



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



RODOLFO ROCHA DE AQUINO

**Classificação geomecânica de taludes críticos para a
ocupação urbana no bairro Barra (Ouro Preto-MG)**

Ouro Preto

2026

RODOLFO ROCHA DE AQUINO

Classificação geomecânica de taludes críticos para a
ocupação urbana no bairro Barra (Ouro Preto-MG)

Projeto Final de Curso apresentado como
parte dos requisitos para obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia Urbana
na Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Pedro Manuel Alameda Hernández

Ouro Preto

2026



FOLHA DE APROVAÇÃO

Rodolfo Rocha de Aquino

Classificação geomecânica de taludes críticos para a ocupação urbana no bairro Barra (Ouro Preto-MG)

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Urbana da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de engenheiro urbanista

Aprovada em 27 de fevereiro de 2026

Membros da banca

Dr. - Pedro Manuel Alameda Hernández- Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. - Ángel Efrén Tamayo Jaramillo - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Me. - Filipe Guarnieri Xavier- (Universidade de São Paulo)

Pedro Manuel Alameda Hernández, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 06/03/2026



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Manuel Alameda Hernandez, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/03/2026, às 09:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1070427** e o código CRC **3E5DF012**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família, pelo apoio incondicional ao longo de toda a minha graduação e por ter sido minha base em cada etapa desse percurso.

À minha namorada, Rúbia Gonçalves Mansano, por estar sempre ao meu lado, me incentivando e apoiando nas minhas decisões, mesmo nos momentos mais difíceis.

Agradeço a todos os professores do curso de Engenharia Urbana, em especial ao meu orientador, Pedro Manuel Alameda Hernandez, pela orientação, disponibilidade e contribuições fundamentais para o desenvolvimento deste Projeto Final de Curso.

Registro também meu agradecimento aos professores Aline Nunes, Barbara Abreu e Paulo Vieira, pelos conselhos, apoio e ensinamentos ao longo da graduação.

Aos meus amigos de curso, Luis, Carlos, Jeann, Felipe e Nicolas, pelas noites de estudo, pelos trabalhos acadêmicos compartilhados e pela parceria que tornou essa caminhada mais leve.

Por fim, agradeço à Escola de Minas de Ouro Preto e à Universidade Federal de Ouro Preto, pela formação de qualidade e pela oportunidade de concluir minha graduação em Engenharia.

RESUMO

Este Projeto Final de Curso teve como objetivo caracterizar geomecanicamente e analisar a estabilidade de taludes rochosos situados no bairro Barra, em Ouro Preto (MG), integrando ensaios laboratoriais, levantamentos estruturais de campo e classificações geomecânicas consolidadas. O estudo foi desenvolvido em três pontos (P-01, P-02 e P-03) implantados em cortes rochosos associados à ocupação urbana e a interferências antrópicas, com registro de coordenadas, descrição litológica e levantamento das descontinuidades predominantes. Foram executados 21 ensaios de carga pontual (PLT), com tratamento estatístico dos resultados e adoção de um conjunto final de 17 corpos de prova, obtendo-se I_s (50) médio de 0,90 MPa. A partir da correlação indireta recomendada na literatura, estimou-se resistência à compressão uniaxial (UCS) variando entre 18 e 22 MPa, com valor médio da ordem de 20 MPa. O mapeamento estrutural incluiu 150 medições (50 por ponto), permitindo a definição das famílias de descontinuidades e a avaliação cinemática dos mecanismos potenciais de ruptura. Com base nos parâmetros geomecânicos adotados (UCS \approx 20 MPa, RQD 90–100%, espaçamento 0,6–2,0 m, juntas com abertura $>$ 5 mm e preenchimento argiloso, condição predominantemente seca), foi determinado RMR básico igual a 62 (classe de maciço bom). A aplicação do SMR refinou a interpretação por ponto, com SMR = 58,25 no P-01 e SMR = 62 no P-02 e P-03 (Classe II - boa estabilidade), destacando o P-01 como o setor mais crítico, sobretudo pela elevada inclinação da face e pela proximidade com infraestrutura ferroviária. Por fim, discute-se a influência de condicionantes antrópicos (infiltrações, resíduos e degradação local) e recomenda-se a realização de ensaios complementares, monitoramento e elaboração de mapas de risco para subsidiar o planejamento urbano e a mitigação de instabilidades.

Palavras-chave: estabilidade de taludes; mecânica das rochas; classificação geomecânica; RMR; SMR; análise cinemática; Ouro Preto (MG).

ABSTRACT

This Final Graduation Project aimed to perform a geomechanical characterization and a stability assessment of rock slopes located in the Barra neighborhood, Ouro Preto (MG), by integrating laboratory testing, field structural surveys, and well-established geomechanical classification systems. The study was carried out at three sites (P-01, P-02, and P-03) along rock cuts influenced by urban occupation and anthropogenic disturbances, including spatial referencing, preliminary lithological description, and discontinuity mapping. A total of 21 Point Load Tests (PLT) were conducted, followed by statistical treatment of the dataset and the adoption of a final set of 17 valid specimens, resulting in an average I_s (50) of 0.90 MPa. Based on indirect correlations commonly used in rock mechanics, the uniaxial compressive strength (UCS) was estimated to range from 18 to 22 MPa, with an average value of approximately 20 MPa. Structural mapping comprised 150 measurements (50 per site), enabling the identification of the main discontinuity sets and the kinematic appraisal of potential failure mechanisms. Using the adopted geomechanical parameters (UCS \approx 20 MPa, RQD 90-100%, discontinuity spacing 0.6–2.0 m, joints with openings $>$ 5 mm and clay infilling, predominantly dry conditions), a basic RMR value of 62 was obtained, indicating a good-quality rock mass. The Slope Mass Rating (SMR) was then applied to incorporate slope geometry and discontinuity orientation, yielding SMR = 58.25 at P-01 and SMR = 62 at P-02 and P-03 (Class II - good/stable). Although all sites share the same RMR_b, SMR results highlight P-01 as the most critical sector due to the steep slope face and its proximity to railway infrastructure. Finally, the study discusses the role of anthropogenic factors (sewage infiltration, solid waste disposal, and local degradation) and recommends complementary testing, continuous monitoring, and detailed geotechnical risk mapping to support urban planning and risk mitigation actions.

Keywords: rock slope stability; rock mechanics; geomechanical classification; RMR; SMR; kinematic analysis; Ouro Preto (Brazil).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Principais tipos de rupturas em maciços rochosos:	30
Figura 2 - Localização da área de estudo município de Ouro Preto (MG)	32
Figura 3 - Mapa hipsométrico do município de Ouro Preto (MG)	33
Figura 4 - Mapa geológico do município de Ouro Preto (MG)	33
Figura 5 - Bairro: área de estudo em julho de 2003.	34
Figura 6 - Bairro Barra: área de estudo em julho de 2025.	34
Figura 7 - Bairro Barra: Imagem do maciço rochoso.....	35
Figura 8 - Localização dos pontos de coleta de amostras e medições geomecânicas no bairro Barra, Ouro Preto (MG)	36
Figura 9 - Corpos de prova rochosos preparados e identificados para a realização do ensaio de carga pontual (PLT).	47
Figura 10 - Execução do ensaio de carga pontual (PLT) em amostra rochosa, conforme procedimento laboratorial.	47
Figura 11 - Vista do maciço rochoso no Ponto 01, evidenciando a foliação e o estado superficial das descontinuidades.	55
Figura 12 - Vista do maciço rochoso no Ponto 02, evidenciando a foliação e o estado superficial das descontinuidades.	56
Figura 13 - Vista do maciço rochoso no Ponto 03, evidenciando a foliação e o estado superficial das descontinuidades.	57
Figura 14 - Rede estereográfica (projeção de igual-área, hemisfério inferior) do Ponto 01, com polos e grandes círculos das famílias de descontinuidades e da face do talude, utilizada na análise cinemática de estabilidade.	62
Figura 15 - Rede estereográfica do Ponto 02 com a face do talude e as famílias de descontinuidades.	63
Figura 16 - Rede estereográfica (projeção de igual-área, hemisfério inferior) do Ponto 02, com polos e grandes círculos das famílias de descontinuidades e da face do talude, utilizada na análise cinemática de estabilidade.	64
Figura 17 - Rede estereográfica do Ponto 02 com a face do talude e as famílias de descontinuidades.	65
Figura 18 - Rede estereográfica (projeção de igual-área, hemisfério inferior) do Ponto	

03, com polos e grandes círculos das famílias de descontinuidades e da face do talude, utilizada na análise cinemática de estabilidade.	66
Figura 19 -Rede estereográfica do Ponto 03 com a face do talude e as famílias de descontinuidades.	67
Figura 20 - Síntese dos resultados da análise cinemática por ponto (P-01, P-02 e P-03) - bairro Barra, Ouro Preto (MG).	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da qualidade do maciço rochoso segundo índice RQD.....	21
Tabela 2 -Parâmetros de Classificação do Maciço Rochoso RMR (Bieniawski,1989)	24
Tabela 3 - Orientação das descontinuidades em relação ao eixo da escavação.....	24
Tabela 4 - Significado das classes de maciço.....	25
Tabela 5 - Dados do ensaio PLT por corpo de prova.....	40
Tabela 6 - Inventario dos pontos e atitudes média da estrutura predominante	44
Tabela 7 - Parâmetros geomecânicos utilizados na determinação do índice RMR básico.....	51
Tabela 8 - Pontuação dos parâmetros e cálculo do índice RMR básico do maciço rochoso	52
Tabela 9 - Determinação do índice RMR básico (RMRb) para o maciço rochoso do Bairro Barra.....	60

LISTA DE SIGLAS

UCS – Resistência à Compressão Uniaxial (Uniaxial Compressive Strength)

Is(50) – Índice de Carga Pontual corrigido para 50 mm

PLT – Ensaio de Carga Pontual (Point Load Test)

RMR – Rock Mass Rating – Classificação Geomecânica de Maciços Rochosos

RMR89 – Versão de 1989 da classificação RMR, proposta por Bieniawski

SMR – Slope Mass Rating – Extensão do RMR para avaliação de estabilidade de taludes

K – Fator de conversão entre Is(50) e UCS

RQD – Rock Quality Designation – Índice de Qualidade da Rocha Jv – Densidade volumétrica de descontinuidades

De – Diâmetro equivalente (utilizado na correção do Is para 50 mm) P – Carga de falha aplicada durante o ensaio PLT

D – Distância entre os pontos de contato no ensaio PLT

V1 – Fator relacionado à orientação de descontinuidades (no cálculo do SMR) F – Fator de correção aplicado no cálculo do SMR

CPRM – Serviço Geológico do Brasil (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais)

ISRM – International Society for Rock Mechanics

N – Newton – Unidade de Força no Sistema Internacional (SI) NBR – Norma Brasileira da ABNT

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas PMRR – Plano Municipal de Redução de Risco SIG – Sistema de Informações Geográficas

QGIS – Software de código aberto para SIG (Quantum GIS)

GPS – Global Positioning System – Sistema de Posicionamento Global

ASTM D5731-08 – Norma técnica para determinação do índice de carga pontual em rochas

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVO	14
1.2.1	OBJETIVO GERAL	14
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	INSTABILIDADE DE TALUDES EM CONTEXTO URBANO	15
2.2	PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS E MECÂNICA DAS ROCHAS.....	16
2.3	ENSAIO DE CARGA PONTUAL (POINT LOAD TEST - PLT)	17
2.4	ALTERABILIDADE E INTEMPERISMO EM XISTOS E METAGRAUVAQUES	19
2.5	RQD – ROCK QUALITY DESIGNATION.....	20
2.5.1	METODOLOGIA DE CÁLCULO DO RQD	20
2.5.2	INTERPRETAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DA QUALIDADE DO MACIÇO ROCHOSO	21
2.5.3	APLICAÇÕES NA ENGENHARIA	21
2.5.4	LIMITAÇÕES E CONSIDERAÇÕES	22
2.6	O SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR (ROCK MASS RATING) E SUA APLICAÇÃO EM MACIÇOS RÓCHOSOS ALTERADOS	22
2.7	ANÁLISE CINEMÁTICA DE TALUDES E INTEGRAÇÃO COM O SISTEMA SMR	26
2.7.1	O SMR COMO ADAPTAÇÃO DO RMR PARA TALUDES.....	27
2.7.2	ESTRUTURA DO CÁLCULO DO SMR E FATORES DE AJUSTE	28
2.7.3	CRITÉRIOS CINEMÁTICOS E MODOS DE RUPTURA.....	29
2.7.4	APLICAÇÃO DOS DADOS DE CAMPO AOS RESULTADOS	30
3	METODOLOGIA	31
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	31
3.2	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E PONTOS DE ANÁLISE	35
3.3	TIPO DE PESQUISA.....	36
3.3.1	LEVANTAMENTO DE CAMPO (ESTRUTURAS + RMR).....	37
3.3.2	PARÂMETROS DO RMR EM CAMPO.....	37
3.4	ENSAIOS PLT.....	38
3.4.1	EXECUÇÃO DO ENSAIO (PLT) E CRITÉRIOS DE VALIDADE	39
3.4	TRATAMENTO DOS DADOS (IS, IS(50), UCS, RMR, SMR)	39
3.5.1	CORRELAÇÃO PLT - UCS (ESTIMATIVA DE UCS).....	39

3.5.2	CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR	40
3.5.3	Estabilidade e classificação SMR	41
3.6	INTEGRAÇÃO E MAPEAMENTO / DIRETRIZES	41
3.6.1	INTEGRAÇÃO DOS DADOS E MAPEAMENTO	42
3.6.2	PROPOSIÇÃO DE DIRETRIZES E RECOMENDAÇÕES	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS TALUDES E SETORES AVALIADOS	43
4.1.2	ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS ESTRUTURAIS	45
4.2	ENSAIO DE CARGA PONTUAL (PLT)	45
4.3	TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE CARGA PONTUAL (PLT)	46
4.4	CORRELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE DE CARGA PONTUAL $IS(50)$ E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (ΣC)	48
4.5	CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DO MACIÇO ROCHOSO PELO SISTEMA RMR ..	50
4.5.1	PARÂMETROS UTILIZADOS NA DETERMINAÇÃO DO RMR BÁSICO	51
4.5.2	PONTUAÇÃO DOS PARÂMETROS E CÁLCULO DO RMR BÁSICO (RMRB)	51
4.5.3	CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO	52
4.5	Integração entre RMR e SMR por ponto analisado	52
4.6.1	FUNDAMENTAÇÃO DO MÉTODO SMR	53
4.6.2	PARÂMETROS GEOMÉTRICOS UTILIZADOS	53
4.6.3	CÁLCULO DO SMR E CLASSIFICAÇÃO DO TALUDE	54
4.6.4	INTERPRETAÇÃO DO ÍNDICE SMR POR PONTO ANALISADO	54
4.8	DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE RMR BÁSICO (RMRB)	59
4.9	RESULTADOS DA ANÁLISE CINEMÁTICA E CLASSIFICAÇÃO SMR POR PONTO ..	60
4.9.1	ANÁLISE CINEMÁTICA E CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA - PONTO 01	61
4.9.2	ANÁLISE CINEMÁTICA DO PONTO - 2	63
4.9.3	PONTO 03 - BAIRRO BARRA	65
4.9.4	RESULTADOS DA ANÁLISE CINEMÁTICA (PROJEÇÕES ESTEREOGRÁFICAS)	67
5	CONCLUSÕES	68
5.1	PERSPECTIVAS FUTURAS	70
6	REFERÊNCIAS	70

1. INTRODUÇÃO

A ocupação urbana em áreas de relevo acidentado representa um desafio persistente para a engenharia urbana, sendo o município de Ouro Preto, em Minas Gerais, um exemplo emblemático dessa realidade brasileira. Inserida no Quadrilátero Ferrífero, uma província geológica marcada por estruturas complexas, a cidade tem um histórico de expansão desde o século XVIII, majoritariamente em encostas íngremes. Fenômenos como deslizamentos, corridas de detritos e quedas de blocos não são incomuns e comprometem a segurança de infraestruturas e das comunidades que ali residem (PINHEIRO; SOBREIRA; LANA, 2003; PORTO et al., 2024). O cenário é agravado pela combinação entre adensamento construtivo, cortes em terreno e drenagem deficiente, fatores que ampliam a exposição a movimentos de massa em taludes naturais e escavados. Diante disso, a necessidade de estudos geotécnicos detalhados para o diagnóstico e mitigação desses riscos torna-se uma urgência.

Em levantamentos recentes, 38% da área urbana de Ouro Preto encontra-se em situação crítica quanto ao risco de movimentos de massa, com zonas de alta e extrema suscetibilidade a deslizamentos, o que reforça a necessidade de estudos geotécnicos detalhados e de estratégias de planejamento urbano eficazes (AZEVEDO et al., 2024).

Nesse contexto, a caracterização geomecânica dos maciços rochosos é essencial para avaliar a estabilidade de taludes e propor medidas de mitigação. Entretanto, as rochas predominantes na região, como xistos e metagrauvaques, são metamórficas e frequentemente apresentam elevado grau de intemperismo (CAMPOS et al., 2020), o que dificulta a coleta de amostras com as características exigidas para ensaios laboratoriais convencionais, como o de compressão uniaxial (UCS). Portanto, o Ensaio de Carga Pontual (Point Load Test - PLT) pode ser utilizado como um ensaio de caracterização rápida, fornecendo uma estimativa indireta da resistência da matriz rochosa para alguns materiais da área urbana de Ouro Preto. Entretanto, em rochas anisotrópicas, os resultados podem apresentar maior variabilidade em função da orientação de descontinuidades e da foliação, devendo ser interpretados com cautela. Além de fornecer o índice de carga pontual (I_s) e seu valor corrigido para o diâmetro padrão de 50 mm, $I_{s(50)}$, o PLT é amplamente utilizado como parâmetro de entrada em sistemas de classificação geomecânica e como base para estimativas indiretas da

resistência à compressão uniaxial das rochas (MARQUES et al., 2015).

