interferência da água na superfície da região. Percebeu-se que o talude deveria ser seccionado devido a suas

diferentes condições geométricas (270°/90° e 215°/90°) Faz-se importante destacar que neste local observou-se interferência na bussola, portando os valores de direção tendem a ser menos precisos. Verificou-se que o Itabirito possui direção de mergulho e mergulho de 220°/25°, também foi calculado as condições geométricas das famílias de descontinuidades Frx e Fry, 350°/85° e 295°/90°. Nesse talude foi realizado as classificações geomecânica pelos métodos RMR e SMR e a análise cinemática. Uma descrição mais completa da área será apresentada adiante, no tópico de análise cinemática.

Figura 17 – Início do primeiro acesso a área, próxima a estação JF03.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

**JF04:** Estação localizada no quartzito em um córrego/drenagem na região, onde observou-se mata densa, arvores de médio porte com blocos rolados de quartzito e camada de solo mais espessa. O mergulho e direção de mergulho do quartzito encontrado foi 195°/23°.

**JF05:** Estação localizada em um talude natural de saprólito de quartzito (W5R0), subindo o córrego, identificado na estação JF04, em direção a nascente e em direção às residências acima. As estruturas estavam preservadas e foi possível mapear as seguintes famílias de descontinuidade: Sn (220°/15°), Frx (220°/S.V.) e Fry (330°/90°), sendo está condizendo com a face do talude em que foi realizado as medidas. As residências, que foram

demarcadas como locais de alto risco (SBG-CPRM) estavam localizadas próximas ao talude de solo (Figura 18), onde foi realizado a classificação geomecânica pelos métodos de RMR e SMR.



Figura 18 – Residência próximas aos taludes de saprólito da estação JF05.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

**JF06:** Estação realizada em um afloramento de quartzito próximo à trilha do primeiro acesso. Devido à facilidade para realização das análises in situ, a estação serviu como um ponto de controle, onde se obteve a direção de mergulho do quartzito (225°/15°) e das principais famílias de descontinuidades responsáveis pela liberação dos blocos Frx e Fry (140° e 220°), também foi calculado os valores de RMR e SMR do afloramento.

**JF07:** Estação realizada próxima a quadra localizada no Parque Arqueológico do Morro da Queimada, relativamente próxima à área urbana edificada do bairro Morro da Queimada, uma região de canga estruturada em itabirito com atitude da estrutura de 180°/13°, onde foi realizado classificação geomecânica da rocha pelo método do RMR.

JF08: Região de canga estruturada sobre o itabirito (193°/25°)

**JF09:** Estação realizada sobre uma grande concentração de pequenos blocos de filito no solo na região onde se estimava o contato quartzito/itabirito. Importante ressaltar que os

pequenos blocos de itabirito foram observados de forma dispersa em basicamente todo o acesso, mas nesse ponto observou-se uma maior aglomeração deles.

**JF10:** Ponto de controle, realizado na Escola Municipal Professora Juventina Drummond, sobre canga rolada.

**JF11:** Extensão do talude descrito no ponto JF03 (270°/90°). As condições geométricas da camada de itabirito foram calculadas e se obteve os valores de 220°/30°, também foi medido a direção de mergulho e mergulho das descontinuidades responsáveis pela liberação dos blocos, Frx e Fry (350°/75° e 285°/90°, respectivamente), esses dados, juntos aos dados do ponto JF03, foram utilizados na análise cinemática. Uma das características que diferencia o ponto JF11 deste ponto é a presença de um solo mais espesso com presença de material orgânico e maior quantidade de lixo residencial (Figura 19). Faz-se importante destacar que nesta região observou-se grande interferência na bussola, portanto os dados de direção podem ser menos precisos. Este talude também passou por classificações geomecânica com a utilização dos métodos RMR e SMR. Uma descrição mais completa da área é apresentada no tópico.



Figura 19 - Afloramento de Itabirito na estação geológica JF11.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

**JF12:** Estação geológica localizada em afloramento de quartzo-mica-xisto, com direção de mergulho e mergulho da camada de 157°/18°, localizada no segundo acesso citado a beira da rua Rio Piracicaba, ligando os bairros Morro São João e Morro São Sebastião,

próximo ao Parque das Andorinhas e ao Moinho de Vento localizado no Parque Arqueológico Morro da Queimada.

**JF13:** Estação geológica localizado em um afloramento de saprólito de quartzo-micaxisto (180°/12°), na entrada do Parque Arqueológico do Morro da Queimada

**JF14:** Foi observado nesta estação geológica, localizada dentro do Parque Arqueológico, a presença do contato do xisto e do itabirito, no entanto também foi observado fragmentos de filito e feios de quartzo, devido a isso, considerou-se esse local como um local de risco geológico. Entendeu-se a presença de uma possível falha, mas devido ao foco do estudo, não se aprofundou nas características dessa estrutura. A atitude da camada de xisto e itabirito foi determinada nos valores de 150°/12° e 205°/15°, respectivamente.

**JF15:** Estação geológica localizada em afloramento de quartzito com atitude da camada de  $170^{\circ}/22^{\circ}$ 

JF16: Estação geológica localizada em uma região de blocos de canga rolada.

**JF17:** Ponto realizado em uma drenagem intermitente da área (seca no dia 25/02/2023), ao plotar o ponto no mapa geológico, foi possível notar que o ponto estava localizado na drenagem já mapeada pela SBG-CPRM. O ponto estava localizado na faixa de quartzito, que apresentou atitude de camada de 180°/20°, porém próximo a encostas onde foi observado o afloramento de itabirito. Essas encostas foram identificadas no mapa geológico, e uteis para mapear o contato entre os materiais (quartzito e itabirito). Além disso, na região observou-se a presença de muitos blocos "quebrados" de quartzito.

JF18: Estação geológica localizada em região de blocos de canga rolada.

JF19: Estação geológica localizada em região de blocos de canga rolada.

**JF20:** Estação geológica próxima a um talude localizado no quartzito (260°/90°). Neste local, observou-se dois afloramentos de quartzito, próximos ao outro, com comportamentos geométricos diferentes de suas camadas, 150°/24° e 250°/40°. Neste local foi realizado a classificação geomecânica pelos métodos RMR e SMR, no intuito de entender a influência das condições geométricas da camada na competência geotécnica da rocha.

**JF21:** Estação geológica realizada em um afloramento de quartzito, em que se percebeu mudança na atitude de sua camada (125°/25°). Tendo isso em vista, criou-se a hipótese de que a região que engloba as estações geológicas JF20, JF21, JF06, JF05 e JF04, em especial a área próxima às estações JF20 e JF21, é uma região de dobramentos no quartzito.

**JF22:** Estação geológica realizada na área urbana do Bairro Morro do Santana, sobre um afloramento de Itabirito com atitude da camada de 177°/24°.

