



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



Ana Clara de Oliveira Mendes

A influência da anisotropia e do intemperismo na resistência
de rochas e na estabilidade de encostas urbanas no município
de Ouro Preto - MG

Ouro Preto

2026

Ana Clara de Oliveira Mendes

A influência da anisotropia e do intemperismo na resistência
de rochas e na estabilidade de encostas urbanas no município
de 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: Dr. Pedro Manuel A. Hernandez

Ouro Preto

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M538a Mendes, Ana Clara de Oliveira.

A influência da anisotropia e do intemperismo na resitência de rochas e na estabilidade de encostas urbanas no município de Ouro Preto- MG. [manuscrito] / Ana Clara de Oliveira Mendes. - 2026.
87 f.: il.: color., gráf., tab., mapa. (Série: 1148696)

Orientador: Prof. Dr. Pedro Manuel Alameda Hernández.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Urbana .

1. Planejamento urbano. 2. Engenharia geotécnica. 3. Mecânica de rochas. 4. Risco Geológico. 5. Anisotropia. 6. Intemperismo. I. Hernández, Pedro Manuel Alameda. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 62:711.4

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - CRB6/2322



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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Ana Clara de Oliveira Mendes

A influência da anisotropia e do intemperismo na resistência de rochas e na estabilidade de encostas urbanas no município de Ouro Preto - MG

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

Aprovada em 24 de julho de 2026

Membros da banca

Dr. Pedro Manuel Alameda Hernández - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Mário Luis Cabello Russo - (Instituto Federal de Minas Gerais)
Dr. Ángel Efrén Tamayo Jaramillo - (Universidade Federal de Ouro Preto)

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 28/07/2026



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Manuel Alameda Hernandez, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/07/2026, às 15:54, 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 **1148696** e o código CRC **A7E46531**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.008399/2026-10

SEI nº 1148696

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: (31)3559-1471 - www.ufop.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo de toda esta trajetória acadêmica, especialmente nos momentos de dificuldade e incerteza.

À minha família e amigos, expresso minha mais profunda gratidão pelo apoio incondicional, pelo incentivo constante e por acreditarem em mim em todas as etapas desta caminhada. Sua presença, compreensão e carinho foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui.

Ao meu professor orientador Dr. Pedro Manuel Alameda Hernandez, agradeço pela orientação, paciência, disponibilidade e pelos conhecimentos compartilhados durante o desenvolvimento deste trabalho. Suas contribuições foram essenciais para o meu crescimento acadêmico, profissional e pessoal.

Aos técnicos dos laboratórios do NUGEO da Escola de Minas, agradeço pelo auxílio na realização dos ensaios, pela atenção, disponibilidade e por todo o suporte técnico oferecido ao longo da pesquisa.

À Universidade Federal de Ouro Preto e à Escola de Minas, agradeço pela formação acadêmica de excelência e pelas oportunidades proporcionadas ao longo da graduação.

À Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação (PROPPI) e à EMBRAPPII, agradeço pelo apoio e pela oportunidade de participação em projetos de iniciação científica, experiências que contribuíram significativamente para a minha formação, para o desenvolvimento deste trabalho e para o aprofundamento dos meus conhecimentos na área.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para a conclusão desta importante etapa da minha vida.

*“Ninguém pode construir em teu lugar as pontes que
precisarás passar, para atravessar o rio da vida -
ninguém exceto você, somente você.”*

(Friedrich Nietzsche)

RESUMO

O município de Ouro Preto apresenta recorrentes processos de instabilidade em encostas urbanas, condicionados pela interação entre relevo acidentado, estruturas geológicas, intemperismo, precipitação e formas de uso e ocupação do solo. Este trabalho teve como objetivo caracterizar o comportamento físico e mecânico de rochas coletadas em seis setores da área urbana do distrito sede de Ouro Preto, considerando a anisotropia estrutural e as condições de alteração, e discutir as implicações dos resultados para o planejamento urbano e a gestão de riscos geológicos. A metodologia compreendeu reconhecimento geológico de campo, estimativa da resistência à compressão simples por índices de campo, ensaio de carga pontual em orientações paralela e perpendicular às estruturas planares, determinação de propriedades-índice e ensaio de durabilidade à desagregação. No ensaio de carga pontual, a amostra São Cristóvão apresentou os maiores valores médios de $I_{s(50)}$, com 2,27 MPa na orientação perpendicular e 2,10 MPa na paralela. A amostra Centro apresentou valores de 2,17 MPa e 0,48 MPa, respectivamente, evidenciando influência pronunciada da anisotropia. Já a amostra da XIII de Maio apresentou valores de 0,96 MPa na orientação perpendicular e 0,75 MPa na paralela. Os índices de durabilidade variaram entre 74,78% e 98,51%, mostrando que a resistência à desagregação não acompanha necessariamente a resistência à carga pontual. As propriedades físicas também apresentaram elevada variabilidade, com porosidades entre 2,19% e 20,45% nas amostras em que o procedimento completo foi possível. Os resultados demonstram que a formação geológica regional, isoladamente, não é suficiente para representar o comportamento local, que depende da interação entre estrutura, características físicas, heterogeneidade e estado de alteração. Embora não permitam o dimensionamento de obras ou a análise direta da estabilidade, os parâmetros obtidos constituem dados preliminares que podem orientar investigações futuras e complementar a cartografia geotécnica, o Plano Municipal de Redução de Riscos e o planejamento territorial de Ouro Preto.

Palavras-chave: anisotropia; intemperismo; mecânica das rochas; geotecnia; planejamento urbano; risco geológico.

ABSTRACT

The municipality of Ouro Preto has a recurring history of instability processes on urban slopes, conditioned by the interaction between steep terrain, geological structures, weathering, rainfall, and land-use patterns. This study aimed to characterize the physical and mechanical behavior of rock samples collected from six locations within the urban area of the Ouro Preto administrative district, considering structural anisotropy and weathering conditions, and to discuss the implications of the results for urban planning and geological risk management. The methodology comprised geological field reconnaissance, approximate estimation of uniaxial compressive strength using field indices, point load testing parallel and perpendicular to the macroscopically identified planar structures, determination of index properties, and slake durability testing. In the point load test, the sample São Cristóvão presented the highest mean $I_{s(50)}$ values, with 2.27 MPa in the perpendicular orientation and 2.10 MPa in the parallel orientation. The sample Centro presented values of 2.17 MPa and 0.48 MPa, respectively, indicating a pronounced influence of anisotropy. The sample XIII de Maio presented values of 0.96 MPa in the perpendicular orientation and 0.75 MPa in the parallel orientation. Slake durability indices ranged from 74.78% to 98.51%, demonstrating that resistance to disintegration does not necessarily correspond directly to point load strength. The physical properties also showed substantial variability, with porosity values ranging from 2.19% to 20.45% in the samples for which the complete procedure could be performed. The results demonstrate that regional geological classification alone is insufficient to represent local rock behavior, which depends on the interaction between structural characteristics, physical properties, heterogeneity, and weathering conditions. Although the results are not sufficient for structural design or direct slope stability assessment, the parameters obtained constitute preliminary data that can guide future investigations and complement engineering geological mapping, the Municipal Risk Reduction Plan, and territorial planning in Ouro Preto.

Keywords: anisotropy; weathering; rock mechanics; geotechnics; urban planning; geological risk.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da ocupação urbana no município de Ouro Preto.....	18
Figura 2 - Mapa de ocupação urbana atual.....	20
Figura 3 - Mapa do grupo geológico no distrito sede de Ouro Preto.....	22
Figura 4 - Coluna estratigráfica da região de Ouro Preto	23
Figura 5 - Exemplo de maciço rochoso anisotrópico.....	24
Figura 6 - Tipos de movimentos de massa.....	26
Figura 7 - Relação entre o clima e processos de intemperismo.....	29
Figura 8 - Médias mensais históricas de precipitação em Ouro Preto.....	30
Figura 9 - Mapa de localização de Ouro Preto.....	39
Figura 10 - Mapa de formação geológica de Ouro Preto.....	40
Figura 11 - Mapa de setorização de riscos em Ouro Preto.....	41
Figura 12 - Local de retirada da amostra da São Francisco, da formação Cauê.....	42
Figura 13 - Local de retirada da amostra São Cristóvão, da formação Cauê.....	42
Figura 14 - Local de retirada da amostra Centro, da Formação Indiviso.....	43
Figura 15 - Local de retirada da amostra XII de Maio, da Formação Cauê.....	43
Figura 16 - Local de retirada da amostra Morro da Força, da Formação Fecho do Funil.....	44
Figura 17 - Local de retirada da amostra Vila Aparecida, da Formação Fecho do Funil.....	44
Figura 18 - a) Amostra intensamente alterada e branda; b) Corte de amostras com auxílio de serra mármore.....	46
Figura 19 - Fragilidades das amostras. a) Amostra Vila Aparecida sendo facilmente marcada com a unha b) Amostra São Francisco sendo furada facilmente pela ponta da faca c) Amostra Morro da força sendo fraturada facilmente ao ser golpeada com a ponta do martelo.....	47
Figura 20 - Aparelho do ensaio PLT.....	48
Figura 21 - Requisitos de forma dos corpos de prova para: (a) o ensaio diametral, (b) o ensaio axial, (c) o ensaio em bloco e (d) o ensaio com fragmentos irregulares.....	49
Figura 22 - Medição das amostras irregulares.....	49
Figura 23 - Corpos de prova XIII de Maio - Formação Cauê. a) antes do ensaio com orientação perpendicular à foliação. b) depois do ensaio com orientação perpendicular à foliação. c) antes do ensaio com orientação paralelo à foliação. d) depois do ensaio com orientação paralelo à foliação.....	50
Figura 24 - Corpos de prova da amostra Centro - Formação Indiviso.a) antes do ensaio com orientação perpendicular à foliação. b) depois do ensaio com orientação perpendicular à foliação. c) antes do ensaio com orientação paralelo à foliação. d) depois do ensaio com orientação paralelo à foliação.....	51
Figura 25 - Corpos de prova da amostra São Cristóvão - Formação Cauê.a) antes do ensaio com orientação perpendicular à foliação. b) depois do ensaio com orientação perpendicular à foliação. c) antes do ensaio com orientação paralelo à foliação. d) depois do ensaio com orientação paralelo à foliação.....	52
Figura 26 - Execução de ensaios de propriedades-índice das amostras. a)Amostra saturada imersa em água em vácuo. b) Amostra em banho de imersão.....	57
Figura 27 - Trituração de material para ensaio com auxílio do martelo petrográfico.....	58

Figura 28 - Material sendo ensaiado com auxílio de bomba de vácuo.....	59
Figura 29 - Aparelho do ensaio Slake Durability.....	60
Figura 30 - Amostras no aparelho do ensaio Slake Durability no laboratório do DEMIN.....	61
Figura 31 - Corpos de prova da amostra Centro.....	69
Figura 32 - Corpos de prova da amostra XIII de Maio.....	70
Figura 33 - Corpos de prova da amostra São Cristóvão.....	70
Figura 34 - Vista do deslizamento sobre a rodoviária em 2012.....	74
Figura 35 - Vista do deslizamento no Morro da Força.....	74
Figura 36 - Relação entre benefício e custo nas diferentes modalidades de investigação geológico-geotécnica.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Objetivos dos estudos geológico-geotécnicos em função das etapas de um projeto...	32
Tabela 2 - Influência do meio geológico e do relevo no planejamento das investigações in situ.	35
Tabela 3 - Estimativa aproximada e classificação da resistência à compressão simples de solos e rochas a partir de índices de campo.....	37
Tabela 4 - Pontos de amostragem escolhidos.....	41
Tabela 5 - Parâmetros do ensaio da amostra XIII de Maio- Formação Cauê.....	50
Tabela 6 - Parâmetros do ensaio da amostra Centro - Formação Indiviso.....	51
Tabela 7 - Parâmetros do ensaio da amostra São Cristóvão - Formação Cauê.....	52
Tabela 8 - Classificação da durabilidade sugerida pela ISRM.....	62
Tabela 9 - Ensaio realizados para cada amostra.....	63
Tabela 10 - Propriedades-Índice das Rochas.....	63
Tabela 11 - Estimativa aproximada e classificação da resistência à compressão simples a partir de índices de campo.....	66
Tabela 12 - Resultados do ensaio da amostra XIII de Maio - Formação Cauê.....	67
Tabela 13 - Resultados do ensaio da amostra Centro - Formação Indiviso.....	67
Tabela 14 - Resultados do ensaio da amostra São Cristóvão - Formação Cauê.....	68
Tabela 15 - Resultados do ensaio Slake Durability.....	72

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. OBJETIVOS.....	13
1.2. JUSTIFICATIVA.....	14
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1. Contexto Histórico e evolução da ocupação urbana em Ouro Preto.....	16
2.2. Contexto geológico e geomorfológico.....	20
2.3. Mecânica das Rochas e Anisotropia.....	23
2.4. Processos de Instabilidade em Encostas Rochosas Urbanas.....	25
2.4.1. <i>Movimentos de Massa</i>	26
2.4.2. <i>Rupturas Circulares Profundas e o Papel do Intemperismo</i>	27
2.5. Influência do clima de Ouro Preto na evolução do intemperismo e no comportamento geomecânico das rochas.....	28
2.6. Os estudos geológico-geotécnicos como subsídio ao planejamento territorial e à gestão de riscos urbanos.....	31
2.7. Influência do meio geológico e do relevo no planejamento das investigações geológico-geotécnicas.....	33
2.8. Ensaios geomecânicos aplicados à avaliação da resistência das rochas e do intemperismo na estabilidade de encostas.....	35
2.8.1. <i>Estimativa de resistência à compressão simples a partir de índices de campo</i>	36
3. METODOLOGIA.....	38
3.1. Área de Estudo.....	38
3.2. Critérios de seleção dos pontos de amostragem.....	39
3.3. Coleta e preparação das amostras.....	45
3.4. Ensaios de caracterização geomecânica.....	46
3.4.1. <i>Estimativa de resistência à compressão simples a partir de índices de campo</i>	46
3.4.2. <i>Ensaio de Carga Pontual</i>	48
3.4.3. <i>Ensaio de Propriedades-Índice das Rochas</i>	54
3.4.4. <i>Ensaio Slake Durability</i>	60
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
4.1. Ensaio de Propriedades-Índice das Rochas.....	63
4.2. Estimativa de resistência à compressão simples a partir de índices de campo.....	65
4.3. Ensaio de Carga Pontual.....	67
4.4. Ensaio Slake Durability.....	71
4.5. Relação dos resultados com ocorrências históricas de instabilidade.....	73
4.6. Aplicabilidade dos resultados à cartografia geotécnica e aos instrumentos de planejamento territorial.....	76
5. CONCLUSÃO.....	78
5.1. Sugestão para trabalhos futuros.....	80
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82

1. INTRODUÇÃO

O município de Ouro Preto apresenta histórico recorrente de instabilidades em encostas, especialmente em áreas urbanizadas implantadas sobre relevo acidentado e inseridas em um meio físico geologicamente complexo. A ocupação urbana desenvolveu-se, em grande parte, sobre encostas íngremes e vales encaixados, nem sempre acompanhada pela consideração adequada dos condicionantes geológicos e geotécnicos. Esse processo contribuiu para a recorrência de escorregamentos, quedas de blocos e outros movimentos gravitacionais de massa, com impactos diretos sobre a segurança da população, a infraestrutura urbana e a preservação do patrimônio histórico, configurando um dos principais desafios ao planejamento territorial e à gestão de riscos no município (Bonuccelli, 1996).

Do ponto de vista geológico, a área urbana de Ouro Preto está inserida no contexto do Quadrilátero Ferrífero e apresenta rochas metamórficas e metassedimentares, como filitos, xistos, quartzitos e formações ferríferas, caracterizadas por foliação, bandamento, fraturamento e diferentes condições de alteração. Essas estruturas internas conferem comportamento anisotrópico aos materiais rochosos, fazendo com que sua resistência e seus mecanismos de ruptura variem de acordo com a orientação da sollicitação em relação aos planos estruturais. Estudos desenvolvidos por Bonuccelli (1996, 1999) e Zenóbio (2000) demonstram que a orientação das foliações e das descontinuidades em relação às encostas e aos cortes urbanos constitui um dos fatores condicionantes das instabilidades, podendo favorecer escorregamentos planares, tombamentos e quedas de blocos.

Nesse contexto, a compreensão do comportamento mecânico das rochas anisotrópicas é relevante para a interpretação das condições de estabilidade de encostas e taludes em ambientes urbanos. Goodman (1989) destaca que as propriedades mecânicas das rochas podem variar significativamente em função da direção de carregamento, especialmente em materiais foliados ou bandados. Barton (2007), ao abordar a qualidade dos maciços rochosos, também ressalta que a resistência da matriz e a orientação, persistência e condição das descontinuidades exercem papel determinante nos mecanismos de ruptura, sobretudo quando associadas a intervenções antrópicas que expõem planos estruturais desfavoráveis.

Além da anisotropia, o intemperismo exerce papel importante na evolução do comportamento geomecânico das rochas em ambientes tropicais úmidos. Em Ouro Preto, a concentração das

precipitações nos meses mais chuvosos favorece a infiltração de água e a intensificação dos processos de alteração física e química dos materiais (Castro et al., 2012). Bonuccelli (1996) descreve a presença de rochas com diferentes graus de alteração na área urbana, associadas à abertura de descontinuidades, ao aumento da porosidade e à redução da integridade dos materiais. Zenóbio (2000) destaca que a degradação progressiva das propriedades geomecânicas pode contribuir para a redução da resistência dos maciços, especialmente quando combinada com condições desfavoráveis de relevo, drenagem e ocupação urbana.

Dessa forma, as instabilidades em encostas urbanas de Ouro Preto não devem ser compreendidas apenas como consequência de eventos extremos ou de rupturas instantâneas, mas como resultado da interação entre estruturas geológicas, características dos materiais, processos de intemperismo, água, relevo e intervenções antrópicas. Estudos experimentais sobre durabilidade e alterabilidade demonstram que ciclos de umedecimento e secagem, lixiviação e variações ambientais podem provocar modificações progressivas nas propriedades físicas e mecânicas das rochas, afetando seu comportamento quando expostas em cortes e encostas urbanas (Ferreira; Antão, 2006; Tomasi Neto, 2015; Corrêa et al., 2020).

A incorporação de informações geológico-geotécnicas ao planejamento urbano encontra respaldo nas diretrizes da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), instituída pela Lei Federal nº 12.608/2012, que estabelece a integração da gestão de riscos ao ordenamento territorial e a priorização de ações preventivas (Brasil, 2012). Nesse sentido, o presente trabalho busca caracterizar o comportamento físico e mecânico de rochas coletadas em diferentes setores da área urbana do distrito sede de Ouro Preto, considerando a influência da anisotropia estrutural e das condições de intemperismo. A partir dos ensaios de carga pontual, propriedades-índice, durabilidade à desagregação e estimativas de resistência por índices de campo, pretende-se discutir as implicações dos resultados para a estabilidade de encostas e sua possível contribuição para instrumentos como o Plano Municipal de Redução de Riscos, o Plano Diretor e a cartografia geotécnica, fortalecendo a integração entre Geotecnia e Engenharia Urbana.

1.1. OBJETIVOS

Objetivo Geral

Caracterizar o comportamento físico e mecânico de rochas coletadas em diferentes setores da área urbana do distrito sede de Ouro Preto, considerando a influência da anisotropia estrutural e das condições de intemperismo, e discutir as implicações dos resultados para a estabilidade de encostas, o planejamento urbano e a gestão de riscos geológicos.

Objetivos específicos

- Realizar a amostragem de materiais rochosos em diferentes pontos da área urbana de Ouro Preto, priorizando taludes rochosos com indícios ou histórico de instabilidade, visando à caracterização geomecânica dos materiais.
- Determinar as propriedades-índice físicas das amostras, avaliando parâmetros relacionados ao seu estado e às possíveis manifestações dos processos de intemperismo.
- Avaliar a resistência das amostras à desagregação após ciclos de umedecimento e secagem por meio do ensaio Slake Durability e discutir sua relação com as características observadas em campo.
- Determinar o índice de resistência à carga pontual corrigido nas orientações paralela e perpendicular às estruturas planares identificadas macroscopicamente, avaliando a anisotropia mecânica das amostras.
- Estimar a faixa de resistência à compressão simples dos materiais muito brandos por meio de índices de campo, nos casos em que não foi possível obter corpos de prova adequados aos ensaios laboratoriais.
- Analisar, de forma integrada, as relações entre resistência, anisotropia, propriedades físicas, durabilidade e características macroscópicas das amostras.
- Discutir as implicações dos resultados para a compreensão preliminar da suscetibilidade das encostas urbanas e sua contribuição potencial para a cartografia geotécnica, o PMRR e o Plano Diretor Municipal.

1.2. JUSTIFICATIVA

O município de Ouro Preto apresenta um contexto particularmente complexo de instabilidade em encostas urbanas, resultante da interação entre relevo acidentado, substrato geológico predominantemente metamórfico, elevada pluviosidade e um processo histórico de ocupação nem sempre compatível com os condicionantes do meio físico. Estudos desenvolvidos no município demonstram que os movimentos gravitacionais de massa não ocorrem de maneira aleatória, mas são condicionados pelas características das rochas e dos materiais de alteração, pela presença e orientação de estruturas geológicas, pelas condições de drenagem e pelas intervenções antrópicas associadas à urbanização, como cortes, aterros e modificações no escoamento superficial (Bonuccelli, 1996, 1999; Zenóbio, 2000).

As rochas presentes na área urbana de Ouro Preto apresentam foliações, fraturas e bandamentos que lhes conferem comportamento anisotrópico, fazendo com que sua resistência varie conforme a direção de aplicação dos esforços. Além disso, os processos de intemperismo podem modificar progressivamente as propriedades físicas e mecânicas desses materiais, promovendo abertura de descontinuidades, aumento da porosidade, perda de coesão e redução da resistência. Dessa forma, a estabilidade das encostas não depende exclusivamente da formação geológica ou da resistência da matriz rochosa, mas da interação entre litologia, estruturas, grau de alteração, relevo, presença de água e intervenções realizadas no terreno (Bonuccelli, 1999; Zenóbio, 2000; González de Vallejo, 2002).

Apesar do reconhecimento da influência desses condicionantes nos processos de instabilização, os diagnósticos territoriais nem sempre dispõem de parâmetros geomecânicos locais em quantidade e distribuição espacial suficientes para representar a variabilidade do substrato rochoso urbano. Os levantamentos geomorfológicos, os inventários de ocorrências, a análise do uso e ocupação do solo e as avaliações qualitativas de campo são fundamentais para a identificação e a setorização das áreas de risco, entretanto, podem ser complementados por dados físicos e mecânicos que contribuam para compreender o comportamento dos materiais presentes em cada contexto geológico. A produção desses parâmetros não substitui as investigações específicas exigidas para análises de estabilidade e projetos de engenharia, mas pode reduzir incertezas e auxiliar na definição de setores que necessitam de estudos mais detalhados.