O presente trabalho tem como objetivo principal caracterizar os materiais rochosos presentes nas encostas urbanas de Ouro Preto utilizando o PLT e caracterizar a resistência da matriz rochosa utilizando o ensaio PLT e, a partir de fatores de conversão estabelecidos na literatura técnica, estimar a resistência à compressão uniaxial (UCS) dos materiais analisados. A partir dessa caracterização, pretende-se aplicar o sistema RMR aos maciços estudados, subsidiando análises de estabilidade de taludes e contribuindo para o aprimoramento do gerenciamento de riscos geotécnicos no município. No contexto urbano, a caracterização geomecânica proposta também tem finalidade aplicada à gestão de risco geotécnico, ao apoiar a identificação de setores com maior suscetibilidade à instabilidade e a priorização de intervenções e restrições de uso do solo no Bairro Barra. Dessa forma, os resultados são apresentados como subsídio técnico ao planejamento urbano, integrando a leitura do maciço rochoso às condicionantes de ocupação e infraestrutura locais. Além de sua relevância técnica, este estudo busca integrar a caracterização geomecânica às necessidades de planejamento urbano sustentável, propondo soluções que conciliam o desenvolvimento com a preservação do patrimônio histórico e cultural da cidade (PREFEITURA DE OURO PRETO, 2024; SOUSA; ÁLVARES, 2019).

1.1 JUSTIFICATIVA

A interação entre o ambiente natural e a ocupação humana em áreas de relevo acidentado configura um cenário desafiador para a engenharia urbana. Ouro Preto, situada em uma província geológica de alta complexidade, apresenta uma combinação de fatores naturais e antrópicos que favorecem movimentos de massa recorrentes, como deslizamentos e quedas de blocos (PINHEIRO; SOBREIRA; LANA, 2003; CAMPOS et al., 2020). A caracterização geomecânica dos maciços rochosos é, portanto, uma etapa essencial para identificar riscos e subsidiar decisões sobre o uso e ocupação do solo.

Métodos tradicionais como o ensaio de compressão uniaxial (UCS) enfrentam limitações significativas na região devido ao alto grau de intemperismo das rochas e à dificuldade de obtenção de corpos de prova íntegros. O PLT, por sua vez, destaca-se como uma solução prática e acessível para essas condições, permitindo

estimativas indiretas da resistência das rochas (MARQUES et al., 2015).

Este trabalho contribui para o avanço técnico e científico ao aplicar e validar o uso do PLT e do RMR em maciços rochosos altamente intemperizados, como os de Ouro Preto. Os resultados poderão subsidiar o planejamento urbano e as políticas públicas de mitigação de riscos, promovendo um desenvolvimento seguro e sustentável (PMOP, 2024; SOUSA; ÁLVARES, 2019).

1.2 OBJETIVO

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Investigar a estabilidade de taludes rochosos em áreas urbanas do município de Ouro Preto por meio da caracterização geomecânica dos maciços com base no Ensaio de Carga Pontual (PLT) e na aplicação dos sistemas de classificação RMR (Rock Mass Rating) e SMR (Slope Mass Rating), com foco na identificação de condições geotécnicas relevantes e nos modos potenciais de instabilidade.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral, foram estabelecidas as seguintes metas específicas:

- Realizar ensaios de carga pontual (PLT) em amostras de materiais rochosos coletadas em encostas urbanas selecionadas no município de Ouro Preto.
- Estimar a resistência à compressão uniaxial (UCS) por meio da aplicação de fatores de conversão (k) recomendados pela ISRM e literatura correlata para rochas metamórficas do Quadrilátero Ferrífero, utilizando os dados obtidos no ensaio de carga pontual $I_s(50)$.
- Aplicar o sistema de classificação geomecânica RMR aos maciços rochosos estudados, considerando as adaptações necessárias para ambientes altamente intemperizados.
- Avaliar a estabilidade de taludes representativos, integrando os resultados da classificação RMR e identificando modos de falha

potenciais.

- Analisar os resultados obtidos com base na bibliografia científica, identificando contribuições teóricas relevantes para o estudo da geomecânica em ambientes urbanos e intemperizados.
- Integrar os resultados de classificação geomecânica e suscetibilidade à instabilidade a uma leitura aplicada ao risco geotécnico, propondo diretrizes técnicas de apoio ao planejamento urbano e à priorização de intervenções em encostas no Bairro Barra.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 INSTABILIDADE DE TALUDES EM CONTEXTO URBANO

A instabilidade de taludes ocorre quando uma encosta natural ou escavada perde sua condição de equilíbrio e passa a se movimentar. Esses fenômenos apresentam diferentes tipologias, tradicionalmente descritas como escorregamentos (em superfícies planares, curvas ou em cunha), tombamentos, quedas de blocos, rastejos, corridas e subsidência (VARNES, 1978). Em geral, tratam-se de movimentos governados pela gravidade ao longo das encostas (“mass movements” ou “mass wasting”, excetuando-se a subsidência).

Em áreas urbanas, a vulnerabilidade tende a aumentar pela intervenção antrópica: cortes em encostas, implantação de edificações e vias, impermeabilização extensiva e sistemas de drenagem insuficientes. Essas alterações modificam o balanço hídrico, concentram o escoamento e intensificam a infiltração localizada, elevando a pressão de água em fraturas e demais descontinuidades. O incremento de pressão neutra reduz a tensão efetiva e favorece a ativação de superfícies potenciais de ruptura, especialmente durante eventos de chuvas intensas (LAMBE; WHITMAN, 1969; CPRM, 2018).

Embora o foco deste trabalho recaia sobre maciços rochosos, a compreensão desse comportamento é fundamental, pois a interface solo/rocha frequentemente constitui a zona mais suscetível à instabilidade nos taludes urbanos analisados, onde processos iniciados na camada residual podem interagir com descontinuidades da

rocha subjacente (CPRM, 2018).

Do ponto de vista da avaliação técnica, a caracterização dos mecanismos e dos fatores condicionantes/deflagradores subsidia a escolha de métodos de investigação e de classificação geomecânica, bem como os critérios de resistência a adotar em análises de estabilidade.

2.2 PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS E MECÂNICA DAS ROCHAS

A avaliação da estabilidade de taludes exige uma compreensão aprofundada das propriedades físico-mecânicas dos materiais rochosos. Para tal, é essencial distinguir dois conceitos fundamentais: a rocha intacta e o maciço rochoso. A rocha intacta representa o material homogêneo e sem descontinuidades visíveis, cujas propriedades mecânicas, como resistência à compressão e deformabilidade, podem ser quantificadas por meio de parâmetros específicos, como o módulo de elasticidade, obtidos em ensaios laboratoriais em corpos de prova padronizados.

Por outro lado, o maciço rochoso é uma estrutura mais complexa, composta pela rocha intacta e suas descontinuidades naturais, como fraturas, juntas e foliações, que influenciam diretamente seu comportamento geomecânico (BIENIAWSKI, 1989). A presença de tais descontinuidades gera anisotropia, dificultando a previsão da resistência e da deformabilidade, entendida aqui como a capacidade geral de o maciço se deformar sob a ação de esforços. É importante diferenciar esse conceito de ductilidade, que se refere especificamente à capacidade do material de sofrer deformações plásticas significativas sem fraturar. Parâmetros como coesão, ângulo de atrito interno e grau de intemperismo também desempenham papel crítico na definição da estabilidade.

Em regiões tropicais úmidas, como Ouro Preto, o intemperismo químico e físico atua intensamente, alterando a mineralogia e a estrutura das rochas metamórficas predominantes, como xistos e metagrauvaques. Esses processos resultam no aumento da porosidade, na redução da coesão interna e, conseqüentemente, na diminuição da resistência ao cisalhamento. No caso dos solos, a saturação eleva a pressão de água, reduzindo a tensão efetiva e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento. Nos maciços rochosos fraturados, embora o conceito de pressão de água não se aplique da mesma forma, a infiltração pode reduzir a coesão e aumentar

a instabilidade.

A resistência das rochas intemperizadas tende a apresentar ainda maior variabilidade em função do grau de alteração química dos minerais, da heterogeneidade microestrutural e da presença de zonas preferenciais de decomposição, como discutido por Mendes, Teixeira e Hernandez (2025). Assim, compreender essas propriedades e seus efeitos é indispensável para análises precisas de estabilidade e para o planejamento de intervenções técnicas adequadas.

2.3 ENSAIO DE CARGA PONTUAL (POINT LOAD TEST - PLT)

Na área de geotecnia, o ensaio de carga pontual (Point Load Test – PLT) é amplamente empregado como uma ferramenta prática de caracterização rápida para estimar, de forma indireta, a resistência da matriz rochosa, sobretudo em condições de campo. Desenvolvido nos anos 1970 e incorporado às recomendações da ISRM em 1985, o método consolidou-se por ser rápido, acessível e funcional. A resistência à compressão uniaxial (UCS) é usualmente tratada como parâmetro de referência para a resistência da rocha intacta, porém sua determinação direta demanda corpos de prova padronizados e infraestrutura laboratorial, o que eleva custos e limita a aplicação em materiais fraturados e alterados. O PLT se mostra especialmente útil em situações em que a coleta ou o preparo de amostras cilíndricas para ensaios convencionais é inviável, como em afloramentos fraturados ou áreas de difícil acesso no campo.

Uma das maiores vantagens do PLT reside em sua flexibilidade operacional. Por não exigir uma preparação refinada das amostras, o ensaio pode ser realizado em fragmentos de rocha com geometrias irregulares, sejam eles discóides, cilíndricos ou angulosos. O procedimento é relativamente simples: a amostra é submetida a uma carga crescente aplicada por um dispositivo que a comprime entre duas pontas metálicas até a ruptura. A partir da carga necessária para essa ruptura e das dimensões do corpo de prova, calcula-se o índice de carga pontual bruto (I_s), um parâmetro indireto que oferece subsídios importantes sobre o comportamento mecânico do material.

De acordo com as diretrizes da ISRM (1985), o PLT se revela particularmente valioso em ambientes com restrições logísticas, como taludes urbanos ou regiões de difícil acesso, devido à simplicidade de seu equipamento e à possibilidade de ensaiar

fragmentos com geometria irregular. No entanto, apesar de sua aplicabilidade, o método apresenta limitações: quando realizado em rochas muito fraturadas, foliadas (anisotrópicas) ou alteradas, pode resultar em maior variabilidade dos resultados e em subestimativas da resistência real do maciço, exigindo cautela na interpretação dos dados.

Inicialmente, o índice de carga pontual bruto (I_s) é determinado a partir da carga de ruptura e da dimensão característica da amostra, conforme a Equação 1:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (1)$$

Quando a carga de ruptura P é fornecida em Newtons (N) e o diâmetro equivalente D_e em milímetros (mm), o índice de carga pontual I_s obtido pela Equação 1 é expresso em megapascal (MPa). Em seguida, aplica-se o fator de correção F para ajustar esse valor ao diâmetro padrão de 50 mm, obtendo-se o índice corrigido $I_s(50)$, conforme a Equação 2:

$$I_s(50) = F \cdot I_s \quad (2)$$

$$F = (D_e/50)^{0,45} \quad (3)$$

em que D_e é o diâmetro equivalente da amostra (mm) e 50 mm é o diâmetro padrão de referência (ISRM, 1985).

Uma das principais utilizações do PLT é a correlação empírica entre $I_s(50)$ e a resistência à compressão uniaxial (UCS) da rocha intacta, por meio de relações empíricas. Uma forma frequentemente utilizada é:

$$UCS \approx k \cdot I_s(50) \quad (4)$$

com k variando geralmente entre 20 e 25, dependendo do tipo de rocha e de seu grau de alteração (BIENIAWSKI, 1989; JAEGER; COOK, 1979). Adicionalmente, estudos aplicados ao método têm corroborado sua utilização como parâmetro de caracterização preliminar da resistência de diferentes materiais rochosos, incluindo litologias metamórficas, desde que sejam observadas as limitações do ensaio em materiais anisotrópicos e/ou muito alterados (ISRM, 1985; BROCH; FRANKLIN, 1972).

2.4 ALTERABILIDADE E INTEMPERISMO EM XISTOS E METAGRAUVAQUES

O comportamento dos maciços rochosos é fortemente condicionado por suas descontinuidades, foliações e estruturas internas, elementos que influenciam diretamente a resistência mecânica do material e a sua resposta aos processos de intemperismo físico-químico (BIENIAWSKI, 1989). Ouro Preto, situada no coração do Quadrilátero Ferrífero, apresenta uma geologia complexa, marcada por intenso histórico tectônico e deformacional e pela predominância de rochas metamórficas, como xistos e metagrauvaques.

As encostas da região são caracterizadas por fraturas e planos de foliação que atuam como caminhos preferenciais para a infiltração de água e a progressão de reações químicas, acelerando o intemperismo e comprometendo a integridade dos maciços. Nos xistos, a foliação intensa, formada pela orientação de minerais como mica, clorita e quartzo durante o metamorfismo regional, configura planos de fraqueza que favorecem a propagação de fraturas. Já os metagrauvaques, embora apresentem menor grau de foliação, possuem matriz argilosa e minerais suscetíveis à alteração, o que também os torna vulneráveis à degradação.

Com a progressão do intemperismo, observa-se um aumento da porosidade e a perda de coesão entre os grãos minerais, resultando na redução significativa da resistência ao cisalhamento e da resistência à tração. Durante períodos de elevada pluviosidade, a água pode penetrar e pressurizar as descontinuidades, reduzindo a tensão normal efetiva entre as paredes dessas superfícies e, conseqüentemente, diminuindo a resistência ao cisalhamento ao longo das descontinuidades, criando condições propícias para deslizamentos superficiais e desprendimentos de blocos. Segundo Mendes, Teixeira e Hernandez (2025), em rochas como xistos e grauvaques, a água infiltra-se facilmente pelas descontinuidades, acelerando a alteração mineralógica e ampliando os riscos de instabilidade. A CPRM (2018) também aponta que áreas compostas por essas litologias, associadas à ocupação urbana desordenada e à deficiência em sistemas de drenagem, apresentam maior suscetibilidade a movimentos de massa.

Nesse contexto, compreender o comportamento alterado dos xistos e metagrauvaques é essencial para avaliar a estabilidade das encostas urbanas, onde

a interação entre geologia, clima e pressão antrópica agrava os riscos. Ensaio como o Point Load Test (PLT) podem ser empregados como ferramenta de caracterização rápida para estimar a resistência da matriz rochosa em diferentes estágios de intemperismo, devendo-se adotar cautela na interpretação em materiais anisotrópicos, muito fraturados ou alterados. A possibilidade de obtenção de parâmetros de forma ágil reforça sua aplicabilidade como suporte ao monitoramento geotécnico e ao planejamento urbano de Ouro Preto.

2.5 RQD – ROCK QUALITY DESIGNATION

O RQD (Rock Quality Designation) é amplamente empregado em estudos geotécnicos como indicador da qualidade e do grau de fraturamento de maciços rochosos, fundamentado na análise de testemunhos de sondagem. Proposto por Deere (1964), o método tornou-se uma métrica comum para avaliar a integridade estrutural dos maciços, sendo definido como “a porcentagem de segmentos de testemunho intactos com comprimento igual ou superior a 100 mm em relação ao comprimento total da sondagem” (DEERE, 1964, p. 18). Sua importância foi incorporada aos principais sistemas de classificação geomecânica, como o Rock Mass Rating (RMR), no qual o RQD figura entre os seis parâmetros fundamentais (BIENIAWSKI, 1979, p. 37). Além de quantificar o grau de fraturamento, o RQD fornece subsídios técnicos para decisões relacionadas a métodos de escavação, dimensionamento de suportes e viabilidade de fundações profundas em maciços rochosos.

2.5.1 METODOLOGIA DE CÁLCULO DO RQD

O cálculo do Rock Quality Designation (RQD) consiste em somar os comprimentos dos segmentos de testemunho classificados como “sãos”, ou seja, intactos e com comprimento igual ou superior a 100 mm. Esse total é dividido pelo comprimento da sondagem e multiplicado por 100, resultando no índice percentual que expressa a qualidade do maciço rochoso. Segundo a International Society for Rock Mechanics (ISRM, 1978, p. 320), apenas segmentos com comprimento superior a 100 mm devem ser considerados no cálculo, garantindo a representatividade do

índice.

Para assegurar resultados confiáveis, recomenda-se o uso de amostradores de parede dupla ou tripla com diâmetro igual ou superior a 76 mm, conforme orientam as diretrizes internacionais (ISRM, 1978, p. 320). Essa precaução minimiza a perda de material durante a sondagem e preserva a integridade do testemunho.

2.5.2 INTERPRETAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DA QUALIDADE DO MACIÇO ROCHOSO

O valor do RQD reflete diretamente o grau de fraturamento do maciço rochoso. Quando os valores são elevados, indicam uma integridade excelente e continuidade estrutural, enquanto valores baixos sugerem alta fragmentação ou intemperismo. Segundo Deere e Deere (1989), o índice RQD permite classificar a qualidade conforme mostrado na tabela 1:

Tabela 1 - Classificação da qualidade do maciço rochoso segundo índice RQD

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

Fonte: Adaptado de DEERE (1989)

2.5.3 APLICAÇÕES NA ENGENHARIA

O Rock Quality Designation (RQD) é amplamente utilizado em estudos geotécnicos para avaliar a estabilidade de taludes, dimensionar fundações profundas, projetar túneis e definir sistemas de contenção. Em áreas urbanas com afloramentos metamórficos, como no bairro Barra, em Ouro Preto o índice tem se mostrado uma ferramenta útil para diagnosticar o grau de fraturamento de xisto metagrauwaques. Essa análise subsidia a escolha de técnicas de contenção adequadas e estratégias preventivas de gestão de riscos geotécnicos.

2.5.4 LIMITAÇÕES E CONSIDERAÇÕES

Embora seja amplamente utilizado, o RQD apresenta limitações que precisam ser consideradas com cautela. O índice não leva em conta fatores essenciais, como a espessura e a abertura das juntas, o tipo de preenchimento e a orientação das descontinuidades, elementos cruciais para uma avaliação precisa da estabilidade.

Além disso, ao desconsiderar fragmentos com menos de 10 cm, o método pode subestimar as condições de maciços intensamente fraturados (ZHAO; ZHI, 2015). Soma-se a isso a subjetividade do processo, uma vez que a experiência do operador pode influenciar diretamente a determinação do RQD (ISRM, 1978, p. 321). Outro aspecto relevante é que o valor do RQD pode variar significativamente de acordo com a direção do furo de sondagem, uma vez que o índice depende da orientação da medição em relação às descontinuidades presentes no maciço. Assim, diferentes orientações podem gerar diferentes interpretações sobre a qualidade da rocha, exigindo atenção na análise multidirecional.