**JF23:** Estação geológica sobre um afloramento de itabirito magnético no principal acesso que liga a Praça Tiradentes ao município de Mariana. Percebeu-se muita interferência na bussola.

**JF24**: Estação geológica localizada em um estacionamento próximo ao hotel Solar das Lages. Afloramento de Quartzito com atitude da camada de 195°/20°, local de escoamento de água, indicando uma drenagem não mapeada.

Compilando essas informações de geologia, junto aos dados disponibilizados pela SGB-CPRM, apresenta-se o seguinte mapa geológico do Morro da Queimada (Figura 20).

Importante ressaltar que a partir das observações do comportamento da direção de mergulho das camadas, inferiu-se a localização de um sinforme na região, ilustrado no mapa abaixo.



Figura 20 – Mapa Geológico do Morro da Queimada

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

#### 4.2. CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

Será apresentado neste tópico os resultados obtidos a partir das classificações geomecânicas realizadas pelos métodos de *Rock Mass Rating* (RMR) e *Slope Mass Rating* (SMR) nos taludes e afloramentos rochosos na região de estudo. Como citado e descrito no tópico acima, as classificações foram realizadas nos seguintes locais: JF02, JF03, JF05, JF06, JF07, JF11 e JF20.

A seguir será apresentado os aspectos considerados de cada ponto para o cálculo do RMR e SMR, juntamente com a pontuação que cada fator atribui à nota final, em parênteses.

### 4.2.1. JF02

#### Rock Mass Rating (RMR):

**Parâmetro 1 (Resistência da Rocha Intacta):** A partir da análise de consistência do material, identificou-se que se trata de uma rocha muito resistente (R5), com resistência à compressão uniaxial na faixa de 100 a 250 MPa (12).

**Parâmetro 2 (RQD):** O RQD da rocha foi calculado a partir do cálculo do Jv, que tem seu valor diretamente ligado ao espaçamento das descontinuidades no maciço. Foi mapeado três diferentes famílias de descontinuidade, sendo elas: Sn (foliação), Frx e Fry. O espaçamento dessas descontinuidades foi estimado conforme as dimensões dos blocos caídos no pé do talude e próximo à área. Então, obteve-se o valor de RQD aproximado de 80% (18).

**Parâmetro 3 (Espaçamento das Descontinuidades):** Apesar do alto valor obtido no RQD, identificou-se que a principal descontinuidade tinha um espaçamento baixo, menor que 60 mm (5).

**Parâmetro 4 (Padrão das Descontinuidades):** A descontinuidade Sn se mostrou persistente (0), sem abertura (6), com uma superfície lisa (1), sem preenchimento (6) e inalterada (6).

Parâmetro 5 (Ação da água subterrânea): o talude se mostrou molhado (7).

O valor de RMR encontrado foi de 61 para o quartzito desse talude, sendo então considerado pelo método um maciço de classe II e descrito como um maciço bom.

Slope Mass Rating (SMR):

Foi observado que este talude possuía variadas direções de mergulho da face e ângulos de mergulho, no entanto, para o cálculo do SMR considerou a direção do talude na região que

apresentava ação da água subterrânea, 160°/90°. Os valores atribuídos para cada fator são apresentados a seguir.

**Fator 1:** A diferença absoluta entre as direções de mergulho da face do talude e da descontinuidade foi de  $10^{\circ}$  (0,7).

Fator 2: O ângulo de mergulho da descontinuidade variou de 20° a 25° (0,40).

**Fator 3**: A diferença entre o mergulho da descontinuidade e o mergulho da face do talude é  $-70^{\circ}$  (-60).

Fator 4: Trata-se de um talude natural (+15).

O valor encontrado de SMR foi de 59, portanto houve pouca alteração no valor encontrado de RMR. Com isso o método indica que nesse talude há uma probabilidade média de ruptura planar, queda de alguns blocos, baixa probabilidade de ruptura por tombamento e probabilidade nula de deslizamento de massa. Os métodos de suporte sugeridos são métodos de sustentação com concreto, de reforço e métodos de proteção contra queda de blocos.

#### 4.2.2. JF03

#### Rock Mass Rating (RMR):

**Parâmetro 1 (Resistência da Rocha Intacta):** A partir do teste do martelo do geólogo, identificou-se que se trata de uma rocha medianamente resistente (R3), com resistência à compressão uniaxial na faixa de 25 a 50 MPa (4).

**Parâmetro 2 (RQD):** O RQD da rocha foi calculado a partir do cálculo do Jv, que tem seu valor diretamente ligado ao espaçamento das descontinuidades no maciço. Foi mapeado três diferentes famílias de descontinuidade, sendo elas: Sn (foliação), Frx e Fry. O espaçamento dessas descontinuidades foi estimado conforme as dimensões dos blocos caídos no pé do talude e próximo à área. Então, obteve-se o valor de RQD na faixa de 50% a 75% (13).

**Parâmetro 3 (Espaçamento das Descontinuidades):** A principal descontinuidade tinha um espaçamento na faixa de 60 a 200 mm (8).

**Parâmetro 4 (Padrão das Descontinuidades):** A descontinuidade Sn se mostrou com persistência entre 3 a 10 m (2), sem abertura (6), com uma superfície lisa (1), sem preenchimento (6) e moderadamente alterada (3).

Parâmetro 5 (Ação da água subterrânea): Observou-se gotejamento no talude (4).

O valor de RMR encontrado foi de 47, para o talude de itabirito próximo às residências em setor de risco, sendo então considerado pelo método um maciço de classe III e descrito como um maciço regular.

### Slope Mass Rating (SMR):

Para o cálculo do SMR, tendo em vistas as diferenças de direção de mergulho da face do talude, fez-se necessário a setorização do talude, sendo o setor A um talude com atitude geométrica 220°/90° e o setor B com atitude de 275°/90°. Para o setor A os valores atribuídos para cada fator e valor encontrado para o SMR são apresentados a seguir.

**Fator 1**: A diferença absoluta entre as direções de mergulho da face do talude e da descontinuidade foi de aproximadamente  $5^{\circ}$  (0,85).

Fator 2: O ângulo de mergulho da descontinuidade é de aproximadamente 25° (0,40).

**Fator 3:** A diferença entre o mergulho da descontinuidade e o mergulho da face do talude é  $-65^{\circ}$  (-60).

**Fator 4:** Apesar de se tratar de um provável talude natural, sua face se apresentava bastante fraturada (Figura 21), por isso considerou-se como um desmonte deficiente (-8).

Com isso, obteve-se o valor de SMR de 19 para o talude do setor A. A partir desse valor, indica que há uma alta probabilidade de ruptura planar, e que é possível a ocorrência de deslizamento de massa. Para o suporte do talude, o SMR sugere a reescavação e utilização de sistemas de drenagem interna e externa.