O planejamento urbano e o ordenamento territorial de áreas de encosta demandam, portanto, a integração entre informações geológicas, geotécnicas e urbanísticas. Girão, Corrêa e Guerra (2007) destacam que a ocupação de encostas dissociada da compreensão da dinâmica do meio físico pode intensificar processos erosivos e movimentos de massa, ampliando riscos ambientais e sociais. Em Ouro Preto, essa problemática se manifesta na recorrência de ocorrências atendidas pelos órgãos de proteção e defesa civil, nos danos à infraestrutura urbana e nas ameaças ao patrimônio histórico, reforçando a necessidade de aprofundar o conhecimento sobre os condicionantes físicos da instabilidade e sua incorporação aos instrumentos de gestão territorial.

Nesse contexto, a caracterização física, mecânica e de durabilidade das rochas fornece informações complementares para futuras avaliações geotécnicas em áreas urbanas. O ensaio de carga pontual permite determinar o índice de resistência em diferentes orientações em relação às estruturas planares, contribuindo para a avaliação da anisotropia mecânica. Os ensaios de propriedades-índice e de Slake Durability, por sua vez, auxiliam na análise do estado físico e da resistência à desagregação dos materiais quando submetidos à ação da água. Para as rochas muito brandas, nas quais não foi possível preparar corpos de prova adequados, a utilização de índices de campo possibilita uma estimativa preliminar da faixa de resistência. A integração desses procedimentos permite caracterizar diferentes aspectos do comportamento das amostras, sem reduzir a análise a um único parâmetro.

A relevância do estudo também se relaciona às diretrizes da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), instituída pela Lei Federal nº 12.608/2012, que prioriza ações preventivas, a integração da gestão de riscos ao ordenamento territorial e a produção de conhecimento técnico-científico voltado à redução de desastres (Brasil, 2012). Ao caracterizar amostras provenientes de diferentes setores da área urbana de Ouro Preto e discutir as implicações dos resultados para as encostas urbanas, o trabalho pode fornecer dados preliminares e complementares para instrumentos como o Plano Municipal de Redução de Riscos (PMRR), o Plano Diretor Municipal, a cartografia geotécnica e as cartas de suscetibilidade.

A contribuição para esses instrumentos deve ser compreendida de acordo com a escala e as limitações da pesquisa. Os resultados obtidos não permitem elaborar diretamente cartas de suscetibilidade, classificar definitivamente setores de risco ou dimensionar obras de

estabilização. Entretanto, podem integrar uma base de dados geológico-geotécnicos que, quando ampliada, georreferenciada e associada a informações sobre relevo, descontinuidades, materiais de cobertura, drenagem, precipitação, ocupação urbana e histórico de ocorrências, poderá auxiliar no refinamento dos diagnósticos territoriais e no planejamento de futuras campanhas de investigação.

Dessa forma, o presente trabalho justifica-se por sua contribuição técnica e científica e relevância urbana e social. Tecnicamente, contribui para a obtenção de parâmetros físicos e mecânicos de rochas aflorantes em diferentes contextos da cidade. Cientificamente, discute a atuação conjunta da anisotropia, das características dos materiais e dos processos de intemperismo. Sob a perspectiva da Engenharia Urbana, integra a caracterização geológico-geotécnica dos instrumentos de planejamento e gestão territorial, contribuindo para decisões mais fundamentadas quanto ao uso e à ocupação do solo e para a priorização de ações preventivas em áreas suscetíveis.

Por fim, o estudo está alinhado ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 11 da Agenda 2030, que propõe tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis. Ao produzir informações sobre o comportamento físico e mecânico de materiais presentes nas encostas urbanas e discutir sua aplicação ao planejamento territorial, a pesquisa contribui para o aprimoramento da prevenção de riscos e para a construção de um desenvolvimento urbano mais compatível com as características e limitações do meio físico (ONU, 2015).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Contexto Histórico e evolução da ocupação urbana em Ouro Preto

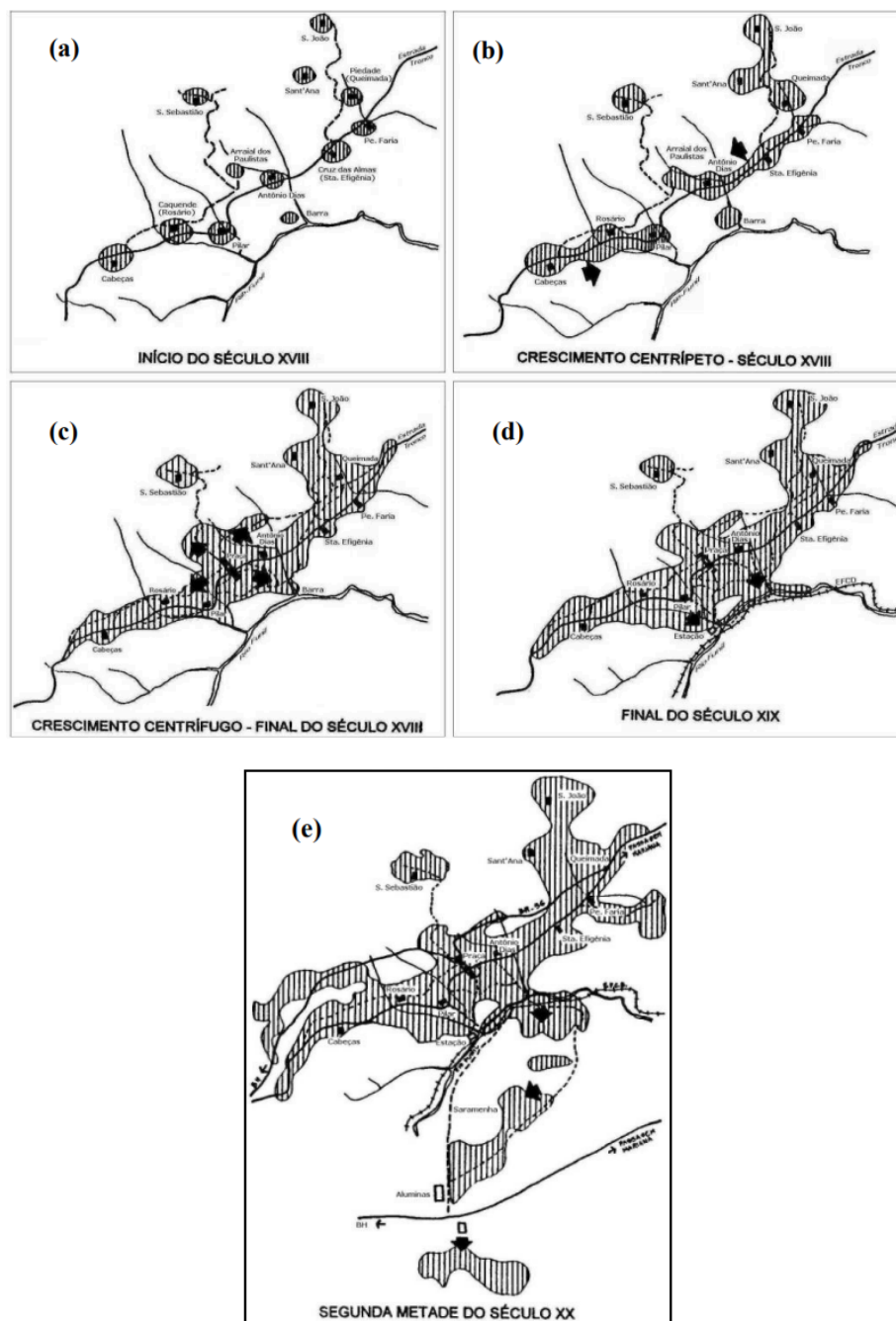
A ocupação urbana de Ouro Preto está diretamente associada ao ciclo da mineração aurífera iniciado no final do século XVII, que deu origem a um processo de urbanização singular no contexto brasileiro. Diferentemente de cidades planejadas, o crescimento urbano ocorreu de forma orgânica e adaptativa ao relevo acidentado, com a implantação de núcleos habitacionais, vias e equipamentos urbanos ao longo de encostas íngremes, fundos de vale e interflúvios estreitos. Essa configuração histórica resultou em uma malha urbana fortemente

condicionada pelas características geomorfológicas e estruturais do terreno, cujos reflexos são observados até os dias atuais (Bonuccelli, 1996).

Durante o período colonial, a prioridade dada à exploração mineral e à proximidade das áreas de extração levou à ocupação de setores naturalmente instáveis, sem a adoção de critérios técnicos relacionados à estabilidade de encostas ou à adequação geotécnica do substrato. Segundo Bonuccelli (1999), a implantação de edificações e caminhos sobre encostas rochosas e solos de alteração ocorreu, em grande parte, desconsiderando as limitações impostas pelas estruturas geológicas, como foliações e fraturas, estabelecendo uma herança urbana marcada por elevado grau de vulnerabilidade geotécnica.

Com o declínio da mineração aurífera e a consolidação da cidade como centro administrativo e cultural, a expansão urbana manteve o padrão histórico de ocupação de encostas, intensificado ao longo do século XX pelo crescimento populacional e pela demanda por habitação. Zenóbio (2000) destaca que, nesse período, a urbanização avançou sobre áreas cada vez mais íngremes e suscetíveis a processos de instabilidade, frequentemente acompanhada por cortes, aterros e alterações nos sistemas naturais de drenagem, fatores que contribuíram para a intensificação dos movimentos de massa em áreas urbanas, conforme demonstrado na Figura 1.

Figura 1 - Evolução da ocupação urbana no município de Ouro Preto.



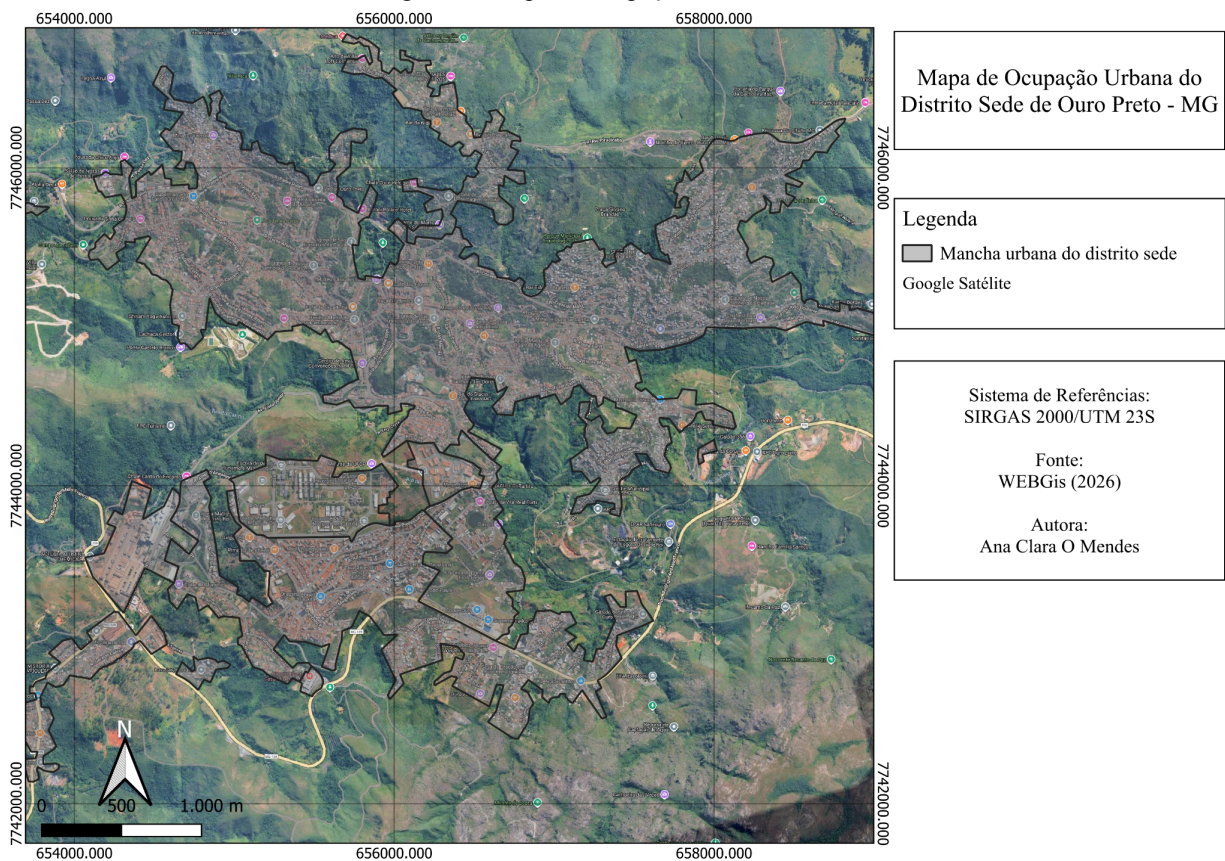
Fonte: Castro (2006).

A partir da segunda metade do século XX, a valorização do patrimônio histórico e a limitação de áreas planas disponíveis no núcleo tombado estimularam a expansão da cidade para bairros periféricos e encostas adjacentes. Esse processo ocorreu, em muitos casos, sem o devido planejamento urbano integrado, resultando na ocupação de áreas classificadas posteriormente como de risco geológico-geotécnico. Estudos técnicos e mapeamentos desenvolvidos para o

município evidenciam que grande parte das ocorrências de escorregamentos e instabilidades está associada a essas áreas de expansão urbana recente (Figura 2), onde o substrato rochoso alterado e os solos residuais apresentam baixa resistência e elevada suscetibilidade à degradação (Bonuccelli, 1999; Zenóbio, 2000).

A recorrência de eventos de instabilidade ao longo das últimas décadas motivou a elaboração de instrumentos específicos de gestão de risco, como mapeamentos de áreas suscetíveis e o Plano Municipal de Redução de Riscos (PMRR), que reconhecem explicitamente a influência do histórico de ocupação urbana sobre a vulnerabilidade das encostas. Castro (2006) demonstra que a distribuição espacial dos movimentos de massa em Ouro Preto apresenta forte correlação com áreas densamente urbanizadas e com setores onde a ocupação modificou significativamente o equilíbrio natural das encostas, especialmente quando associada a episódios de elevada pluviosidade.

Figura 2 - Mapa de ocupação urbana atual.



2.2. Contexto geológico e geomorfológico

O substrato geológico do município de Ouro Preto é constituído por um conjunto de unidades arqueanas e paleoproterozoicas inseridas no contexto do Quadrilátero Ferrífero, com predominância de rochas metamórficas e metassedimentares intensamente deformadas. Conforme descrito por Zenóbio (2000), essas unidades apresentam forte controle estrutural, resultado de múltiplos eventos tectono-metamórficos, responsáveis pelo desenvolvimento de foliações, bandamentos composicionais e sistemas de fraturas que condicionam o comportamento geomecânico das encostas.

Ainda de acordo com o autor, a área urbana de Ouro Preto é dominada por unidades pertencentes ao Supergrupo Minas, com destaque para os grupos Itabira e Piracicaba, além de ocorrências associadas ao Grupo Nova Lima e a unidades indiferenciadas (Figuras 3 e 4). O Grupo Itabira é representado principalmente pelas formações Cauê e Gandarela, compostas por itabiritos, itabiritos dolomíticos, dolomitos e filitos dolomíticos, rochas que apresentam

anisotropia estrutural marcante e comportamento mecânico fortemente dependente da orientação de seus planos internos (Zenóbio, 2000).

O Grupo Piracicaba inclui formações como Fecho do Funil, caracterizadas por filitos, filitos dolomíticos, quartzitos e intercalações ferruginosas, frequentemente associadas a níveis mais elevados de intemperismo. Essas rochas, embora apresentem resistência mineralógica variável, tendem a desenvolver espessas zonas de alteração, mantendo a herança estrutural da rocha sã, o que favorece mecanismos de instabilidade controlados por planos de fraqueza quando expostas em encostas urbanas (Zenóbio, 2000).

Além dessas unidades, o autor ainda destaca a ocorrência de rochas associadas ao Grupo Nova Lima, constituídas por filitos, xistos e rochas metavulcânicas, geralmente mais deformadas e intensamente fraturadas. Essas litologias apresentam elevada suscetibilidade à alteração intempérica e à degradação progressiva de suas propriedades físicas e mecânicas, contribuindo para a formação de materiais saprolíticos estruturalmente herdados, frequentemente associados a deslizamentos translacionais e rupturas profundas em encostas urbanizadas (Zenóbio, 2000).

Figura 3 - Mapa do grupo geológico no distrito sede de Ouro Preto.

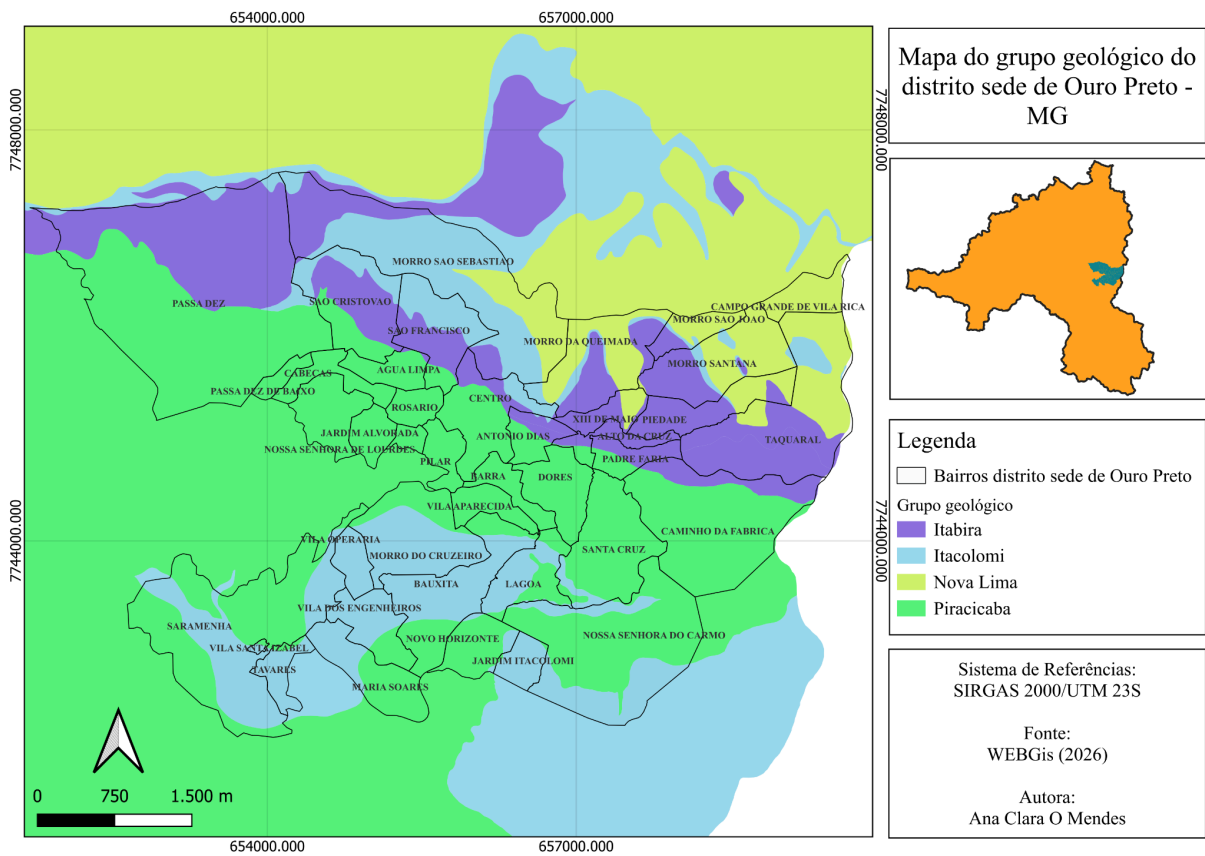


Figura 4 - Coluna estratigráfica da região de Ouro Preto .

Idade	Supergrupo	Grupo	Formação	Litologia	Esp. Máx.(m)
PROTEROZÓICO	PALEO		Indiviso	Ortoquartzitos, quartzitos (matriz ferruginosa), filitos quartzosos, filitos e conglomerados com seixos de itabiritos.	> 1000
		Sabará		Clorita – xistos, grauvacas, metatufos, conglomerados e quartzitos.	>3000
		Piracicaba	Barreiro	filitos e filitos grafitosos.	150
			Taboões	Ortoquartzitos.	125
			Fêcho do Funil	filitos, filitos dolomíticos e dolomito silicoso.	410
			Cercadinho	Quartzitos ferruginosos, quartzitos, filitos ferruginosos e dolomitos.	600
		Itabira	Gandarela	Dolomitos, filito dolomítico e calcários.	600
			Cauê	Itabirito, itabirito dolomítico, hematita.	350
		Caraca	Batatal	filitos e filitos grafitosos.	250
			Moeda	Quartzito sericitico, conglomerados e filitos.	1000
ARQUEANO	Rio das Velhas	Maquiné	Indiviso	Quartzitos, conglomerados, sericita-quartzo-xisto e filitos.	>1800
		Nova Lima	Indiviso	Filito clorítico, filito grafitoso, metagrauvacas, formações ferríferas, quartzitos, metacherts, dolomitos, rochas máficas e ultramáficas, sericita-quartzo-xisto.	>4000
		Quebra Ossos	Indiviso	Komatitos, formações ferríferas e metacherts.	>600
	Complexos Metamórficos	Indiviso	Indiviso	Gnaisses bandados, gnaisses migmáticos, augen gnaisses, granitos.	

Fonte: Zenóbio (2000)

2.3. Mecânica das Rochas e Anisotropia

A mecânica das rochas fornece os fundamentos para a compreensão do comportamento dos maciços rochosos submetidos a esforços naturais e induzidos por atividades antrópicas. Em rochas anisotrópicas (Figura 5), esse comportamento é fortemente condicionado pela presença de estruturas internas, como foliação, fraturas e bandamentos mineralógicos, que conferem direcionalidade às propriedades mecânicas. Goodman (1989) estabelece que a anisotropia exerce influência direta sobre a resistência, a deformabilidade e os mecanismos de ruptura das rochas, destacando que a orientação dos planos de fraqueza em relação ao estado de tensões é determinante para a estabilidade dos maciços.

Em rochas metamórficas foliadas, como xistos e filitos, a resistência não pode ser considerada uniforme em todas as direções. Goodman (1989) demonstra que carregamentos aplicados paralelamente aos planos estruturais tendem a mobilizar resistências significativamente menores quando comparados àqueles aplicados perpendicularmente à foliação, favorecendo rupturas preferenciais ao longo dessas superfícies. Barton (2007), ao tratar da qualidade dos maciços rochosos, reforça que a anisotropia estrutural é um dos principais fatores responsáveis pela variabilidade do comportamento mecânico, sendo refletida em parâmetros como resistência, deformabilidade e resposta à propagação de ondas.

Figura 5 - Exemplo de maciço rochoso anisotrópico.



Fonte: ACDMIN (2023).