2.6 O SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR (ROCK MASS RATING) E SUA APLICAÇÃO EM MACIÇOS ROCHOSOS ALTERADOS

A compreensão do comportamento de maciços rochosos é uma etapa essencial nos estudos geotécnicos, especialmente para garantir a estabilidade e a segurança de obras civis. Para lidar com essa complexidade, surgiram sistemas de classificação geomecânica, entre os quais o Rock Mass Rating (RMR) se consolidou como um dos mais relevantes. Bieniawski (1989) desenvolveu a classificação RMR em 1973, na África do Sul. O método foi inicialmente concebido para projetos de escavações subterrâneas. Com o tempo, sua aplicabilidade expandiu-se para fundações e taludes, consolidando-se como uma ferramenta versátil na engenharia geotécnica. A versão mais amplamente utilizada, o RMR89, incorpora avanços técnicos e décadas de experiência prática (BIENIAWSKI, 1989; CAMPOS et al., 2020).

O RMR sintetiza múltiplas características de um maciço rochoso em um índice numérico, facilitando a previsão de seu comportamento em diferentes contextos de engenharia, como escavações, taludes e túneis. O cálculo do índice baseia-se na análise de seis parâmetros fundamentais, que recebem pontuações específicas. A soma desses valores resulta em um escore final entre 0 e 100, classificando o maciço

em categorias que vão de “muito ruim” a “muito bom” (BIENIAWSKI, 1989).
Parâmetros do RMR:

Resistência à Compressão Uniaxial (UCS): Avalia a resistência da rocha intacta, desconsiderando descontinuidades. Pontuação: 0-15. Pode ser obtida por ensaios laboratoriais diretos ou estimada pelo Point Load Test (PLT), útil para rochas frágeis ou alteradas. Índice de Qualidade da Rocha (RQD): Representa o grau de fraturamento com base no comprimento de testemunhos de sondagem. Pontuação: 3-20.

Espaçamento das descontinuidades: Mede a distância média entre fraturas e juntas. Pontuação: 0,5-20

Condição das descontinuidades: Considera rugosidade, intemperismo, preenchimento, persistência e abertura. É um dos parâmetros mais relevantes, com pontuação de 0-30, e depende do julgamento técnico do engenheiro ou geólogo (BIENIAWSKI, 1989).

Condições da água subterrânea: Avalia o impacto da água sobre o maciço, com pontuações de 0-15 conforme a taxa de fluxo ou umidade observada.

Orientação das descontinuidades: Aplica ajustes ao índice considerando o alinhamento das fraturas em relação à obra (talude ou túnel). Orientações desfavoráveis implicam penalizações.

A tabela 2, adaptada de Bieniawski (1989), apresenta as faixas de valores e as respectivas pontuações para cada parâmetro, além das classes de qualidade do maciço rochoso.

Tabela 2 - Parâmetros de Classificação do Maciço Rochoso RMR (Bieniawski, 1989)

A. Parâmetros de classificação e notas							
A1. Resistência da rocha intacta							
Parâmetro	valores						
Índice de compressão pontiforme (Mpa)	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Ensaio de compressão uniaxial preferido		
Resistência a compressão simples (Mpa)	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	< 1
Peso relativo J_{A1}	15	12	7	4	2	1	0
A2. Qualidade do testemunho RQD							
	90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
Peso relativo J_{A2}	20	17	13	8	3		
A3. Espaçamento das descontinuidades (m)							
	> 2	2 a 0,6	0,6 a 0,2	0,2 a 0,06	< 0,06		
Peso relativo J_{A3}	20	15	10	8	5		
A4. Condição das descontinuidades (veja E)							
	Superfícies muito rugosas, descontinuidades fechadas, paredes duras e não alteradas	Paredes pouco rugosas, aberturas < 1 mm. Paredes ligeiramente alteradas	Paredes pouco rugosas, aberturas < 1 mm. Paredes muito alteradas	Superfícies estriadas ou preenchimento < 5 mm de espessura ou aberturas > 5 mm. Juntas persistentes	Preenchimento mole de espessura > 5 mm ou aberturas > 5 mm. Juntas persistentes		
Peso relativo J_{A4}	30	25	20	10	0		
A5. água subterrânea							
Infiltração em 10 m de túnel (L/min)	Nenhuma	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
Poropressão na junta/tensão principal σ	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
Condições gerais	Completamente seco	Umidade (água intersticial)	molhada	Gotejamento	Fluxo abundante		
Peso relativo J_{A5}	15	10	7	4	0		

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989)

Tabela 3 - Orientação das descontinuidades em relação ao eixo da escavação.

Orientação das descontinuidades	Muito favorável	Favorável	Regular	Desfavorável	Muito Desfavorável
Túneis	0	-2	-5	-10	-12
Fundações	0	-2	-7	-15	-25
Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989)

Tabela 4 - Significado das classes de maciço

Classe do Maciço	I	II	III	IV	V
Coesão (Kpa)	> 400	300-400	200-300	100-200	< 100
Ângulo de atrito	>45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	< 15°

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989)

Entre os seis parâmetros avaliados pelo sistema RMR, dois se destacam no contexto geológico de Ouro Preto, marcado pela complexidade litológica e pelo alto grau de intemperismo dos maciços rochosos.

O primeiro é a UCS da rocha intacta, parâmetro essencial para expressar a capacidade da rocha de suportar esforços sem a influência das discontinuidades. Embora o ensaio uniaxial em laboratório seja o método padrão para determinar a UCS, nem sempre é possível obter amostras de qualidade adequada, especialmente em maciços fraturados e alterados, como os do Quadrilátero Ferrífero. Nessas situações, o Point Load Test (PLT) surge como uma alternativa prática e acessível. Entretanto, em classificações como o RMR, o resultado do PLT pode ser utilizado diretamente por meio de tabelas empíricas para estimativa do parâmetro V1, sem a necessidade de conversão para UCS. Ainda assim, quando houver interesse em obter a UCS a partir do PLT, é importante considerar o fator de correção (K), cuja magnitude varia conforme o tipo de rocha e suas propriedades específicas (MARQUES et al., 2015).

Outro parâmetro crítico é a condição das discontinuidades, que exerce grande influência no score final do RMR. Aspectos como rugosidade das superfícies fraturadas, grau de intemperismo, presença de materiais de preenchimento e continuidade das discontinuidades devem ser avaliados com rigor. Em áreas como Ouro Preto, onde o intemperismo é intenso, essa avaliação exige experiência técnica e sensibilidade por parte do profissional, pois envolve critérios que devem ser aplicados com base nas condições observadas em campo (BIENIAWSKI, 1989; CAMPOS et al., 2020). A aplicação do RMR em maciços altamente intemperizados, como os da Serra de Ouro Preto, tem sido apontada como um desafio na literatura. Diversos autores sugerem ajustes no sistema RMR89 para representá-lo melhor nessas condições. Uma proposta relevante é a utilização do Rock Quality Index (RQI) como correção do RQD em rochas alteradas, que já demonstrou resultados positivos

em estudos realizados na região (ZENÓBIO, ZUQUETTE, 2006; CAMPOS et al., 2014).

Essa discussão torna-se ainda mais significativa quando se considera que os dados do RMR podem subsidiar decisões estratégicas no planejamento urbano e na gestão de riscos geotécnicos. Em cidades como Ouro Preto, onde a ocupação frequentemente ocorre em áreas de encosta, a classificação geomecânica dos maciços fornece uma base técnica essencial. Ela orienta o zoneamento de áreas de risco, embasa diretrizes de uso e ocupação do solo e apoiar políticas públicas que conciliam segurança, desenvolvimento urbano e preservação do patrimônio histórico (PMOP, 2024; SOUSA & ÁLVARES, 2019).

2.7 ANÁLISE CINEMÁTICA DE TALUDES E INTEGRAÇÃO COM O SISTEMA SMR

Uma vez caracterizada a qualidade geomecânica dos maciços por meio do sistema RMR, torna-se necessário avaliar a relação geométrica entre as discontinuidades e a face dos taludes, o que é feito por meio da análise cinemática. A análise cinemática é uma ferramenta utilizada para verificar se a orientação das discontinuidades permite, do ponto de vista geométrico, o movimento de blocos rochosos. Segundo Silva (2023), a orientação das discontinuidades (direção e mergulho) em relação à face livre do talude é o parâmetro-chave para determinar se as estruturas possuem condições favoráveis à ruptura. Essa técnica avalia apenas a viabilidade geométrica do movimento, sem considerar as forças atuantes, utilizando projeções estereográficas para representar a relação espacial entre as estruturas. Estudos recentes aplicados ao contexto brasileiro têm reforçado a importância da integração entre mapeamento estrutural, análise cinemática e classificações geomecânicas para avaliação de taludes rochosos (BOTTECCHIA et al., 2025).

Os critérios geométricos de ruptura em maciços de rocha são definidos pela interação entre a geometria do talude e a rede de discontinuidades. Esses critérios permitem identificar, de forma preliminar, quais mecanismos de ruptura são geometricamente possíveis em cada talude analisado. De acordo com Goodman (1989), os três modos fundamentais que governam a instabilidade de blocos são:

Ruptura Planar: Caracteriza-se pelo movimento que ocorre exclusivamente sob

a influência da gravidade quando um bloco rochoso repousa sobre uma superfície de fraqueza inclinada. Para que o deslizamento ocorra, é imperativo que este plano aflore na face livre do talude. Cinematicamente, as condições são satisfeitas quando o mergulho da descontinuidade (Ψ_p) é inferior ao mergulho da face (Ψ_f) mas excede o ângulo de atrito interno (Φ) da junta, com uma tolerância direcional de aproximadamente 20° em relação à face.

Ruptura em Cunha: Este fenômeno ocorre através da intersecção de dois planos de fraqueza que delimitam um bloco de formato tetraédrico. Diferente da ruptura planar, o deslizamento se processa ao longo da linha de intersecção gerada por esses planos. A instabilidade é viável se o mergulho desta linha for menor que o da face do talude e maior que a resistência friccional média das superfícies envolvidas.

Ruptura por Tombamento: Envolve o capotamento ou a rotação de camadas rochosas sobre uma base fixa, assemelhando-se ao comportamento de vigas em balanço. Este modo é particularmente comum em litologias como ardósias e xistos, cujas estruturas estão inclinadas de forma acentuada para o interior da encosta. Goodman (1989) ressalta que, antes de ocorrerem grandes deformações por flexão, é necessário que haja um deslizamento prévio entre as camadas.

A análise cinemática foi empregada para verificar a compatibilidade geométrica entre famílias de descontinuidades e a orientação dos taludes, permitindo identificar os modos de ruptura potencialmente admissíveis para cada ponto analisado. Os resultados dessa etapa subsidiam a interpretação dos condicionantes estruturais de instabilidade, os quais são posteriormente integrados à classificação geomecânica adotada no trabalho.

2.7.1 O SMR COMO ADAPTAÇÃO DO RMR PARA TALUDES

O sistema RMR (Rock Mass Rating) é amplamente consolidado na engenharia geotécnica para a caracterização de maciços rochosos, fornecendo uma base quantitativa para a avaliação da qualidade geomecânica global (BIENIAWSKI, 1989). No entanto, sua aplicação direta em taludes a céu aberto apresenta limitações, uma vez que o sistema original foi desenvolvido no contexto da engenharia de rochas e difundido inicialmente com forte ênfase em escavações subterrâneas, não ponderando de forma suficiente a influência da orientação das descontinuidades em

relação à face livre do talude (BIENIAWSKI, 1973; BIENIAWSKI, 1989).

Em encostas e cortes rochosos, a relação geométrica entre as atitudes das estruturas geológicas (como foliação/xistosidade e fraturas) e a geometria da escavação tende a controlar os mecanismos de instabilidade. Para suprir essa lacuna, Romana (1985) propôs o Slope Mass Rating (SMR), um sistema que parte do índice RMR básico e aplica fatores de correção específicos associados à orientação estrutural e ao método de escavação empregado (ROMANA, 1985).

Essa adaptação é particularmente relevante no contexto dos taludes urbanos de Ouro Preto, onde a anisotropia dos maciços foliados e o grau de intemperismo exigem uma avaliação que integre a qualidade intrínseca da rocha à sua disposição espacial. Neste estudo, os resultados obtidos pelo Ensaio de Carga Pontual (PLT) fundamentam a caracterização da resistência da rocha intacta, dado essencial que subsidia a classificação geomecânica básica, posteriormente ajustada às condições de talude pelo sistema SMR.

Conforme detalhado por Romana, Serón e Montalar (2003), o cálculo do índice pode ser expresso por:

$$SMR = RMR_{básico} + (F1 \cdot F2 \cdot F3) + F4 \quad (5)$$

O fator F1 avalia o paralelismo entre as direções de mergulho do talude e das descontinuidades; F2 relaciona-se à influência do mergulho da descontinuidade no modo de ruptura; F3 representa a relação entre o mergulho da descontinuidade e o mergulho do talude, refletindo a condição de afloramento; e F4 ajusta o índice em função do método de escavação e do nível de dano induzido. A partir do SMR, torna-se possível classificar a estabilidade do talude em categorias, permitindo integrar os condicionantes estruturais identificados pela análise cinemática a uma avaliação geomecânica aplicada ao contexto de encostas urbanas.

Dessa forma, o SMR não substitui a análise de estabilidade clássica, mas atua como um indicador quantitativo de suscetibilidade à ruptura, permitindo classificar a condição de estabilidade preliminar dos setores avaliados e orientar a identificação dos modos de falha mais prováveis.

2.7.2 ESTRUTURA DO CÁLCULO DO SMR E FATORES DE AJUSTE

A obtenção do índice SMR baseia-se no valor do RMR básico (RMR_b),

entendido como o valor do RMR sem a correção de orientação das descontinuidades, mantendo-se os demais parâmetros do sistema adotado (incluindo a condição de água, quando aplicável). A equação proposta por Romana (1985) é expressa como:

$$SMR = RMR_b + (F1 \cdot F2 \cdot F3) + F4 \quad (6)$$

A atribuição dos fatores F1, F2 e F3 depende do modo de ruptura considerado (planar, cunha ou tombamento), o qual deve ser previamente identificado por critérios cinemáticos (ROMANA, 1985). Os fatores de ajuste desempenham funções específicas na correção do índice para a realidade de taludes:

- Fator F1 (relação direcional): Avalia a relação entre a direção (strike) das descontinuidades e a direção da face do talude, por meio do ângulo de diferença entre essas direções. Configurações mais desfavoráveis tendem a reduzir o valor do fator, elevando a penalização (ROMANA, 1985).
- Fator F2 (mergulho da descontinuidade): Refere-se ao ângulo de mergulho da descontinuidade (considerando o modo de ruptura em análise) e pondera a criticidade da inclinação estrutural para o deslizamento/instabilização (ROMANA, 1985).
- Fator F3 (relação entre mergulhos): Analisa a relação geométrica entre o mergulho da(s) descontinuidade(s) e a inclinação do talude, refletindo a probabilidade de a estrutura aflorar na face da escavação e penalizando configurações geométricas desfavoráveis (ROMANA, 1985).
- Fator F4 (método de escavação): Considera a perturbação gerada no maciço pelo método construtivo. Taludes naturais ou escavados mecanicamente tendem a sofrer menor penalização do que aqueles executados com desmonte por explosivos deficiente (ROMANA, 1985).

2.7.3 CRITÉRIOS CINEMÁTICOS E MODOS DE RUPTURA

A aplicação do SMR deve ser necessariamente precedida ou acompanhada de uma análise cinemática, que consiste na verificação geométrica da possibilidade de movimento dos blocos ou massas rochosas, desconsiderando inicialmente as forças atuantes. Utilizando projeções estereográficas, investiga-se a viabilidade de ocorrência dos principais modos de ruptura controlados por estruturas:

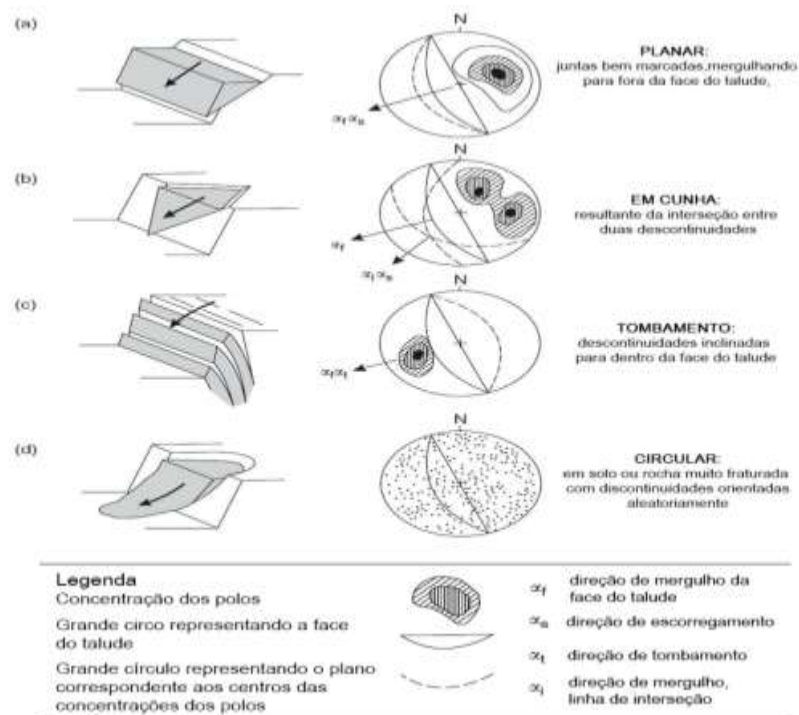
- Ruptura planar: Deslizamento ao longo de um único plano de

descontinuidade que mergulha em direção à face livre do talude.

- Ruptura em cunha: Deslizamento ao longo da linha de interseção de dois planos de descontinuidades.
- Tombamento: Rotação de blocos ou colunas de rocha, comum em maciços com foliação verticalizada ou mergulhando abruptamente contra a face do talude.