Para o setor B se obteve os seguintes resultados.

**Fator 1:** A diferença absoluta entre as direções de mergulho da face do talude e da descontinuidade foi de aproximadamente  $55^{\circ}$  (0,15).

Fator 2: O ângulo de mergulho da descontinuidade é de aproximadamente 25° (0,40).

**Fator 3:** A diferença entre o mergulho da descontinuidade e o mergulho da face do talude é  $-65^{\circ}$  (-60).

**Fator 4:** Apesar de se tratar de um provável talude natural, sua face se apresentava bastante fraturada, por isso considerou-se como um desmonte deficiente (-8).

Chegando ao valor de SMR de 47. Então é indicado uma probabilidade média de ruptura planar, queda de vários blocos no talude (como observado em campo), baixa probabilidade de ocorrência de ruptura por tombamento e probabilidade 0 de escorregamento de massa. Os métodos de suporte sugeridos são suportes utilizando concreto, métodos de reforço na face, e métodos de proteção como redes e cercas.



Figura 21 – Face do talude JF03 setor B.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

4.2.3. JF05

### Rock Mass Rating (RMR):

**Parâmetro 1 (Resistência da Rocha Intacta):** A partir do teste do martelo do geólogo, percebeu-se que se trata de um solo estruturado (R0), com resistência à compressão uniaxial estimada menor que 1 Mpa (0).

**Parâmetro 2 (RQD):** Por se tratar de um saprolito, e sabendo que o RQD se aplica a partir de rochas alteradas, o valor atribuído foi de 0% (0).

**Parâmetro 3 (Espaçamento das Descontinuidades):** Como nesse ponto as estruturas ainda estavam preservadas foi possível tomar medidas do espaçamento das descontinuidades, concluindo que o espaçamento é menor que 60 mm (5)

**Parâmetro 4 (Padrão das Descontinuidades):** Devido as condições de alteração deste talude, não foi possível realizar a avaliação do padrão das descontinuidades (0)

**Parâmetro 5 (Ação da água subterrânea):** Principalmente devido a sua localização próxima a nascente de uma drenagem dessa região, o talude se apresentava molhado (7).

O valor de RMR encontrado foi de 15, portanto este talude de saprolito de quartzito, localizado próximo à drenagem e abaixo das residências identificadas como área de risco, tem sua classificação como V e descrição péssimo.

### Slope Mass Rating (SMR):

Devido as condições do talude, entende-se que o modo de ruptura neste local não seria governado pelas estruturas, caracterizando uma ruptura circular. Portanto, não é o caso para a aplicação do método SMR.

### 4.2.4. JF06

### Rock Mass Rating (RMR):

**Parâmetro 1 (Resistência da Rocha Intacta):** A partir do teste do martelo do geólogo, identificou-se que se trata de uma rocha medianamente resistente (R3), com resistência à compressão uniaxial na faixa de 25 a 50 MPa (4).

**Parâmetro 2 (RQD):** O RQD da rocha foi calculado a partir do cálculo do Jv, em que foi necessário estimar o espaçamento das descontinuidades na rocha. Observou-se valor de RQD está na faixa de 50% a 70% (13)

**Parâmetro 3 (Espaçamento das Descontinuidades):** A principal descontinuidade tinha um espaçamento na faixa de 60 a 200 mm (8).

**Parâmetro 4 (Padrão das Descontinuidades):** A descontinuidade Sn se mostrou com persistência entre 10 e 20 m (1), sem abertura (6), com uma superfície lisa (1), sem preenchimento (6) e moderadamente alterada (3).

#### Parâmetro 5 (Ação da água subterrânea): O afloramento encontrava-se seco (15)

O valor de RMR encontrado foi de 57, o que caracterizou o afloramento de quartzito como classe III, regular.

Slope Mass Rating (SMR):

Como o ponto JF06 não é um talude, e sim apenas um afloramento rochoso, o método SMR não pode ser aplicado.

### 4.2.5. JF07

Rock Mass Rating (RMR):

**Parâmetro 1 (Resistência da Rocha Intacta):** A partir do teste do martelo do geólogo, identificou-se que este afloramento de canga estruturada pode ser entendido como uma rocha muito resistente (R3), com resistência à compressão uniaxial na faixa de 100 a 250 MPa (12).

**Parâmetro 2 (RQD):** O RQD da rocha foi calculado a partir do cálculo do Jv, sendo necessário a estimativa do espaçamento das descontinuidades do maciço rochoso. A partir dos valores encontrados, estimou-se um valor de RQD próximo a 85% (17).

**Parâmetro 3 (Espaçamento das Descontinuidades):** A principal fratura observada em campo tinha espaçamento variando de 200 a 600 mm (10). Nota-se que para esta rocha foi observado fraturas com a mesma direção com espaçamentos bastante variáveis, portanto não foi possível definir um valor exato para a estimativa.

**Parâmetro 4 (Padrão das Descontinuidades):** A fratura se mostrou com persistência maior que 20 m (0), sem abertura (6), com uma superfície rugosa (5), sem preenchimento (6) e basicamente inalterada (6).

Parâmetro 5 (Ação da água subterrânea): O afloramento encontrava-se seco (15).

Obteve-se um valor de 77 para o RMR do afloramento de canga estruturada do Parque Arqueológico Morro da Queimada, classe II descrita como "bom", mas com o valor bem próximo à classe I.

#### Slope Mass Rating (SMR):

Por não se tratar de um talude e sim de um afloramento rochoso, o método SMR não se aplica.

### 4.2.6. JF11

#### Rock Mass Rating (RMR):

Importante lembrar que o talude de itabirito deste local comporta-se como uma extensão do talude JF03 setor B, portanto a princípio se espera comportamentos similares

**Parâmetro 1 (Resistência da Rocha Intacta):** A partir do teste do martelo do geólogo, identificou-se que o itabirito deste talude é uma rocha branda (R2), com resistência à compressão uniaxial na faixa de 5 a 25 MPa (2).

**Parâmetro 2 (RQD)**: O RQD da rocha foi calculado a partir do cálculo do Jv, que tem seu valor diretamente ligado ao espaçamento das descontinuidades no maciço. Foi mapeado

três diferentes famílias de descontinuidade, sendo elas: Sn (foliação), Frx e Fry. O espaçamento dessas descontinuidades foi estimado conforme as dimensões dos blocos caídos no pé do talude e próximo à área. O valor aproximado de RQD gira em torno de 65% a 75% (13).

**Parâmetro 3 (Espaçamento das Descontinuidades):** A descontinuidade Sn apresentou o menor espaçamento entre as outras famílias citadas, com cerca de 10 cm (8).