O comportamento geomecânico das rochas anisotrópicas resulta da interação entre fatores intrínsecos, como composição mineralógica, textura, grau de intemperismo e presença de micro e macrodescontinuidades e fatores extrínsecos, como condições ambientais e estado de tensões. Fairhurst e Hudson (1999) enfatizam que a análise do comportamento tensão–deformação é essencial para compreender a resposta das rochas sob carregamento, especialmente em materiais anisotrópicos, nos quais respostas não lineares e rupturas prematuras são frequentes.

Heidari et al. (2012) demonstraram experimentalmente que a orientação dos planos estruturais exerce influência significativa sobre a resistência mecânica de rochas foliadas, evidenciando diferenças expressivas entre ensaios realizados paralela e perpendicularmente à anisotropia. De forma complementar, Xue et al. (2022) mostraram que a heterogeneidade textural e a granulometria afetam a deformabilidade e os modos de ruptura, indicando que rochas com

estrutura interna mais complexa apresentam comportamento mecânico distinto daquele observado em materiais mais homogêneos.

2.4. Processos de Instabilidade em Encostas Rochosas Urbanas

Os processos de instabilidade em encostas rochosas urbanas estão diretamente associados à relação entre estrutura geológica, relevo e intervenções antrópicas. Em ambientes urbanos assentados sobre rochas metamórficas foliadas, os mecanismos de ruptura mais comuns incluem escorregamentos planares ao longo da foliação, tombamentos e quedas de blocos. Bonuccelli (1996), ao analisar a geologia e o comportamento das encostas na área urbana de Ouro Preto, descreve a presença de rochas intensamente a moderadamente alteradas, com sistemas de descontinuidades formando blocos e placas, evidenciando o controle estrutural sobre os processos de instabilidade.

Zenóbio (2000) destaca que a orientação das descontinuidades em relação à face do talude constitui um fator decisivo para a ocorrência de escorregamentos e quedas de blocos, especialmente quando associada ao intemperismo e à presença de água. Em áreas urbanizadas, a instabilidade não decorre apenas da declividade, mas da interação entre a anisotropia estrutural e intervenções como cortes e escavações.

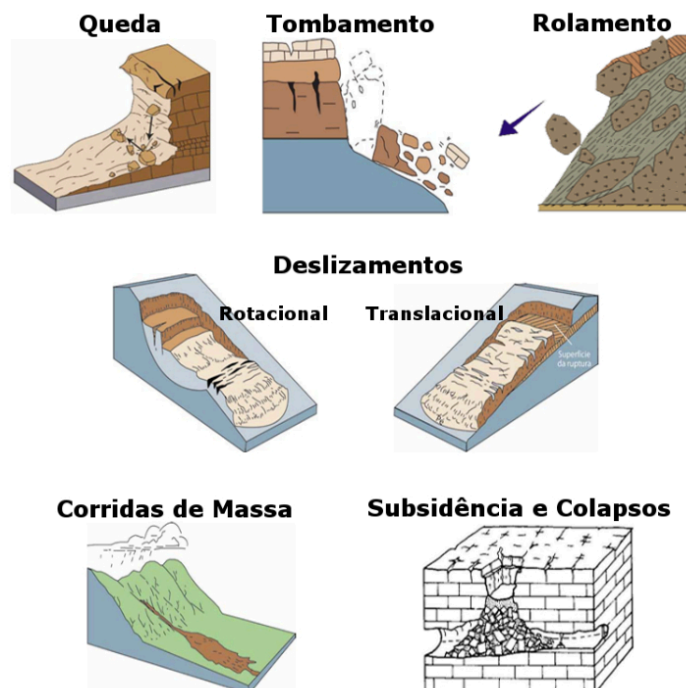
Em ambientes tropicais úmidos, como o de Ouro Preto, o intemperismo desempenha papel central na evolução dos movimentos de massa, atuando de forma progressiva na degradação das propriedades físicas e mecânicas dos materiais. A alteração contínua das rochas ao longo do tempo promove a abertura de descontinuidades, o aumento da porosidade e a redução da resistência, favorecendo tanto movimentos rápidos, como quedas de blocos, quanto processos mais lentos e cumulativos, como escorregamentos planares e em solos de alteração. Dessa forma, a compreensão dos tipos de movimentos de massa e de seus mecanismos associados é fundamental para a análise da estabilidade de encostas e para a elaboração de estratégias de prevenção e mitigação no planejamento urbano e na gestão de riscos.

2.4.1. *Movimentos de Massa*

Movimentos de massa são fenômenos naturais caracterizados pelo deslocamento de solo, rochas e sedimentos ao longo de vertentes sob a ação da gravidade, frequentemente potencializados pela ação da água e por interferências antrópicas. No Brasil, devido ao clima tropical com verões chuvosos e à presença de relevo acidentado em muitas áreas urbanizadas, esses processos representam um dos principais tipos de risco geológico enfrentados pelos municípios (Cemaden, 2022).

Ainda segundo o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), os movimentos de massa são classificados em quatro grupos principais, com base nos mecanismos de movimento e no tipo de material envolvido: (i) quedas, tombamentos e rolamentos; (ii) deslizamentos e escorregamentos; (iii) fluxos de detritos e lama; e (iv) subsidências e colapsos (Figura 6). Essa classificação considera tanto aspectos dinâmicos quanto as formas de ruptura e os processos deflagradores, e é amplamente utilizada em ações de monitoramento, alerta e mapeamento de suscetibilidade no Brasil.

Figura 6 - Tipos de movimentos de massa.



Fonte: Cemaden (2022).

Os movimentos de quedas, tombamentos e rolamentos envolvem o deslocamento de blocos ou fragmentos rochosos sem uma superfície de ruptura bem definida:

- Quedas: quando fragmentos de material rochoso se desprendem de taludes muito íngremes e se movem em queda livre.
- Tombamentos: quando blocos rochosos giram em torno de um ponto de apoio antes de descer a encosta.
- Rolamentos: quando blocos rochosos se deslocam rolando ao longo da superfície da vertente, geralmente após terem sido descalçados de sua posição original.

Os deslizamentos e escorregamentos incluem movimentos de solo e/ou rocha que ocorrem ao longo de superfícies de ruptura internas à encosta, podendo assumir diferentes configurações. O Cemaden destaca que, quando a superfície de ruptura é curva, o movimento é denominado rotacional, enquanto superfícies mais planas estão associadas a movimentos translacionais, ainda que ambos sejam agrupados conceitualmente como deslizamentos/escorregamentos. Esses eventos são frequentemente monitorados como deslizamentos de encosta, e constituem o principal tipo de movimento de massa comunicado pelo Cemaden em alertas antecessores a eventos críticos.

Os fluxos de detritos e lama, também referidos como corridas de massa, correspondem a movimentos extremamente rápidos, desencadeados por chuvas intensas que saturam o material superficial e provocam sua transformação em uma mistura fluida de água, lama e detritos rochosos, com grande poder destrutivo e alcance significativo ao longo da vertente. Por fim, as subsidências e colapsos são movimentos caracterizados pelo afundamento do terreno, seja de maneira rápida ou gradual, devido ao colapso de cavidades, à redução de porosidade do solo ou à deformação de materiais finos (como argilas), podendo comprometer a estabilidade de áreas urbanas e infraestruturas associadas.

2.4.2. Rupturas Circulares Profundas e o Papel do Intemperismo

As rupturas circulares profundas correspondem a movimentos de massa caracterizados pelo deslocamento de grandes volumes de material ao longo de superfícies de ruptura aproximadamente curvas, que se desenvolvem em profundidade e atravessam diferentes

horizontes do perfil de intemperismo. Diferentemente dos escorregamentos superficiais ou das rupturas controladas por planos estruturais bem definidos, esse tipo de instabilidade está fortemente associado à degradação progressiva das propriedades geomecânicas dos materiais e à redistribuição do estado de tensões ao longo do tempo (Cruden; Varnes, 1996).

Em ambientes tropicais úmidos, como o de Ouro Preto, as rupturas circulares profundas estão intimamente relacionadas à evolução do perfil de intemperismo, no qual rochas metamórficas foliadas se transformam gradualmente em rocha alterada, saprolito e solo residual. Bonuccelli (1996) destaca que, em diversos setores urbanos do município, ocorrem perfis espessos de alteração, nos quais a resistência dos materiais é progressivamente reduzida em função do intemperismo, favorecendo a formação de superfícies de ruptura profundas que não coincidem necessariamente com descontinuidades estruturais.

O intemperismo atua diretamente na redução da coesão aparente e do ângulo de atrito dos materiais ao longo do perfil de alteração, promovendo aumento da porosidade, abertura de microfraturas e enfraquecimento da matriz mineralógica. Associada a esse processo, a infiltração prolongada de água durante períodos chuvosos eleva as pressões neutras, reduzindo a resistência efetiva ao cisalhamento e contribuindo para a perda gradual de estabilidade das encostas (Zenóbio, 2000; Tominaga; Santoro; Amaral, 2016).

2.5. Influência do clima de Ouro Preto na evolução do intemperismo e no comportamento geomecânico das rochas

O desenvolvimento dos processos de intemperismo resulta da interação entre as características intrínsecas da rocha e as condições ambientais às quais ela está submetida. Segundo González de Vallejo (2002), a resistência da matriz rochosa à alteração depende principalmente de fatores como composição mineralógica, textura, estrutura, porosidade e grau de fraturamento, que condicionam a velocidade de degradação física e química do material. Minerais menos estáveis em condições superficiais tendem a sofrer transformações químicas mais rapidamente, favorecendo o aumento da porosidade, a redução da coesão entre os grãos minerais e, conseqüentemente, a diminuição da resistência mecânica das rochas. Dessa forma, a evolução dos perfis de alteração não ocorre de maneira uniforme, sendo diretamente

influenciada pelas propriedades geológicas de cada litotipo e pela intensidade dos agentes intempéricos atuantes (González de Vallejo, 2002).

Em regiões de clima tropical úmido, como o município de Ouro Preto, os processos de intemperismo assumem papel predominante na evolução dos maciços rochosos. A elevada precipitação anual, concentrada principalmente nos meses mais quentes do ano, favorece a infiltração de água ao longo das discontinuidades, promovendo reações como hidrólise, oxidação, hidratação e dissolução mineral, responsáveis pela alteração progressiva da matriz rochosa e pela formação de espessos perfis de alteração (Figura 7) (González de Vallejo, 2002). De acordo com Castro et al. (2012), a ocorrência de movimentos de massa em Ouro Preto apresenta forte relação com os episódios de precipitação intensa, sendo observada correlação entre a chuva diária e o volume acumulado nos cinco dias antecedentes aos eventos de instabilidade conforme indicado na Figura 8. Os autores demonstram que a infiltração de água reduz a resistência dos materiais geológicos e favorece o desencadeamento de escorregamentos, sobretudo em encostas previamente condicionadas por características geológicas e geomorfológicas desfavoráveis.

Figura 7 - Relação entre o clima e processos de intemperismo.

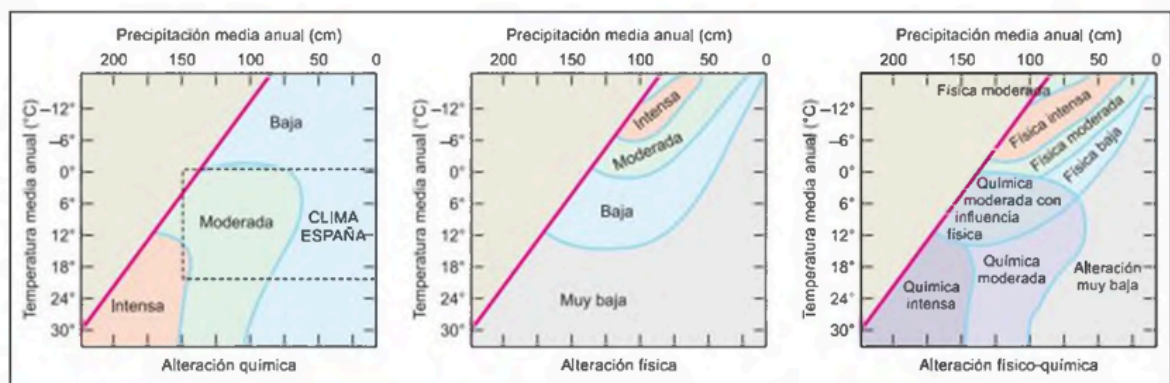
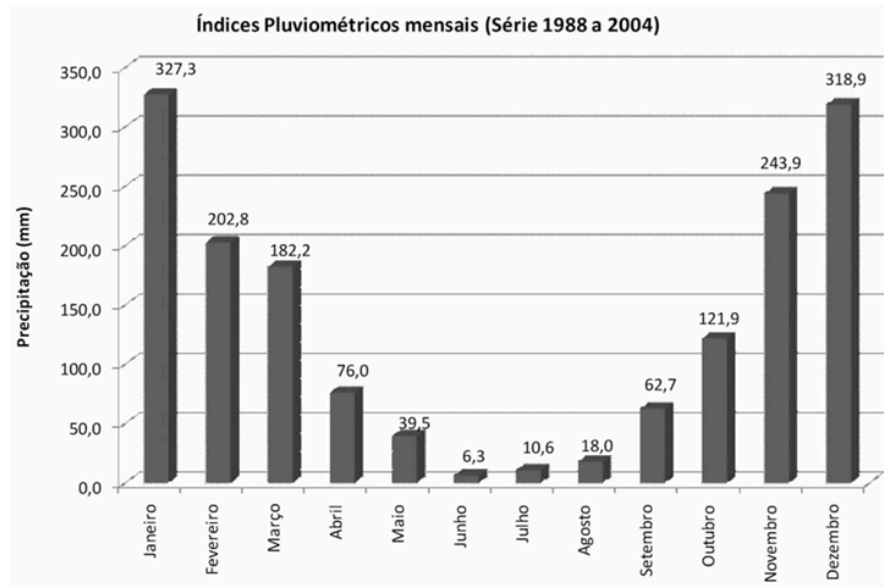


Figura 3.11 Relación entre el clima y los procesos de meteorización (Emblenton y Thurner, 1979).

Fonte: González de Vallejo (2002).

Figura 8 - Médias mensais históricas de precipitação em Ouro Preto.



Fonte: Castro et al. (2012).

A influência do clima sobre o comportamento geomecânico das rochas torna-se ainda mais significativa em litologias anisotrópicas, amplamente distribuídas na área urbana de Ouro Preto, como filitos e xistos (González de Vallejo, 2002). Nessas rochas, a presença de planos de foliação e outras descontinuidades facilita a circulação de água no interior do maciço, intensificando os processos de alteração mineralógica e a degradação das propriedades mecânicas. À medida que o intemperismo avança, observa-se aumento da porosidade, redução da resistência da rocha intacta e maior suscetibilidade ao desenvolvimento de mecanismos de ruptura.

Nesse contexto, González de Vallejo (2002) destaca que o conhecimento das condições de intemperismo e da resposta geomecânica dos diferentes litotipos constitui etapa fundamental das investigações geológico-geotécnicas, uma vez que permite compreender a evolução do comportamento dos maciços rochosos e subsidiar estudos voltados ao planejamento territorial, à cartografia geotécnica e à gestão de riscos geológicos.

2.6. Os estudos geológico-geotécnicos como subsídio ao planejamento territorial e à gestão de riscos urbanos

Os estudos geológico-geotécnicos constituem uma etapa fundamental no desenvolvimento de empreendimentos de engenharia, uma vez que fornecem informações essenciais sobre as características do meio físico, permitindo reduzir incertezas técnicas e orientar a tomada de decisões ao longo das diferentes fases de um projeto. Segundo González de Vallejo (2002), o nível de detalhamento das investigações deve ser compatível com a etapa de desenvolvimento do empreendimento, iniciando-se com levantamentos geológicos preliminares e evoluindo para investigações de maior complexidade, como sondagens, ensaios de campo e laboratoriais e instrumentação geotécnica conforme indicado na Tabela 1. Essa evolução progressiva possibilita o refinamento do conhecimento das condições geológicas e geotécnicas da área estudada, reduzindo riscos técnicos, ambientais e econômicos associados à implantação de obras de engenharia.

De acordo com González de Vallejo (2002), os estudos geológico-geotécnicos acompanham todas as etapas do projeto, desde os estudos prévios e de viabilidade até o projeto executivo, a construção e o monitoramento da obra. Nas fases iniciais, as investigações têm caráter regional e diagnóstico, sendo baseadas em levantamentos bibliográficos, cartografia geológica, reconhecimento de campo, interpretação de fotografias aéreas e imagens de satélite, além da identificação preliminar dos condicionantes geológicos e geomorfológicos. À medida que o projeto avança, aumenta-se a densidade das investigações e o grau de detalhamento dos ensaios, permitindo a obtenção de parâmetros geotécnicos necessários ao dimensionamento de fundações, contenções, cortes, aterros e demais estruturas de engenharia, conforme ainda descrito pelo autor. Essa metodologia demonstra que o conhecimento do meio físico deve ser construído de forma gradual, acompanhando a complexidade das decisões técnicas ao longo do ciclo do empreendimento.

Tabela 1 - Objetivos dos estudos geológico-geotécnicos em função das etapas de um projeto.

Fases do projeto	Objetivos geológico-geotécnicos
Estudos preliminares e de viabilidade	— Viabilidade geológica. — Identificação de riscos geológicos. — Condições geológico-geotécnicas gerais.
Anteprojeto	— Seleção dos locais de implantação e dos traçados. — Classificação geotécnica dos materiais. — Definição de soluções geotécnicas aproximadas.
Projeto	— Caracterização geotécnica detalhada. — Determinação dos parâmetros geotécnicos para o dimensionamento de estruturas, escavações, fundações etc.
Construção	— Controle geotécnico e instrumentação. — Verificação e adaptação do projeto.
Operação	— Controle da resposta terreno-estrutura. — Auscultação.

Fonte: González de Vallejo (2002).

Embora esse modelo seja tradicionalmente aplicado ao desenvolvimento de obras civis, seus princípios podem ser estendidos ao planejamento urbano, uma vez que os instrumentos de ordenamento territorial também dependem da caracterização das condições geológicas e geotécnicas do território. Conforme estabelece a Lei Federal nº 12.608/2012, que institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, os municípios sujeitos à ocorrência de movimentos de massa e outros desastres naturais devem incorporar informações relativas aos riscos geológicos em seus instrumentos de planejamento territorial, especialmente no Plano Diretor e na elaboração de cartas geotécnicas de aptidão à urbanização (Brasil, 2012).

Dessa forma, o conhecimento das características do terreno deixa de representar apenas uma etapa de projetos de engenharia e passa a constituir elemento essencial para a gestão territorial, contribuindo para o planejamento da expansão urbana, a ocupação adequada do solo e a redução da vulnerabilidade das populações expostas aos riscos geológicos.

Nesse contexto, destaca-se o Plano Municipal de Redução de Riscos (PMRR), instrumento técnico destinado à identificação, caracterização e hierarquização das áreas suscetíveis a processos geodinâmicos, subsidiando a definição de prioridades para intervenções preventivas e corretivas. A elaboração do PMRR depende da integração de informações geológicas, geomorfológicas, geotécnicas, hidrológicas e de uso e ocupação do solo, permitindo

compreender os fatores condicionantes da instabilidade das encostas e estabelecer critérios técnicos para o gerenciamento dos riscos (Brasil, 2024).

Trabalhos desenvolvidos por Bonuccelli (1999), Zenóbio (2000) e Castro et al. (2012) demonstram que, na área urbana de Ouro Preto, a ocorrência de movimentos de massa está diretamente relacionada à interação entre as características litológicas, o relevo acidentado, a elevada pluviosidade, a presença de descontinuidades nos maciços rochosos e a ocupação urbana, evidenciando a necessidade de estudos geológico-geotécnicos como suporte ao planejamento territorial.

Sob a perspectiva da Engenharia Urbana, os estudos geológico-geotécnicos extrapolam sua função tradicional de apoio ao dimensionamento de obras, assumindo papel estratégico na formulação de políticas públicas voltadas ao uso e ocupação sustentável do solo urbano. Informações relacionadas à resistência das rochas, ao grau de alteração, à alterabilidade e ao comportamento geomecânico dos maciços permitem aprimorar diagnósticos de suscetibilidade, subsidiar a elaboração de cartas geotécnicas, orientar a localização de novas áreas de expansão urbana e apoiar ações de prevenção de desastres naturais.

Assim, o conhecimento produzido por investigações geológico-geotécnicas representa importante ferramenta para o ordenamento territorial, possibilitando que decisões de planejamento urbano sejam fundamentadas nas limitações e potencialidades impostas pelo meio físico.

2.7. Influência do meio geológico e do relevo no planejamento das investigações geológico-geotécnicas

O planejamento das investigações geológico-geotécnicas deve considerar as características do meio físico, uma vez que a natureza dos materiais geológicos e as condições geomorfológicas influenciam diretamente a definição das técnicas de investigação, da quantidade de ensaios e do nível de detalhamento necessário em cada etapa do projeto, como pode ser observado na Tabela 2. Segundo González de Vallejo (2002), não existe um programa de investigação universal, pois cada área apresenta condicionantes geológicos específicos que determinam a estratégia mais adequada para a caracterização do terreno. Dessa forma, fatores como

litologia, grau de alteração, presença de descontinuidades, condições hidrogeológicas e configuração do relevo constituem elementos fundamentais para o planejamento das campanhas de investigação.

Ainda de acordo com o autor, as características geológicas condicionam não apenas o comportamento geomecânico dos materiais, mas também a escolha dos métodos de investigação mais apropriados. Em maciços rochosos pouco alterados, por exemplo, as investigações podem priorizar a caracterização estrutural das descontinuidades e a determinação dos parâmetros de resistência da rocha intacta. Em contrapartida, em áreas submetidas a intenso intemperismo, onde predominam materiais saprolíticos ou rochas muito alteradas, torna-se necessária a realização de investigações complementares capazes de avaliar a variabilidade geotécnica do perfil de alteração e seu comportamento frente às solicitações impostas pelas obras de engenharia (González de Vallejo, 2002).

Para o autor, o relevo também exerce influência significativa sobre o planejamento das investigações, especialmente em regiões montanhosas e com elevada declividade, onde as condições de acesso, a instabilidade natural das encostas e a heterogeneidade dos materiais podem limitar a execução de determinados ensaios e exigir maior densidade de pontos de investigação. Em municípios como Ouro Preto, cuja ocupação urbana está inserida em um contexto geológico complexo e de relevo acidentado, a integração entre informações geológicas, geomorfológicas e geotécnicas torna-se indispensável para reduzir incertezas durante a caracterização do terreno e orientar adequadamente as etapas subsequentes de estudo.

Tabela 2 - Influência do meio geológico e do relevo no planejamento das investigações *in situ*.