A figura 3 apresenta os principais modos de rupturas, existentes para maciços rochosos:

Figura 1- Principais tipos de rupturas em maciços rochosos:



Fonte: Adaptado de Wyllie e Mah (2004) pela autora (2023)

A análise cinemática permite filtrar quais mecanismos são geometricamente admissíveis, assegurando que o cálculo do SMR seja direcionado para o modo de falha crítico identificado em cada setor.

2.7.4 APLICAÇÃO DOS DADOS DE CAMPO AOS RESULTADOS

No presente trabalho, os dados estruturais coletados em campo (direção e mergulho das famílias de descontinuidades e da foliação principal) são integrados à

geometria dos taludes mapeados no Bairro Barra. Essa integração permite, primeiramente, a triagem dos modos de ruptura potenciais via análise cinemática e, na sequência, a determinação dos fatores F1, F2 e F3 específicos para cada caso. Os procedimentos de integração e cálculo são detalhados no Capítulo 3 (Metodologia).

O resultado final consiste na espacialização da suscetibilidade à instabilização dos maciços, fundamentada tanto na qualidade geomecânica (apoiada pelo PLT) quanto na configuração estrutural das encostas.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa tem como objetivo central caracterizar a geomecânica aplicada ao contexto urbano específico de Ouro Preto (MG). Para alcançar este objetivo, adotou-se uma metodologia que combina abordagens experimentais e analíticas, abrangendo etapas de campo, ensaios laboratoriais e análises integradas dos dados geotécnicos para apoiar o planejamento urbano e a gestão de riscos geológicos na região. Durante o reconhecimento de campo, também foram anotados indícios de condicionantes de instabilização relevantes ao meio urbano, como presença de blocos instáveis/deposição de blocos, pontos de infiltração/gotejamento, além de sinais de deficiência de drenagem e possíveis contribuições antrópicas (por exemplo, vazamentos localizados), quando observáveis.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no bairro Barra, município de Ouro Preto (MG), inserida no Quadrilátero Ferrífero, uma região geologicamente complexa caracterizada pela predominância de rochas metamórficas, como xistos, filitos e metagrauvaques. A escolha da área se justifica pela ocupação em encostas íngremes, elevada suscetibilidade a movimentos de massa e histórico de instabilidades agravadas pelo intenso intemperismo e pela ausência de infraestrutura de drenagem adequada.

Para contextualizar espacialmente a pesquisa, foram elaborados três mapas temáticos utilizando o software QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2025):

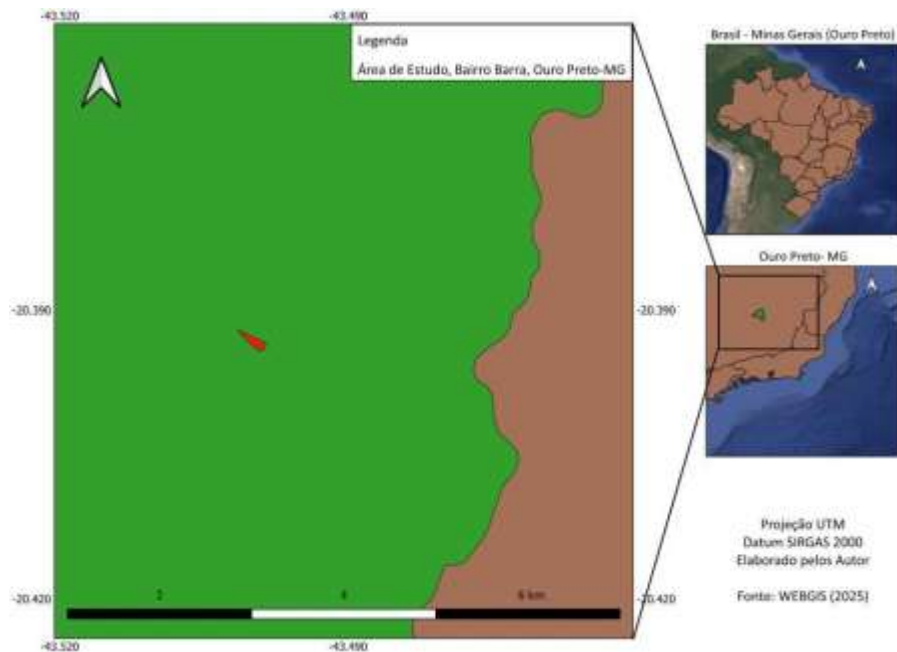
- Mapa de localização, situando a área de estudo no município de Ouro

Preto e no estado de Minas Gerais;

- Mapa geológico, representando as principais litologias presentes na região;
- Mapa hipsométrico, evidenciando a variação altimétrica local, relevante para a análise da estabilidade dos taludes.

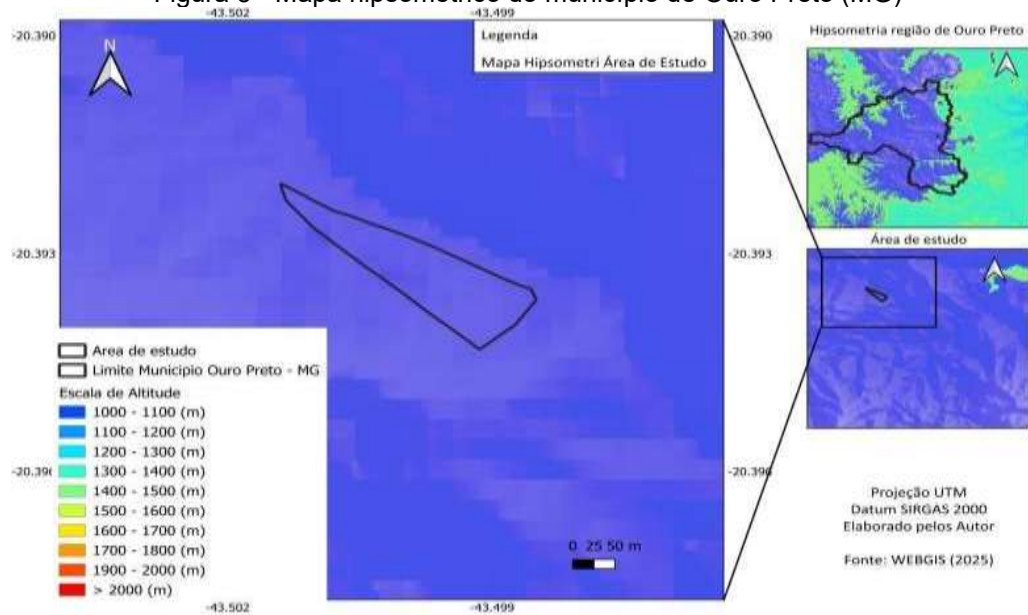
Esses produtos cartográficos foram fundamentais para a compreensão da configuração geológica, geomorfológica e altimétrica da área, subsidiando as etapas de mapeamento geomecânico e classificação dos maciços rochosos.

Figura 2 - Localização da área de estudo município de Ouro Preto (MG)



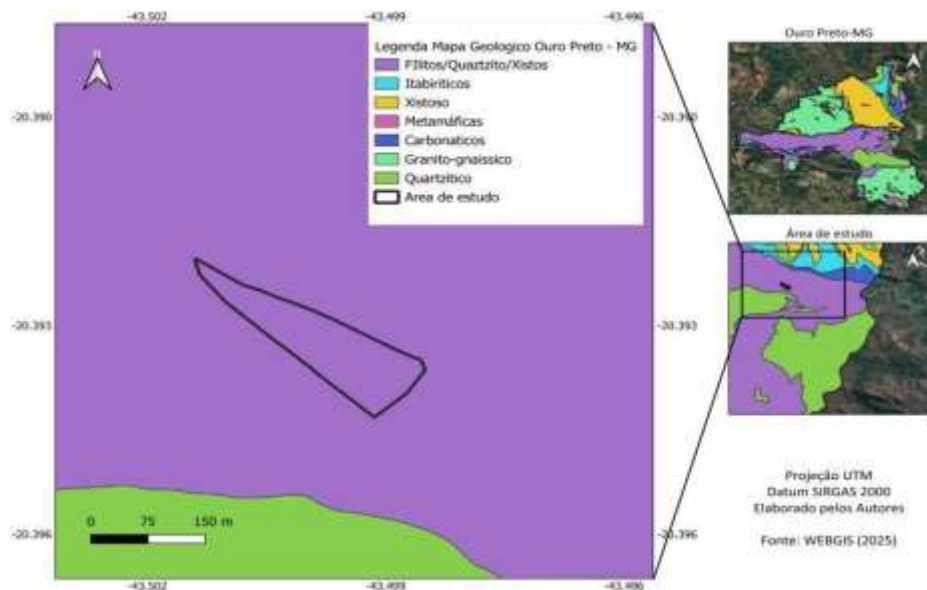
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 3 - Mapa hipsométrico do município de Ouro Preto (MG)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4 - Mapa geológico do município de Ouro Preto (MG)



Fonte: Elaborado pelo autor

As figuras 5 e 6 apresentam a evolução da ocupação urbana no bairro Barra nos anos de 2003 e 2025, evidenciando o adensamento das construções ao longo das encostas e o avanço sobre áreas de preservação. Observa-se que, com o passar do tempo, a cobertura vegetal original foi progressivamente substituída por edificações, o que potencializa o risco geotécnico e requer medidas de contenção e

monitoramento.

Figura 5 - Bairro: área de estudo em julho de 2003.



Fonte: Autoral

Figura 6 - Bairro Barra: área de estudo em julho de 2025.



Fonte: Autoral

Figura 7 - Bairro Barra: Imagem do maciço rochoso.



Fonte: Elaborado pelo autor

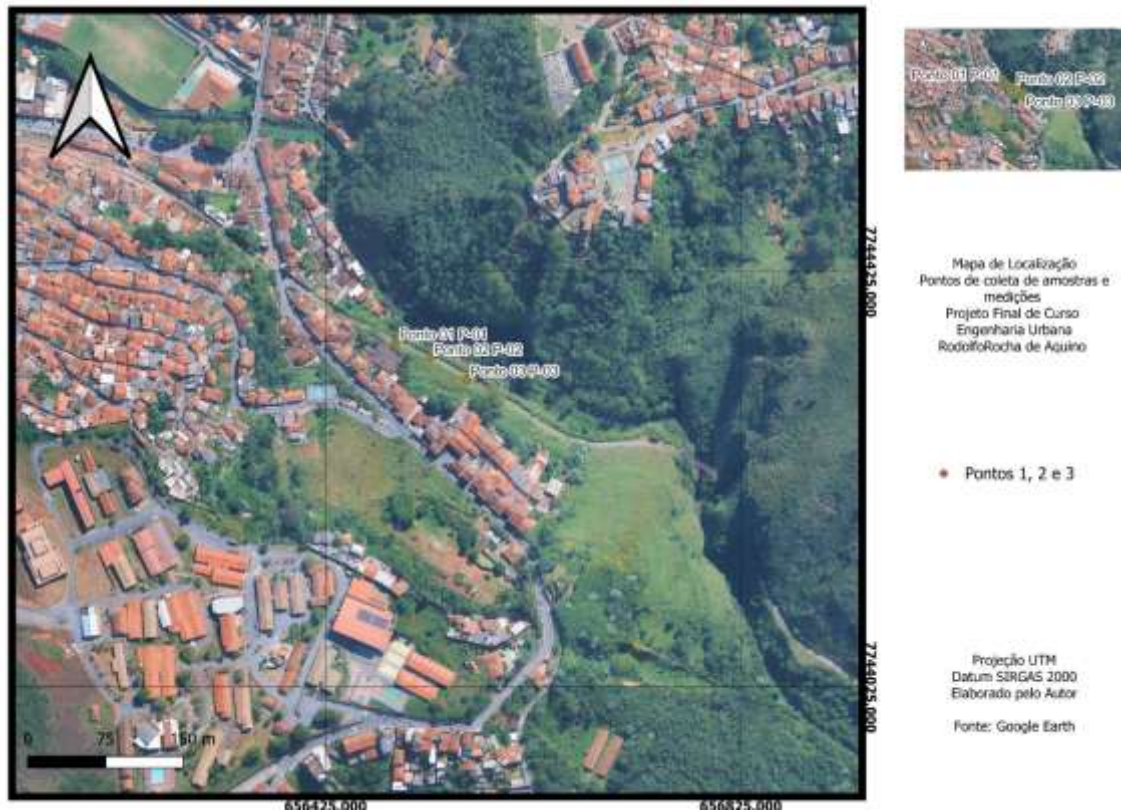
3.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E PONTOS DE ANÁLISE

A área de estudo compreende o bairro Barra, localizado no município de Ouro Preto (MG), caracterizado por relevo acidentado e presença de cortes em maciço rochoso associados à ocupação urbana e à infraestrutura ferroviária.

Os pontos de coleta de amostras e de medições estruturais foram selecionados com base na acessibilidade, representatividade geomecânica e proximidade com áreas de risco potencial, sendo denominados Ponto 01 (P-01), Ponto 02 (P-02) e Ponto 03 (P-03).

A figura 8 apresenta o mapa de localização da área de estudo, destacando a posição espacial dos pontos analisados, bem como o sistema de coordenadas utilizado.

Figura 8 - Localização dos pontos de coleta de amostras e medições geomecânicas no bairro Barra, Ouro Preto (MG)



Fonte: Autoral

3.3 TIPO DE PESQUISA

O ensaio de carga pontual foi adotado neste trabalho por se adequar às condições reais dos taludes urbanos de Ouro Preto, onde predominam maciços fraturados, blocos irregulares e rochas com diferentes graus de alteração, o que dificulta a obtenção de corpos de prova padronizados para ensaios convencionais de resistência à compressão uniaxial. A simplicidade do equipamento, a possibilidade de aplicação diretamente em fragmentos e a viabilidade de testar um número maior de amostras tornam o PLT uma alternativa metodológica eficiente para representar a variabilidade dos materiais rochosos presentes nos taludes selecionados. Assim, o método permite obter, de forma mais prática e compatível com as limitações de campo, parâmetros de resistência essenciais para a caracterização geomecânica e para a avaliação da estabilidade em áreas urbanas ocupadas.

A aplicação do ensaio de carga pontual fornecerá o índice de resistência à

carga pontual (I_s), corrigido para o diâmetro padrão, resultando no índice $I_{s(50)}$, que será utilizado como base para estimar faixas de resistência à compressão uniaxial (UCS) a partir de correlações consagradas na literatura de mecânica das rochas. Esses valores estimados serão incorporados aos sistemas de classificação geomecânica empregados no estudo, em especial ao Rock Mass Rating (RMR), e servirão de referência para a definição dos parâmetros de resistência utilizados nas análises de estabilidade dos taludes selecionados. Dessa forma, o PLT atua como elo entre as observações de campo e os modelos de avaliação geotécnica, fornecendo suporte quantitativo para a interpretação das condições dos maciços rochosos e para a proposição de diretrizes voltadas à gestão de risco e ao planejamento urbano em Ouro Preto.

3.3.1 LEVANTAMENTO DE CAMPO (ESTRUTURAS + RMR)

No levantamento de campo serão reconhecidos e selecionados os taludes rochosos do bairro Barra que atendam aos critérios de criticidade geotécnica e relevância urbana previamente estabelecidos, procedendo-se ao mapeamento geomecânico detalhado de cada setor, com registro da geometria dos taludes (altura, inclinação, extensão e orientação), das principais discontinuidades (tipologia, direção e mergulho, espaçamento, persistência, abertura, rugosidade, preenchimento e condições de contato) e do grau de intemperismo dos maciços. Nessa etapa também serão coletados, em pontos georreferenciados ao longo dos paramentos, fragmentos representativos das diferentes litologias e estados de alteração identificados, garantindo condições adequadas para a execução dos ensaios de carga pontual (PLT) conforme as recomendações da ISRM, de forma a produzir um conjunto de dados consistente para as etapas subsequentes de classificação geomecânica e análise de estabilidade.

3.3.2 PARÂMETROS DO RMR EM CAMPO

Durante o mapeamento geomecânico, os seis parâmetros do sistema RMR serão avaliados diretamente em campo para as diferentes regiões estruturais

identificadas no maciço rochoso:

a) Resistência à compressão uniaxial (UCS): estimada em campo por testes rápidos com martelo geológico e canivete e, posteriormente, complementada pelos resultados do PLT em laboratório (ISRM, 1985; ASTM INTERNATIONAL, 2007).

b) Índice de Qualidade da Rocha (RQD): obtido em afloramentos e, quando disponíveis, em testemunhos de sondagem; na ausência destes, será estimado por métodos empíricos com base na densidade volumétrica de descontinuidades (J_v), conforme Palmström (PALMSTRÖM, 1975).

c) Espaçamento das descontinuidades: medido diretamente em campo, registrando-se a distância média entre as descontinuidades de cada família.

d) Condição das descontinuidades: avaliação de rugosidade, grau de intemperismo (não intemperizado, ligeiro, moderado, alto, decomposto), presença/natureza de preenchimento (gouge), persistência e abertura; a subjetividade é mitigada por descrições padronizadas e pela experiência do observador (BIENIAWSKI, 1989).

e) Condições da água subterrânea: observação de infiltrações, gotejamentos ou fluxo de água nas descontinuidades e faces dos taludes, classificando-se como seca, úmida, molhada, gotejando ou fluindo (BIENIAWSKI, 1989).

f) Orientação das descontinuidades: medição das atitudes das famílias e análise da relação com a geometria dos taludes, aplicando-se o ajuste de pontuação correspondente no cálculo final do RMR (BIENIAWSKI, 1989).

3.4 ENSAIOS PLT

O Ensaio de Carga Pontual (PLT) foi adotado como ferramenta metodológica principal para a estimativa da resistência da rocha intacta devido às limitações práticas associadas à realização de ensaios de compressão uniaxial (UCS) em taludes urbanos de Ouro Preto, onde predominam maciços fraturados, anisotrópicos e com diferentes graus de intemperismo, especialmente em xistos e metassedimentos que dificultam a extração de corpos de prova cilíndricos padronizados. Nessas condições, a obtenção de amostras indeformadas em quantidade suficiente implica intervenções mais invasivas, com maior custo e risco operacional em áreas ocupadas, o que torna o UCS clássico pouco aplicável como procedimento rotineiro.