**Parâmetro 4 (Padrão das Descontinuidades):** A fratura se mostrou com persistência de 10 a 20 m (1), com abertura pequena de 0,1 a 1 mm (4), com uma superfície lisa (1), sem preenchimento (6) e fortemente alterada (1).

Parâmetro 5 (Ação da água subterrânea): O talude encontrava-se seco (15).

Chegou-se em um valor de 51, classe III regular, para o talude do ponto JF11, que se encontra mais próximo às residências que foram demarcadas como em situação de risco.

Slope Mass Rating (SMR):

Para o cálculo de SMR deste talude, a atitude da descontinuidade considerada foi a medida em campo, 220°/30°, e a direção de mergulho e mergulho do talude é 270/°90°. A seguir apresenta-se os valores atribuídos a cada fator.

**Fator 1:** A diferença absoluta entre as direções de mergulho da face do talude e da descontinuidade é de  $50^{\circ}$  (0,15).

**Fator 2:** O ângulo de mergulho da descontinuidade é de aproximadamente 30° (0,40).

**Fator 3:** A diferença entre o mergulho da descontinuidade e o mergulho da face do talude é  $-60^{\circ}$  (-60).

**Fator 4:** Trata-se de um talude natural (+15).

O valor obtido de SMR é de 62, com esse valor, o método indica uma baixa probabilidade de ruptura planar, a ocorrência de queda de alguns blocos da face do talude, baixa probabilidade de ocorrência de ruptura por tombamento e probabilidade nula de ocorrência de deslizamento de massas. Os métodos de suporte sugeridos são métodos de reforço como a utilização de ancoragem e métodos de proteção como redes e cercas.

### 4.2.7. JF20

Rock Mass Rating (RMR):

**Parâmetro 1 (Resistência da Rocha Intacta):** Com a realização do teste do martelo do geólogo, identificou-se que este afloramento de quartzito pode ser entendido como uma rocha resistente (R4), com resistência à compressão uniaxial na faixa de 50 a 100 MPa (7).

**Parâmetro 2 (RQD):** O RQD da rocha foi calculado a partir do cálculo do Jv, que tem seu valor diretamente ligado ao espaçamento das descontinuidades no maciço. Foi mapeado três diferentes famílias de descontinuidade, sendo elas: Sn (foliação), Frx e Fry. O espaçamento dessas descontinuidades foi estimado conforme as dimensões dos blocos caídos no pé do talude e próximo à área. Estimou-se um valor de RQD próximo a 95% (20).

**Parâmetro 3 (Espaçamento das Descontinuidades):** As famílias de descontinuidade observadas, Sn, Frx e Fry tinham todas espaçamento aproximado de 0,5 m, obtendo-se um RQD aproximado de 95% (20).

**Parâmetro 4 (Padrão das Descontinuidades):** A descontinuidade se mostrou com persistência maior que 20 m (0), sem abertura (6), com uma superfície lisa (1), sem preenchimento (6) e moderadamente alterada (3).

Parâmetro 5 (Ação da água subterrânea): O afloramento encontrava-se seco (15).

Obteve-se então um RMR de 68, configurando o maciço rochoso de quartzito como classe II, "bom".

Slope Mass Rating (SMR):

Neste local, o talude se apresentava com orientações 260°/90°. E como já descrito no tópico anterior, neste local era possível identificar duas orientações de mergulho e ângulos de mergulho diferentes bem próximos, sendo um com atitude 180°/15° e outro 250°/40°. Com isso os seguintes fatores são determinados:

**Fator 1:** Para Sn  $180^{\circ}/15^{\circ}$  temos a diferença absoluta entre as direções de mergulho da descontinuidade e do talude maior que  $30^{\circ}$  (0,15). Para Sn  $250^{\circ}/40^{\circ}$  temos que a diferença é de  $10^{\circ}$  (0,7).

**Fator 2:** Para Sn  $180^{\circ}/15^{\circ}$  temos o mergulho menor que  $20^{\circ}$  (0,15). Para Sn  $250^{\circ}/40^{\circ}$  temos o mergulho entre  $35^{\circ}$  e  $45^{\circ}$  (0,85).

**Fator 3:** Para ambas a diferença entre o mergulho da descontinuidade e o mergulho da face do talude é menor que  $-10^{\circ}$  (-60).

Fator 4: Trata-se de um talude natural (+15).

Para Sn 180°/15° obteve-se um valor de SMR de 81. Com isso o método indica que não há probabilidade de ruptura planar, o desplacamento de poucos blocos e que não há

probabilidade de ruptura por tombamento ou deslizamento de massa. De acordo com o método, métodos de suporte não são necessários.

Para Sn  $250^{\circ}/40^{\circ}$ , obteve-se um valor de SMR igual a 47. O método indica que há chances de ruptura planar, é provável o desplacamento de muitos blocos (com prováveis dimensões de 0,5 x 0,5 x 0,5, como observado), baixa probabilidade de ruptura por tombamento, e sem probabilidade da ocorrência de deslizamento de massas. Os métodos de suporte sugeridos são, concretagem (como a utilização de concreto projetado), reforço (como ancoragem) e métodos de proteção (como redes).

No intuito de resumir as informações obtidas a partir dos dados de classificações geomecânicas, a Tabela 11 resume os resultados encontrados e a Figura 22 apresenta os valores encontrados para as estações geológicas em mapa.

Estação Geológica	RMR	Classe e Descrição	SMR	Probabilidades de Ruptura	Métodos de suporte
JF02	61	II – "Bom"	59	Média – Ruptura planar Queda de poucos blocos Baixa – Ruptura tombamento Nula – Deslizamento de massa	Sustentação com concreto e reforço da face.
JF03 (Setor A)	47	III – "Regular"	19	Alta – Ruptura Planar Possibilidade – Deslizamento de massa.	Reescavação e sistemas de drenagem.
JF03 (Setor B)	47	III – "Regular"	47	Média – Ruptura Planar Queda de vários blocos Baixa – Ruptura tombamento Nula – Deslizamento de massa	Sustentação com concreto, reforço da face e proteção
JF05	15	V – "Péssimo"	-	-	-
JF06	57	III – "Regular"	-	-	-
JF07	77	II – Bom	-	-	-
JF11	51	III – "Regular"	62	Baixa – Ruptura planar Queda de alguns blocos Baixo – Ruptura tombamento Nula – Deslizamento de massa	Reforço da face e proteção
JF20 (Sn 180°/15°)	68	II – "Bom"	81	Nula – Ruptura planar Queda de poucos blocos	Sem necessidade

Tabela 11 - Resumo dos resultados encontrados nas avaliações geomecânicas.