Fatores geológicos e geomorfológicos	Características predominantes	Influência nas investigações <i>in situ</i>
Rochas sedimentares e metamórficas de origem sedimentar	— Formações relativamente uniformes em áreas extensas. — Estruturas bem definidas e estratificadas. — As rochas de origem marinha são mais uniformes e contínuas que as de origem continental.	— Maior confiabilidade na extrapolação e interpretação geológica. — Menor número relativo de prospecções. — Maior utilidade das sondagens.
Rochas ígneas extrusivas	— Estruturas estratiformes. — Grande heterogeneidade e anisotropia litológica.	— Necessidade de maior número de sondagens. — Dificil interpretação das técnicas geofísicas.
Rochas ígneas intrusivas	— Grande variação tanto litológica como geométrica dos corpos intrusivos.	— Maior dificuldade na extrapolação geológica. — Dificil delimitação geométrica dos corpos intrusivos. — Boa utilidade da geofísica.
Estruturas tectônicas	— Grande continuidade. — Materiais brandos de preenchimento. — Anisotropias em cada lado da estrutura.	— Grande utilidade dos métodos de geologia estrutural e cartografia — Necessidade de sondagens e geofísica.
Relevo baixo	— Predomínio de meios aluviais, solos e rochas brandas. — Má drenagem.	— Baixo custo relativo das sondagens. — Boa utilidade da geofísica.
Relevo moderado a alto	— Controle litológico-estrutural do relevo. — Rochas, solos, depósitos coluviais e aluviais.	— Alto custo das sondagens. — Importância dos acessos no planejamento.
Relevo acidentado e escarpado	— Rochas duras. — Alto controle litoestrutural do relevo. — Depósitos coluviais e instabilidade de encostas.	— Condições adversas para investigações <i>in situ</i> . — Acessos difíceis. — Alto custo de sondagens. — Limitações climáticas. — Grande utilidade da fotointerpretação e da geologia de superfície.

Fonte: Adaptado de González de Vallejo (2002).

2.8. Ensaios geomecânicos aplicados à avaliação da resistência das rochas e do intemperismo na estabilidade de encostas

A caracterização experimental das propriedades mecânicas das rochas é fundamental para a análise da estabilidade de encostas e para a classificação geomecânica dos maciços. Normas técnicas e recomendações internacionais, como os métodos sugeridos por ISRM, estabelecem procedimentos padronizados para a determinação da resistência e da deformabilidade dos materiais rochosos (ISRM, 1977, 1985). Tradicionalmente, a resistência à compressão uniaxial é obtida por meio de ensaios laboratoriais com corpos de prova cilíndricos, cuja obtenção nem sempre é viável em ambientes urbanos.

Nesse contexto, o ensaio de carga pontual destaca-se como método alternativo para a estimativa indireta da resistência mecânica das rochas. Franklin (1985) propôs o índice de carga pontual como um parâmetro prático para a classificação de rochas, especialmente em estudos preliminares e em situações onde a preparação de corpos de prova padronizados é limitada. Akbay (2023) demonstrou que o ensaio de carga pontual apresenta boa correlação com a resistência à compressão uniaxial, ressaltando, contudo, que a anisotropia estrutural pode influenciar significativamente os resultados, exigindo interpretação criteriosa.

As propriedades-índice das rochas, como massa específica, porosidade aparente e absorção de água, constituem a base para a caracterização inicial do estado físico do material e permitem

inferir sua suscetibilidade à infiltração e à degradação. Estudos realizados em áreas urbanas do Quadrilátero Ferrífero indicam que variações nesses índices refletem o grau de alteração das rochas metamórficas e influenciam diretamente sua resposta mecânica e sua estabilidade em encostas (Bonuccelli, 1999; Zenóbio, 2000).

O ensaio de Slake Durability, sugerido pela ISRM (1977), é amplamente utilizado para avaliar a resistência das rochas à desagregação quando submetidas a ciclos de umedecimento e secagem, simulando condições naturais de exposição superficial. Trabalhos aplicados a rochas brasileiras demonstram que índices reduzidos de durabilidade estão associados a maior fragilidade do material e maior propensão a processos de instabilidade, especialmente em rochas anisotrópicas intensamente alteradas (Ferreira; Antão, 2006).

2.8.1. Estimativa de resistência à compressão simples a partir de índices de campo

A resistência à compressão simples (Uniaxial Compressive Strength – UCS) constitui um dos principais parâmetros utilizados na caracterização geomecânica das rochas, sendo amplamente empregada na classificação da resistência da rocha intacta e na avaliação do comportamento de maciços rochosos frente às solicitações impostas por obras de engenharia (González de Vallejo, 2002). Entretanto, a determinação direta desse parâmetro requer a obtenção de corpos de prova com dimensões e condições geométricas padronizadas, o que nem sempre é possível em materiais intensamente alterados ou muito brandos.

Segundo González de Vallejo (2002), rochas submetidas a elevados graus de intemperismo frequentemente apresentam baixa coesão, elevada friabilidade e intensa fragmentação, dificultando a preparação de amostras adequadas para a realização dos ensaios laboratoriais convencionais de compressão simples. Nessas situações, torna-se necessária a utilização de métodos indiretos de caracterização, capazes de fornecer estimativas preliminares da resistência mecânica do material.

Ainda de acordo com González de Vallejo (2002), a estimativa da resistência da rocha pode ser realizada por meio de índices obtidos em campo, baseados na resposta do material à aplicação de esforços simples durante a inspeção geológica-geotécnica (Tabela 3). Esses procedimentos utilizam critérios qualitativos relacionados à facilidade de escavação, à

possibilidade de fragmentação manual, ao comportamento frente ao golpe de martelo geológico e à resistência oferecida à penetração ou ao risco por ferramentas metálicas.

A associação entre essas observações e intervalos aproximados de resistência permite enquadrar o material em classes geomecânicas compatíveis com seu comportamento mecânico, constituindo uma ferramenta importante para investigações preliminares, levantamentos geológico-geotécnicos e cartografia geotécnica. Embora tais estimativas não substituam os ensaios laboratoriais padronizados, elas representam uma alternativa tecnicamente aceitável quando as condições do material impedem a obtenção de resultados experimentais diretos.

Tabela 3 - Estimativa aproximada e classificação da resistência à compressão simples de solos e rochas a partir de índices de campo.

Classe	Descrição	Identificação de campo	Aproximação da faixa de resistência à compressão simples (MPa)
R ₀	Rocha extremamente branda	Pode ser marcada com a unha.	0,25–1,0
R ₁	Rocha muito branda	A rocha se desagrega ao ser golpeada com a ponta do martelo. Com uma lâmina, pode ser talhada facilmente.	1,0–5,0
R ₂	Rocha branda	É talhada com dificuldade com uma lâmina. Ao ser golpeada com a ponta do martelo, produzem-se pequenas marcas.	5,0–25
R ₃	Rocha moderadamente dura	Não pode ser talhada com a lâmina. Pode ser fraturada com um golpe forte do martelo.	25–50
R ₄	Rocha dura	Requer mais de um golpe com o martelo para ser fraturada.	50–100
R ₅	Rocha muito dura	Requer muitos golpes com o martelo para ser fraturada.	100–250
R ₆	Rocha extremamente dura	Ao ser golpeada com o martelo, apenas se desprendem lascas.	> 250

Fonte: Adaptado de ISRM (1981).

Para o autor, a utilização de índices de campo apresenta especial importância em regiões submetidas a intenso intemperismo, onde a ocorrência de saprolitos e rochas muito alteradas dificulta a execução de ensaios convencionais. Nessas condições, a caracterização do comportamento mecânico passa a depender da integração entre observações geológicas, classificação do grau de alteração e avaliação qualitativa da resistência do material. Conforme destaca González de Vallejo (2002), esse procedimento permite estabelecer estimativas suficientemente confiáveis para subsidiar estudos de viabilidade, cartografia geotécnica e planejamento das investigações subsequentes, reduzindo incertezas nas fases iniciais de projetos de engenharia.

3. METODOLOGIA

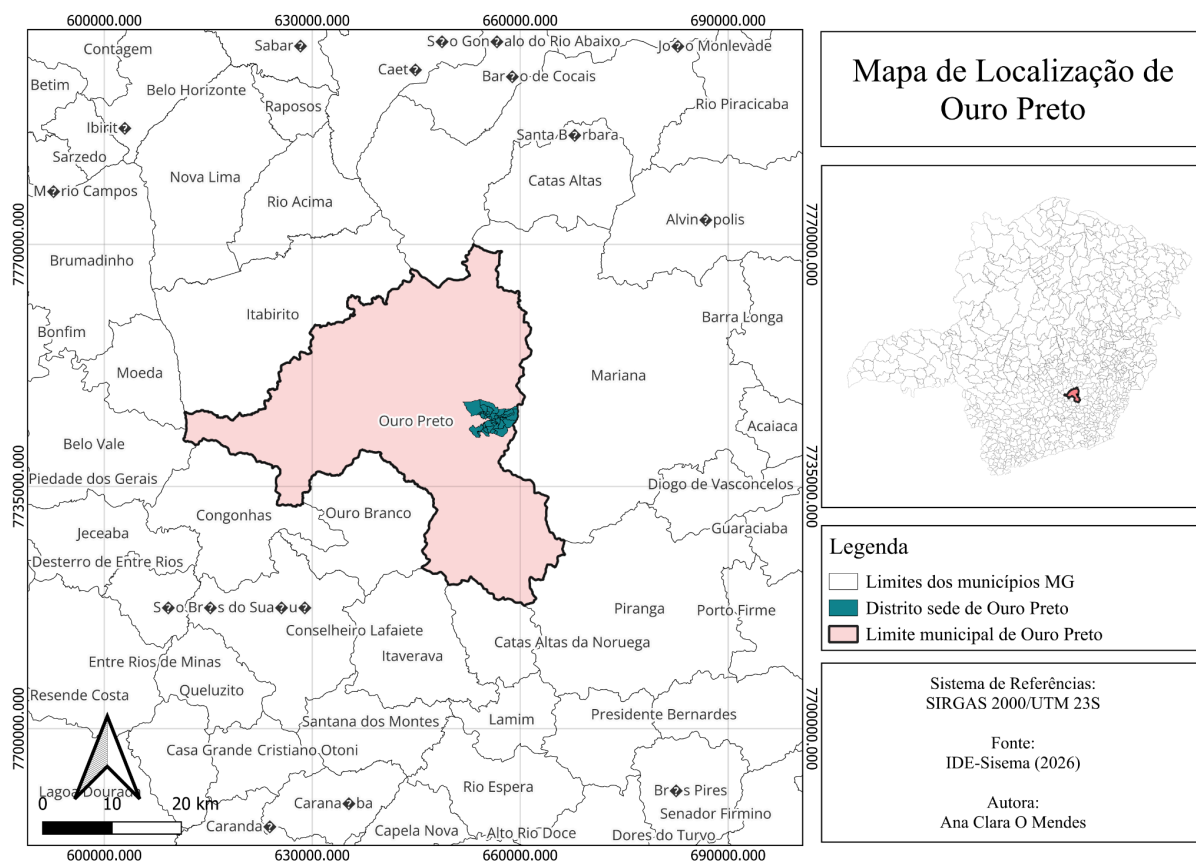
Com a intenção de atingir os objetivos propostos no presente estudo, foi realizada uma caracterização da área de forma a compreender geomorfologicamente quais locais seriam mais apropriados para obtenção de amostras representativas e em seguida, os procedimentos a serem seguidos de cada ensaio proposto.

3.1. Área de Estudo

O estudo foi realizado no município de Ouro Preto, localizado no estado de Minas Gerais, na Região Sudeste do Brasil (Figura 9). O município possui uma área territorial de aproximadamente 1.245,865 km², conforme dados do IBGE, e uma população estimada em 77.914 habitantes em 2025, com densidade demográfica da ordem de cerca de 60 pessoas por quilômetros quadrados (IBGE, 2023).

O território municipal situa-se na Serra do Espinhaço, integrando a chamada Zona Metalúrgica do estado, parte do Quadrilátero Ferrífero, área de grande importância geológica e histórica. A cidade apresenta clima tropical de altitude, com pluviosidade média anual em torno de 2.018 mm, com chuvas concentradas no verão, e altitude média próxima a 1.150 metros, características que influenciam significativamente os processos geomorfológicos e os mecanismos de instabilidade de encostas no município (Prefeitura de Ouro Preto, 2026).

Figura 9 - Mapa de localização de Ouro Preto.



3.2. Critérios de seleção dos pontos de amostragem

A seleção dos pontos de amostragem foi realizada por meio da sobreposição espacial de bases cartográficas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando o software QGIS. Foram integrados o Mapa de Formação Geológica de Ouro Preto (Figura 10) e o Mapa de Setorização de Riscos do Plano Municipal de Redução de Riscos (PMRR) (Figura 11), permitindo identificar a coincidência entre unidades litológicas específicas e setores urbanos com registros prévios de instabilidade.

Foram priorizados setores associados a mecanismos com controle estrutural do maciço rochoso, especialmente quedas e rolamentos de blocos e deslizamentos translacionais ou rotacionais em encostas rochosas ou em rocha alterada, por serem compatíveis com a caracterização geomecânica proposta neste trabalho (Figura 11). Processos predominantemente hidrológicos ou erosivos, como ravinas, enxurradas, solapamentos e

rastejo, não foram adotados como critério principal de seleção, uma vez que não refletem diretamente a resistência mecânica do substrato rochoso.

Em alguns casos, verificou-se limitação de acesso às áreas exatamente coincidentes com as manchas de risco mapeadas, em função da presença de propriedades privadas, declividades elevadas ou cobertura vegetal densa, que dificultam a coleta de amostras. Nessas situações, optou-se por selecionar pontos próximos, inseridos na mesma formação geológica e no mesmo contexto geomorfológico, garantindo equivalência litológica e condições geotécnicas semelhantes (Figura 10).

Figura 10 - Mapa de formação geológica de Ouro Preto.

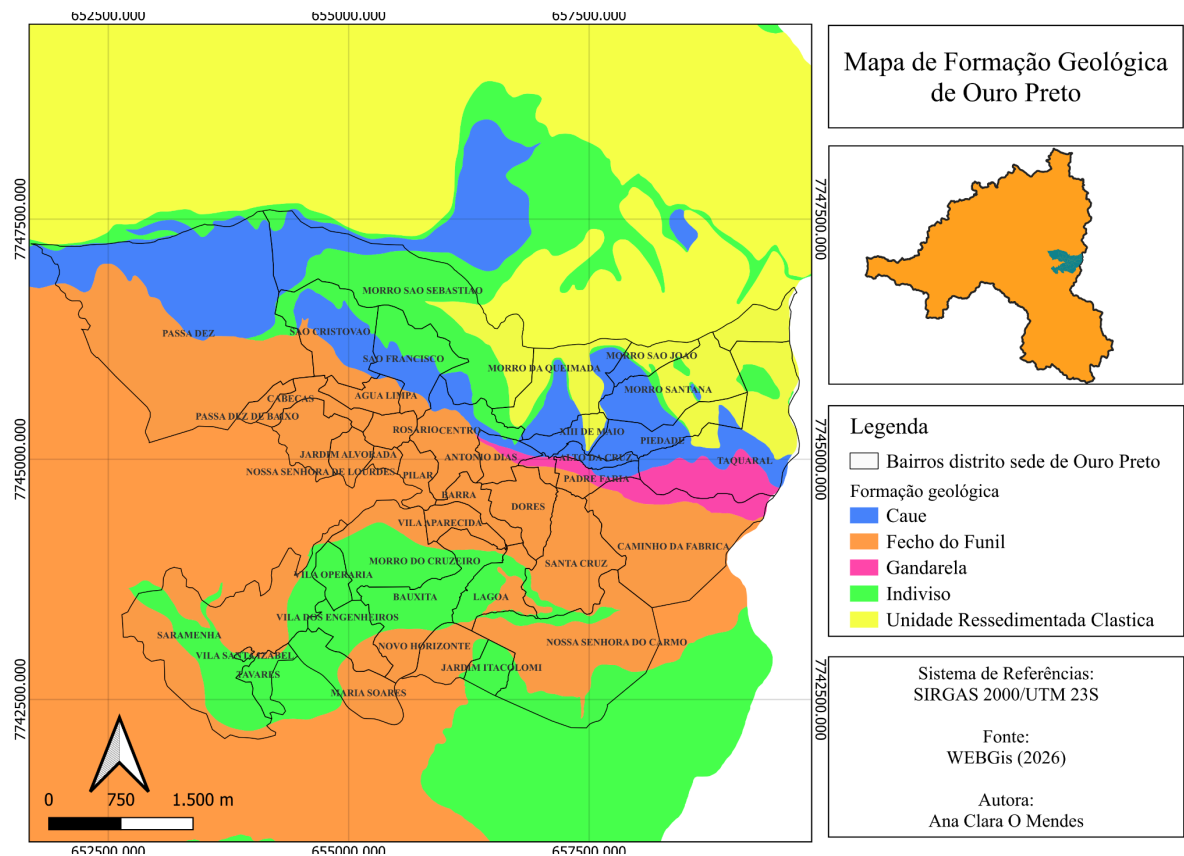
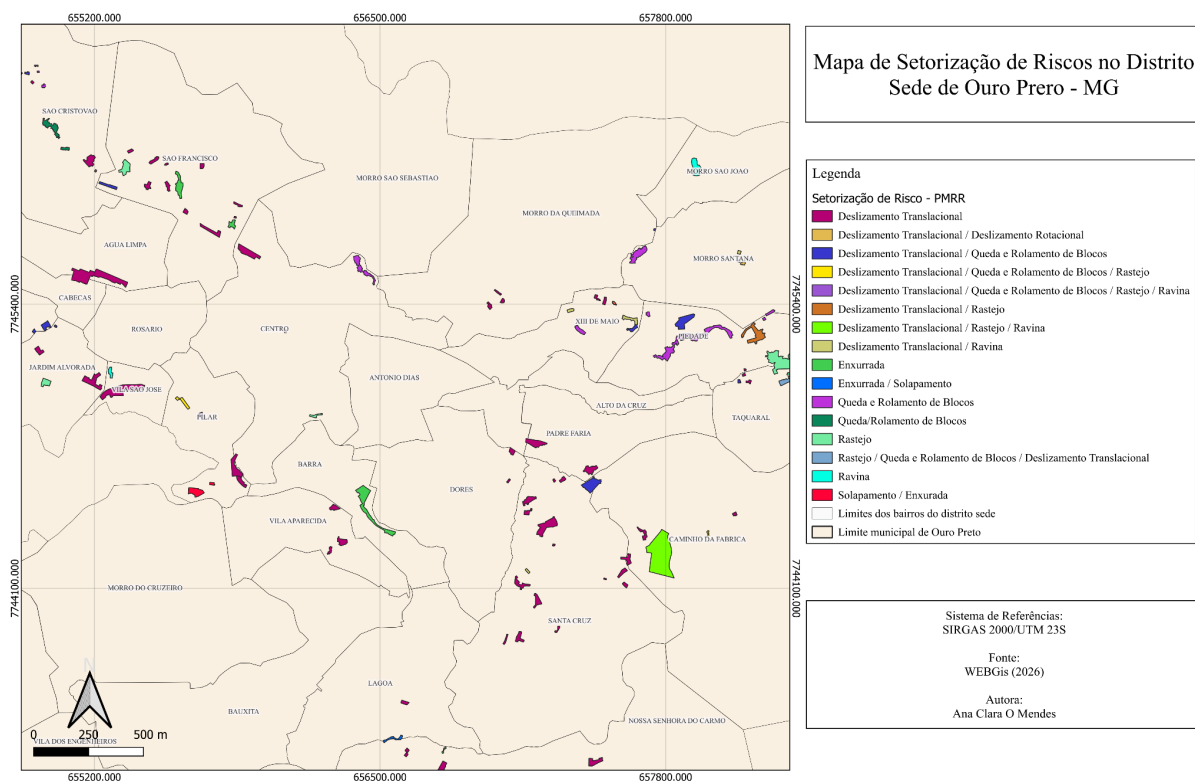


Figura 11 - Mapa de setorização de riscos em Ouro Preto.



Neste contexto, foram escolhidos os seguintes pontos, com seus respectivos bairros e formação geológica na Tabela 4 e Figuras 12 a 17 a seguir. Em vista disso, cada amostra será identificada ao longo do texto pelo nome do bairro em que foi coletada, com exceção daquela proveniente do bairro Pilar, que será denominada amostra Morro da Força.

Tabela 4 - Pontos de amostragem escolhidos.

Amostra	Rua de retirada	Bairro	Formação geológica
São Francisco	Rua Miguel Alves Pereira	São Francisco	Cauê
São Cristóvão	Rua Padre Rolim	São Cristóvão	Cauê
Centro	Rua Conselheiro Quintiliano	Centro	Indiviso
XIII de Maio	Rua 15 de Agosto	XIII de Maio	Cauê
Morro da Força	Rua Pacífico Homem	Pilar	Fecho do Funil
Vila Aparecida	Rua Rodrigo Silva	Vila Aparecida	Fecho do Funil

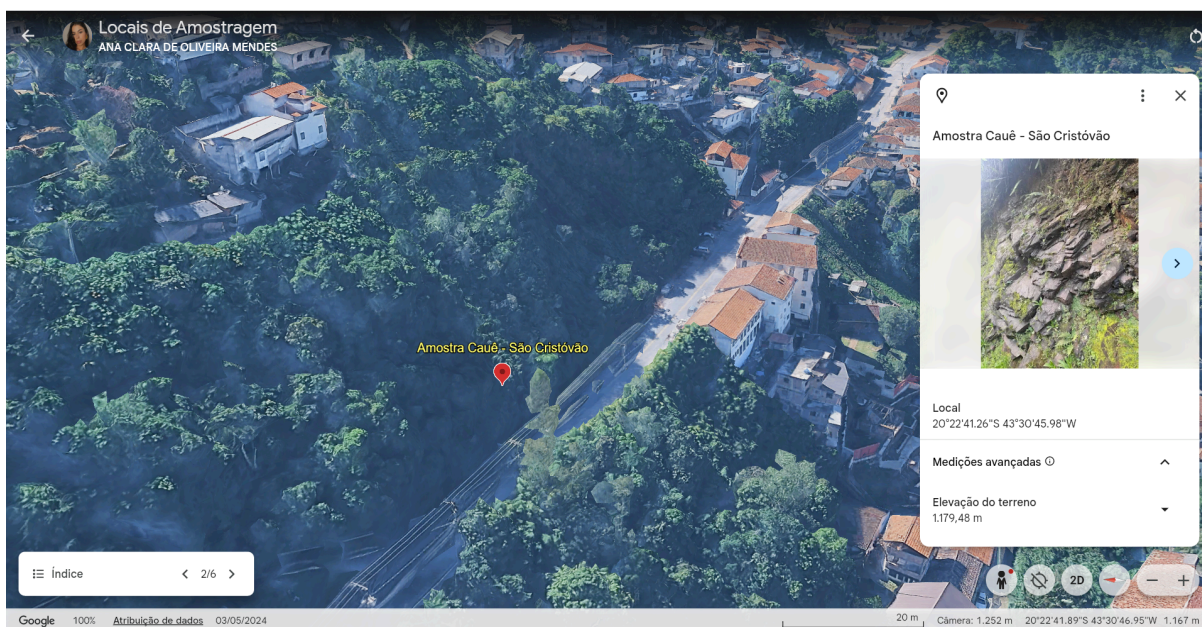
Fonte: A autora (2026).