O PLT, por sua vez, permite a realização de ensaios em fragmentos e blocos de dimensões reduzidas, coletados com menor impacto sobre os taludes e o entorno urbano, possibilita a obtenção de um número mais elevado de medições ao longo dos paramentos e fornece o índice $I_{s(50)}$, que pode ser utilizado em correlações consagradas para estimativa indireta da resistência à compressão e para suporte a sistemas de classificação geomecânica empregados na avaliação da estabilidade de encostas em contexto urbano.

3.4.1 EXECUÇÃO DO ENSAIO (PLT) E CRITÉRIOS DE VALIDADE

Os ensaios laboratoriais serão focados na caracterização da resistência do material rochoso intacto.

Ensaio de carga pontual (PLT). O PLT será realizado em laboratório conforme as recomendações da ISRM e da ASTM D5731-07 (ISRM, 1985; ASTM INTERNATIONAL, 2007). Amostras, preferencialmente irregulares ou em blocos, serão submetidas à compressão entre pontas cônicas até a ruptura, registrando-se a carga de falha (P) e a distância entre os pontos de contato (D). Serão realizados no mínimo 10 ensaios válidos por tipo de rocha ou por grau de alteração, a fim de garantir a confiabilidade dos resultados (ISRM, 1985).

3.4 TRATAMENTO DOS DADOS (IS, IS(50), UCS, RMR, SMR)

3.5.1 CORRELAÇÃO PLT - UCS (ESTIMATIVA DE UCS)

Foram ensaiados inicialmente 21 corpos de prova, sendo 7 corpos de prova provenientes de cada ponto de amostragem, totalizando três pontos avaliados. Os valores de $I_{s(50)}$ obtidos para cada corpo de prova, bem como as dimensões W_1 , W_2 e o diâmetro equivalente D_e , estão apresentados na tabela 5. Conforme recomendação da ISRM (1985), os resultados extremos correspondentes aos dois maiores e aos dois menores valores de $I_{s(50)}$ foram excluídos da análise estatística, a fim de reduzir a influência de outliers e aumentar a representatividade do conjunto. Dessa forma, obteve-se um conjunto final de 17 corpos de prova válidos, utilizado para a determinação dos parâmetros estatísticos representativos do material.

Tabela 5 - Dados do ensaio PLT por corpo de prova

Amostra	Ponto	W1 (mm)	W2 (mm)	D (mm)	Carga (kgf)	P (N)	Is (MPa)	F	Is(50) (MPa)
1	1	48,38	49,09	33,15	633	6207,61	5,649	0,831	4,695
2	1	50,53	32,88	51,19	271	2657,60	1,014	1,011	1,025
3	1	52,34	54,73	37,49	255	2500,70	1,779	0,878	1,563
4	1	89,34	52,82	38,31	135	1323,90	0,902	0,887	0,800
5	1	55,72	55,18	47,50	135	1323,90	0,587	0,977	0,573
6	1	50,42	48,78	39,72	245	2402,63	1,523	0,902	1,373
7	1	42,74	43,97	35,20	50	490,33	0,396	0,854	0,338
8	2	56,20	61,46	45,77	60	588,40	0,281	0,961	0,270
9	2	53,81	54,60	25,70	245	2402,63	3,638	0,741	2,696
10	2	53,20	54,04	25,90	35	343,23	0,512	0,744	0,381
11	2	50,19	50,43	24,19	230	2255,53	3,855	0,721	2,780
12	2	50,93	52,39	27,67	341	3344,07	4,368	0,766	3,347
13	2	53,44	49,74	23,17	237	2324,18	4,329	0,707	3,063
14	2	48,69	47,93	27,95	322	3157,74	4,042	0,770	3,111
15	3	50,35	52,39	27,14	470	4609,13	6,257	0,760	4,753
16	3	54,29	52,08	24,18	82	804,15	1,375	0,721	0,992
17	3	53,01	51,00	27,23	82	804,15	1,085	0,761	0,825
18	3	54,23	57,35	48,68	107	1049,31	0,443	0,988	0,437
19	3	54,07	54,39	48,61	94	921,83	0,390	0,987	0,385
20	3	48,85	43,50	48,25	154	1510,22	0,649	0,984	0,638
21	3	51,81	52,27	48,73	176	1725,97	0,727	0,988	0,718

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O fator K não é fixo: varia com a litologia, o grau de intemperismo e as características estruturais; em rochas fracas e muito alteradas, tende a assumir valores menores e, idealmente, requer calibração local (MARQUES et al., 2015). Neste trabalho, na ausência de ensaios de compressão uniaxial específicos para o bairro Barra, serão adotados valores de K recomendados na literatura para rochas com características semelhantes às encontradas na área de estudo (como MARQUES et al., 2015; CAMPOS et al., 2020), considerando-se as estimativas de UCS obtidas como aproximações indiretas e discutindo suas implicações e limitações nas análises subsequentes.

3.5.2 CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR

Com os dados de campo e a UCS estimada a partir do PLT, será aplicada a classificação RMR (BIENIAWSKI, 1989). A avaliação atribui pontuações aos seis parâmetros do sistema, resultando em um índice final que permite a categorização em cinco classes de qualidade e subsidia análises subsequentes. Dada a ocorrência de maciços altamente intemperizados em Ouro Preto, será feita análise crítica da aplicabilidade do RMR89 nessas condições; estudos indicam a necessidade de

ajustes, por exemplo no RQD, e o uso de índices alternativos como o RQI para aumentar a representatividade em rochas alteradas (CAMPOS et al., 2020; ZENÓBIO; ZUQUETTE, 2006).

3.5.3 ESTABILIDADE E CLASSIFICAÇÃO SMR

A estabilidade será analisada com base no SMR (Slope Mass Rating), que adapta o RMR para encostas naturais ou taludes escavados (ROMANA, 1985; 1993). O método permite identificar modos potenciais de ruptura escorregamentos planares, em cunha e tombamentos (VARNES, 1978) em consonância com as diretrizes gerais da NBR 11682 (ABNT, 2009). Os parâmetros de resistência considerarão Mohr–Coulomb e, quando aplicável, o critério de Hoek–Brown para melhor representar maciços intensamente fraturados (JAEGER; COOK, 1979; HOEK; CARRANZA-TORRES; CORKUM, 2002).

3.6 INTEGRAÇÃO E MAPEAMENTO / DIRETRIZES

A etapa de integração e mapeamento tem como finalidade consolidar, em ambiente geoespacial, os dados estruturais e geomecânicos obtidos nos levantamentos de campo e nos ensaios laboratoriais. A incorporação dessas informações em sistema de informações geográficas permite correlacionar parâmetros como resistência da rocha, orientação das descontinuidades e índices de classificação (RMR e SMR) com sua distribuição espacial no bairro Barra.

A utilização de ferramentas de geoprocessamento possibilita a organização dos dados em camadas temáticas e a geração de representações cartográficas interpretativas, contribuindo para a identificação de setores com maior suscetibilidade a instabilidades. Essa abordagem é compatível com metodologias contemporâneas de elaboração de cartas geotécnicas em contexto urbano, nas quais a análise espacial constitui elemento essencial para o planejamento territorial e gestão de riscos (AZEVEDO et al., 2024; SILVA et al., 2024). Ressalta-se que os resultados obtidos representam uma análise classificatória geomecânica, não substituindo análises determinísticas baseadas em fator de segurança. A ausência de parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos por ensaios específicos limita a aplicação de

métodos de equilíbrio limite, sendo o SMR adotado como ferramenta compatível com os dados disponíveis e com o escopo deste estudo.

3.6.1 INTEGRAÇÃO DOS DADOS E MAPEAMENTO

Após a análise dos dados, será realizada a integração geoespacial no QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2025), com organização das informações em camadas temáticas (shapefiles) correspondentes aos parâmetros geomecânicos e à classificação final dos maciços. Essa estrutura permitirá mapas interpretativos com SMR, facilitando a visualização das zonas de maior suscetibilidade à instabilidade em áreas urbanas. Sempre que possível, será avaliada a automatização do cálculo do SMR no QGIS a partir da entrada dos parâmetros individuais. A etapa seguirá metodologias consolidadas de cartas geotécnicas em contexto urbano (AZEVEDO et al., 2024; SILVA et al., 2024).

3.6.2 PROPOSIÇÃO DE DIRETRIZES E RECOMENDAÇÕES

Com base nas análises, serão formuladas recomendações técnicas para o planejamento urbano e a gestão de riscos geotécnicos, priorizando: mitigação de riscos em áreas de encosta; parâmetros de uso e ocupação do solo em zonas críticas; e integração dos dados geomecânicos com instrumentos como o Plano Diretor e o Plano Municipal de Redução de Riscos (PMRR) (PREFEITURA DE OURO PRETO, 2024). O objetivo é subsidiar estratégias de desenvolvimento urbano seguro e sustentável, conciliando a preservação do patrimônio histórico com a segurança geotécnica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nesta pesquisa são apresentados de forma integrada, articulando os levantamentos estruturais realizados em campo, os ensaios laboratoriais de carga pontual (PLT) e as classificações geomecânicas aplicadas ao maciço rochoso do bairro Barra. A organização deste capítulo segue a sequência metodológica estabelecida no Capítulo 3, iniciando-se pela caracterização estrutural

dos taludes, passando pela determinação da resistência da rocha intacta e culminando na aplicação dos sistemas de classificação RMR e SMR.

A discussão dos resultados busca não apenas apresentar valores numéricos, mas interpretar o comportamento geomecânico dos taludes em função da interação entre litologia, anisotropia estrutural e geometria das faces escavadas. Essa abordagem permite compreender como a qualidade intrínseca do maciço se traduz em condições reais de estabilidade no contexto urbano analisado, fornecendo subsídios técnicos para a gestão de risco geotécnico.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS TALUDES E SETORES AVALIADOS

A área de estudo no Bairro Barra foi segmentada em três pontos de levantamento (Ponto 01 a Ponto 03), representativos de setores de taludes/afloramentos, definidos em função da exposição do maciço rochoso e da relevância geotécnica frente à ocupação urbana adjacente.

Os resultados apresentados a seguir referem-se ao mapeamento detalhado de 150 medições estruturais (50 por ponto), destacando a atitude da família de descontinuidades predominante em cada afloramento (identificada em campo como foliação/acamamento). Ressalta-se que, em alguns pontos, observou-se a interferência de fraturas secundárias, porém a análise concentra-se na estrutura penetrativa principal que governa a anisotropia do maciço na escala do talude.

A tabela 5 sintetiza o inventário dos pontos, apresentando a localização e a atitude média das estruturas calculada a partir dos dados de campo.

No Ponto1, Xisto metagrauváquico moderadamente a altamente alterado (grau W4), apresentando estrutura fortemente foliada com bandamento milimétrico e intercalações ricas em quartzo. A foliação constitui a principal anisotropia do maciço, controlando o comportamento mecânico do talude. Observa-se preenchimento argiloso nas descontinuidades, com abertura superior a 5 mm. O maciço encontra-se predominantemente seco no momento da inspeção, sem evidência de percolação ativa.

O Ponto 2, Xisto metagrauváquico classificado como W4, com estrutura foliada bem definida e bandamento milimétrico, contendo níveis quartzosos intercalados. As descontinuidades apresentam abertura superior a 5 mm com preenchimento argiloso,

evidenciando alteração avançada ao longo dos planos estruturais. No momento do mapeamento, observou-se condição úmida superficial, associada à infiltração pontual, sem fluxo contínuo visível.

Por último o Ponto 3, Xisto metagrauváquico moderadamente a altamente alterado (W4), com foliação milimétrica persistente e presença de lentes quartzosas. O maciço apresenta anisotropia estrutural marcante, controlada pela foliação, e descontinuidades com preenchimento argiloso superior a 5 mm. As condições observadas no momento do levantamento indicaram maciço seco, sem presença de umidade significativa nas juntas

Tabela 6 - Inventario dos pontos e atitudes média da estrutura predominante

ID Setor	Coordenadas (UTM)	Estrutura Predominante Média (Dip / Dip Direction)	Descrição Litológica Preliminar
Ponto 01	Latitude: -20.26239 Longitude: -43.50035	Familia 1 - 199/53 Familia 2 -246/24- Familia 3- 325/32 Face - 074/82	Xisto metagrauváquico (W4), foliação milimétrica com intercalações quartzosas, juntas com preenchimento argiloso >5 mm, maciço seco
Ponto 02	Latitude: -20.39275 Longitude: -43.50003	Familia 1 – 206/54 Familia 2 – 251/30 Familia 3- 342/17 Face - 078/34	Xisto metagrauváquico (W4), foliação milimétrica com intercalações quartzosas, juntas com preenchimento argiloso >5 mm, maciço seco
Ponto 03	Latitude: -20.39293 Longitude: -43.49969	Familia 1 - 202/53 Familia 2 -251/26- Familia 3- 343/50 Face - 077/48	Xisto metagrauváquico (W4), foliação milimétrica persistente, preenchimento argiloso nas juntas, maciço seco.

Fonte: Dados de campo (Autor, 2026).

Notas: Coordenadas UTM, Fuso 23K, Datum SIRGAS 2000. ² Atitude média aritmética calculada a partir das 10 medições realizadas por ponto. ³ Descrição visual preliminar de campo.

4.1.2 ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS ESTRUTURAIS

A compilação dos dados estruturais revela um intervalo de mergulhos relativamente restrito (54° a 69°), porém com variações importantes na direção de mergulho (dip direction) ao longo da encosta. Observa-se um predomínio de mergulhos para o setor Oeste/Sudoeste (W/WSW) nos Pontos 01, 02 e 03, sugerindo uma continuidade estrutural neste trecho central da área de estudo. Em contrapartida, os Pontos 01 e 03 apresentam orientações divergentes (SSE e ENE, respectivamente), podendo indicar inflexões locais na foliação ou associação a estruturas em escala de detalhe.

Essa variação na orientação das descontinuidades implica que a condição de estabilidade não é uniforme ao longo da encosta. A depender da geometria da face de cada talude, a estrutura predominante pode estabelecer condições cinemáticas favoráveis a mecanismos distintos de instabilidade (como ruptura planar ou tombamento), correlação que será detalhada na análise cinemática apresentada no item 4.5.

4.2 ENSAIO DE CARGA PONTUAL (PLT)

O ensaio de carga pontual (*Point Load Test* - PLT) foi realizado na configuração axial, conforme recomendação da *International Society for Rock Mechanics* - ISRM (1985). Para esta configuração, o diâmetro equivalente (De) foi calculado a partir da área da seção transversal do corpo de prova, conforme a Equação (7):

$$De = \frac{\sqrt{4WD}}{\pi} \quad (7)$$

Onde: W = largura média do corpo de prova (mm); D = dimensão característica do corpo de prova medida na direção de carregamento (mm). Essa formulação considera a equivalência do diâmetro a partir da área real da seção transversal do corpo de prova, sendo recomendada para ensaios realizados na configuração axial. Na sequência, determinou-se o índice de resistência à carga pontual (Is) e o índice corrigido para o diâmetro padrão de 50 mm ($Is50$) através das seguintes relações matemáticas:

$$I_S = \frac{P}{De^2} \quad (8)$$

$$I_{S(50)} = I_S \cdot \left(\frac{De}{50}\right)^{0.45} \quad (9)$$

Em que P é a carga de ruptura obtida no ensaio (N). O valor $I_{S(50)}$ foi calculado por correção de tamanho para referência em $De = 50$ mm, seguindo os critérios de normalização estabelecidos pela ISRM (1985) para o ensaio de carga pontual.

4.3 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE CARGA PONTUAL (PLT)

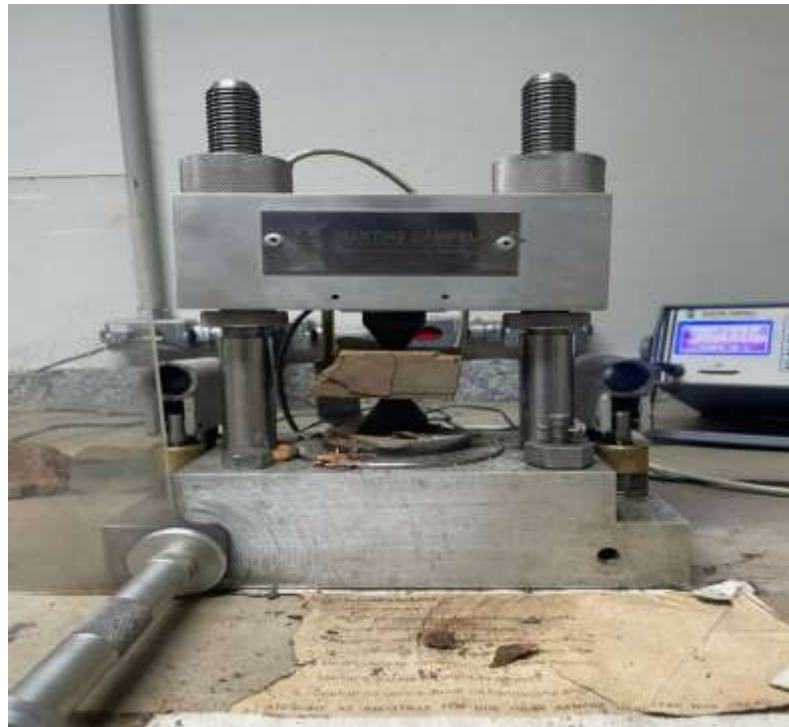
Com base na caracterização da resistência à compressão uniaxial (σ_c) obtida através dos ensaios de carga pontual (PLT), procedeu-se à classificação geomecânica do maciço rochoso utilizando o sistema Rock Mass Rating (RMR), proposto originalmente por Bieniawski e consolidado em sua forma atual por Bieniawski (1989). Esse procedimento é recomendado pela International Society for Rock Mechanics - ISRM (1985). Ressalta-se que todos os ensaios de carga pontual foram executados na direção perpendicular à foliação do material rochoso, visando a caracterização da resistência axial da matriz, em função da elevada variabilidade inerente aos ensaios realizados em materiais rochosos, especialmente quando aplicados a corpos de prova irregulares ou heterogêneos. O registro visual do preparo das amostras e da execução dos ensaios laboratoriais que fundamentaram a determinação dos parâmetros geomecânicos encontra-se apresentado nas figuras 9 e 10.

Figura 9 - Corpos de prova rochosos preparados e identificados para a realização do ensaio de carga pontual (PLT).