				Nula - Ruptura tombamento Nula – Deslizamento de massa	
JF20 (Sn 250°/40°)	68	II – "Bom"	47	Moderada – Ruptura planar Queda de muitos blocos Baixa – Ruptura tombamento Nula – Deslizamento de massa	Sustentação com concreto, reforço da face e proteção

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)





Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

### 4.3. ANÁLISE CINEMÁTICA

Neste tópico serão apresentados os resultados e as análises realizadas para a obtenção da projeção estereográfica dos taludes localizados na área de risco descrita pela CPRM como "Morro da Queimada, Alto da Cruz, Antônio Dias" em 2011 e próximo as residências demarcadas como em região de alto risco e descritas e utilizadas pela Defesa Civil de Ouro Preto como "MG\_OUROPRE\_SR\_34\_CPRM", em 2016. A partir disso será realizado a análise cinemática visando entender o comportamento dos taludes nessas regiões para o detalhamento das áreas de risco.

Serão analisados os taludes identificados nos pontos JF02, JF03 (Setor A e Setor B) e JF11, que se comporta como uma extensão do talude JF03 B. Para esses taludes será realizado

uma descrição mais completa do local, vistos que algumas características dos locais são importantes para entender a situação a qual estas estruturas estão expostas.

#### 4.3.1. Talude JF03 A

#### 4.3.1.1. Descrição

Localizado próximo à área de risco "MG\_OUROPRE\_SR\_34\_CPRM" (SBG-CPRM, 2016), que delimita às áreas residenciais, é localizada no extremo oeste Bairro Morro do Santana, na rua São Pedro. Sua descrição, que pode ser encontrada no site da Defesa Civil de Ouro Preto, indica que se trata de uma área de alto risco a deslizamento, onde há um conjunto de moradias no topo de uma encosta, onde algumas moradias correm risco de desabarem totalmente ou parcialmente no período chuvoso. Em sua descrição, a CPRM identificou como evidência da susceptibilidade ao deslizamento a presença de árvores e arbustos inclinados ao longo da encosta, por fim contabilizou que nesta área há 32 imóveis e 7 pessoas em risco.

Durante a visita desta área de risco, ocorrida no dia 28 de janeiro de 2023, identificouse a face de um talude de rocha aflorante extenso, na qual seu topo servia como fundação de moradias, e abaixo dele também havia uma área particular cercada. A estrutura está localizada no início da trilha que liga a rua São Pedro, bairro Morro do Santana, ao parque arqueológico Morro da Queimada. Foi observado que o acesso ao talude é um caminho preferencial de escoamento de água. Esta área foi descrita como uma região de vegetação densa, onde notouse a plantação de bananeiras, o talude em questão é bem íngreme (com mergulho de aproximadamente 90°), no seu topo foi possível observar uma camada de solo com maior taxa de material orgânico, a face do talude se apresentava úmida e com bastante vegetação, inclusive percebia-se raízes nascendo entre os estratos da rocha. Além disso observou-se encanamento para descarte de resíduos resistências no local (Figura 23). Trata-se de um talude de itabirito médio (itabirito chapinha). Faz-se importante mencionar que essa rocha apresentou forte magnetismo, podendo ter influenciado os valores apresentados nas bussolas.



Figura 23 – Encanamento localizado na região JF03.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

### 4.3.1.2. Projeção Estereográfica

Os dados de comportamento geométrico do talude JF03 A, localizado no itabirito, e das descontinuidades encontradas em sua face são compilados na Tabela 12. Em seguida, apresenta-se a projeção estereográfica do talude JF03 A (Figura 24).

Estrutura	Direção de Mergulho / Mergulho
Talude	215° / 80°
	200° / 25°
Sm	220° / 25°
511	225° / 18°
	220° / 20°
Fry	295° / 90°
Frx	350° / 85°

Tabela 12 - Atitude das estruturas do talude JF03 A.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)



Figura 24 – Projeção estereográfico do talude JF03 A (Open Stereo).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

### 4.3.1.3. Ângulo de Atrito

A partir das informações obtidas acerca do padrão das descontinuidades, apresentadas no tópico 4.2, entendeu-se que a família de descontinuidades críticas do talude JF03 A pode ser descrita como lisa e planar, apresentando uma rugosidade do tipo F de acordo com Barton (2002), obtendo o valor 1 de Jr (Tabela 8). Em relação a alteração das paredes da descontinuidade, foi observado uma alteração moderada, e sem preenchimento, similar ao descrito por Barton (2002) na Tabela 9, referente ao tipo C, que indica um valor de Ja de 2, também é sugerido, a partir do valor de Ja, que a faixa de ângulo de atrito desta descontinuidade é de 25° a 30°. Como esses valores, estima-se o valor de ângulo de atrito.

JF03: 
$$\varphi = tan^{-1} \left(\frac{J_r}{J_a}\right) = tan^{-1} \left(\frac{1}{2}\right) \cong 26^{\circ}$$

A partir dos dados, observou-se que para esse setor do talude JF03 a equação 2.1 é respeitada, em que o plano de deslizamento é quase paralelo à direção do talude com uma diferença aproximada de 5°.

A equação 2.2 também é respeitada, visto que o ângulo da face do talude é maior que o ângulo da descontinuidade condicionante.

Em relação à equação 2.3, percebe-se que o ângulo de atrito estimado e o mergulho da descontinuidade possuem valores próximos (26° e 25°, respectivamente). Adotando medidas conservadoras, será considerado que esta condição também está satisfeita.

Por fim, a necessidade de fraturas de liberação do bloco da rocha é satisfeita, visto que foi observada a família de fraturas Frx e Fry na face do talude, com orientações favoráveis à liberação do bloco.

Portanto, este talude está suscetível a ruptura planar, e a direção deste talude será considerada como uma direção crítica nesta área de risco.

### 4.3.2. Talude JF03 B

Como mencionado, o talude de rocha da estação geológica JF03 foi setorizado devido as diferentes direções de mergulho da face do talude. Portanto, a descrição da área do talude JF03 B é igual à descrição apresentada no tópico anterior (4.3.1). O padrão das descontinuidades e suas atitudes, também são os mesmos, portanto o valor estimado de ângulo de atrito utilizado será o calculado no tópico 4.3.1.3.

#### 4.3.2.1. Projeção Estereográfica

Os dados de comportamento geométrico do talude JF03 B, localizado no itabirito, e das descontinuidades encontradas em sua face são compilados na Tabela 13. Em seguida, apresenta-se a projeção estereográfica do JF03 B (Figura 25).

Estrutura	Direção de Mergulho / Mergulho
Talude	270° / 90°

Tabela 13 - Atitude das estruturas do talude JF03 B

	200° / 25°
Ç.,	220° / 25°
Sn	225° / 18°
	220° / 20°
Fry	295° / 90°
Frx	350° / 85°

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 25 – Projeção estereográfico do talude JF03 B (Open Stereo).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

### 4.3.2.2. Análise Cinemática

Entende-se que para o talude JF03 B a equação 2.1 não é satisfeita, tendo em vista que a diferença angular entre a direção de mergulho da face do talude e a direção de mergulho da descontinuidade é superior a 20°.