Figura 12 - Local de retirada da amostra da São Francisco, da formação Cauê.



Fonte: Google Earth (2026).

Figura 13 - Local de retirada da amostra São Cristóvão, da formação Cauê.



Fonte: Google Earth (2026).

Figura 14 - Local de retirada da amostra Centro, da Formação Indiviso.



Fonte: Google Earth (2026).

Figura 15 - Local de retirada da amostra XII de Maio, da Formação Cauê.



Fonte: Google Earth (2026).

Figura 16 - Local de retirada da amostra Morro da Forca, da Formação Fecho do Funil.



Fonte: Google Earth (2026).

Figura 17 - Local de retirada da amostra Vila Aparecida, da Formação Fecho do Funil.



Fonte: Google Earth (2026).

3.3. Coleta e preparação das amostras

As amostras de rocha foram coletadas nos pontos previamente definidos, utilizando um martelo geológico para a extração dos fragmentos representativos. Posteriormente, as amostras foram preparadas de acordo com as especificações estabelecidas pelas normas e metodologias aplicáveis a cada ensaio laboratorial. Durante a etapa de amostragem, observou-se significativa variação no grau de intemperismo e nas características geomecânicas das diferentes litologias estudadas, refletindo diretamente na forma de coleta e preparação das amostras.

Em razão da elevada alterabilidade e da baixa competência de algumas amostras, não foi possível realizar determinados ensaios, como o ensaio de carga pontual e o ensaio Slake Durability em todos os materiais coletados. Esses ensaios exigem que a amostra apresente dimensões mínimas, geometria adequada e resistência suficiente para suportar a aplicação da carga até a ruptura. No entanto, em materiais muito brandos ou intensamente intemperizados, a amostra pode se desagregar, deformar ou romper de maneira irregular antes da aplicação adequada do carregamento, comprometendo a confiabilidade dos resultados. Essa limitação é coerente com o observado por Leão (2017), que relata dificuldades na obtenção de corpos de prova devido à tendência de deslocamento dos filitos ao longo dos planos de foliação.

Por outro lado, as amostras provenientes de litologias mais resistentes e menos alteradas apresentaram maior dificuldade de extração devido à elevada resistência da matriz rochosa. Nesses casos, além do martelo geológico, foi necessária a utilização de uma serra mármore para o corte e a adequação das amostras às dimensões requeridas pelos ensaios. Esse procedimento possibilitou a obtenção de corpos de prova com dimensões adequadas, preservando, sempre que possível, a integridade estrutural das amostras e garantindo maior confiabilidade aos resultados obtidos.

Figura 18 - a) Amostra intensamente alterada e branda; b) Corte de amostras com auxílio de serra mármore.



Fonte: Acervo pessoal (2026).

3.4. Ensaios de caracterização geomecânica

3.4.1. *Estimativa de resistência à compressão simples a partir de índices de campo*

As amostras analisadas apresentaram comportamento compatível com rochas brandas, uma vez que esse tipo de material é caracterizado por baixa resistência mecânica, elevada deformabilidade. Conforme Leão (2017), em maciços compostos por rochas heterogêneas e anisotrópicas, como os filitos, a obtenção de propriedades geomecânicas pode ser dificultada pela influência da foliação, da porosidade, do grau de alteração e da própria estrutura da rocha. Dessa forma, o avanço do intemperismo tende a intensificar a perda de coesão da matriz, a fragmentação física e a redução da resistência, dificultando a obtenção de corpos de prova íntegros e representativos para ensaios mecânicos.

Diante dessas limitações, a caracterização preliminar da resistência foi realizada por meio de avaliação visual e tátil, com auxílio de martelo geológico e faca, conforme observado na Figura 19. Esse procedimento permitiu observar a resistência da matriz ao risco, ao golpe e à desagregação, além de auxiliar na distinção dos diferentes graus de alteração das amostras.

Leão (2017) destaca que, em filitos, a classificação dos estados de alteração pode ser baseada em características macroscópicas, como mineralogia, variação da rocha, cor, descontinuidades e testes simples da matriz, incluindo o risco do canivete e golpes com martelo geológico, o que justifica a adoção desse procedimento quando a fragilidade do material inviabiliza ensaios laboratoriais convencionais.

Figura 19 - Fragilidades das amostras. a) Amostra Vila Aparecida sendo facilmente marcada com a unha b) Amostra São Francisco sendo furada facilmente pela ponta da faca c) Amostra Morro da Forca sendo fraturada facilmente ao ser golpeada com a ponta do martelo.



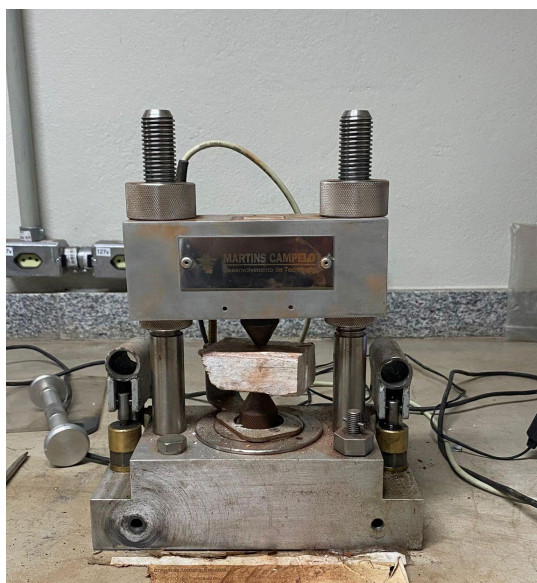
Fonte: Acervo Pessoal (2026).

Em vista disso, as amostras cuja realização de ensaios não foi possível, foram classificadas tátil e visualmente conforme sugerido pela ISRM (1981) apud González de Vallejo (2002) na Tabela 3 do tópico 2.8.1.

3.4.2. Ensaio de Carga Pontual

A realização do ensaio no Laboratório de Mecânica das Rochas do Núcleo de Geotecnia (NUGEO), consiste em inserir o corpo de prova na máquina entre as ponteiras de forma que este fique estável e preso (Figura 20). A aplicação da carga é realizada manualmente por meio de uma haste acoplada ao injetor hidráulico. A carga é aumentada de forma contínua, de modo que a ruptura ocorra entre 10 e 60 segundos. Durante todo o ensaio, são registrados os valores de carga e deslocamento, iniciando-se com a variação manual da carga e a carga de ruptura (P), ou carga máxima suportada é registrada ao final do processo.

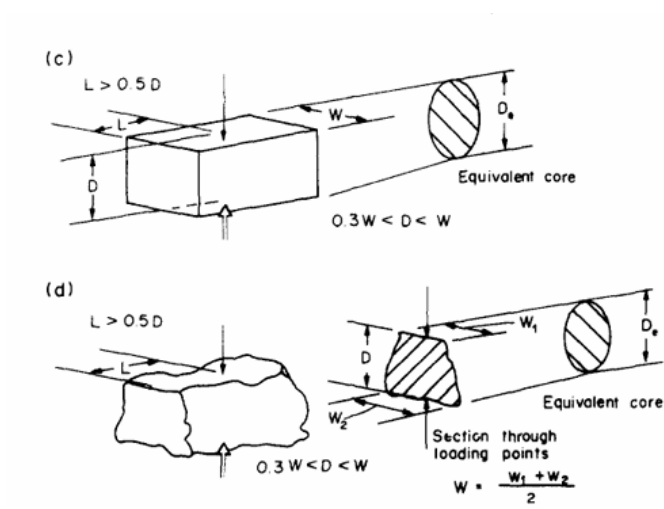
Figura 20 - Aparelho do ensaio PLT.



Fonte: Acervo pessoal (2026).

Entretanto, as amostras devem seguir as dimensões impostas pela norma de forma a garantir que tenham o tamanho e os requisitos necessários para o ensaio com blocos irregulares e regulares. De acordo com a ISRM (1985), blocos de rocha ou pedaços de dimensões 50 ± 35 mm são adequados para os ensaios com bloco regular e irregular. E a relação D / W (diâmetro/ largura) deve estar entre 0,3 e 1,0, de preferência próximo a 1,0 (Figura 21).

Figura 21 - Requisitos de forma dos corpos de prova para: (a) o ensaio diametral, (b) o ensaio axial, (c) o ensaio em bloco e (d) o ensaio com fragmentos irregulares.



Fonte: ISRM (1985).

Figura 22 - Medição das amostras irregulares.



Fonte: Acervo Pessoal (2026).

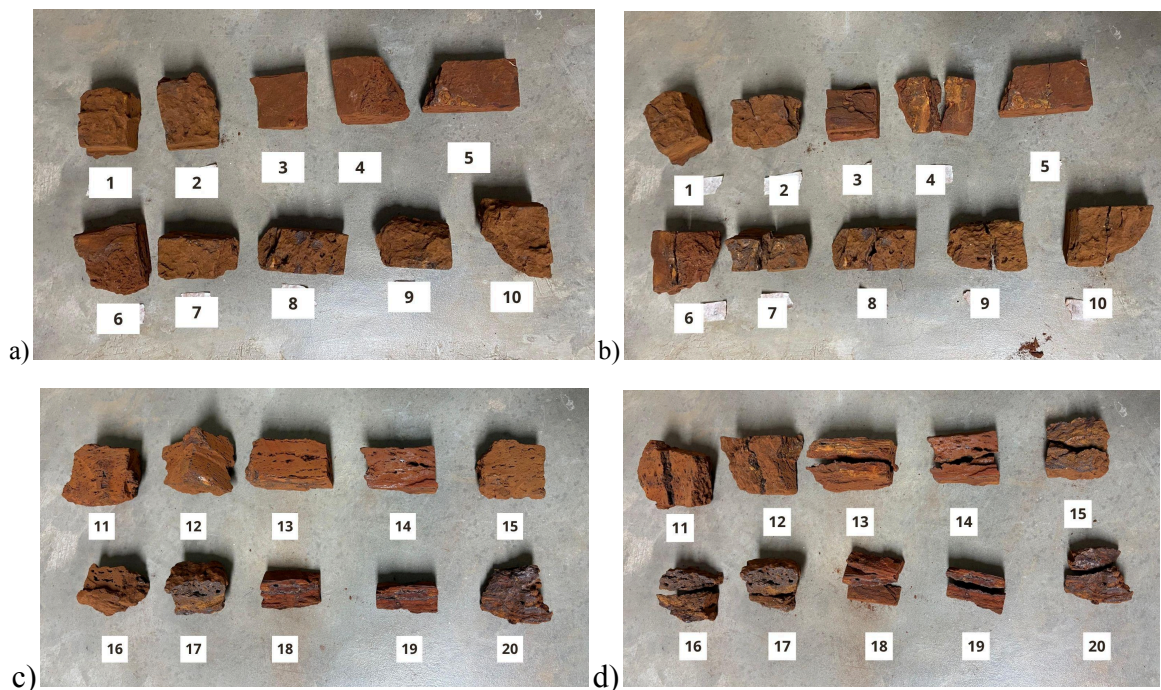
Tabela 5 - Parâmetros do ensaio da amostra XIII de Maio- Formação Cauê.

ID	D (mm)	W1 (mm)	W2 (mm)	Wmédio (mm)	L	Posição	Formato	Relação D/W	Atendimento ao critério $0.3W < D < W$
1	46,47	45,07	48,42	46,75	52,98	Perpend.	Irregular	0,994	OK
2	41,56	47,99	51,47	49,73	65,53	Perpend.	Irregular	0,836	OK
3	25,93	49,11	46,06	47,59	49,77	Perpend.	Irregular	0,545	OK
4	33,80	60,19	52,34	56,27	61,36	Perpend.	Irregular	0,601	OK
5	34,10	43,37	43,28	43,33	74,28	Perpend.	Irregular	0,787	OK
6	38,95	59,78	49,08	54,43	60,39	Perpend.	Irregular	0,716	OK
7	32,62	34,93	35,22	35,08	67,04	Perpend.	Irregular	0,930	OK
8	38,90	38,48	39,62	39,05	81,29	Perpend.	Irregular	0,996	OK
9	44,47	44,15	44,82	44,49	63,48	Perpend.	Irregular	1,000	OK
10	39,10	50,96	29,60	40,28	59,30	Perpend.	Irregular	0,971	OK
11	44,32	52,42	63,64	58,03	57,6	Paralelo	Irregular	0,764	OK
12	37,39	44,71	44,69	44,7	53,09	Paralelo	Irregular	0,836	OK
13	40,37	40,54	39,50	40,02	69,87	Paralelo	Irregular	1,009	Erro
14	25,70	40,36	36,50	38,43	56,48	Paralelo	Irregular	0,669	OK
15	27,42	47,30	43,68	45,49	49,80	Paralelo	Irregular	0,603	OK
16	30,18	37,60	33,42	35,51	46,35	Paralelo	Irregular	0,850	OK
17	36,53	44,20	40,21	42,21	45,76	Paralelo	Irregular	0,866	OK
18	24,00	29,21	28,88	29,045	49,31	Paralelo	Irregular	0,826	OK
19	22,26	25,15	20,12	22,64	50,19	Paralelo	Irregular	0,983	OK
20	27,29	40,29	45,11	42,7	45,42	Paralelo	Irregular	0,639	OK

Nota: ID = identificação do corpo de prova.

Fonte: A autora (2026).

Figura 23 - Corpos de prova XIII de Maio - Formação Cauê. a) antes do ensaio com orientação perpendicular à foliação. b) depois do ensaio com orientação perpendicular à foliação. c) antes do ensaio com orientação paralelo à foliação. d) depois do ensaio com orientação paralelo à foliação.



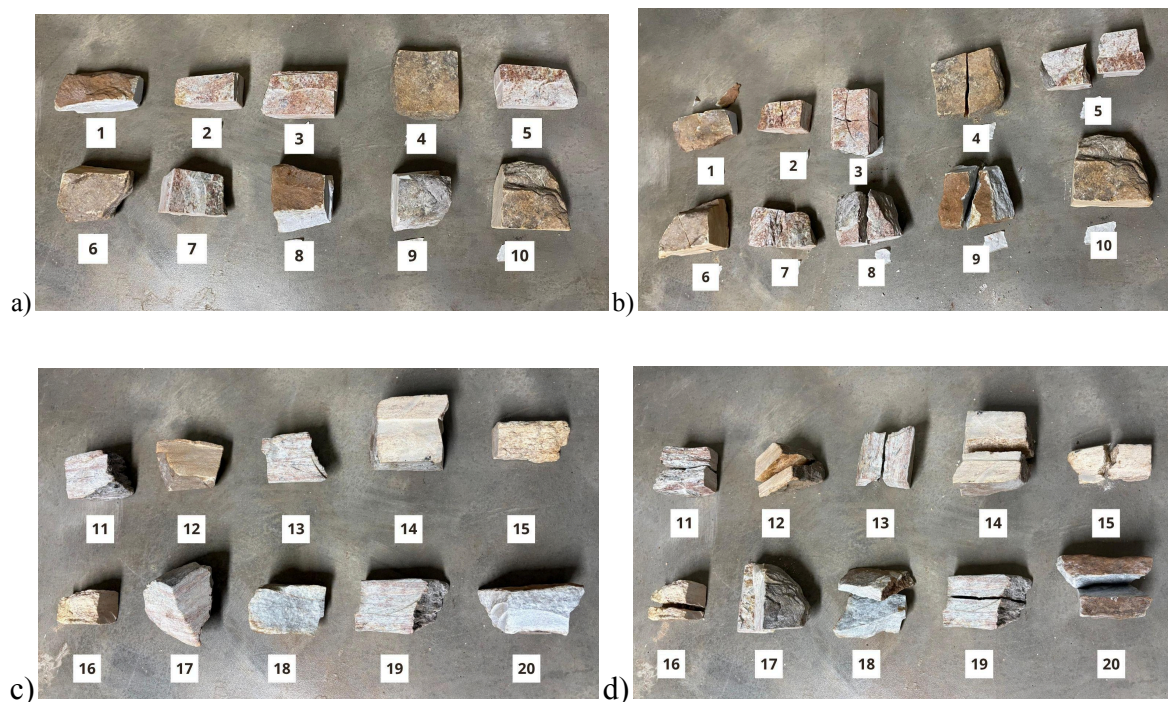
Fonte: Acervo Pessoal (2026).

Tabela 6 - Parâmetros do ensaio da amostra Centro - Formação Indiviso.

ID	D (mm)	W1 (mm)	W2 (mm)	Wmédio (mm)	L	Posição	Formato	Relação D/W	Atendimento ao critério $0.3W < D < W$
1	23,18	46,4	38,21	42,305	84,46	Perpend.	Irregular	0,548	OK
2	21,31	36,49	31,69	34,09	67,01	Perpend.	Irregular	0,625	OK
3	31,85	48,05	48,49	48,27	74,62	Perpend.	Irregular	0,660	OK
4	22,05	70,62	69,83	70,225	76,76	Perpend.	Irregular	0,314	OK
5	29,24	42,96	39,77	41,365	82,59	Perpend.	Irregular	0,707	OK
6	36,16	57	37,56	47,28	63,4	Perpend.	Irregular	0,765	OK
7	32,5	44,78	43,32	44,05	59,44	Perpend.	Irregular	0,738	OK
8	41,8	70,02	55,96	62,99	61,99	Perpend.	Irregular	0,664	OK
9	45,7	58,36	53,92	56,14	54,81	Perpend.	Irregular	0,814	OK
10	36,62	71,91	60,5	66,205	71,51	Perpend.	Irregular	0,553	OK
11	30,21	42,42	45,86	44,14	50,87	Paralelo	Irregular	0,684	OK
12	35,63	37,35	36,85	37,1	51,67	Paralelo	Irregular	0,960	OK
13	36,87	42,77	44,26	43,515	46,79	Paralelo	Irregular	0,847	OK
14	52,88	56,3	55,23	55,765	61,05	Paralelo	Irregular	0,948	OK
15	28,87	30,96	33,74	32,35	59,86	Paralelo	Irregular	0,892	OK
16	30,80	30,05	31,57	30,81	50,17	Paralelo	Irregular	1,000	OK
17	48,39	60,78	68,23	64,505	63,52	Paralelo	Irregular	0,750	OK
18	37,40	42,66	43,67	43,165	58,79	Paralelo	Irregular	0,866	OK
19	34,54	44,02	45,90	44,96	60,04	Paralelo	Irregular	0,768	OK
20	45,24	41,25	43,30	42,275	51,63	Paralelo	Irregular	1,070	Erro

Fonte: A autora (2026).

Figura 24 - Corpos de prova da amostra Centro - Formação Indiviso. a) antes do ensaio com orientação perpendicular à foliação. b) depois do ensaio com orientação perpendicular à foliação. c) antes do ensaio com orientação paralelo à foliação. d) depois do ensaio com orientação paralelo à foliação.



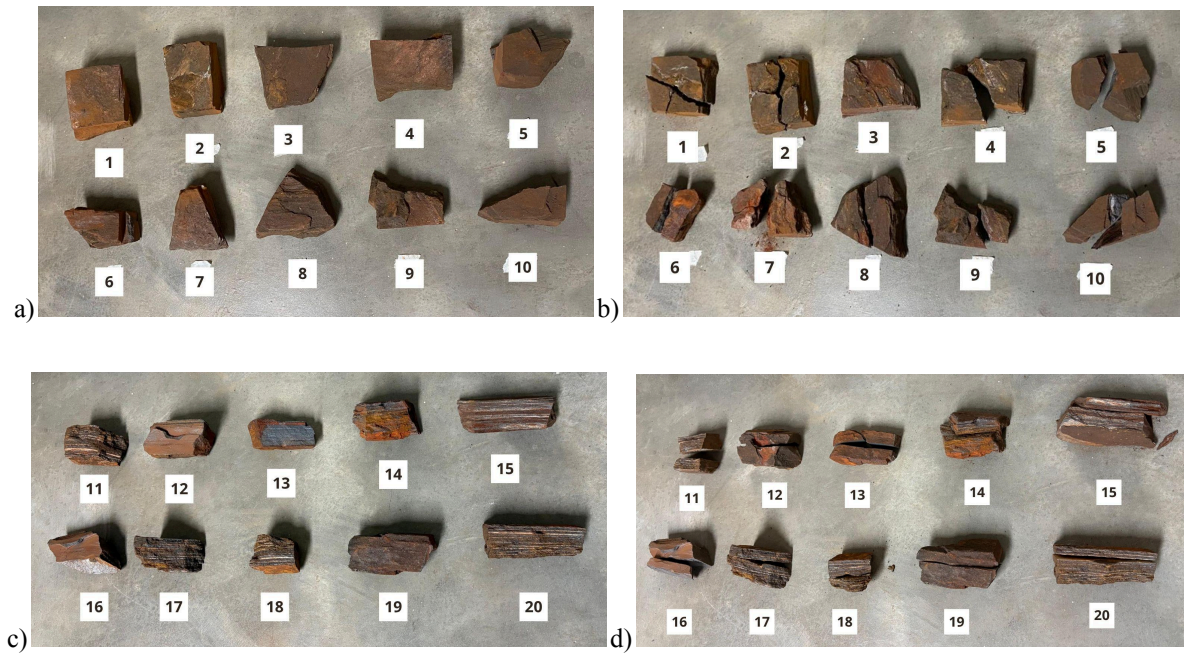
Fonte: Acervo Pessoal (2026).

Tabela 7 - Parâmetros do ensaio da amostra São Cristóvão - Formação Cauê.

ID	D (mm)	W1 (mm)	W2 (mm)	Wmédio (mm)	L	Posição	Formato	Relação D/W	Atendimento ao critério $0.3W < D < W$
1	21,74	72,87	68,81	70,84	78,94	Perpend.	Irregular	0,307	OK
2	31,69	60,23	57,75	58,99	82,6	Perpend.	Irregular	0,537	OK
3	30,05	68,71	57,92	63,315	74,34	Perpend.	Irregular	0,475	OK
4	34,76	54,81	59,61	57,21	80,75	Perpend.	Irregular	0,608	OK
5	28,58	49,59	50,78	50,185	77,57	Perpend.	Irregular	0,569	OK
6	34,35	40,2	46,86	43,53	67,99	Perpend.	Irregular	0,789	OK
7	27,05	42,83	65,57	54,2	70,03	Perpend.	Irregular	0,499	OK
8	29,68	70,59	59,34	64,965	69,54	Perpend.	Irregular	0,457	OK
9	25,11	47,7	38,02	42,86	72,44	Perpend.	Irregular	0,586	OK
10	31,51	38,34	28,98	33,66	81,22	Perpend.	Irregular	0,936	OK
11	33,27	32,68	33,54	33,11	50,40	Paralelo	Irregular	1,005	Erro
12	36,23	35,43	36,72	36,075	58,50	Paralelo	Irregular	1,004	Erro
13	22,23	28,74	26,59	27,665	65,66	Paralelo	Irregular	0,804	OK
14	36,16	37,59	36,58	37,085	58,62	Paralelo	Irregular	0,975	OK
15	21,67	30,57	30,66	30,615	86,97	Paralelo	Irregular	0,708	OK
16	32,39	35,14	31,81	33,475	49,15	Paralelo	Irregular	0,968	OK
17	33,28	33,62	34,07	33,845	47,92	Paralelo	Irregular	0,983	OK
18	31,00	31,35	30,77	31,06	41,56	Paralelo	Irregular	0,998	OK
19	32,3	34,69	34,28	34,485	73,47	Paralelo	Irregular	0,937	OK
20	27,53	27,68	29,18	28,43	81,7	Paralelo	Irregular	0,968	OK

Fonte: A autora (2026).