Fonte: Acervo do autor (2026).

Figura 10 - Execução do ensaio de carga pontual (PLT) em amostra rochosa, conforme procedimento laboratorial.



Fonte: Acervo do autor (2026).

Foram ensaiados inicialmente 21 corpos de prova. Conforme recomendação da ISRM (1985), os resultados extremos correspondentes aos dois maiores e aos dois

menores valores de $I_{s(50)}$, foram excluídos da análise estatística. Dessa forma, obteve-se um conjunto final de 17 amostras válidas, utilizado para a determinação dos parâmetros estatísticos representativos do material.

Para o conjunto de amostras válidas, foram calculados a média aritmética, o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV) dos valores de $I_{s(50)}$. O coeficiente de variação foi empregado como indicador da dispersão dos resultados, permitindo avaliar o grau de heterogeneidade do material ensaiado

O coeficiente de variação obtido foi de aproximadamente 69,7%, valor considerado elevado. Esse comportamento é comum em ensaios de carga pontual aplicados a materiais geológicos heterogêneos, refletindo variações naturais de textura, microfraturamento e composição mineralógica dos corpos de prova.

Assim, o valor médio de $I_{s(50)}$ adotado como representativo do material foi de 0,90 MPa, obtido após a exclusão dos valores extremos, conforme metodologia recomendada pela ISRM (1985). Com base nesse valor médio corrigido, o material foi classificado como de baixa resistência, segundo os critérios da ISRM (1985), os quais indicam que valores de $I_{s(50)}$ inferiores a 1,0 MPa correspondem a materiais de baixa resistência mecânica.

4.4 CORRELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE DE CARGA PONTUAL $I_{s(50)}$ E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (ΣC)

A estimativa da resistência à compressão simples (σ_c) representa uma etapa fundamental para a classificação geomecânica do maciço rochoso do Bairro Barra. Devido às restrições para a execução de ensaios diretos (UCS) em amostras anisotrópicas e intemperizadas, que dificultaram a obtenção de corpos de prova cilíndricos padronizados, optou-se pela estimativa indireta. Conforme as recomendações da ISRM (1985), o valor de UCS foi projetado utilizando a relação $UCS \approx k * I_{s(50)}$, onde o fator (k) foi adotado no intervalo entre 20 e 25. Este intervalo é o consagrado na literatura para litologias com características e graus de alteração semelhantes às encontradas na área de estudo, como os xistos do Quadrilátero Ferrífero.

A fundamentação teórica dessa abordagem baseia-se na proporcionalidade

observada entre a resistência à ruptura sob compressão simples e o índice de resistência à carga pontual corrigido. Diversos autores, como Bieniawski (1975) e Broch e Franklin (1972), propuseram correlações empíricas que demonstram que a resistência à compressão simples (σ_c) pode ser estimada a partir do valor de $I_{s(50)}$. Ressalta-se, entretanto, que os coeficientes de proporcionalidade envolvidos nessas correlações variam em função da litologia, do grau de fraturamento e das condições de intemperismo do material rochoso, exigindo uma análise criteriosa da natureza geológica das amostras ensaiadas.

A forma geral da correlação empregada para a estimativa da resistência à compressão simples é apresentada na Equação (10):

$$\sigma_c = k \cdot I_{s(50)} \quad (10)$$

Em que k representa um coeficiente empírico de conversão. De acordo com a literatura técnica e as recomendações da International Society for Rock Mechanics - ISRM (1985), o valor de k não deve ser adotado como um número fixo, mas sim considerado dentro de um intervalo representativo, de modo a refletir as incertezas inerentes à heterogeneidade do maciço rochoso.

Para a aplicação prática neste estudo, adotou-se como valor representativo do material o índice médio corrigido $I_{s(50)=0,90} \text{ Mpa}$, obtido após o tratamento estatístico dos resultados experimentais. O intervalo do coeficiente k selecionado para as projeções situou-se entre 20 e 25, valor compatível com materiais de baixa resistência mecânica e alinhado aos critérios recomendados pela ISRM (1985) e pela literatura clássica para maciços rochosos com elevado grau de alteração, como os xistos identificados na área de estudo.

Com base nos parâmetros estabelecidos, os valores estimados de resistência à compressão simples variaram entre 18 MPa e 22 MPa, sendo a resistência mínima estimada de 18 MPa, a resistência média de aproximadamente 20 MPa e a resistência máxima estimada de 22 MPa.

Os valores de (σ_c) estimados apresentam plena coerência com a classificação de moderada resistência resultante dos ensaios de carga pontual. A relação entre o baixo, $I_{s(50)}$ índice e a baixa resistência compressiva estimada reforça a integridade

da caracterização mecânica do material. Tais valores são perfeitamente compatíveis com rochas de baixa competência estrutural e atendem integralmente aos objetivos do trabalho de subsidiar a análise de estabilidade dos taludes críticos no bairro Barra.

4.5 CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DO MACIÇO ROCHOSO PELO SISTEMA RMR

Com base na caracterização da resistência à compressão uniaxial (σ_c) obtida por meio dos ensaios de carga pontual (PLT), procedeu-se à classificação geomecânica do maciço rochoso utilizando o sistema Rock Mass Rating (RMR), proposto originalmente por Bieniawski e consolidado em sua forma atual por Bieniawski (1989). Essa metodologia é amplamente utilizada na geotecnia e na mecânica das rochas, permitindo quantificar a qualidade do maciço e estimar parâmetros de suporte e estabilidade a partir da integração das propriedades da rocha intacta e das características de suas descontinuidades.

A aplicação do sistema RMR neste estudo justifica-se pela necessidade de converter dados pontuais obtidos em laboratório e em campo em um índice numérico representativo do comportamento global da massa rochosa. A partir dessa classificação, torna-se possível enquadrar o maciço em classes de qualidade que variam de muito pobre a muito boa, fornecendo uma base técnica consistente para a análise de estabilidade e para a definição de eventuais sistemas de contenção ou métodos de escavação.

Para a determinação do índice RMR final, são avaliados e pontuados seis parâmetros fundamentais, conforme estabelecido por Bieniawski (1989):

1. Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta (σ_c): obtida a partir da correlação com o índice $I_{s(50)}$;
2. Grau de faturamento (RQD - *Rock Quality Designation*): que mede a integridade do testemunho ou da face do maciço;
3. Espaçamento das descontinuidades: distância entre as juntas e planos de fraqueza;
4. Condição das descontinuidades: avalia persistência, abertura, rugosidade, preenchimento e alteração das paredes;
5. Condições hidrológicas: presença e fluxo de água subterrânea nas

estruturas;

6. Orientação das descontinuidades: fator de ajuste aplicado em função da atitude das juntas em relação à face da escavação ou talude.

4.5.1 PARÂMETROS UTILIZADOS NA DETERMINAÇÃO DO RMR BÁSICO

Os parâmetros utilizados para a determinação do índice RMR básico foram obtidos a partir da integração entre os ensaios laboratoriais de carga pontual (PLT) e os levantamentos estruturais realizados em campo nos setores analisados do Bairro Barra. Os valores adotados correspondem a médias representativas do comportamento geomecânico do maciço rochoso, conforme descrito nas fichas de campo e na interpretação técnica dos dados coletados.

A tabela 7 apresenta os valores geomecânicos adotados para cada um dos parâmetros utilizados na determinação do índice RMR básico, incluindo a resistência à compressão uniaxial estimada, o índice RQD, o espaçamento médio das descontinuidades, a condição das juntas e as condições hidrológicas observadas no maciço rochoso.

Tabela 7 - Parâmetros geomecânicos utilizados na determinação do índice RMR básico

Parâmetro	Descrição / Valor Medido	Pontuação RMR
1. Resistência da rocha	$\sigma_c=20$ MPa (Ensaio PLT)	2
2. RQD	90%–100% (Excelente)	20
3. Espaçamento	0,6 m a 2,0 m	15
4. Condição das juntas	Abertura >5 mm e preenchimento mole (Argila)	10
5. Água Subterrânea	Maciço Seco	15
TOTAL	Índice RMR Básico (RMRBb)	62

Fonte: Dados de campo e ensaios laboratoriais (2025).

4.5.2 PONTUAÇÃO DOS PARÂMETROS E CÁLCULO DO RMR BÁSICO (RMRB)

Com base nos valores medidos apresentados no item anterior e nas classes de pontuação estabelecidas por Bieniawski (1989), procedeu-se à atribuição das pontuações individuais para cada parâmetro do sistema RMR.

No caso do espaçamento das descontinuidades, embora os valores medidos variem predominantemente entre 0,60 m e 1,00 m, adotou-se a classe de espaçamento médio regional (0,6–2,0 m), por representar de forma mais adequada o

comportamento global do maciço rochoso nos setores analisados.

Em relação às condições hidrológicas, o maciço foi classificado como predominantemente seco, uma vez que a presença de umidade foi pontual e restrita a setores localizados, não exercendo influência significativa sobre o comportamento global do maciço rochoso.

A tabela 8 apresenta a pontuação atribuída a cada parâmetro e o cálculo do índice RMR básico (RMR_b), conforme os critérios estabelecidos por Bieniawski (1989).

Tabela 8 - Pontuação dos parâmetros e cálculo do índice RMR básico do maciço rochoso

Parâmetro	Valor Medido (Baseado nas fichas de campo)
Resistência (σ_c)	20 MPa (Estimativa R3/R4 em campo)
RQD	90% - 100% (Estimado via J_v entre 1 e 4 fraturas/m ³)
Espaçamento	0,60 m a 1,00 m (Média entre os pontos)
Condição das juntas	Abertura > 5mm com preenchimento de Argila
Água subterrânea	Predominantemente seco (com trechos Úmidos no P2)

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989).

4.5.3 CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO

O valor do índice RMR básico (RMR_b) obtido foi igual a 62, o que classifica o maciço rochoso como pertencente à Classe II-III, correspondente a um maciço de qualidade boa a razoável, segundo a classificação proposta por Bieniawski (1989). Essa classificação é compatível com os valores de resistência à compressão simples estimados a partir do ensaio de carga pontual e com as características estruturais observadas em campo, reforçando a consistência da caracterização geomecânica realizada.

4.5 INTEGRAÇÃO ENTRE RMR E SMR POR PONTO ANALISADO

Para a realização dos cálculos de ajuste pelo sistema Slope Mass Rating (SMR), adotou-se o valor de RMR básico (RMR_b) igual a 62. Este índice foi considerado único e definitivo para representar o comportamento geomecânico médio e a qualidade intrínseca do maciço rochoso nos pontos analisados no setor do Bairro Barra. A análise da estabilidade de taludes rochosos exige que a qualidade intrínseca

do maciço seja contextualizada frente à geometria da face escavada. Nesta etapa, os dados de resistência e faturamento consolidados anteriormente são integrados às orientações estruturais das descontinuidades, permitindo uma avaliação mais realista do comportamento geomecânico dos taludes analisados. A caracterização visual dos taludes e o registro dos ensaios laboratoriais realizados encontram-se apresentados nas figuras 11, 12 e 13.

4.6.1 FUNDAMENTAÇÃO DO MÉTODO SMR

O sistema *Slope Mass Rating* (SMR), proposto por Romana (1985) e posteriormente atualizado por Romana et al. (2003), constitui uma adaptação do sistema *Rock Mass Rating* (RMR) voltada especificamente para a análise da estabilidade de taludes em maciços rochosos.

Enquanto o *RMR* básico avalia a qualidade geomecânica intrínseca do maciço rochoso, o *SMR* incorpora fatores geométricos e estruturais relacionados à orientação das descontinuidades em relação à face do talude, permitindo uma avaliação mais representativa das condições potenciais de instabilidade.

Neste estudo, o valor do *RMR* básico previamente determinado ($RMR_b = 62$) foi adotado como base para o cálculo do índice *SMR*, sendo ajustado por meio da aplicação dos fatores de correção F_1, F_2, F_3 e F_4 , conforme a metodologia proposta por Romana.

4.6.2 PARÂMETROS GEOMÉTRICOS UTILIZADOS

Os fatores geométricos empregados no cálculo do índice *SMR* foram determinados a partir da análise estrutural realizada em campo, considerando a orientação da face dos taludes e a atitude das principais famílias de descontinuidades identificadas nos pontos analisados.

Os fatores F_1, F_2, F_3 refletem, respectivamente, a relação angular entre a direção da descontinuidade e a direção da face do talude, o mergulho da descontinuidade em relação à inclinação do talude e o mecanismo potencial de ruptura identificado.

A análise cinemática realizada indicou a predominância de condições favoráveis à ruptura planar, sendo este o mecanismo adotado para a determinação dos fatores de correção. Tal escolha justifica-se pela presença de foliações nos xistos metagravauques, que apresentam elevada persistência e orientação, em diversos trechos, compatível com o escorregamento ao longo da face dos taludes analisados.

Todas as orientações estruturais e geométricas utilizadas nesta etapa seguem o padrão de direção de mergulho (Dip Direction) e mergulho (Dip), expressos em graus. Medições originalmente registradas no formato Strike/Dip foram convertidas para DipDir/Dip, assegurando consistência técnica na aplicação dos fatores de correção do sistema SMR.

4.6.3 CÁLCULO DO SMR E CLASSIFICAÇÃO DO TALUDE

O índice Slope Mass Rating (SMR) foi calculado a partir da expressão proposta por Romana (1985), apresentada na Equação 9:

$$SMR = RMRb + (F1 * F2 * F3) + F4 \quad (9)$$

em que $RMRb$ corresponde ao índice RMR básico previamente determinado ($RMRb = 62$), $F1, F2, F3$ são os fatores geométricos associados à orientação das descontinuidades em relação à face do talude, e $F4$ representa o fator de ajuste relacionado ao método de escavação.

Considerando que os pontos 1, 2 e 3 correspondem a taludes de corte associados a intervenções urbanas e ferroviárias, adotou-se o valor de $F4$, correspondente a escavações realizadas por métodos mecânicos ou por detonação convencional, conforme recomendado por Romana et al. (2003).

4.6.4 INTERPRETAÇÃO DO ÍNDICE SMR POR PONTO ANALISADO

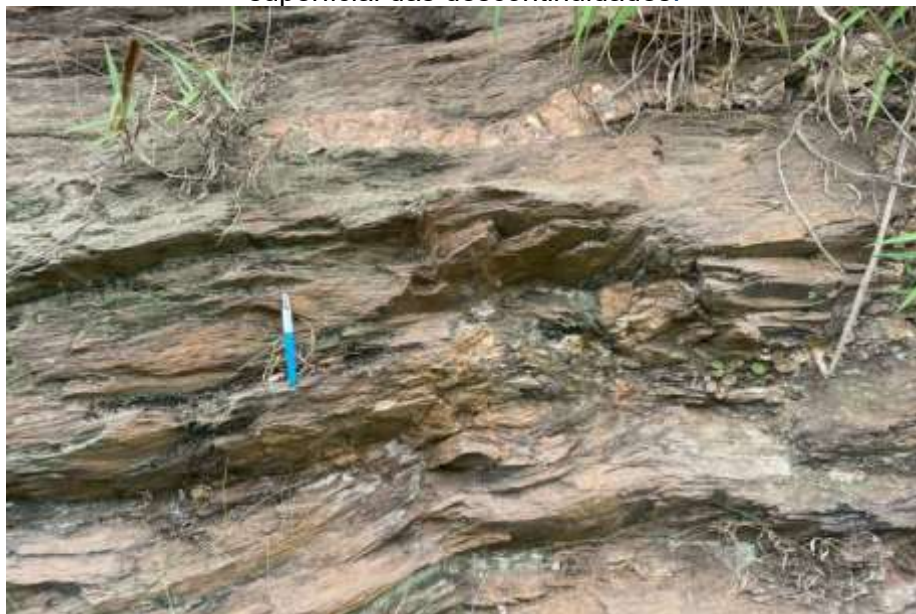
A determinação do índice *Slope Mass Rating* (SMR) permitiu uma análise individualizada da estabilidade dos taludes mapeados no bairro Barra, contextualizando a qualidade intrínseca do maciço rochoso frente às condições geométricas e cinemáticas de cada ponto. A interpretação a seguir baseia-se nas

classes de estabilidade propostas por Romana (1985), correlacionando os valores numéricos obtidos com a probabilidade de ocorrência de instabilidades no ambiente urbano.

A determinação do índice *Slope Mass Rating* (SMR) permitiu uma análise individualizada da estabilidade dos taludes mapeados no bairro Barra, contextualizando a qualidade intrínseca do maciço rochoso frente às condições geométricas e cinemáticas de cada ponto. A interpretação a seguir baseia-se nas classes de estabilidade propostas por Romana (1985), correlacionando os valores numéricos obtidos com a probabilidade de ocorrência de instabilidades no ambiente urbano e ferroviário.

O Ponto 01 apresentou um índice SMR de 58,25, o que o enquadra na Classe II (Boa). Conforme a classificação de Romana, este talude é considerado estável, apresentando baixa probabilidade de rupturas generalizadas. Contudo, dentre os setores analisados, este é o que apresenta a condição cinemática mais próxima do limiar de instabilidade planar, devido à elevada inclinação da face do talude 82° em relação ao mergulho da foliação 53° . A diferença angular de 35° entre a direção de mergulho da face e da junta atua como um fator atenuante, mas a proximidade com a linha ferroviária exige atenção constante a vibrações que possam mobilizar blocos isolados.

Figura 11 - Vista do maciço rochoso no Ponto 01, evidenciando a foliação e o estado superficial das discontinuidades.



Fonte: Registrado pelo autor em campo

Para o Ponto 02, o valor de SMR obtido foi 62, mantendo-o na Classe II (Boa). Em termos comparativos, este ponto apresenta uma condição de estabilidade superior ao Ponto 01, pois a geometria da face 34° é significativamente menos inclinada que o mergulho das discontinuidades 54° , o que torna improvável a ocorrência de rupturas planares. Apesar do índice favorável, a presença de infiltrações provenientes de esgoto doméstico e o acúmulo de lodo na face do talude representam agentes intempéricos que podem, a longo prazo, degradar a coesão do preenchimento argiloso das juntas.

Figura 12 - Vista do maciço rochoso no Ponto 02, evidenciando a foliação e o estado superficial das discontinuidades.



Fonte: Registrado pelo autor em campo.