A equação 2.2 é satisfeita, visto que o ângulo da face do talude é maior que o ângulo da descontinuidade condicionante.

Para a equação 2.3, nota-se que o valor estimado de ângulo de atrito é de (26°), próximo ao ângulo de mergulho da descontinuidade. Adotando medidas mais conservadoras, será considerando que esta equação também é satisfeita.

Dito isso, supõe-se que o principal risco associado a esta estrutura se dá a partir de seu enfraquecimento devido à queda gradual e constante de blocos. Isso foi indicado a partir dos resultados encontrados de SMR e RMR, e observado na face deste talude (Figura 21), que se apresentava bastante fraturada. Também ficou evidente a contribuição da água no local, fator que tende a enfraquecer esta estrutura.

### 4.3.3. Talude JF11

4.3.3.1. Descrição

Como já mencionado, foi observado a extensão do talude no ponto JF03 B até o ponto JF11 (cerca de 35,8 m de distância). A área próxima a este ponto também é localizada sobre o itabirito macio, possui características similares às apresentadas acima, no entanto é notável uma maior espessura de solo com maior taxa de material orgânico e uma maior presença de lixo residencial.

### 4.3.3.2. Projeção Estereográfica

O talude JF11, também no itabirito, se comporta como uma extensão do talude JF03 B, portanto espera-se projeções similares. A Tabela 14 apresenta os dados de comportamento geométrico do talude e suas principais estruturas. Em seguida a Figura 26 apresenta a projeção estereográfica para este talude.

Estrutura	Direção de Mergulho / Mergulho
Talude	270° / 90°
	220° / 30°
Sn	200° / 30°
	203° / 20°

Tabela 14 - Atitude das estruturas do talude JF11

	203° / 30°
	290° / 90°
Fry	285° / 90°
	270° / 90°
	350° / 70°
Frx	350° / 75°
	0° / 75°

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)





Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

# 4.3.3.3. Ângulo de Atrito

A partir das informações obtidas acerca do padrão das descontinuidades do talude JF11, apresentadas no tópico 4.2, entendeu-se que a família de descontinuidades críticas apresenta uma superfície lisa e planar, sendo caracterizada como uma rugosidade do tipo F de acordo com Barton (2002), obtendo o valor 1 de Jr (Tabela 8). Em relação a alteração das

paredes da descontinuidade, foi observado grande alteração do material, abertura pequena (< 1 mm) massem preenchimento, similar ao descrito por Barton (2002) na Tabela 9, referente ao tipo C, que indica um valor de Ja de 2, também é sugerido, a partir do valor de Ja, que a faixa de ângulo de atrito desta descontinuidade é de  $25^{\circ}$  a  $30^{\circ}$ . Com esses valores, estima-se o valor de ângulo de atrito.

JF11: 
$$\varphi = tan^{-1} \left(\frac{J_r}{J_a}\right) = tan^{-1} \left(\frac{1}{2}\right) \cong 26^{\circ}$$

4.3.3.4. Análise Cinemática

A partir dos dados obtidos nos tópicos anteriores, observou-se que este talude não satisfaz a equação 2.1, a diferença entre a direção do talude e a direção da descontinuidade é superior a 20°.

A equação 2.2 foi satisfeita, visto que o ângulo de mergulho da descontinuidade condicionante é menor que o ângulo do talude.

Em relação à equação 2.3, nota-se que o ângulo de atrito estimado é inferior ao ângulo de mergulho da descontinuidade crítica.

Por fim, este talude apresentou famílias de fraturas que podem ser responsáveis pela liberação do bloco (Frx e Fry).

Então, conclui-se que esta estrutura apresenta uma baixa suscetibilidade à ocorrência de ruptura planar. O sistema de classificação geomecânica SMR indicou uma probabilidade média de queda de alguns blocos da face do talude, o que foi evidenciado em campo, porém o talude não se apresentava tão fraturado ao se comparar com o talude JF03 B. Um dos possíveis condicionantes do movimento na região do talude JF11 é sua proximidade ao contato Itabirito-Quartzito, em que pode ser evidenciado a presença de filito, tendo em vista que foi observado pequenos fragmentos dessa rocha nos entornos. O filito pode se comportar com uma superfície condicionante ao escorregamento.

### 4.3.4. Talude JF02

### 4.3.4.1. Descrição

Este talude está localizado dentro dos limites da área de risco delimitada pela SBG-CPRM, 2011, de nome "Morro da Queimada / Alto da Cruz / Antônio Dias", na trilha que liga
o bairro Morro do Santana ao bairro Morro da Queimada, bem próximo às áreas residenciais do Morro da Queimada.

Trata-se de um talude natural íngreme (com mergulho de aproximadamente 90°), de quartzito em que foi percebido a presença de gotejamento em sua face e uma camada de canga rolada em seu topo. Ao pé desse talude, onde estava localizado a trilha, encontrava-se uma região plana relativamente extensa, comparada as dimensões da trilha, seguida a jusante de outro talude natural em quartzito íngreme. Nessa área ao pé do talude, que se assemelha a uma berma, percebeu-se a presença de blocos quebrados de quartzito no pé do talude, os blocos tinham dimensões aproximadas de 10cm x 50cm x 50cm. Próximo a esse local, observou-se acima um talude de quartzito erodido de forma natural, em que também foi observado uma camada de canga em seu topo.

#### 4.3.4.2. Projeção Estereográfica

Comparado aos demais, o talude JF02 está localizado em outra área de risco e em outra litologia (quartzito). Os dados referentes ao comportamento geométrico do talude e de suas principais descontinuidades são apresentados na Tabela 15, em seguida a Figura 27 apresenta a projeção estereográfica para o talude.

Estrutura	Direção de Mergulho / Mergulho
Talude	160° / 90°
Sn	170° / 20°
Fry	80° / 80°
Frx	145° / 90°

Tabela 15 - Atitude das estruturas do talude JF02.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)



Figura 27 – Projeção estereográfica do talude JF02 (Open Stereo).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

#### 4.3.4.3. Ângulo de Atrito

A partir das informações obtidas acerca do padrão das descontinuidades do talude JF02, apresentadas no tópico 4.2, entendeu-se que a família de descontinuidades críticas se apresenta como planar e extremamente lisa, portando sendo caracterizada como uma rugosidade do tipo G, planar e slickensided obtendo o valor 0,5 de Jr (Tabela 8). As faces da descontinuidade se mostravam não alteradas, tendo sua alteração classificada como do tipo B descrito por Barton (2002) na Tabela 9, que indica um valor de Ja de 1 e uma faixa do ângulo de atrito da descontinuidade de 25° a 35°. Com esses valores, estima-se o valor de ângulo de atrito.