Figura 25 - Corpos de prova da amostra São Cristóvão - Formação Cauê. a) antes do ensaio com orientação perpendicular à foliação. b) depois do ensaio com orientação perpendicular à foliação. c) antes do ensaio com orientação paralelo à foliação. d) depois do ensaio com orientação paralelo à foliação.



Fonte: Acervo Pessoal (2026).

Cálculos e Determinação do Índice de Resistência à Carga Pontual

Para cada ensaio, é calculado o índice de resistência à carga pontual (I_s) não corrigido que é dado pela equação 1.

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

Onde:

I_s é o índice de resistência à carga pontual (MPa);

P é a carga máxima aplicada na amostra até a ruptura (N);

D_e é o diâmetro equivalente (mm), onde:

$D_e^2 = 4 \times \frac{A}{\pi}$ para os testes axiais, de blocos e de fragmentos irregulares;

Sendo $A = W \times D$, a área mínima da seção transversal que contém os pontos de aplicação de carga.

Ainda de acordo com a norma, o valor de I_s é influenciado pelo diâmetro D nos ensaios diametrais e pelo diâmetro equivalente D_e nos ensaios axiais, com blocos ou amostras irregulares. Diante dessa variação, torna-se necessário aplicar uma correção de tamanho para se obter um valor padronizado de resistência à carga pontual, que seja representativo da amostra e adequado para a classificação da resistência da rocha.

Esse valor padronizado é conhecido como Índice de Resistência à Carga Pontual Corrigido pelo Tamanho ($I_{s(50)}$), definido como o valor de I_s que seria obtido em um ensaio diametral com $D = 50$ mm. Quando o corpo de prova não possui esse diâmetro, a correção pode ser feita por meio da equação 2.

$$I_{s(50)} = F \times I_s \quad (2)$$

Onde:

$I_{s(50)}$ é o índice de resistência de uma amostra padronizada em 50 mm de diâmetro (MPa);

F é o fator de correção, podendo ser obtido pela equação 3.

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

Os valores de $I_{s(50)}$ foram organizados em ordem crescente e, conforme as recomendações da ISRM (1985), os dois menores e os dois maiores resultados de cada conjunto foram excluídos antes do cálculo da média. Esse procedimento busca reduzir a influência de valores extremos decorrentes da heterogeneidade das rochas, da presença de descontinuidades e das irregularidades naturais dos corpos de prova. As médias foram calculadas separadamente para os ensaios realizados nas orientações paralela e perpendicular às estruturas planares identificadas nas amostras.

3.4.3. Ensaio de Propriedades-Índice das Rochas

As propriedades-índice foram determinadas com o objetivo de quantificar parâmetros físicos básicos do material rochoso, principalmente aqueles associados ao grau de alteração, capacidade de absorção de água e estrutura porosa, que influenciam diretamente a degradação físico-mecânica durante o intemperismo (ISRM, 1977).

Determinação do teor de água de uma amostra de rocha

Para obter o teor de água de uma amostra de rocha, a norma indica o seguinte procedimento:

- a. Pesar recipiente não corrosível + tampa hermética denominado: massa **A**;
- b. Selecionar para uma amostra representativa acima de 10 fragmentos com ≥ 50 g ou dimensão mínima ≥ 10 vezes o tamanho máximo de grão;
- c. Pesar amostra + o recipiente (com a tampa), denominado: massa **B**;
- d. Secar a amostra a 105°C até a massa constante (recipiente sem a tampa).

- e. Resfriar a amostra em dessecador (com a tampa), por ± 30 minutos, denominado: massa C

Dessa forma, obtemos a seguinte equação:

$$w = \frac{B - C}{C - A} \times 100 \quad (4)$$

Determinação da porosidade e densidade por saturação em amostras irregulares

Este método, sugerido pela ISRM (1977), é indicado para amostras irregulares e que não incham ou se desintegram quando imersas em água ou secas em estufas. O procedimento do ensaio se dá por:

- a. Selecionar para uma amostra representativa acima de 10 fragmentos com ≥ 50 g ou dimensão mínima ≥ 10 vezes o tamanho máximo de grão;
- b. A amostra é saturada imersa em água em vácuo inferior a 800 Pa por aproximadamente uma hora, agitando regularmente para garantir que não fique ar aprisionado;
- c. A amostra é transferida sob água para a cesta no banho de imersão. Sua massa saturada-submersa M_s é determinada pela diferença entre a massa saturada-submersa da cesta + amostra e a da cesta sozinha;
- d. O recipiente + tampa é limpo e seco, e sua massa A é determinada.
- e. A amostra é retirada do banho de imersão e seca superficialmente com um pano úmido. A amostra é transferida para o recipiente, a tampa é recolocada e a massa B da amostra saturada e seca superficialmente + recipiente, é determinada.
- f. A tampa é removida e a amostra é seca em estufa até a massa constante a uma temperatura de 105 °C. A tampa é recolocada e a amostra é deixada esfriar por 30 minutos em um dessecador. A massa C da amostra seca em estufa + recipiente é medida.

Dessa forma, obtemos as seguintes equações:

- Massa saturada com superfície seca:

$$M_{sat} = B - A \quad (5)$$

- Massa seca:

$$M_s = C - A \quad (6)$$

- Volume total:

$$V = \frac{M_{sat} - M_{sub}}{\rho_w} \quad (7)$$

- Volume de poros:

$$V_v = \frac{M_{sat} - M_s}{\rho_w} \quad (8)$$

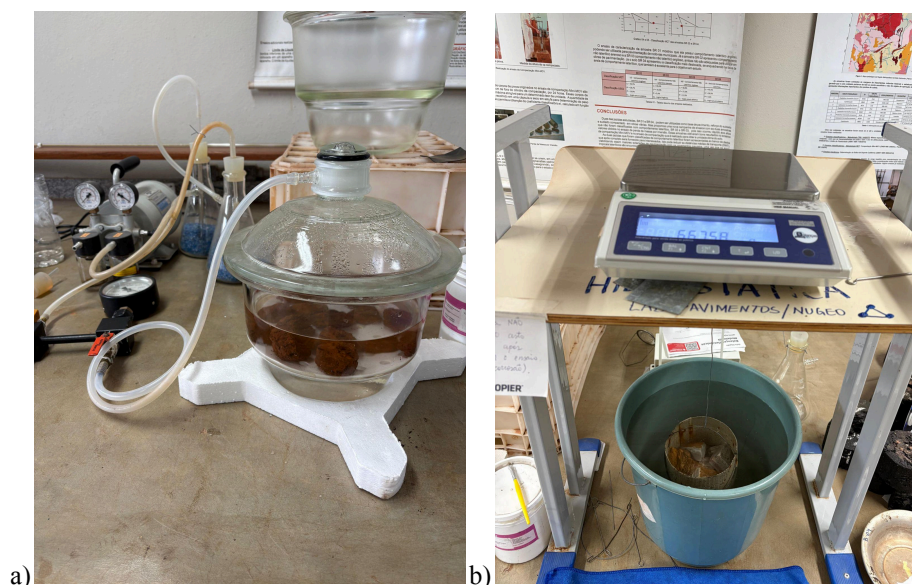
- Porosidade:

$$n = \frac{100V_v}{V} \% \quad (9)$$

- Densidade da rocha seca:

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \quad (10)$$

Figura 26 - Execução de ensaios de propriedades-índice das amostras. a) Amostra saturada imersa em água em vácuo. b) Amostra em banho de imersão.



Fonte: Acervo pessoal (2026).

Determinação da densidade real dos grãos.

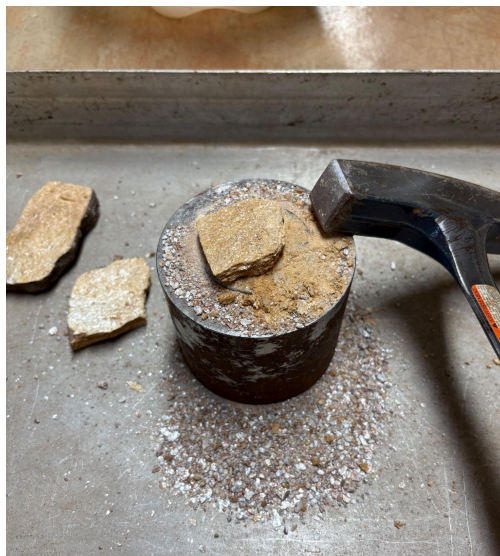
O ensaio para determinação da massa específica dos grãos foi realizado com o objetivo de caracterizar uma propriedade física fundamental das amostras analisadas, correspondente à relação entre a massa dos sólidos e o volume ocupado pelos grãos, desconsiderando os vazios existentes entre as partículas. O procedimento foi adaptado a partir da ABNT NBR 6458, uma vez que o material estudado era composto por fragmentos de rocha, sendo necessária sua preparação prévia para adequação ao ensaio.

O procedimento do ensaio se dá por:

- a. Triturar os fragmentos de rocha, reduzindo o material a uma granulometria compatível com a execução do ensaio.
- b. Passar o material triturado na peneira de 0,425 mm, utilizando a fração passante para a realização do procedimento.
- c. Separar aproximadamente 60 g de material para cada amostra ensaiada.

- d. Colocar o material separado em estufa para secagem, até a remoção da umidade presente.
- e. Após a secagem e o resfriamento da amostra, pesar a massa seca do material.
- f. Inserir o material seco nos picnômetros e adicionar água, promovendo a homogeneização do conjunto e a eliminação de bolhas de ar aprisionadas através de uma bomba de vácuo.
- g. Completar o volume do frasco conforme o procedimento do ensaio e realizar as pesagens necessárias.
- h. Calcular a massa específica dos grãos a partir das massas obtidas em laboratório, considerando a massa específica da água na temperatura do ensaio.

Figura 27 - Trituração de material para ensaio com auxílio do martelo petrográfico.



Fonte: Acervo Pessoal (2026).

Figura 28 - Material sendo ensaiado com auxílio de bomba de vácuo.



Fonte: Acervo Pessoal (2026).

Dessa forma, obtemos a seguinte equação:

$$\delta_t = \frac{P2 - P1}{(P4 - P1)(P3 - P2)} \quad (11)$$

Onde:

δ_t é densidade real dos grãos à temperatura t do ensaio;

P1 é o peso do picnômetro vazio;

P2 é o peso do picnômetro mais amostra, em gramas;

P3 é o peso do picnômetro mais amostra mais água, em gramas;

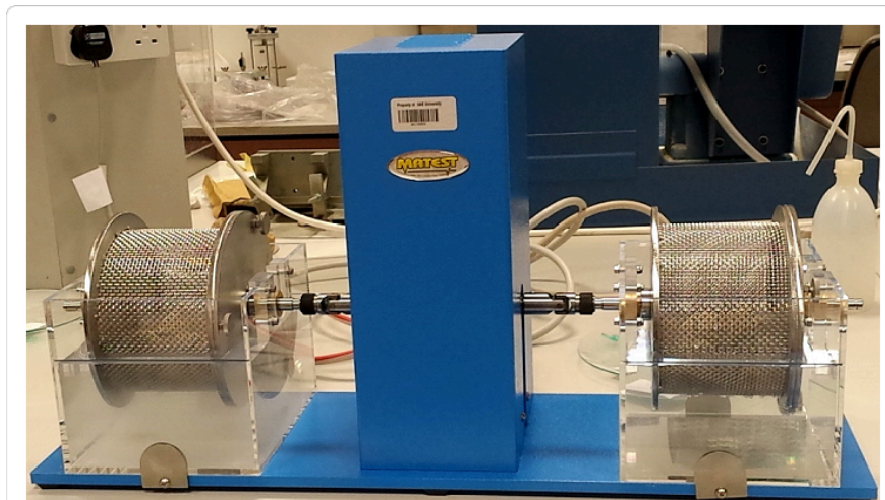
P4 é o peso do picnômetro mais água, em gramas.

3.4.4. Ensaio Slake Durability

O ensaio de Slake Durability foi executado no Laboratório de Mecânica das Rochas do DEMIN (Departamento de Engenharia de Minas) para avaliar a resistência do material rochoso à desintegração quando submetido a dois ciclos padrão de umedecimento e secagem, simulando processos de intemperismo de curto prazo associados à alternância úmido-seco, em consonância com a norma da ISRM (1977).

O ensaio consiste em adicionar amostras em um cilindro que é colocado para girar, permanecendo parcialmente submerso em um tanque com água (Figura 29). A combinação da água com o atrito entre os fragmentos provoca a desagregação do material; as partículas finas que se desprendem atravessam as aberturas do cilindro e se depositam no fundo do tanque. Ao final, a resistência/durabilidade dos fragmentos é avaliada pela razão entre a massa retida no cilindro antes do ensaio e a massa retida após o teste.

Figura 29 - Aparelho do ensaio Slake Durability.



Fonte: Arman et al. (2016).

O procedimento do ensaio se dá por:

- a. Preparar a amostra separando 10 fragmentos de rocha (40–60 g cada; total 450–550 g), com grãos ≤ 3 mm, o mais próximo de um formato esférico e cantos arredondados.
- b. Coloca-se a amostra no tambor limpo e a seca em estufa a 105 °C até a massa constante (aproximadamente de 2 a 6 horas). Pesam-se a massa A = tambor + amostra seca (após resfriar).

- c. 1º ciclo (umedecer/rotacionar): fechar o tambor, montar na cuba e encher com água a 20 °C até 20 mm abaixo do eixo; girar 200 rotações em 10 min (±0,5 min).
- d. Secagem após 1º ciclo: retirar, abrir e secar a 105 °C até massa constante; pesar a massa B = tambor + material retido (após resfriar).
- e. 2º ciclo: repetir rotação em água e nova secagem; pesar massa C = tambor + material retido.
- f. Peso do tambor: limpar/escovar o tambor e pesar a massa D = tambor vazio.

Dessa forma, obtemos a seguinte equação após o segundo ciclo:

- Índice de durabilidade à desagregação

$$I_{d_2} = \frac{C - D}{A - D} \times 100 \quad (12)$$

Figura 30 - Amostras no aparelho do ensaio Slake Durability no laboratório do DEMIN.



Fonte: Acervo pessoal (2026).

Para auxiliar na interpretação dos resultados obtidos no ensaio de *Slake Durability*, a ISRM (1977) propõe uma classificação baseada no índice de durabilidade à desagregação após o segundo ciclo de ensaio (ID_2). Essa classificação relaciona os valores percentuais de massa

retida às diferentes classes de durabilidade da rocha, permitindo avaliar qualitativamente sua resistência à desagregação quando submetida a ciclos sucessivos de umedecimento e secagem. A Tabela 8 apresenta os intervalos de classificação recomendados pela ISRM (1977), os quais foram adotados para a análise dos resultados desta pesquisa.

Tabela 8 - Classificação da durabilidade sugerida pela ISRM.

ID2 (%)	Classificação da durabilidade
0-25	Muito Baixa
26-50	Baixa
51-75	Média
76-90	Alta
91-95	Muito Alta
96-100	Extremamente Alta

Fonte: Modificado de ASTM (1990).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 9 a seguir, apresenta um resumo das amostras coletadas, das respectivas formações geológicas, dos ensaios realizados e do número de corpos de prova empregados em cada etapa experimental. Observa-se que a quantidade de ensaios variou entre as amostras em função das características geomecânicas e do estado de alteração dos materiais, fatores que limitaram a execução de alguns procedimentos laboratoriais.

Tabela 9 - Ensaios realizados para cada amostra.

Amostra	Formação geológica	Ensaios Realizados	Número de corpos de prova
Rua Conselheiro Quintiliano - Centro	Indiviso	- Ensaio de Carga Pontual; - Determinação do teor de água de uma amostra de rocha; - Determinação da porosidade e densidade por saturação; - Determinação da densidade real dos grãos; - Ensaio Slake Durability.	45
Rua 15 de Agosto - XIII de Maio	Cauê	- Ensaio de Carga Pontual; - Determinação do teor de água de uma amostra de rocha; - Determinação da porosidade e densidade por saturação; - Determinação da densidade real dos grãos; - Ensaio Slake Durability.	45
Ru Padre Rolim - São Cristóvão	Cauê	- Ensaio de Carga Pontual; - Determinação do teor de água de uma amostra de rocha; - Determinação da porosidade e densidade por saturação; - Determinação da densidade real dos grãos; - Ensaio Slake Durability.	45
Rua Miguel Alves Pereira - São Francisco (atrás da rodoviária)	Cauê	- Estimativa de resistência à compressão simples; - Determinação do teor de água de uma amostra de rocha; - Determinação da porosidade e densidade por saturação; - Determinação da densidade real dos grãos; - Ensaio Slake Durability.	25
Rua Rodrigo Silva - Vila Aparecida	Fecho do Funil	- Estimativa de resistência à compressão simples; - Determinação do teor de água de uma amostra de rocha; - Determinação da densidade real dos grãos;	15
Rua Pacífico Homem - Pilar (Morro da Forca)	Fecho do Funil	- Estimativa de resistência à compressão simples; - Determinação do teor de água de uma amostra de rocha; - Determinação da densidade real dos grãos.	15

Fonte: A autora (2026).

4.1. Ensaio de Propriedades-Índice das Rochas

Tabela 10 - Propriedades-Índice das Rochas.

Amostra	Formação geológica	Massa Seca (g)	Volume Total (cm³)	Volume de Poros (cm³)	Porosidade (%)	Densidade Rocha Seca g/cm³	Teor de Água (%)	Densidade real dos grãos (g/cm³)
Rua Conselheiro Quintiliano - Centro	Indiviso	1062,63	403,88	8,83	2,19	2,63	0,023	2,750
Rua 15 de Agosto - XIII de Maio	Cauê	898,67	309,9	63,38	20,45	2,90	2,182	3,202
Ru Padre Rolim - São Cristóvão	Cauê	1375,69	469,01	48,97	10,44	2,93	0,398	3,583
Rua Miguel Alves Pereira - São Francisco (atrás da rodoviária)	Cauê	706,43	256,98	42,83	16,67	2,75	0,583	3,399
Rua Rodrigo Silva - Vila Aparecida	Fecho do Funil	x	x	x	x	x	0,900	2,832
Rua Pacífico Homem - Pilar (Morro da Forca)	Fecho do Funil	x	x	x	x	x	0,674	2,793

Fonte: A autora (2026).

As propriedades-índice apresentadas na Tabela 10 acima foram determinadas conforme os procedimentos recomendados pela ISRM (1977) para teor de água, volume, porosidade e densidade de rochas. A densidade real dos grãos foi obtida de acordo com a ABNT NBR 6458. Esses parâmetros permitem caracterizar o estado físico dos materiais e avaliar

diferenças de estrutura porosa e retenção de água, mas não possibilitam, isoladamente, identificar a composição mineralógica ou determinar o grau de intemperismo.

A amostra Centro apresentou a menor porosidade e o menor teor de água entre as amostras avaliadas. Esses resultados são coerentes com o aspecto compacto observado em campo e com um dos maiores valores de resistência perpendicular obtidos no PLT e com a maior diferença entre as orientações avaliadas. Visualmente, o material apresentou características compatíveis com uma rocha rica em quartzo, mas essa interpretação não foi confirmada por petrografia.

A XIII de Maio apresentou a maior porosidade e o maior teor de água do conjunto, além dos menores resultados de $I_{s(50)}$. Em campo, foram observados aspecto ferruginoso, cavidades e heterogeneidade superficial compatíveis com uma canga. Contudo, essa denominação possui caráter descritivo. Os resultados permitem afirmar que o material apresenta elevado volume relativo de vazios, mas não permitem definir, sem análises adicionais, se essa condição decorre principalmente da origem do material, da alteração ou da combinação entre ambos.

A amostra São Cristóvão combinou porosidade intermediária, elevada densidade dos grãos, alta durabilidade e os maiores valores médios de $I_{s(50)}$ nas duas orientações; o que é compatível com a possível presença de constituintes ferruginosos, hipótese também sugerida pelo aspecto bandado observado em campo e pela inserção da amostra na Formação Cauê. Entretanto, não é possível associar esse resultado a minerais específicos, como hematita ou magnetita, sem caracterização petrográfica ou mineralógica.

A amostra São Francisco apresentou uma porosidade relativamente elevada, o que é coerente com a classificação de campo como rocha muito branda e com o índice de durabilidade médio de 74,78%. Ainda assim, a relação entre esses parâmetros não deve ser interpretada como prova de que o intemperismo foi o único responsável pela menor resistência, pois fatores litológicos, estruturais e texturais também podem controlar o comportamento observado.

As amostras Vila Aparecida e Morro da Força não resistiram adequadamente às etapas de saturação e manipulação necessárias para a determinação do volume total, volume de poros, porosidade e densidade seca pelo método da ISRM (1977). Por esse motivo, foram determinados apenas o teor de água, de 0,900% e 0,674%, e a densidade real dos grãos, de

2,832 g/cm³ e 2,793 g/cm³, respectivamente. A inviabilidade dos demais procedimentos decorreu do comportamento desagregável dos materiais e não permite, por si só, classificá-los como mais intemperizados que todas as demais amostras. As características visualmente compatíveis com filitos indicam que sua própria natureza fina e foliada também pode ter contribuído para a baixa integridade durante a preparação.

Leão et al. (2017) verificaram, em uma frente de intemperismo desenvolvida especificamente em filito da Formação Batatal, aumento da porosidade e da absorção de água, associado à abertura e propagação de fraturas e microfraturas. Essa referência auxilia na compreensão dos mecanismos que podem atuar em materiais filíticos, mas não deve ser empregada para afirmar que todas as diferenças observadas neste estudo resultam do mesmo processo. Como não foram realizadas análises petrográficas, os resultados físicos devem ser interpretados conjuntamente com a formação geológica, as observações de campo, o PLT, o Slake Durability e a estimativa de resistência.

De maneira geral, os dados mostram que a amostra Centro reuniu baixa porosidade, baixo teor de água e uma das maiores resistências perpendiculares; a XIII de Maio apresentou elevada porosidade, maior teor de água e menor resistência no PLT; a São Cristóvão combinou densidades elevadas, porosidade intermediária e alta durabilidade; e a São Francisco apresentou porosidade relativamente elevada e menor durabilidade. Essas associações constituem tendências observadas no conjunto estudado, mas não devem ser convertidas em relações causais definitivas, devido ao número limitado de amostras, à heterogeneidade natural dos materiais e à ausência de confirmação petrográfica.