O Ponto 03 também atingiu um índice SMR de 62 (Classe II - Estável). Assim como observado no Ponto 02, a relação geométrica entre a face e as famílias de juntas é amplamente favorável, não havendo condições cinemáticas para rupturas planares ou por tombamento significativas. O fator distintivo deste ponto é a sua maior altura

estimada 8 metros e a presença de resíduos sólidos descartados no pé do talude, o que, embora não altere a nota geomecânica do *SMR*, eleva o risco social e ambiental em caso de desprendimentos superficiais de solo ou blocos menores causados pela degradação da vegetação local.

Figura 13 - Vista do maciço rochoso no Ponto 03, evidenciando a foliação e o estado superficial das discontinuidades.



Fonte: Registrado pelo autor em campo

Em síntese, a aplicação do sistema *SMR* evidenciou que, embora todos os pontos compartilhem o mesmo *RMRb* (62), a geometria do corte torna o Ponto 01 o setor mais crítico do ponto de vista cinemático. Os pontos 02 e 03, embora mais estáveis estruturalmente, demandam atenção devido aos fatores antrópicos (esgoto e resíduos sólidos) identificados, demonstrando que a estabilidade global é uma composição entre a qualidade do maciço e as condições de uso e ocupação do solo adjacente.

4.7 SÍNTESE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS GEOMECÂNICOS

A caracterização geomecânica realizada neste estudo seguiu uma sequência lógica e integrada para avaliar a estabilidade dos taludes. O processo iniciou-se com a realização de ensaios de carga pontual (PLT), que permitiram a obtenção do índice de resistência $I_s(50)$ e a subsequente determinação da resistência à compressão uniaxial (σ_c) da rocha intacta. Esses parâmetros de laboratório forneceram a base necessária para o cálculo do *Rock Mass Rating* (RMR) básico, o qual foi posteriormente refinado pelo *Slope Mass Rating* (SMR). A associação desses índices com a análise cinemática estrutural possibilitou entre as propriedades físicas da rocha e o comportamento global do maciço rochoso.

Embora os três pontos de análise compartilhem um índice RMR básico de 62, a resposta mecânica e a estabilidade de cada setor apresentam variações significativas devido a fatores geométricos. A divergência observada no comportamento dos taludes decorre essencialmente da relação entre a orientação da face escavada e a atitude das famílias de descontinuidades. O Ponto 01 destaca-se como o setor mais crítico, apresentando uma condição cinemática favorável a mecanismos potenciais de ruptura devido à sua geometria mais íngreme. Em contrapartida, os Pontos 02 e 03 mostram-se estruturalmente mais estáveis, uma vez que a orientação da face e a menor inclinação nesses locais reduzem a viabilidade cinemática de instabilizações.

A avaliação da estabilidade é complementada pela consideração de influências antrópicas e ambientais que contextualizam o risco real no ambiente urbano. No Ponto 01, a proximidade com a linha ferroviária introduz o fator de vibração constante, que pode atuar como gatilho para a mobilização de blocos em juntas já desfavoráveis. Além disso, a presença de descarte de resíduos sólidos, sistemas de esgoto ineficientes e vegetação degradada contribui para a deterioração progressiva da superfície do maciço. Tais elementos externos, embora não alterem o cálculo numérico do SMR, são decisivos para a compreensão da vulnerabilidade do bairro Barra frente a eventos de instabilidade.

O emprego do índice SMR mostrou-se essencial para diferenciar o comportamento dos taludes e validar a adequação da metodologia ao contexto urbano analisado. A aplicação sistemática das ferramentas de classificação geomecânica

permitiu que a qualidade intrínseca do xisto fosse traduzida em indicadores de estabilidade claros e tecnicamente embasados. Os resultados obtidos consolidam o entendimento das áreas prioritárias e subsidiam as decisões técnicas necessárias para a gestão de riscos na área de estudo. Dessa forma, a integração dos dados de campo e laboratório apresentada neste capítulo constitui o alicerce técnico fundamental para as conclusões finais e recomendações propostas neste trabalho.

4.8 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE RMR BÁSICO (RMRB)

A determinação do índice *RMRb* básico para o maciço rochoso em estudo foi realizada a partir da avaliação integrada dos parâmetros geomecânicos obtidos em ensaios de laboratório e nos levantamentos estruturais de campo. Seguindo a metodologia proposta por Bieniawski (1989), buscou-se converter as propriedades físicas da rocha intacta e as características geométricas e superficiais das descontinuidades em uma métrica quantitativa que reflita a qualidade geomecânica global do setor analisado.

Para a obtenção deste índice, foram pontuados cinco parâmetros fundamentais: a resistência à compressão uniaxial (σ_c), o índice de qualidade da rocha (RQD), o espaçamento das descontinuidades, o estado de conservação das juntas e a presença de água subterrânea. A tabela 9 apresenta detalhadamente a caracterização qualitativa e quantitativa de cada um desses parâmetros, as pontuações individuais atribuídas conforme os intervalos normatizados e o somatório final que define a classe de qualidade do maciço rochoso.

Tabela 9 - Determinação do índice RMR básico (RMRb) para o maciço rochoso do Bairro Barra

Parâmetro	Valor adotado	Classe RMR	Pontuação
Resistência à compressão uniaxial (σ_c)	20 Mpa	15 - 25 MPa	2
RQD	90 -100 %	Excelente	20
Espaçamento das descontinuidades	0,6 - 2,0 m	Moderadamente espaçado	15
Condição das juntas	Abertura > 5 mm com preenchimento argiloso	Juntas moderadamente desfavoráveis	10
Condições de água subterrânea	Predominantemente seco	Seco	15
TOTAL - RMR básico (RMRb)			62

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989)

4.9 RESULTADOS DA ANÁLISE CINEMÁTICA E CLASSIFICAÇÃO SMR POR PONTO

Com base nos critérios geométricos da análise cinemática e nos fatores de ajuste do sistema SMR apresentados no Capítulo 2, foram analisados os taludes mapeados nos três pontos do Bairro Barra. O processamento dos dados estruturais coletados em campo exigiu a determinação da orientação média das famílias de descontinuidades. Para a determinação das atitudes médias das famílias de descontinuidades, foi utilizado o método vetorial, no qual cada plano é representado por um vetor normal, permitindo a obtenção de uma orientação média mais representativa da família (GAVA, 2019). Os dados processados para os três pontos

de análise no bairro Barra revelaram configurações geomecânicas distintas.

O processamento dos dados estruturais e cálculo do SMR é calculado com base nas medições de campo e considerando um RMR_b médio de 62 (cinquenta e dois) para os maciços metamórficos locais e escavação mecânica normal $F_4 = 0$, os resultados são:

4.9.1 ANÁLISE CINEMÁTICA E CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA - PONTO 01

A análise cinemática do Ponto 01 foi realizada com base nas orientações médias das famílias de descontinuidades e da face do talude, obtidas a partir do processamento estatístico dos dados de campo. As atitudes médias utilizadas nesta etapa estão apresentadas na abaixo e foram empregadas na construção das redes estereográficas nos softwares Stereonet (Allmendinger) e OpenStereo 2.0, ambos utilizando projeção equal-area (hemisfério inferior). Neste trabalho, as atitudes estruturais são apresentadas no formato direção de mergulho/mergulho (Dip Direction/Dip), em graus.

As orientações médias consideradas para o Ponto 01 são:

- Família 1: 199/53
- Família 2: 246/24
- Família 3: 325/32
- Face do talude: 074/82

A figura 14 apresenta a rede estereográfica gerada no software Stereonet, onde são plotados os grandes círculos correspondentes às três famílias de descontinuidades e à face do talude, bem como os polos associados e o mapa de densidade. Observa-se a formação de concentrações bem definidas de polos, indicando a existência de três conjuntos estruturais predominantes no maciço rochoso do Ponto 01. A disposição espacial desses conjuntos em relação à face do talude permite a avaliação preliminar da viabilidade geométrica dos mecanismos de ruptura.

Complementarmente, a figura 15 apresenta a rede estereográfica elaborada no software OpenStereo 2.0, com a inclusão da janela cinemática para análise dos modos de ruptura. Nesta representação, além dos grandes círculos das famílias estruturais e da face do talude, são destacadas as regiões correspondentes aos possíveis

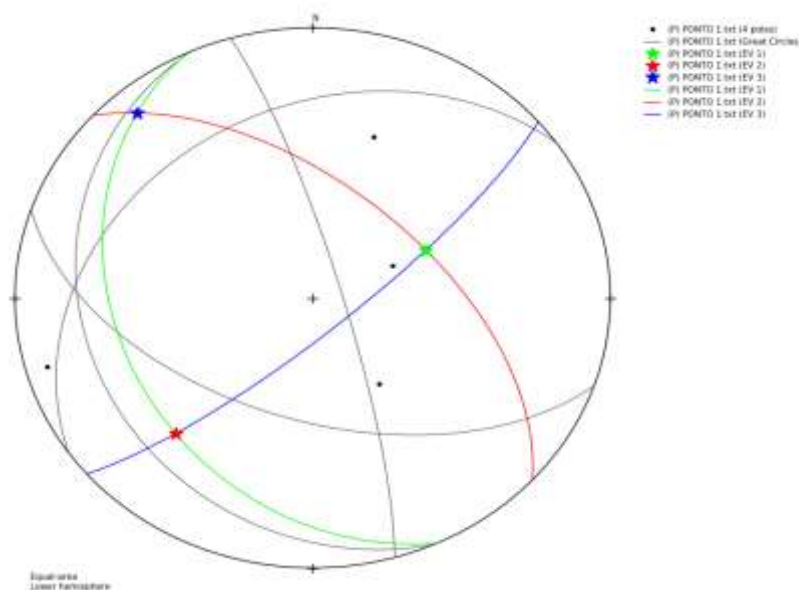
mecanismos de ruptura planar, em cunha e por tombamento.

A comparação entre a orientação da Família 1 (199/53) e a face do talude (074/82) não indica condição geométrica favorável à ruptura planar, uma vez que a diferença entre as direções de mergulho é elevada ($\Delta \approx 125^\circ$), não atendendo ao critério de paralelismo necessário para esse mecanismo. Assim, a interpretação deve ser feita de forma consistente com o padrão adotado (DipDir/Dip) e confirmada na janela cinemática apresentada na Figura 15.

As famílias 2 e 3, por sua vez, não apresentam condições geométricas favoráveis para ruptura planar ou por tombamento neste ponto, uma vez que seus mergulhos são significativamente inferiores ou suas direções não apresentam paralelismo adequado em relação à face do talude. Também não foram identificadas interseções críticas entre os planos que indiquem predominância de ruptura em cunha para o Ponto 01.

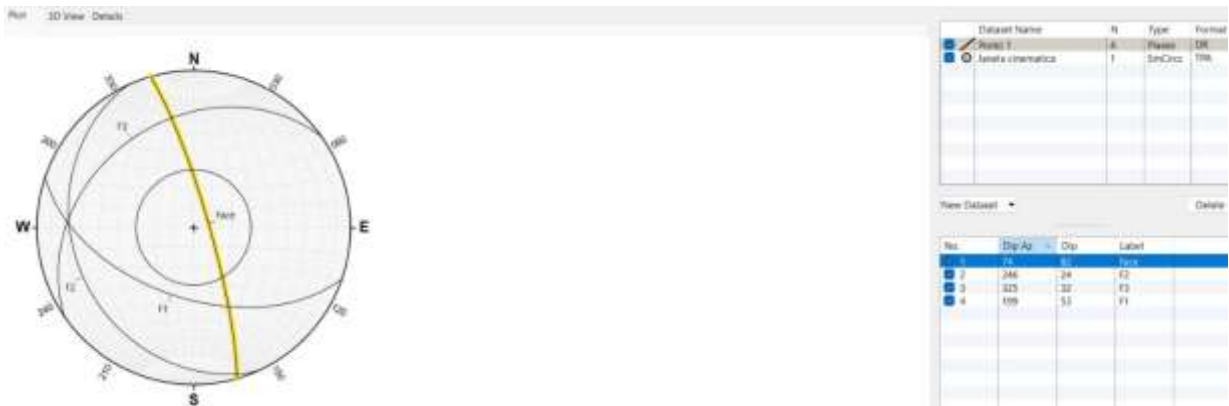
Dessa forma, a análise cinemática indica que o modo de ruptura potencialmente crítico no Ponto 01 é a ruptura planar associada à Família 1, sendo está a estrutura considerada para a aplicação dos fatores de ajuste do sistema Slope Mass Rating (SMR). Os resultados obtidos nesta etapa subsidiam a classificação geomecânica do talude e a avaliação de sua estabilidade, apresentadas na sequência deste capítulo.

Figura 14 - Rede estereográfica (projeção de igual-área, hemisfério inferior) do Ponto 01, com polos e grandes círculos das famílias de discontinuidades e da face do talude, utilizada na análise cinemática de estabilidade.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 15 - Rede estereográfica do Ponto 01 com a face do talude e as famílias de descontinuidades.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.9.2 ANÁLISE CINEMÁTICA DO PONTO - 2

A análise cinemática do Ponto 2 foi realizada a partir das orientações médias das famílias de descontinuidades, obtidas por tratamento estatístico dos dados estruturais levantados em campo apresentado abaixo, e representadas em redes estereográficas nos softwares StereoNet e OpenStereo 2.0, utilizando projeção equal-area no hemisfério inferior.

No Ponto 2, a face do talude apresenta orientação média de 078/34, enquanto as famílias estruturais identificadas possuem as seguintes orientações médias:

- Família 1 (206/54);
- Família 2 (251/30);
- Família 3 (342/17).

A partir da análise geométrica, observa-se que a Família 1 (206/54) apresenta direção de mergulho relativamente próxima à da face do talude, com diferença direcional da ordem de 128°, o que caracteriza uma orientação desfavorável à ruptura planar, uma vez que a descontinuidade não mergulha no mesmo sentido da face. Além disso, embora o mergulho da família seja superior ao da face, a discrepância direcional inviabiliza cinematicamente esse mecanismo de ruptura.

A Família 2 (251/30) apresenta diferença direcional ainda mais significativa em relação à face do talude, associada a um ângulo de mergulho inferior ao da face. Essa

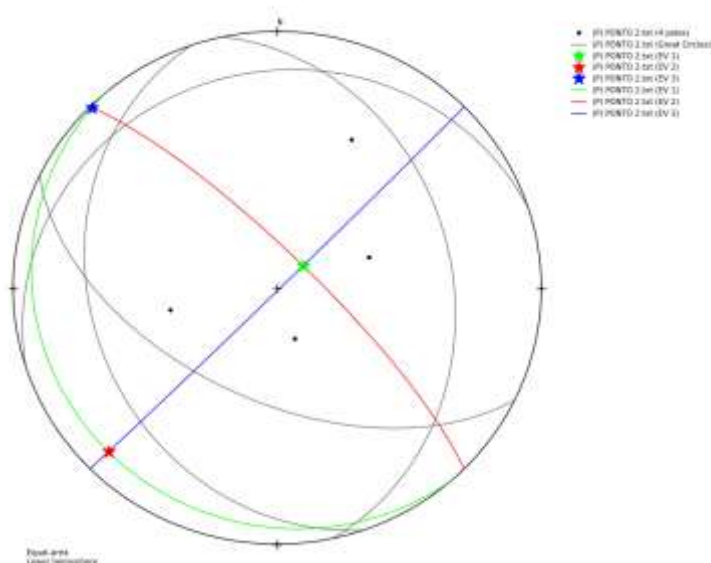
configuração indica que a descontinuidade não atende aos critérios geométricos necessários para a ocorrência de ruptura planar, sendo considerada cinematicamente estável para esse mecanismo.

Já a Família 3 (342/17) possui direção praticamente oposta à da face do talude e baixo ângulo de mergulho, configurando uma geometria claramente desfavorável à ruptura planar, não apresentando qualquer condição cinemática de instabilidade associada.

As redes estereográficas geradas no StereoNet evidenciam que os grandes círculos correspondentes às famílias estruturais não interceptam a região crítica associada à face do talude, enquanto a análise no OpenStereo 2.0 confirma essa interpretação ao mostrar que os polos médios das descontinuidades se encontram fora das zonas cinematicamente favoráveis à ruptura.

Dessa forma, a análise cinemática do Ponto 2 não identificou suscetibilidade à ruptura planar para nenhuma das famílias de descontinuidades analisadas. O comportamento estrutural observado indica que o maciço rochoso nesse ponto apresenta condição cinemática estável, considerando exclusivamente os critérios geométricos de orientação entre descontinuidades e face do talude.

Figura 16 - Rede estereográfica (projeção de igual-área, hemisfério inferior) do Ponto 02, com polos e grandes círculos das famílias de descontinuidades e da face do talude, utilizada na análise cinemática de estabilidade.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 17 - Rede estereográfica do Ponto 02 com a face do talude e as famílias de descontinuidades.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.9.3 PONTO 03 - BAIRRO BARRA

No Ponto 3, a análise estrutural foi realizada com base nos valores médios de direção e mergulho das três famílias de descontinuidades e da face do talude, obtidos a partir do tratamento estatístico das medições de campo. Esses dados foram representados em projeções estereográficas de hemisfério inferior, utilizando os softwares Stereonet e OpenStereo 2.0, garantindo consistência e validação cruzada dos resultados.

A face do talude apresenta orientação média de 078/34, indicando um talude com mergulho moderado e direção aproximadamente leste. As famílias de descontinuidades identificadas no ponto possuem as seguintes orientações médias:

- Família 1 (F1): 206/54
- Família 2 (F2): 251/30
- Família 3 (F3): 342/17

Na projeção estereográfica, observa-se que a Família 1 apresenta direção relativamente próxima à direção da face do talude, com diferença angular inferior a 30°, além de mergulho superior ao da face. Essa condição geométrica indica possibilidade de ruptura planar, uma vez que o plano de descontinuidade tende a aflorar na face do talude, atendendo aos critérios cinemáticos clássicos.