JF02: 
$$\varphi = tan^{-1} \left(\frac{J_r}{J_a}\right) = tan^{-1} \left(\frac{0.5}{1}\right) \cong 26^{\circ}$$

#### 4.3.4.4. Análise Cinemática

Para a análise cinemática deste talude, observou-se que a direção de mergulho da descontinuidade condicionante da ruptura planar é praticamente paralela a direção da face do talude, portanto a equação 2.1 foi satisfeita.

A equação 2.2 também é satisfeita, tendo em vista que o mergulho da descontinuidade é menor que o ângulo da face do talude, apresentando uma diferença considerável entre os dois valores.

O ângulo de atrito estimado é maior que o mergulho da descontinuidade, portanto a equação 2.3 não é satisfeita.

Por fim, este talude apresentou famílias de fraturas que podem ser responsáveis pela liberação do bloco (Frx e Fry).

Dito isso, apesar do mergulho da descontinuidade condicionante da ruptura planar ser inferior ao ângulo de atrito estimado, essa direção de mergulho será considerada como crítica, devido às incertezas relacionadas ao método indireto de obtenção do valor de ângulo de atrito e as poucas medições de atitude. Também é notável que esta direção de talude se repte a jusante do talude analisado, portanto a análise neste talude é representativa.

Por fim, a Figura 28 compila as projeções estereográficas obtidas e a localização dos taludes, com o mapa geológico e de RMR da área.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

#### 4.4. ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE DE RUPTURA DE ÁREAS DE RISCO

A seguir será apresentado uma proposta de detalhamento e setorização das áreas de risco a partir dos resultados encontrados acima.

A partir das observações feitas através das análises cinemática, entende-se que para a região da área de risco MG\_OUROPRE\_SR\_34\_CPRM (mapa de risco da SBG-CPRM de 2016) os taludes com direções de mergulho próximas à 220 estão mais suscetíveis à ruptura planar. Para a área de risco Morro da Queimada, Alto da Cruz e Antônio Dias (mapa de risco da SBG-CPRM de 2011) os taludes com direção 170° tendem a ser os mais suscetíveis. Os taludes nessas regiões com essas direções são destacados no mapa geológico como locais de maior suscetibilidade a ruptura planar, para então se obter um detalhamento dessas áreas a partir da setorização da mesma.

Como a identificação desses taludes se deu a partir da análise das curvas de nível, que estão espaçadas de 20 em 20 m, há uma perda de precisão na setorização das áreas, visto que dados topográficos mais densos seriam mais adequados para identificar os taludes e sua orientação. No entanto, ainda é possível obter uma análise mais macroscópica da região, podendo ser utilizada como facilitadora para futuros estudos e investigações.

A proposta de setorização das áreas é realizada com o objetivo de direcionar estudos e investigações que visam averiguar as condições de movimento de taludes nas áreas urbanas, não se tratando de uma setorização definitiva, tendo em vista que às áreas demarcadas não foram investigadas no presente trabalho.

Fora a diferenciação de áreas conforme sua suscetibilidade a ruptura planar, também se apresenta pontos de atenção, em que foi observado características que podem indicar suscetibilidade a movimento, em que o estudo não se aprofundou. Portanto, destaca-se como pontos de atenção:

**Contato Quartzito-Itabirito**: A possível presença de uma camada de filito neste contato pode vir a criar uma superfície condicionante de ruptura planar.

Área de Drenagem natural do vale: Nas regiões próximas a drenagens foi observado maior espessura do solo, mata densa, descarte de lixo e maior influência da água.

**Itabirito abaixo da canga**: Foi observado algumas regiões urbanas fundadas sobre a canga estruturada, que apresentam baixa suscetibilidade à ruptura planar, no entanto, caso a canga esteja escavada e o itabirito exposto, essa suscetibilidade pode aumentar.

Além disso, a interpretação do mapeamento geológico realizado em campo possibilitou inferir a presença de um sinforme na região, fundamental para entender o comportamento geológico da área e balizar a setorização da área de risco. O mapa geológico de campo foi fundamental devido ao refinamento da geologia nas regiões de interesse, o que não é observado no mapa geológico do quadrilátero ferrífero, possibilitando identificar detalhes na geologia que não são representados no mapa de maior escala. No entanto, a geologia apresentada se mostra condizente com os mapas da região.

A seguir, é apresentado o mapa com a proposta de setorização das áreas e regiões de risco conforme sua suscetibilidade a ruptura planar (Figura 29), e disposto no Apêndice C. Neste mapa, também é ilustrado o RMR das rochas, e as características geológicas da região.



Figura 29 – Proposta de setorização das áreas de risco, conforme suscetibilidade à ruptura

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Além da setorização das áreas averiguadas, conforme a suscetibilidade dos taludes à ruptura planar, é apresentado uma hipótese de regiões do perímetro urbano, não investigadas no presente documento, suscetíveis ao mesmo tipo de ruptura.

A região de baixa suscetibilidade à ruptura planar localizado no bairro morro da queimada se dá devido à presença de canga, que apresenta uma baixa suscetibilidade à ruptura

plana. No entanto, cortes transversais nessa rocha podem expor e desconfinar o itabirito, que apresenta maior suscetibilidade ao movimento e a quedas de blocos. Este trabalho não mapeou cortes transversais realizados nas áreas urbanas e residenciais.

Em geral, indica-se que nas áreas propostas de suscetibilidade indicadas no mapa é necessário cuidado ao se considerar realizar cortes verticais na rocha, visto que isto pode ocasionar o desconfinamento do maciço rochoso.

#### 5. CONCLUSÃO

A partir do levantamento, tratamento e interpretação dos dados obtidos acerca da geologia local, das classificações de maciços rochosos e da análise cinemática, foi possível realizar a setorização das áreas de risco, a partir da suscetibilidade a rupturas planares. O método proposto permitiu identificar setores, dentro das áreas de risco, que podem estar sujeitos a maior suscetibilidade de movimentos de massa. Acredita-se que este método possa vir a ser consolidado a partir de sua aplicação nas demais áreas de risco delimitadas na serra de Ouro Preto, e demais áreas dominadas por taludes de rocha, com características semelhantes às analisadas no trabalho

O mapeamento geológico-geomecânico realizado no Morro da Queimada, acerca da identificação e descrição das litologias e tomada de medidas das descontinuidades, foi crucial para o desenvolvimento do método proposto para o detalhamento da área de risco. Além disso, a interpretação do mapeamento realizado em campo possibilitou inferir a presença de um sinforme na região, e entender o comportamento geológico.

Com o RMR foi possível classificar os maciços rochosos da região, e o SMR se mostrou eficaz como um método adequado para a proposição de soluções relativas aos movimentos de massa em encostas urbanas. Por fim, compilando os resultados numéricos encontrados para o RMR, foi realizado um mapa temático separando os afloramentos estudados, trazendo mais detalhes acerca das condições geomecânicas da região.