4.2. Estimativa de resistência à compressão simples a partir de índices de campo

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 11. Para os materiais que não apresentaram condições adequadas à obtenção de fragmentos íntegros para determinados ensaios, a resistência à compressão simples foi estimada por índices de campo, com base nos critérios apresentados por González de Vallejo (2002). A avaliação considerou a resposta ao golpe do martelo geológico, a possibilidade de risco e corte com canivete, a facilidade de fragmentação manual e o comportamento do material durante a coleta. Trata-se de uma classificação aproximada, não equivalente à determinação laboratorial da resistência à compressão uniaxial.

Tabela 11 - Estimativa aproximada e classificação da resistência à compressão simples a partir de índices de campo.

Amostra	Formação geológica	Classe	Descrição	Aproximação da faixa de resistência à compressão simples (MPa)
Rua Rodrigo Silva - Vila Aparecida	Fecho do Funil	R0	Rocha extremamente branda	0,25 - 1,0
Rua Miguel Alves Pereira - São Francisco (atrás da rodoviária)	Cauê	R1	Rocha muito branda	1,0 - 5,0
Rua Pacífico Homem - Pilar (Morro da Forca)	Fecho do Funil	R2	Rocha branda	5,0 - 25

Fonte: A autora (2026).

As amostras Vila Aparecida e Morro da Forca apresentaram características visuais e táteis compatíveis com materiais predominantemente filíticos, interpretação apoiada pela unidade geológica mapeada e pela presença de foliação, textura fina e facilidade de fragmentação. Entretanto, como não foram realizadas análises petrográficas, essa descrição deve ser tratada como uma interpretação de campo. A baixa resistência desses materiais não pode ser atribuída exclusivamente ao grau de intemperismo, pois filitos podem apresentar comportamento naturalmente brando e forte anisotropia em razão de sua granulometria fina e estrutura foliada.

O estudo de Leão et al. (2017) mostra que, nos filitos analisados pelos autores, a evolução do intemperismo promoveu aumento da porosidade, abertura e propagação de microfraturas e maior absorção de água. Entretanto, a aplicação desse estudo aos resultados atuais deve ser feita apenas como comparação de comportamento, e não como confirmação da composição das amostras. Assim, as classes R0, R1 e R2 são interpretadas como resultado da interação entre natureza do material, estrutura, condições de alteração e características locais do afloramento.

A diferença entre as amostras Vila Aparecida e Morro da Forca, ambas inseridas na Formação Fecho do Funil, reforça que uma mesma unidade geológica pode conter materiais com diferentes níveis de resistência. Essa variação pode decorrer de mudanças locais de composição, intensidade da foliação, descontinuidades, cimentação e alteração. Por esse motivo, os índices de campo são úteis para o reconhecimento preliminar, mas devem ser complementados, sempre que possível, por investigações e ensaios específicos.

4.3. Ensaio de Carga Pontual

Tabela 12 - Resultados do ensaio da amostra XIII de Maio - Formação Cauê.

ID	Posição	Carga (Kgf)	Carga (N)	Área (mm²)	De² (mm²)	De (mm)	Resistência à carga pontual Is (Mpa)	F	Is(50) (Mpa)	Média Is (50) (Mpa)
1	Perpend.	455	4462,19	2172,24	2765,78	52,59	1,613	1,02	1,65	0,96
2	Perpend.	284	2785,19	2066,78	2631,50	51,30	1,058	1,01	1,07	
3	Perpend.	134	1314,14	1233,88	1571,02	39,64	0,836	0,90	0,75	
4	Perpend.	175	1716,23	1901,76	2421,39	49,21	0,709	0,99	0,70	
5	Perpend.	197	1931,98	1477,38	1881,06	43,37	1,027	0,94	0,96	
6	Perpend.	452	4432,76	2120,05	2699,33	51,96	1,642	1,02	1,67	
7	Perpend.	211	2069,28	1144,15	1456,77	38,17	1,420	0,89	1,26	
8	Perpend.	176	1726,03	1519,05	1934,11	43,98	0,892	0,94	0,84	
9	Perpend.	173	1696,61	1978,25	2518,78	50,19	0,674	1,00	0,67	
10	Perpend.	183	1794,68	1574,95	2005,29	44,78	0,895	0,95	0,85	
11	Paralelo	242	2373,29	2571,89	3274,63	57,22	0,725	1,06	0,77	0,75
12	Paralelo	299	2932,29	1671,33	2128,01	46,13	1,378	0,96	1,33	
13	Paralelo	136	1333,75	1615,61	2057,06	45,35	0,648	0,96	0,62	
14	Paralelo	134	1314,14	987,65	1257,52	35,46	1,045	0,86	0,90	
15	Paralelo	127	1245,49	1247,34	1588,16	39,85	0,784	0,90	0,71	
16	Paralelo	185	1814,30	1071,69	1364,52	36,94	1,330	0,87	1,16	
17	Paralelo	76	745,33	1541,75	1963,02	44,31	0,380	0,95	0,36	
18	Paralelo	56	549,19	697,08	887,55	29,79	0,619	0,79	0,49	
19	Paralelo	88	863,02	503,86	641,53	25,33	1,345	0,74	0,99	
20	Paralelo	80	784,56	1165,28	1483,68	38,52	0,529	0,89	0,47	

Nota: ID = identificação do corpo de prova.

Fonte: A autora (2026).

Tabela 13 - Resultados do ensaio da amostra Centro - Formação Indiviso.

ID	Posição	Carga (Kgf)	Carga (N)	Área (mm²)	De² (mm²)	De (mm)	Resistência à carga pontual Is (Mpa)	F	Is(50) (Mpa)	Média Is (50) (Mpa)
1	Perpend.	1136	11140,75	980,63	1248,58	35,34	8,923	0,86	7,63	2,17
2	Perpend.	334	3275,54	726,46	924,95	30,41	3,541	0,80	2,83	
3	Perpend.	449	4403,34	1537,40	1957,48	44,24	2,249	0,95	2,13	
4	Perpend.	301	2951,91	1548,46	1971,56	44,40	1,497	0,95	1,42	
5	Perpend.	571	5599,80	1209,51	1540,00	39,24	3,636	0,90	3,26	
6	Perpend.	161	1578,93	1709,64	2176,79	46,66	0,725	0,97	0,70	
7	Perpend.	100	980,70	1431,63	1822,80	42,69	0,538	0,93	0,50	
8	Perpend.	2141	20996,79	2632,98	3352,42	57,90	6,263	1,07	6,69	
9	Perpend.	670	6570,69	2565,60	3266,62	57,15	2,011	1,06	2,14	
10	Perpend.	370	3628,59	2424,43	3086,88	55,56	1,175	1,05	1,23	
11	Paralelo	48	470,74	1333,47	1697,83	41,20	0,277	0,92	0,25	0,48
12	Paralelo	59	578,61	1321,87	1683,06	41,03	0,344	0,91	0,31	
13	Paralelo	81	794,37	1604,40	2042,78	45,20	0,389	0,96	0,37	
14	Paralelo	211	2069,28	2948,85	3754,60	61,27	0,551	1,10	0,60	
15	Paralelo	98	961,09	933,94	1189,14	34,48	0,808	0,85	0,68	
16	Paralelo	40	392,28	948,95	1208,24	34,76	0,325	0,85	0,28	
17	Paralelo	47	460,93	3121,40	3974,29	63,04	0,116	1,11	0,13	
18	Paralelo	1190	11670,33	1614,37	2055,48	45,34	5,678	0,96	5,43	
19	Paralelo	137	1343,56	1552,92	1977,24	44,47	0,680	0,95	0,64	
20	Paralelo	920	9022,44	1912,52	2435,10	49,35	3,705	0,99	3,68	

Fonte: A autora (2026).

Tabela 14 - Resultados do ensaio da amostra São Cristóvão - Formação Cauê.

ID	Posição	Carga (Kgf)	Carga (N)	Área (mm²)	De² (mm²)	De (mm)	Resistência à carga pontual Is (Mpa)	F	Is(50) (Mpa)	Média Is (50) (Mpa)
1	Perpend.	429	4207,20	1540,06	1960,87	44,28	2,146	0,95	2,03	2,27
2	Perpend.	192	1882,94	1869,39	2380,19	48,79	0,791	0,99	0,78	
3	Perpend.	304	2981,33	1902,62	2422,49	49,22	1,231	0,99	1,22	
4	Perpend.	1047	10267,93	1988,62	2531,99	50,32	4,055	1,00	4,07	
5	Perpend.	1007	9875,65	1434,29	1826,19	42,73	5,408	0,93	5,04	
6	Perpend.	1216	11925,31	1495,26	1903,82	43,63	6,264	0,94	5,89	
7	Perpend.	224	2196,77	1466,11	1866,71	43,21	1,177	0,94	1,10	
8	Perpend.	276	2706,73	1928,16	2455,01	49,55	1,103	1,00	1,10	
9	Perpend.	206	2020,24	1076,21	1370,28	37,02	1,474	0,87	1,29	
10	Perpend.	620	6080,34	1060,63	1350,43	36,75	4,503	0,87	3,92	
11	Paralelo	275	2696,93	1101,57	1402,56	37,45	1,923	0,88	1,69	2,10
12	Paralelo	602	5903,81	1307,00	1664,12	40,79	3,548	0,91	3,24	
13	Paralelo	572	5609,60	614,99	783,03	27,98	7,164	0,77	5,52	
14	Paralelo	31	304,02	1340,99	1707,41	41,32	0,178	0,92	0,16	
15	Paralelo	40	392,28	663,43	844,70	29,06	0,464	0,78	0,36	
16	Paralelo	573	5619,41	1084,26	1380,52	37,16	4,071	0,87	3,56	
17	Paralelo	175	1716,23	1126,36	1434,13	37,87	1,197	0,88	1,06	
18	Paralelo	279	2736,15	962,86	1225,95	35,01	2,232	0,85	1,90	
19	Paralelo	471	4619,10	1113,87	1418,22	37,66	3,257	0,88	2,87	
20	Paralelo	231	2265,42	782,68	996,54	31,57	2,273	0,81	1,85	

Fonte: A autora (2026).

Os resultados do ensaio de carga pontual, corrigidos para o diâmetro equivalente de 50 mm, são apresentados nas Tabelas 12, 13 e 14 acima. Os ensaios foram realizados em fragmentos irregulares, com a aplicação da carga nas orientações perpendicular e paralela à foliação ou ao bandamento identificado macroscopicamente nas amostras. Essa disposição permitiu avaliar a influência da orientação das estruturas planares sobre a resistência à carga pontual, aspecto especialmente relevante em materiais geologicamente anisotrópicos (ISRM, 1985; Goodman, 1989).

De maneira geral, as amostras atenderam ao critério geométrico recomendado para fragmentos irregulares, definido pela relação $0,3W < D < W$. Em alguns corpos de prova foram observados desvios mínimos em relação ao limite superior, inferiores a 1%. Considerando a pequena magnitude das diferenças, a geometria naturalmente irregular dos fragmentos extraídos em campo e a manutenção de um padrão de ruptura considerado válido, esses resultados foram preservados na análise. Contudo, essa decisão deve ser registrada como uma limitação do procedimento, evitando interpretar os respectivos valores isoladamente.

A amostra Centro apresentou redução expressiva da resistência entre as orientações, passando de 2,17 MPa, na direção perpendicular, para 0,48 MPa, na direção paralela. A resistência

perpendicular foi aproximadamente 4,50 vezes superior à paralela, evidenciando forte influência das estruturas planares sobre a ruptura. Durante a avaliação visual e tátil, a amostra apresentou aspecto mais compacto e características macroscópicas compatíveis com materiais ricos em quartzo (Figura 31). A elevada resistência perpendicular pode estar relacionada à maior competência da matriz, enquanto a redução acentuada na orientação paralela indica que as estruturas planares podem atuar como superfícies preferenciais de ruptura.

Figura 31 - Corpos de prova da amostra Centro.



Fonte: Acervo pessoal (2026).

Na amostra da XIII de Maio, pertencente à Formação Cauê, a diferença entre as orientações foi menos pronunciada do que na amostra Centro. Foram obtidos valores médios de 0,96 MPa na direção perpendicular e 0,75 MPa na paralela, de modo que a resistência perpendicular foi aproximadamente 28% superior à paralela. Em campo, o material apresentou aspecto superficial ferruginoso, poroso e heterogêneo, visualmente compatível com uma canga (Figura 32). A relativa proximidade entre os valores pode indicar que a redução da resistência não está concentrada exclusivamente nas estruturas planares, mas também se distribui pela matriz do material. Nesse caso, a porosidade elevada, a heterogeneidade da cimentação e o estado de alteração observado podem reduzir a competência tanto da matriz quanto das superfícies de descontinuidade.

Figura 32 - Corpos de prova da amostra XIII de Maio.



Fonte: Acervo pessoal (2026).

A amostra São Cristóvão, também inserida na Formação Cauê, apresentou os maiores valores médios entre as amostras analisadas, com $I_{s(50)}$ de 2,27 MPa na orientação perpendicular e 2,10 MPa na orientação paralela. A resistência perpendicular foi aproximadamente 8% superior à paralela, indicando pequena diferença entre as duas direções de carregamento. Visualmente, a amostra apresentou bandamento e características macroscópicas compatíveis com materiais itabiríticos, interpretação baseada no contexto geológico da Formação Cauê e na avaliação de campo, mas não confirmada por análise petrográfica (Figura 33). A proximidade dos valores sugere que, nas amostras ensaiadas, o bandamento identificado macroscopicamente não constituiu uma superfície contínua de fraqueza tão pronunciada quanto a observada na amostra Centro. Esse comportamento pode estar associado à heterogeneidade e à alternância de bandas com diferentes características físicas e mecânicas.

Figura 33 - Corpos de prova da amostra São Cristóvão.



Fonte: Acervo pessoal (2026).

A comparação entre as orientações demonstrou diferentes níveis de anisotropia mecânica. A amostra Centro apresentou a maior influência direcional, com resistência perpendicular aproximadamente 4,50 vezes superior à paralela. Na XIII de Maio, essa relação foi de aproximadamente 1,28, enquanto na São Cristóvão foi de cerca de 1,08. Esses resultados

indicam que a presença visual de foliação ou bandamento não produz necessariamente a mesma resposta mecânica em todos os materiais. Conforme Goodman (1989), o comportamento anisotrópico depende não apenas da orientação das estruturas planares, mas também de sua continuidade, persistência, composição, espaçamento e interação com a matriz rochosa. Assim, a amostra Centro apresentou anisotropia mais pronunciada, ao passo que a São Cristóvão exibiu comportamento mais próximo entre as duas orientações.

Ressalta-se que as designações macroscópicas utilizadas nesta discussão, material com aspecto quartzítico, itabirítico ou de canga ferruginosa, baseiam-se apenas no mapeamento geológico disponível e na avaliação visual e tátil realizada em campo. Como não foram efetuadas análises petrográficas, mineralógicas ou geoquímicas, essas denominações possuem caráter interpretativo e não devem ser consideradas classificações litológicas conclusivas.

Sob a perspectiva urbanística, os resultados demonstram que cortes, fundações e intervenções em encostas não devem ser avaliados somente a partir da formação geológica indicada em mapas regionais. A orientação das estruturas, a heterogeneidade local, a porosidade e o estado de alteração podem modificar significativamente a resistência mobilizada. Os valores obtidos constituem uma caracterização preliminar e não substituem investigações específicas do maciço, análises cinemáticas ou cálculos de estabilidade, mas podem auxiliar na definição de locais prioritários para estudos complementares e no refinamento de instrumentos de planejamento territorial e redução de riscos.

4.4. Ensaio Slake Durability

O ensaio de Slake Durability foi realizado somente com as amostras que apresentaram integridade suficiente para serem manuseadas, secas, imersas e submetidas à rotação no tambor sem se desagregarem previamente ao início do procedimento. Alguns materiais coletados apresentavam comportamento muito brando e elevada facilidade de fragmentação ao toque, impossibilitando a seleção de dez fragmentos com massa e dimensões adequadas. A ausência de resultado para esses materiais não representa durabilidade nula, mas uma limitação experimental decorrente da impossibilidade de preparação de uma amostra válida.

Tabela 15 - Resultados do ensaio Slake Durability.

Amostra	Formação geológica	Índice de durabilidade à desagregação (%)
Rua Conselheiro Quintiliano - Centro	Indiviso	93,04
Rua 15 de Agosto - XIII de Maio	Cauê	91,12
Ru Padre Rolim - São Cristóvão	Cauê	98,51
Rua Miguel Alves Pereira - São Francisco (atrás da rodoviária)	Cauê	74,784

Fonte: A autora (2026).

Os índices de durabilidade após o segundo ciclo indicados na Tabela 15 acima, foram de 98,51% para a amostra São Cristóvão, 93,04% para a amostra Centro, 91,12% para a XIII de Maio e 74,78% para a São Francisco. De acordo com a classificação adotada (Tabela 8 do tópico 3.4.4.), as três primeiras amostras apresentaram durabilidade muito alta, enquanto a amostra São Francisco foi enquadrada como de durabilidade média. Os resultados evidenciam que os materiais apresentam respostas distintas à desagregação provocada pelos ciclos de umedecimento, abrasão e secagem.

Entre as amostras da Formação Cauê, a São Cristóvão apresentou a maior durabilidade, seguida pela XIII de Maio e pela São Francisco. Essa variabilidade reforça que pertencer à mesma formação não implica comportamento físico uniforme. Na São Cristóvão, o aspecto visualmente bandado e a elevada densidade real dos grãos sugerem a presença de constituintes mais densos e resistentes à desagregação, mas essa hipótese não pode ser confirmada sem análise petrográfica. Na XIII de Maio, apesar da porosidade elevada e da baixa resistência no PLT, mais de 90% da massa foi preservada após os dois ciclos, mostrando que a baixa resistência à carga concentrada não implica necessariamente baixa durabilidade à desagregação.

A São Francisco apresentou o menor ID₂, de 74,78%. A amostra foi classificada visualmente como muito branda (Tabela 11 do tópico 4.2) e apresentou maior perda de massa durante o ensaio. Esse resultado pode estar associado à combinação entre características próprias do material, estrutura planar e estado de alteração. Não é adequado atribuí-lo exclusivamente ao intemperismo, porque a natureza litológica também interfere na resistência à desagregação.

De forma semelhante, Leão et al. (2017) demonstraram, em filitos da Formação Batatal, que a evolução intempérica afeta principalmente as propriedades físicas, aumentando a porosidade e a abertura de microfissuras; contudo, os resultados desses autores não devem ser transferidos diretamente para todas as amostras deste trabalho, pois não houve confirmação de que apresentem a mesma litologia.

A comparação entre PLT e Slake Durability mostra que os ensaios avaliam propriedades diferentes. O PLT representa a resistência à ruptura sob carregamento concentrado, enquanto o Slake Durability avalia a manutenção da integridade dos fragmentos após umedecimento, rotação e secagem. A amostra XIII de Maio apresentou o menor valor médio perpendicular de $I_{s(50)}$ e baixa resistência na orientação paralela, mas com uma durabilidade muito alta. Portanto, os índices devem ser interpretados de forma integrada, e não como parâmetros diretamente equivalentes.

4.5. Relação dos resultados com ocorrências históricas de instabilidade

Os resultados obtidos nesta pesquisa também podem ser discutidos qualitativamente à luz de eventos históricos de instabilidade registrados na área urbana de Ouro Preto. As amostras coletadas na Rua Miguel Alves Pereira, no bairro São Francisco, e na Rua Pacífico Homem, no bairro Pilar, próximo ao Morro da Forca, estão inseridas em setores urbanos onde ocorreram movimentos de massa de grande relevância. Ressalta-se, entretanto, que os pontos de coleta não correspondem às mesmas faces dos taludes afetadas pelos eventos, não sendo possível estabelecer uma correspondência direta entre as propriedades determinadas nas amostras e os mecanismos de ruptura observados nos deslizamentos.

Na região da Rua Miguel Alves Pereira, próxima à rodoviária, ocorreu em 2012 um movimento de massa com consequências graves, conforme apresentado na Figura 34. De forma semelhante, o setor do Morro da Forca foi atingido, em 2022, por um deslizamento que provocou a destruição de edificações históricas, conforme ilustrado na Figura 35. Ambos os eventos ocorreram durante períodos de precipitação elevada e reforçam o histórico de instabilidade desses setores da cidade (G1 MG, 2012; G1 MG, 2022). Essa relação com a chuva é compatível com o estudo de Castro et al. (2012), que identificou correlação entre a

precipitação diária, a chuva acumulada nos dias anteriores e a ocorrência de movimentos de massa na área urbana de Ouro Preto.

Figura 34 - Vista do deslizamento sobre a rodoviária em 2012.



Fonte: G1 MG (2012).

Figura 35 - Vista do deslizamento no Morro da Forca.



Fonte: G1 MG (2022).

Embora as amostras tenham sido coletadas em faces diferentes daquelas diretamente envolvidas nos movimentos de massa, os resultados contribuem para a caracterização preliminar dos materiais presentes nesses contextos geológicos. A amostra São Francisco, por exemplo, foi classificada como rocha muito branda por índices de campo, apresentou porosidade relativamente elevada e obteve o menor índice de durabilidade entre as amostras submetidas ao ensaio Slake Durability. Esses parâmetros indicam menor integridade física do material analisado, mas não permitem afirmar que tenham sido responsáveis pelo deslizamento registrado em 2012, uma vez que a estabilidade de uma encosta depende de condições específicas da face analisada e da interação entre diversos fatores.

A interpretação de movimentos de massa exige considerar, de maneira integrada, a geometria e a declividade das encostas, a orientação e a persistência das discontinuidades, as características dos materiais geológicos, o grau de alteração, as condições de drenagem, a infiltração de água, a ocupação urbana e as intervenções realizadas no terreno. Conforme González de Vallejo (2002), o comportamento dos maciços rochosos não pode ser avaliado exclusivamente a partir da resistência da matriz, pois as estruturas geológicas, as condições hidrogeológicas e a configuração do relevo podem exercer controle decisivo sobre os mecanismos de ruptura. Portanto, mesmo materiais classificados como relativamente resistentes podem integrar encostas instáveis quando outras condições desfavoráveis estão presentes.

Nesse sentido, a proximidade entre os pontos estudados e setores com registros históricos de movimentos de massa não estabelece uma relação causal, mas reforça a relevância da produção de dados geológico-geotécnicos locais. Os parâmetros obtidos podem complementar levantamentos de campo, mapas geológicos, inventários de ocorrências e análises de suscetibilidade, contribuindo para a definição de áreas que necessitam de investigações mais detalhadas. Sob a perspectiva da urbanística, essa integração fortalece o uso das informações geotécnicas no planejamento territorial, na atualização do Plano Municipal de Redução de Riscos, na cartografia geotécnica e na definição de medidas preventivas voltadas à ocupação segura das encostas.