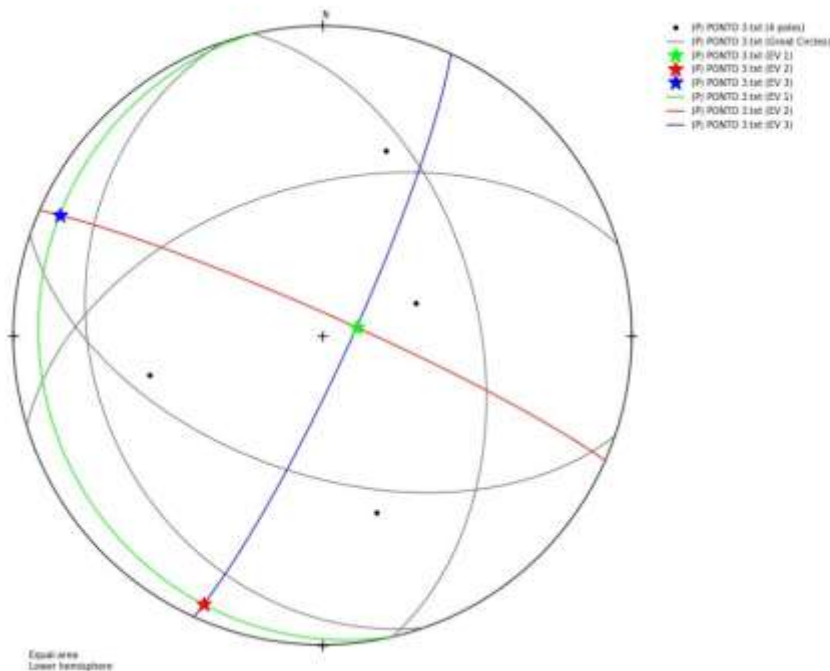
As Famílias 2 e 3, por sua vez, apresentam direções significativamente distintas da face do talude e mergulhos inferiores, não favorecendo mecanismos de ruptura

planar. Também não se observa, a partir da interseção dos grandes círculos dessas famílias, a formação de linhas de interseção com orientação compatível com o mergulho da face, o que descarta a ocorrência de ruptura em cunha para este ponto. Da mesma forma, não foram identificadas condições geométricas favoráveis à ruptura por tombamento, uma vez que os planos não apresentam mergulhos elevados em sentido contrário ao talude.

A análise realizada no Stereonet evidencia visualmente essas relações geométricas, por meio da sobreposição dos grandes círculos das discontinuidades com a orientação da face. Complementarmente, o OpenStereo 2.0 permitiu a análise cinemática detalhada, com a definição das janelas de ruptura e a identificação do mecanismo potencial associado à Família 1.

Dessa forma, o Ponto 3 é caracterizado por potencial suscetibilidade à ruptura planar, controlada principalmente pela Família 1, enquanto as demais famílias não contribuem de forma significativa para a instabilidade do talude nas condições geométricas atuais.

Figura 18 - Rede estereográfica (projeção de igual-área, hemisfério inferior) do Ponto 03, com polos e grandes círculos das famílias de discontinuidades e da face do talude, utilizada na análise cinemática de estabilidade.



Fonte: Autor

Figura 19 -Rede estereográfica do Ponto 03 com a face do talude e as famílias de descontinuidades.



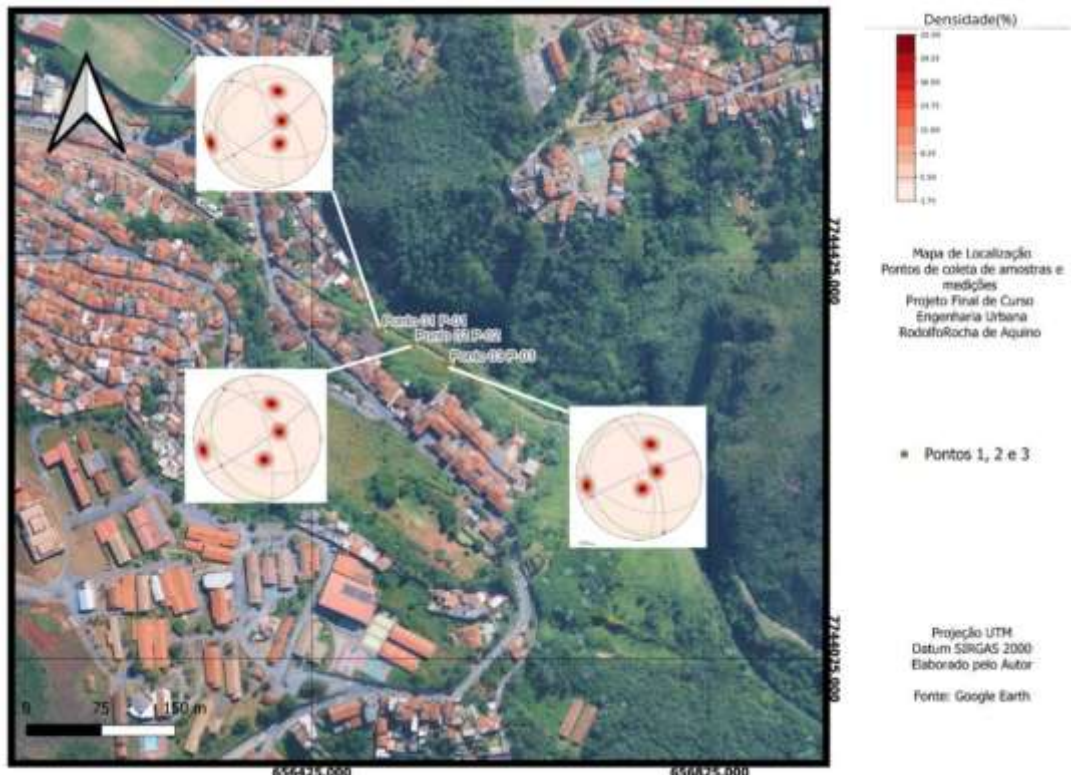
Fonte: Autor.

4.9.4 RESULTADOS DA ANÁLISE CINEMÁTICA (PROJEÇÕES ESTEREOGRÁFICAS)

A figura 20 apresenta a síntese dos resultados da análise cinemática para os três pontos avaliados (P-01, P-02 e P-03), combinando a localização espacial dos pontos com as projeções estereográficas das descontinuidades medidas em campo, representadas por contornos de densidade. Observa-se que, em todos os pontos, há concentrações bem definidas de orientações estruturais, indicando a presença de famílias de descontinuidades com atitudes preferenciais, compatíveis com o caráter anisotrópico dos maciços rochosos analisados.

Os contornos de densidade evidenciam que a distribuição das orientações não é aleatória e varia entre os pontos, sugerindo diferenças locais no controle estrutural dos taludes. Esse comportamento implica que a viabilidade geométrica de mecanismos de estabilização como ruptura planar, ruptura em cunha e tombamento depende da relação entre as famílias de descontinuidades identificadas e a orientação da face dos taludes em cada setor. Assim, a figura 20 subsidia a interpretação da compatibilidade geométrica entre as descontinuidades e os paramentos, servindo de base para a identificação dos modos de ruptura potencialmente admissíveis e para a discussão dos resultados por ponto nas subseções seguintes.

Figura 20 - Síntese dos resultados da análise cinemática por ponto (P-01, P-02 e P-03) - bairro Barra, Ouro Preto (MG).



Fonte: Autores

De forma geral, a presença de agrupamentos estruturais recorrentes nos três pontos reforça que a estabilidade dos taludes avaliados é fortemente condicionada pela geometria das descontinuidades, o que justifica a integração entre o mapeamento estrutural, a análise cinemática e a classificação geomecânica adotada no estudo.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo a caracterização geomecânica e a análise da estabilidade de taludes rochosos localizados no bairro Barra, no município de Ouro Preto (MG), a partir da integração de ensaios laboratoriais, levantamentos estruturais de campo e sistemas de classificação geomecânica consagrados. A metodologia adotada mostrou-se adequada para a avaliação do comportamento dos maciços rochosos em ambiente urbano, permitindo a identificação de setores mais sensíveis à instabilidade.

Os ensaios de carga pontual (PLT), executados na direção perpendicular à foliação, possibilitaram a estimativa da resistência à compressão uniaxial da matriz

rochosa. Os resultados indicaram valores médios da ordem de 20 MPa, o que caracteriza o material como de baixa resistência mecânica, conforme os critérios da ISRM. A partir desses dados, associando-os às características estruturais do maciço observadas em campo, foi determinado um índice RMR básico igual a 62. Este índice de qualidade boa (Classe II) concorda com o comportamento estável observado globalmente em campo durante as vistorias realizadas.

A aplicação do sistema Slope Mass Rating (SMR) permitiu refinar a análise de estabilidade, incorporando os efeitos geométricos e cinemáticos associados à orientação das descontinuidades em relação à face dos taludes. Embora os pontos analisados compartilhem o mesmo valor de RMR básico, os resultados do SMR evidenciaram diferenças importantes no comportamento estrutural, destacando o Ponto 01 como o setor mais crítico devido à elevada inclinação da face e à proximidade com infraestrutura ferroviária. Os Pontos 02 e 03 apresentaram condições de estabilidade mais favoráveis, com menor viabilidade cinemática para rupturas planares ou por tombamento.

Ressalta-se que, além dos fatores geomecânicos, a estabilidade dos taludes é fortemente influenciada por condicionantes antrópicos e ambientais, como a presença de sistemas de drenagem deficientes, infiltrações de esgoto doméstico e descarte inadequado de resíduos sólidos. Esses fatores, embora não sejam diretamente incorporados aos índices numéricos de classificação, desempenham um papel fundamental na avaliação do risco associado aos taludes em áreas urbanizadas.

Como limitações do estudo, destaca-se a ausência de ensaios específicos para a determinação direta dos parâmetros de resistência ao cisalhamento das descontinuidades (coesão e ângulo de atrito), o que inviabilizou a aplicação de métodos quantitativos de cálculo do fator de segurança. Ainda assim, os sistemas de classificação geomecânica utilizados mostraram-se suficientes para fornecer uma avaliação confiável da estabilidade relativa dos taludes analisados.

Por fim, recomenda-se que estudos futuros incluam ensaios geotécnicos complementares, monitoramento contínuo dos setores mais críticos e a elaboração de mapas de risco geotécnico detalhados para o bairro Barra. Tais medidas podem subsidiar ações de planejamento urbano e mitigação de riscos, contribuindo para a segurança da população e a preservação das infraestruturas existentes.

5.1 PERSPECTIVAS FUTURAS

A partir dos resultados obtidos, observa-se a possibilidade de aprofundamento da análise por meio da aplicação futura de modelagens numéricas determinísticas, utilizando métodos de equilíbrio limite ou elementos finitos, desde que sejam obtidos parâmetros geotécnicos adicionais, como coesão e ângulo de atrito das descontinuidades.

Recomenda-se também a implantação de monitoramento estrutural nos setores identificados como mais sensíveis, especialmente no Ponto 01, considerando a proximidade com a infraestrutura ferroviária e a influência de vibrações periódicas.

Além disso, a metodologia empregada neste estudo pode ser expandida para outros bairros do município de Ouro Preto que apresentem condições geológicas semelhantes, contribuindo para a elaboração de cartas geotécnicas municipais e políticas públicas voltadas à gestão preventiva de riscos geológicos em áreas urbanas.

6 REFERÊNCIAS

ABNT, NBR. 11682. Estabilidade de Encostas. **Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT, 2009.**

ASTM INTERNATIONAL. D5731-07: **Standard test method for determination of the point load strength index of rock and application to rock strength classifications.** West Conshohocken: ASTM International, 2007. 11 p. DOI: <https://doi.org/10.1520/D5731-07>

AZEVEDO, Rogério Cabral de; PORTO, Danielle Stefane Gualberto Fernandes; VILLAR, Lúcio Flávio de Souza; SANTOS, Hersília de Andrade e; PORTO, Thiago Bomjardim. Zoneamento de áreas suscetíveis a deslizamentos no município de Ouro Preto - Minas Gerais - Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 17, n. 3, p. 847-864, 2024.

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

BROCH, E.; FRANKLIN, J. A. The point-load strength test. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 9, p. 669-697, 1972.

BRAGA NETO, Nivaldo Moreira. Caracterização geomecânica de maciços rochosos em áreas urbanas: aplicação do RMR em taludes da região sudeste do Brasil. Belo Horizonte: UFMG, 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

CAMPOS, Lucas Almeida; MARQUES, Eduardo Antonio Gomes; COSTA, Teófilo Aquino Vieira; FERREIRA, Flávio Affonso; MARCHI, Othávio Afonso; ALVES, Henrique Oliveira. Reavaliação da RMR para as minas de ferro do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 17., 2014, Goiânia. Anais... Goiânia, 2014.

CAMPOS, Lucas Almeida; MARQUES, Eduardo Antonio Gomes; COSTA, Teófilo Aquino Vieira; FERREIRA FILHO, Flávio Affonso. Proposed adjustments and validation of different RMR89 geomechanical classification for Quadrilátero Ferrífero lithologies. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 79, n. 10, p. 5031-5048, 2020. DOI: 10.1007/s10064-020-01879-DEERE, D. U. Technical description of rock cores. **Rock Mechanics and Engineering Geology**, v. 1, n. 1, p. 16-22, 1964.

DEERE, D. U.; DEERE, D. W. Rock quality designation (RQD) after twenty years. Vicksburg, MS: U.S. **Army Corps of Engineers, Contract Report GL 89-100**, 1989.

GOODMAN, Richard E. **Introduction to Rock Mechanics**. 2. ed. Nova York: John Wiley & Sons, 1989.

GOOGLE EARTH. Imagem de satélite do bairro Barra-Ouro Preto/MG. Coordenadas: [-20.393, -43.499]. Imagem de julho de 2003, 2010, 2015, 2020 e

2025. Disponível em: <https://earth.google.com>. Acesso em: 17 jul. 2025.

HOEK, E.; CARRANZA-TORRES, C.; CORKUM, B. – Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition, Proc. Of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium and Seventeenth Tunneling Association of Canada Conference, 2002.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, v. 15, n. 6, p. 319-368, 1978.

ISRM. Suggested method for determining point load strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, [S. l.], v. 22, n. 2, p. 51-60, 1985.

JAEGER, J. C.; COOK, N. G. W. *Fundamentals of rock mechanics*. 3. ed. London: Chapman and Hall, 1979.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. *Soil mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 1969.

MARQUES, Aline de Almeida; PAES, Brahmani Sidhartha Tiburcio; MARQUES, Eduardo Antônio Gomes; PEREIRA, Luana Claudia. Correlations between uniaxial compressive strength and point load strength for some Brazilian high-grade metamorphic rocks. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, São Paulo, n. 4, p. 47-58, 2015.

MENDES, Ana Clara de Oliveira; TEIXEIRA, Gustavo Fernandes; HERNANDEZ, Pedro Manuel Alameda. *Caracterização geomecânica de material rochoso anisotrópico de áreas de risco do município de Ouro Preto: relatório final de projeto*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia Urbana, 2025. Relatório Final (Programa de Iniciação à Pesquisa – PIP/UFOP).

NIEHUES, Beatriz. **Caracterização, parametrização e análise da estabilidade de um talude rochoso do contorno rodoviário de Florianópolis, em São José - SC**. 2019. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) -

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

PALMSTROM, A. Characterizing rock masses by RQD-Jv methods. **Journal of Rock Mechanics**, 1975.

PINHEIRO, A. L.; SOBREIRA, F. G.; LANA, M. S. Influência da expansão urbana nos movimentos em encostas na cidade de Ouro Preto, MG. REM: **Revista Escola de Minas**, v. 56, n. 3, p. 169-174, 2003.

PREFEITURA DE OURO PRETO. Plano Diretor de Ouro Preto: Relatório de Proposições - Volume II. Ouro Preto, 2024. Disponível em: https://www.ouropreto.mg.gov.br/planodiretor/arquivos/PDOP_RELATORIOPROPOS_ICOES_VOL_II.pdf. Acesso em: 1 jul. 2025.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. Version 3.36. Open Source Geospatial Foundation Project, 2025. Disponível em: <https://qgis.org>. Acesso em: 01 ago. 2025.

Romana, Manuel, Seron, Jose B., and Enrique Montalar. "SMR Geomechanics Classification: Application, Experience And Validation." Paper presented at the 10th ISRM Congress, Sandton, South Africa, September 2003.

ROMANA, Manuel. **New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes**. In: Proceedings of the International Symposium on the Role of Rock Mechanics, Zacatecas, México, p. 49-53, 1985

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. Mapeamento e avaliação da suscetibilidade a movimentos de massa no município de Ouro Preto - MG. Brasília: CPRM, 2018.

SILVA, Breno Alcântara; PORTO, Thiago Bomjardim; GOMES, Antônio Jorge de Lima; GOMES, Jorge Luiz. Aplicação de geotecnologias no mapeamento de áreas suscetíveis a eventos geodinâmicos em Teófilo Otoni - MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 20.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MECÂNICA DAS ROCHAS, 10.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHEIROS GEOTÉCNICOS JOVENS, 10., 2024,

Balneário Camboriú. Anais... Balneário Camboriú: ABMS, 2024.
DOI: <https://doi.org/10.47094/COBRAMSEG2024/177>

SIVAKUGAN, Nagaratnam; SHUKLA, Sanjay K.; DAS, Braja M. Rock Mechanics: An Introduction. 1^a. ed.

SOUSA, H. A.; ÁLVARES, P. M. F. A legislação urbana e sua relação com a proteção do patrimônio cultural: o caso de Ouro Preto, MG. Arq.urb, n. 16, p. 60-76, 2019.

VARNES, D. J. Slope movement types and processes. In: SCHUSTER, R. L.; KRIZEK, R. J. (Ed.). **Landslides: analysis and control**. Washington, D.C.: National Academy of Sciences, 1978. p. 11-33. (Special Report, 176).

WYLLIE, Duncan C.; MAH, Chris. Rock Slope Engineering. 4^a. ed.

WOLPP, L. F. de L. Caracterização geomecânica de taludes em escavações urbanas na formação Serra Geral. 2018. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ZENÓBIO, Ângelo; ZUQUETTE, Lazaro. Geotechnical mapping of rock masses in natural slopes using geomechanical classifications. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR ENGINEERING GEOLOGY AND THE ENVIRONMENT CONGRESS, 2006, Nottingham. Proceedings... London: Geological Society of London, 2006. (IAEG 2006, Paper n. 173).

ZHAO, Z. P.; ZHI, J. C. Application and Improvement of Rock Quality Designation (RQD). **Applied Mechanics and Materials**, v. 747, p. 119-122, 2015