Com a análise cinemática foi possível identificar as direções críticas das regiões, em especial para o Quartzito Moeda e para o Itabirito Cauê, o que foi fundamental para a realização do zoneamento das áreas de risco.

Aconselha-se que para detalhar mais esse projeto seja realizados novas investigações nas regiões demarcadas como alta e média suscetibilidade à ruptura planar. Também é indicado que os contatos entre o Quartzito Moeda e o Itabirito Cauê sejam melhor investigados, em especial na região urbana, assim como as regiões urbanas próximas às drenagens naturais do vale. Chegou-se a essa conclusão tendo em vista que essas regiões apresentaram alguns fatores que podem indicar suscetibilidade a movimentos de massa como ruptura planar, deslizamento de massa e ruptura circular.

#### REFERÊNCIAS

ALKMIM F. F., NEVES B. B. B., ALVES J. A. C., 1993. Arcabouço tectônico do Cráton São Francisco – uma revisão. In: J.M.L. Dominguez, A. Misi eds. O Cráton do São Francisco, Salvador; SBG, p-45-62.

BARRS, F.J. & ROSIÈRE, C.A. 1994. Geological map of the Quadrilátero Ferrífero. In: BAARS, F.J. The São Francisco Craton. In: DE WITT, M.J.; ASHWAL, L.A. (Eds.) Greenstone Belts Oxford Monographs on Geology and Geophysics Series, Oxford University Press. p. 529-557.

BARTON, N.; BANDIS, S. (1982). Effects of Block Size on the Shear Behaviour of Jointed Rock. Issues in Rock Mechanics. In Proceedings of 23 rd US Symposium of Rock Mechanics (eds RE Goodman & F.E. Heuze), Berkeley, California, pp 739-760.

BARTON, N. (2002). Some new Q value correlations to assist in site characterization and tunnel design. Int. J. Rock Mech. Min. Sci.;39, p. 184-216.

BIENIAWSKI Z .T. (1989). Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons, New York, 251 p.

Choi, S.Y.; Park, H.D. (2004). Variation of rock quality designation (**RQD**) with scanline orientation and length: a case study in Korea. International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences, v.41(2), p.207-221.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Ação emergencial para reconhecimento de áreas de alto e muito alto risco a movimentos de massas e enchentes: Ouro Preto, Minas Gerais. Minas Gerais, Ouro Preto, 2011. CPRM.

DEERE, D.U., HENDRON, A.J., Patton, F.D. and Cording, E.J. (1968). **Design of surface and near surface construction in rock**. Failure and breakage of rock, proc. 8th U.S. symp. Rock mech., (ed. C. Fairhurst), p. 237-302.

DOOR II, J.V.N. 1969. Physiographic, stratigraphic and a structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper., 641 A: 110p.

FIORI & CARMIGNANI (2011). Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes. Curitiba: Ed. UFPR, 604 p.

FONSECA, M. A. da; SOBREIRA, F. G. **Impactos físicos e sociais de antigas atividades de mineração em Ouro Preto, Brasil**. Geotecnia, Lisboa, v. 92, p. 5-28, 2001. Disponível em: http://morrodaqueimada.fiocruz.br/pdf/4\_Impactos%20fisicos%20e%20sociais%20de%20nti gas%20atividades%20de%20mineracao%20em%20Ouro%20Preto\_Brasil.pdf>. Acesso em: 30 set. 2014.

GOES, Heródoto; RIBEIRO, Rafael Silva; LANA, Júlio César et al. Ação emergencial para reconhecimento de áreas de alto e muito alto risco a movimentos de massa e enchentes: Ouro Preto, MG. Minas Gerais, Ouro Preto, 2016. CPRM.

GOODMAN, R. E. & BRAY, J. W. (1976). **Toppling of rock slopes. In: Proceedings of the specialty conference rock engineering for foundations and slopes**. Boulder, CO: American Society of Civil Engineers, p. 201-234.

HUDSON, J. A.; HARRISON, J. P. (1997). Engineering rock mechanics: An introduction to the principles. Oxford: Pergamon Press.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

ISRM (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Int. J. Rock Mechanics Min. Sci. Geomech. v. 15, p. 319-368.

MACIEL FILHO, C. L. 2007. **INTRODUÇÃO À GEOLOGIA DE ENGENHARIA**. Editora UFSM. 310p. - 3ª EDIÇÃO

MARKLAND, J.T., 1972. A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected. Rock mechanics research report - Imperial College of Rock Mechanics, London, UK, 19:1-10.

NALINI JR., H.A. 1993. Análise estrutural descritiva e cinemática do flanco sul e terminação periclinal do Anticlinal de Mariana e adjacências, região sudeste do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Dissertação de Mestrado. UFMG. Belo Horizonte – MG. 132 p.

PINOTTI, ALEXANDRE & CARNEIRO, CELSO. (2015). Geologia estrutural na previsão e contenção de queda de blocos em encostas: aplicação no Granito Santos, SP. Terrae Didatica. 9. 132. 10.20396/td.v9i2.8637402.

PRIEST, S. D. (1993). **Discontinuity analysis for rock engineering**. Chapman & Hall, London 470 p.

PALMSTRÖM, A. (1982). The volumetric joint count - a useful and simple measure of the degree of jointing. Proc. IV Int. Congr. IAEG, New Delhi, pp.221-228.

ROMANA, M. Manual for the Geotechnical Design of Rock Slopes. [s.l]: International Society for Rock Mechanics, 1985.

SANTOS, Tatiana Barreto dos. **Aplicabilidade das classificações geomecânicas e retroanálises para estimação das propriedades dos maciços rochosos**. Ouro Preto, MG, agosto de 2015. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.

UNIVERSIDE FEDERAL DE VIÇOSA (UFV). **Plano Municipal de Redução de Risco de Ouro Preto (PMRR).** Ouro Preto. Ministério do Desenvolvimento Regional. 2023.

XAVIER, Matheus Oliveira. **Mapeamento da suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa utilizando a análise estatística do valor informativo aplicada ao distrito sede da cidade histórica de Ouro Preto-MG. 2018. 126 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.** 

ZHANG, W.; WANG, Q.; CHEN, J.P.; TAN, C.; YUAN, X.; ZHOU, F. (2012). **Determination of the optimal threshold and length measurements for RQD calculations**. International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences, v.51, p.1-12.

# APÊNDICE A – Mapa Geológico: Morro da Queimada





### APÊNDICE B – Mapa Geológico-Geotécnico do Morro da Queimada



# APÊNDICE C – Proposta de Setorização de Áreas de Risco

## ANEXO A – Mapa de Risco de Ouro Preto (SBG-CPRM)