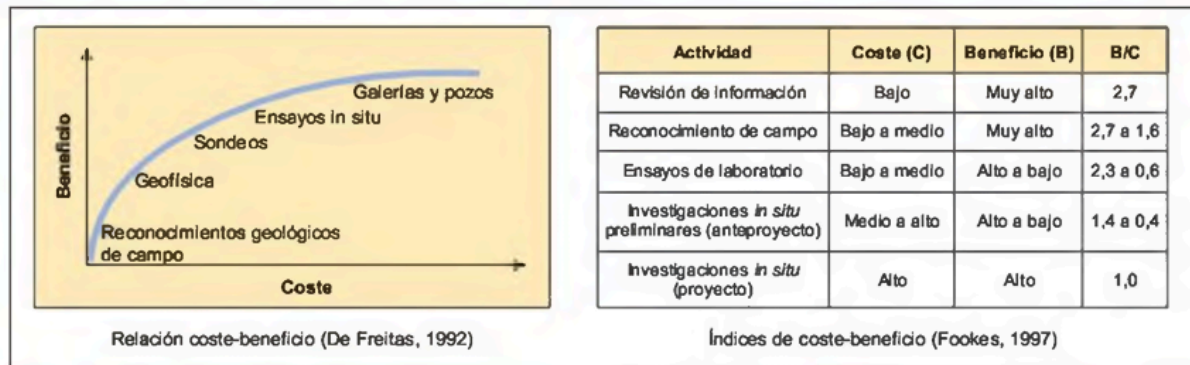
4.6. Aplicabilidade dos resultados à cartografia geotécnica e aos instrumentos de planejamento territorial

Considerando o alcance e a escala desta pesquisa, o estudo enquadra-se predominantemente nas fases iniciais das investigações geológico-geotécnicas descritas por González de Vallejo (2002), correspondentes aos estudos prévios e de viabilidade. Nessas etapas, busca-se reconhecer os condicionantes do meio físico, identificar possíveis limitações geotécnicas e produzir informações preliminares que orientem a definição de investigações posteriores. Nesse sentido, a caracterização das amostras coletadas na área urbana do distrito sede de Ouro Preto, por meio da determinação de propriedades físicas, resistência à carga pontual, durabilidade e estimativa de resistência por índices de campo, constitui uma base inicial para a compreensão da variabilidade geomecânica dos materiais presentes no território estudado.

Os resultados obtidos não são suficientes para o dimensionamento de fundações, contenções ou intervenções específicas, tampouco permitem calcular fatores de segurança ou explicar isoladamente movimentos de massa ocorridos nos locais avaliados. Para essas finalidades, seriam necessárias investigações direcionadas a cada encosta ou empreendimento, incluindo levantamento estrutural detalhado, caracterização geométrica do talude, sondagens, ensaios de campo e laboratório, avaliação das condições hidrogeológicas e análises de estabilidade. Entretanto, os parâmetros produzidos oferecem informações complementares que podem auxiliar no reconhecimento de materiais com diferentes comportamentos físicos e mecânicos e na identificação de setores que demandem campanhas investigativas mais detalhadas.

Essa contribuição relaciona-se ao princípio da relação benefício/custo das investigações geológico-geotécnicas apresentado por González de Vallejo (2002) e ilustrado na Figura 36. Nas etapas iniciais, o levantamento de dados existentes, o reconhecimento geológico de campo e a realização de ensaios preliminares apresentam custos relativamente reduzidos e podem proporcionar benefícios elevados, pois permitem reconhecer antecipadamente condicionantes que influenciarão as decisões posteriores. À medida que o nível de detalhamento aumenta, passam a ser necessários procedimentos mais complexos e onerosos, como sondagens profundas, ensaios *in situ*, instrumentação e monitoramento. Assim, quanto melhor for a base de informações construída inicialmente, maior será a possibilidade de direcionar racionalmente os recursos para os locais e problemas que exigem investigação específica.

Figura 36 - Relação entre benefício e custo nas diferentes modalidades de investigação geológico-geotécnica.



Fonte: González de Vallejo (2002).

No âmbito da cartografia geotécnica, González de Vallejo (2002) destaca que a elaboração de mapas aplicados à engenharia depende da integração de informações referentes à litologia, aos materiais superficiais, às estruturas geológicas, ao relevo, às condições hidrogeológicas e às propriedades geotécnicas do terreno. Os resultados deste trabalho podem constituir dados pontuais de entrada para essa integração, acrescentando informações sobre resistência, porosidade, teor de água, densidade e durabilidade de materiais associados a diferentes unidades geológicas e contextos urbanos. Quando espacializados e associados a uma campanha de amostragem mais abrangente, esses parâmetros podem contribuir para a delimitação de unidades com comportamentos geotécnicos distintos e para o refinamento da interpretação das condições do substrato rochoso.

A incorporação desses dados em cartas de suscetibilidade exige, entretanto, cautela metodológica. A suscetibilidade a movimentos de massa não é definida somente pela resistência da rocha intacta, mas pela combinação entre declividade, geometria da encosta, estruturas e descontinuidades, grau de alteração, materiais de cobertura, drenagem, infiltração, uso do solo e histórico de ocorrências. Desse modo, os resultados desta pesquisa não produzem isoladamente uma carta de suscetibilidade, mas podem complementar suas bases temáticas e auxiliar na atribuição ou no refinamento de parâmetros relacionados ao comportamento geomecânico dos materiais. Para que essa aplicação alcance maior representatividade cartográfica, será necessário ampliar o número de pontos, contemplar diferentes graus de alteração em cada unidade geológica e estabelecer procedimentos padronizados para a espacialização e a comparação dos dados.

A integração dessas informações à cartografia geotécnica pode fortalecer instrumentos como o Plano Diretor Municipal e o Plano Municipal de Redução de Riscos. No Plano Diretor, as informações podem auxiliar na formulação de diretrizes para expansão urbana, ocupação de encostas, implantação de infraestrutura e exigência de estudos específicos em setores com condicionantes desfavoráveis. No PMRR, podem complementar a caracterização dos materiais presentes nos setores de risco, apoiar a hierarquização de áreas que necessitam de aprofundamento técnico e orientar a seleção de locais para monitoramento ou investigação complementar. Dessa forma, os dados geológico-geotécnicos deixam de representar apenas resultados laboratoriais e passam a compor uma base de conhecimento potencialmente aplicável ao ordenamento territorial e à prevenção de riscos.

Portanto, a principal contribuição desta pesquisa para os instrumentos públicos não consiste em fornecer soluções executivas ou classificações definitivas do território, mas em ampliar a base técnica disponível sobre o comportamento das rochas urbanas de Ouro Preto. A continuidade da investigação, com maior densidade espacial de amostras e integração em ambiente de Sistema de Informação Geográfica, poderá favorecer a construção de unidades geotécnicas mais representativas, aprimorar cartas de suscetibilidade e fornecer subsídios mais consistentes para decisões relativas ao uso e à ocupação do solo urbano.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo caracterizar geomecanicamente rochas aflorantes em diferentes setores da área urbana do distrito sede de Ouro Preto, avaliando suas propriedades físicas, resistência mecânica e comportamento frente aos processos de intemperismo, com enfoque na contribuição dessas informações para o planejamento urbano e para a gestão de riscos geológicos. Os resultados obtidos demonstraram que as rochas analisadas apresentam comportamento geomecânico bastante variável, evidenciando que fatores como as características litológicas observadas em campo, a anisotropia estrutural, o grau de alteração e as propriedades físicas exercem influência conjunta sobre a resistência e a durabilidade dos materiais.

Os ensaios realizados evidenciaram que amostras inseridas em um mesmo contexto geológico podem apresentar comportamentos geomecânicos distintos, em razão da interação entre

características estruturais, propriedades físicas, heterogeneidade e estado de alteração observado em campo. Dessa forma, a classificação geológica regional, embora importante para o reconhecimento inicial dos materiais, não deve ser utilizada isoladamente para representar as condições locais, sendo necessária sua complementação por meio de ensaios e observações específicas.

Entre as unidades avaliadas, a Formação Cauê apresentou a maior variabilidade de comportamento. A amostra XIII de Maio apresentou valores médios de $I_{s(50)}$ de 0,96 MPa na orientação perpendicular e 0,75 MPa na paralela, enquanto a amostra São Cristóvão atingiu 2,27 MPa e 2,10 MPa, respectivamente. Em relação à anisotropia, o comportamento mais marcado foi observado na amostra Centro, cuja resistência perpendicular foi aproximadamente 4,5 vezes superior à paralela, indicando influência significativa das estruturas planares sobre o processo de ruptura.

Os resultados também demonstraram a importância da integração entre diferentes métodos de caracterização. O ensaio de carga pontual permitiu avaliar a resistência mecânica e sua variação em função da orientação, enquanto o ensaio de *Slake Durability* indicou que a resistência à desagregação pela ação da água não está necessariamente associada aos maiores valores de $I_{s(50)}$. De maneira complementar, as propriedades-índice e as estimativas de resistência obtidas por índices de campo contribuíram para interpretar a influência da porosidade, da densidade, do teor de água e das condições de alteração, proporcionando uma análise mais abrangente do comportamento geomecânico das amostras.

Posto isso, este trabalho demonstrou que informações geológico-geotécnicas obtidas ainda nas etapas iniciais de investigação constituem importante suporte para o planejamento territorial. Embora os resultados não sejam suficientes para o dimensionamento de obras específicas ou para a elaboração direta de cartas de suscetibilidade e projetos executivos, eles representam uma base técnica capaz de subsidiar futuras campanhas de investigação, aperfeiçoar diagnósticos geotécnicos e contribuir para instrumentos públicos como o Plano Diretor Municipal, o Plano Municipal de Redução de Riscos (PMRR), a cartografia geotécnica e estudos de suscetibilidade a movimentos de massa. Conforme discutido por González de Vallejo (2002), a produção de informações confiáveis nas fases preliminares das

investigações reduz incertezas e aumenta a eficiência técnica e econômica das etapas posteriores do planejamento e da implantação de empreendimentos.

A análise qualitativa dos resultados, associada ao histórico de movimentos de massa registrados em Ouro Preto, reforça que a estabilidade das encostas urbanas depende da interação entre diversos fatores, como litologia, estruturas geológicas, relevo, grau de alteração, drenagem, precipitação e ocupação antrópica. Dessa forma, a caracterização da resistência da rocha intacta representa apenas um dos elementos necessários para a compreensão desses processos, devendo ser integrada a investigações geológico-geotécnicas mais abrangentes e a estudos específicos de estabilidade quando aplicados a áreas de risco.

Por fim, considera-se que a principal contribuição desta pesquisa consiste na ampliação da base de conhecimento sobre o comportamento geomecânico das rochas presentes na área urbana de Ouro Preto, fornecendo parâmetros que poderão subsidiar futuras investigações e contribuir para a consolidação de uma cultura de planejamento territorial fundamentada no conhecimento do meio físico. Mais do que caracterizar materiais rochosos, este trabalho busca reforçar a importância da integração entre a geotecnia e o planejamento urbano na construção de cidades mais resilientes, capazes de reconhecer as potencialidades e as limitações impostas pelo ambiente natural.

Nesse contexto, entende-se que planejar com segurança significa compreender a dinâmica natural do terreno e adaptar as intervenções humanas às suas limitações, e não o contrário. Os processos geológicos fazem parte da evolução natural da paisagem e não podem ser evitados, contudo, podem ser compreendidos, monitorados e incorporados ao planejamento territorial, reduzindo significativamente os riscos associados à ocupação humana e promovendo um desenvolvimento urbano mais seguro, sustentável e compatível com as características do meio físico.

5.1. Sugestão para trabalhos futuros

Como continuidade desta pesquisa, recomenda-se a ampliação da campanha de amostragem, contemplando maior número de afloramentos distribuídos pelas diferentes unidades geológicas e pelos distintos graus de alteração presentes na área urbana do distrito sede de

Ouro Preto. O aumento da quantidade de amostras e da representatividade espacial dos pontos de coleta permitirá caracterizar de forma mais abrangente a variabilidade geomecânica dos materiais rochosos, reduzindo as incertezas relacionadas às diferenças litológicas, às condições estruturais dos maciços e à evolução do intemperismo.

Recomenda-se também a realização de análises petrográficas, mineralógicas e, quando pertinente, químicas, com o objetivo de confirmar as interpretações litológicas efetuadas a partir do contexto geológico e das avaliações visuais e táteis de campo. A incorporação dessas análises permitirá compreender com maior precisão a influência da composição mineralógica, da textura e do bandamento ou foliação sobre as propriedades físicas, a resistência e a alterabilidade das rochas estudadas.

Quanto à caracterização experimental, sugere-se a incorporação de ensaios complementares destinados à avaliação da alterabilidade e da degradação progressiva dos materiais, como a ciclagem água-estufa e a alteração acelerada em extrator Soxhlet. Esses procedimentos poderão ampliar a compreensão dos efeitos produzidos por ciclos sucessivos de umedecimento, secagem e lixiviação sobre as propriedades físicas e mecânicas das rochas. Adicionalmente, a utilização do esclerômetro de Schmidt poderá fornecer estimativas indiretas e não destrutivas da resistência superficial, desde que os resultados sejam interpretados por meio de correlações compatíveis com os materiais analisados e comparados com ensaios laboratoriais.

Além da ampliação dos ensaios, recomenda-se o desenvolvimento de investigações direcionadas ao comportamento dos maciços rochosos, incluindo levantamentos estruturais detalhados, caracterização das famílias de descontinuidades, análises cinemáticas, determinação do fator de segurança e aplicação de métodos de equilíbrio limite ou modelagem numérica. A integração dessas informações com os parâmetros físicos e mecânicos obtidos permitirá avaliar de forma mais completa os possíveis mecanismos de ruptura e as condições de estabilidade das encostas urbanas de Ouro Preto.

Sugere-se, ainda, a organização dos resultados em um banco de dados geológico-geotécnico georreferenciado, integrado a um Sistema de Informação Geográfica. A ampliação e a espacialização dos dados poderão contribuir para a definição de unidades geotécnicas, para o

refinamento de cartas de suscetibilidade e para a identificação de setores prioritários para investigações complementares, monitoramento e intervenções preventivas.

Por fim, a consolidação de uma base geológico-geotécnica mais abrangente poderá contribuir para o aperfeiçoamento de instrumentos públicos de planejamento territorial, como as cartas geotécnicas de aptidão à urbanização, o Plano Municipal de Redução de Riscos de Ouro Preto e o Plano Diretor Municipal. Ademais, a incorporação de parâmetros relacionados à resistência, à alterabilidade, à anisotropia e ao comportamento dos maciços rochosos poderá favorecer decisões mais fundamentadas sobre o uso e a ocupação do solo, fortalecendo as ações de prevenção de desastres, a gestão de áreas de risco e o planejamento de intervenções em terrenos geologicamente complexos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACDMIN. Rochas isotrópicas e anisotrópicas: são rochas homogêneas ou heterogêneas? 10 mar. 2023. Disponível em: <https://acadmin.com.br/2023/03/rochas-isotropicas-anisotropicas-sao-rochas-homogeneas-heterogeneas/>. Acesso em: 10 jan. 2026.

AKBAY, Deniz. Investigating the Accuracy of Specimen Shape for Point Load Index Test in Predicting the Uniaxial Compressive Strength for Rocks Using Regression Analysis and Machine Learning. Mining, Metallurgy & Exploration, 2023. 40. 10.1007/s42461-023-00865-4.

ARMAN, Hasan; ELTOKHI, Mohamed. Slake Durability Test on Lower Oligocene Limestones from Al Ain City, United Arab Emirates. Journal of Earth Science & Climatic Change, 2016. 7. 10.4172/2157-7617.1000356.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12696:1992 – Agregados – Verificação do comportamento mediante ciclagem artificial água – estufa. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASTM D4644 - 08 - Standard test method for slake durability of shales and similar weak rocks 1990. 7p.

BARTON, Nick. Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy. London: Taylor & Francis, 2007.

BRASIL. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil, autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, 11 abr. 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm. Acesso em: 10 jan. 2026.

BRASIL. Movimento de massa. São José dos Campos: Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ceaden/pt-br/paginas/ameacas-naturais/movimento-de-massa>. Acesso em: 18 jan. 2026.

BRASIL. Plano Nacional de Proteção e Defesa Civil (PN-PDC) 2025-2035. Brasília, DF: Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional – Sedec, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/protecao-e-defesa-civil-sedec/20251110_PNPDC_site_compressed.pdf. Acesso em: 10 jan. 2026.

BRASIL. Guia para Planos Municipais de Redução de Riscos – PMRR. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/assuntos/publicacoes/arquivos/arquivos/Guia_PMRR.pdf. Acesso em: 10 jan. 2026.

BONUCCELLI, Teresinha de Jesus. Estudo dos movimentos gravitacionais de massa e processos erosivos com aplicação na área urbana de Ouro Preto (MG): escala 1:10.000. 1999.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

CASTRO, Jeanne Michelle Garcia. Pluviosidade e movimentos de massa nas encostas de Ouro Preto. 2006. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

CASTRO, Jeanne Michelle Garcia; SOBREIRA, Frederico Garcia; GOMES, Romero César; GOMES, Guilherme José Cunha. Proposição de procedimento preventivo de riscos geológicos em Ouro Preto – BR com base em histórico de ocorrências e sua correlação com a pluviosidade. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 42, n. 1, p. 58–66, mar. 2012.

CORREIA, Fernando Augusto; RIBEIRO, Rogério Pinto; PARAGUASSÚ, Antenor Braga. Estudo da alterabilidade de rochas em extrator Soxhlet com novo sistema de condensação sem perda de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 20., 2020, Campinas, SP. Anais [...]. Campinas: ABMS, 2020. DOI: 10.4322/cobramseg.2022.0588.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslide types and processes. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD; NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. Landslides: investigation and mitigation. Washington, D.C.: National Academy Press, 1996. cap. 3.

FAIRHURST, C.E.; HUDSON, J.A. Draft ISRM Suggested Method for the Complete Stress-Strain Curve for Intact Rock in Uniaxial Compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 36, n. 3, p. 279-289, 1999.

FERREIRA, Mário Quinta; ANTÃO, Ana. Utilização do Slake Durability Test na caracterização da alteração de granitos. In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 2006. Lisboa. Anais... Lisboa: Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 2006. p. 763–766.

G1 MINAS. Bombeiros confirmam segundo soterrado em Ouro Preto. *G1*, Minas Gerais, 3 jan. 2012. Disponível em: <https://g1.globo.com/minas-gerais/noticia/2012/01/bombeiros-confirmam-segundo-soterrado-em-ouro-preto.html>. Acesso em: 8 jul. 2026.

G1 MINAS. Deslizamento destrói casarão histórico em Ouro Preto; vídeos. *G1*, Minas Gerais, 13 jan. 2022. Disponível em:

<https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2022/01/13/deslizamento-destrói-casarao-historico-em-ouro-preto-videos.ghtml>. Acesso em: 8 jul. 2026.

GIRÃO, Osvaldo; CORRÊA, Antonio Carlos de Barros; GUERRA, Antonio José Teixeira. Encostas urbanas como unidades de gestão e planejamento, a partir do estudo de áreas a sudoeste da cidade do Recife – PE. *Revista de Geografia*, Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. 24, n. 3, p. 239–267, set./dez. 2007.

GOODMAN, Richard E. *Introduction to rock mechanics*. 2. ed. New York: Wiley, 1989. 562 p.

GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis I. *Ingeniería geológica*. Madrid: Pearson Educación, 2002.

HEIDARI, M.; AZARAFZA, M.; MOTAGHI, A. Estimation of uniaxial compressive strength from point load strength, Schmidt hammer rebound value and P-wave velocity. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, v. 46, n. 1, p. 33–43, 2012.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (ISRM). Commission on Classification of Rocks and Rock Masses. Basic geotechnical description of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Oxford, v. 18, n. 1, p. 85–110, fev. 1981.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. Suggested Method for Determining Point Load Strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, v. 22, n. 2, p. 51-60, 1985.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS; FRANKLIN, J. A. Suggested method for determining point load strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, v. 22, n. 2, p. 51–60, abr. 1985. DOI: 10.1016/0148-9062(85)92327-7.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (ISRM). Suggested methods for determining swelling and slake-durability index properties. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 16, n. 2, p. 151–160, 1979.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (ISRM). Suggested methods for determining water content, density, porosity and absorption of rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 14, n. 2, p. 151–156, 1977.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Ouro Preto (MG): panorama. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/ouro-preto/panorama>. Acesso em: 25 jan. 2026.

LEÃO, Marcio Fernandes; BARROSO, Emílio Velloso; POLIVANOV, Helena; MARQUES, Eduardo Antônio Gomes; VARGAS JR., Eurípedes do Amaral; FIGUEIREDO, Veronica Dutra de. Aspectos mineralógicos, químicos e físicos de frente de intemperismo em filito da Formação Batatal, Quadrilátero Ferrífero. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, Rio de Janeiro, v. 40, n. 3, p. 398-406, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2017_3_398_406

MARCELLINO, Lázaro Corrêa; MARQUES, Eduardo Antonio Gomes; LEMOS, Carolina Cryssaf Santo; VARGAS JUNIOR, Eurípedes do Amaral. Avaliação dos efeitos da ciclagem água-estufa em amostras de rochas intrusivas do Quadrilátero Ferrífero. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 17., 2017. Anais... [S.l.]: ABGE, 2017.

NAÇÕES UNIDAS. ODS 11 – Cidades e comunidades sustentáveis. Brasília: ONU Brasil, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/11>. Acesso em: 10 jan. 2026.

NETO, Danilo Tomasi. Estudo de alterabilidade de rochas utilizando o ensaio Slake Durability. 2015. Trabalho apresentado no XXVII Salão de Iniciação Científica da UFRGS, Porto Alegre, RS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Geociências, 2015.

PREFEITURA MUNICIPAL DE OURO PRETO. Informações gerais. Ouro Preto, MG: Prefeitura Municipal de Ouro Preto, [s.d.]. Disponível em: <https://www.ouropreto.mg.gov.br/informacoes-gerais>. Acesso em: 25 jan. 2026.

TOMINAGA, Lídia Keiko; SANTORO, Jair; AMARAL, Rosangela do. Conhecer para prevenir: manual de prevenção de desastres naturais. 3. ed. São Paulo: Secretaria de Estado de Infraestrutura e Meio Ambiente, 2016. Disponível em:

https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/233/2017/05/Conhecer_para_Prevenir_3ed_2016.pdf. Acesso em: 10 jan. 2026

XUE, Yiguo; KONG, Fanmeng; QIU, Daohong; GONG, Huimin; NING, Zexu. Assessing the effect of grain size or anisotropy on the correlated equations between uniaxial compressive strength and point load test. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, [s.l.], v. 81, n. 325, 2022. DOI: [10.1007/s10064-022-02814-9](https://doi.org/10.1007/s10064-022-02814-9).

ZENÓBIO, Ângelo Almeida. Avaliação geológica-geotécnica de encostas naturais rochosas por meio de classificações geomecânicas: área urbana de Ouro Preto (MG), escala 1:5.000. 2000. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.