



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



Bárbara Rodrigues Silva

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ANÁLISE DE DURABILIDADE DE ROCHAS
BÁSICAS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO (MG)

Monografia Nº 575

Ouro Preto
2026

Bárbara Rodrigues Silva

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ANÁLISE DE DURABILIDADE DE ROCHAS
BÁSICAS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO (MG)**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Geóloga.

Orientador: Luis de Almeida Prado Bacellar
Coorientadora: Maria Carolina Rodrigues Marcussi

Ouro Preto
2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586a Silva, Bárbara Rodrigues.

Avaliação de métodos de análise de durabilidade de rochas básicas do Quadrilátero Ferrífero (MG). [manuscrito] / Bárbara Rodrigues Silva. - 2026.

56 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

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

Coorientadora: Ma. Maria Carolina Rodrigues Marcussi.

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

1. Geotecnia. 2. Rochas - Durabilidade. 3. Rochas ígneas - Rochas básicas. I. Bacellar, Luis de Almeida Prado. II. Marcussi, Maria Carolina Rodrigues. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624.13:552.3

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



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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Bárbara Rodrigues Silva

Avaliação de métodos de análise de durabilidade de rochas básicas do Quadrilátero Ferrífero (MG)

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

Aprovada em 13 de fevereiro de 2026.

Membros da banca:

Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dra. Mônica Neves Pessoa - Universidade Federal de Ouro Preto
Dra. Cristiane Paula de Castro Gonçalves - Universidade Federal de Ouro Preto

Luis de Almeida Prado Bacellar, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/03/2026



Documento assinado eletronicamente por **Luis de Almeida Prado Bacellar, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/03/2026, às 22:45, 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 **1068873** e o código CRC **C9C33962**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, que foi meu sustento ao longo de toda essa trajetória.

Aos meus pais, Geraldo e Eliane, ao meu irmão Henrique e à minha cunhada Mirela, pelo apoio incondicional, incentivo e carinho.

Aos meus amigos de BH, que persistiram apesar da minha distância e sempre estiveram ao meu lado. À Geogalera, pela companhia ao longo do curso e por ter com quem dividir experiências únicas, que se tornaram ainda melhores com vocês.

Ao Gustavo, meu agradecimento especial pela amizade desde o primeiro dia em sala de aula. Às minhas pessoas preferidas, Ana Luiza, Dante, Vitória e Sofia, não sinto que preciso explicar a gratidão que tenho por vocês.

À República Penélope, por ser meu lar desde o começo e me presentear com uma segunda família eterna.

Ao Centro Tecnológico de Geotecnia Aplicada da Escola de Minas, pelo apoio durante os ensaios. Ao mestre Luis Bacellar, pelos ensinamentos e incentivo para a realização deste trabalho. À Maria Carolina, pela paciência, parceria e aprendizados. Ao Luiz, por me ajudar a tornar isso possível.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto e ao Departamento de Geologia pelo ensino público e de qualidade.

A cada um que contribuiu com essa conquista, muito obrigada!

RESUMO

As rochas ígneas de composição básica são amplamente empregadas em obras de engenharia devido à sua elevada resistência mecânica. Entretanto, quando expostas a novas condições ambientais decorrentes de escavações, desconfinamento e alteração físico-química, podem sofrer degradação significativa, comprometendo o desempenho geotécnico de taludes, fundações e estruturas associadas. No Quadrilátero Ferrífero (MG), esses litotipos ocorrem principalmente como diques intrusivos nos supergrupos Minas e Rio das Velhas, onde sua durabilidade variável representa um fator de risco relevante em cavas de mineração. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo geral avaliar o grau de degradação, ou seja, da durabilidade de rochas básicas provenientes de três minas da região, buscando compreender os mecanismos de alteração envolvidos e a coerência entre diferentes métodos laboratoriais utilizados para quantificação desse comportamento. As amostras foram submetidas a caracterizações física, química, mineralógica e petrográfica, além de ensaios de absorção de água, porosidade aparente, Índice de Durabilidade *Slake*, ciclos de saturação e secagem em estufa e lixiviação contínua em extrator Soxhlet, estes últimos com procedimentos expeditos propostos na literatura para redução do tempo experimental. Uma amostra de gnaiss foi incluída como referência por sua reconhecida alta durabilidade. De forma geral, quatro dos cinco indicadores analisados apresentaram tendências convergentes, demonstrando coerência entre a metodologia expedita adotada e os métodos consagrados de avaliação de alterabilidade. Os resultados reforçam que a combinação entre caracterização mineralógica, ensaios físico-mecânicos e testes acelerados de ciclagem é essencial para compreender o comportamento de durabilidade das rochas básicas do Quadrilátero Ferrífero. Ainda, conclui-se que são necessárias investigações adicionais, com aumento do número de amostras e execução de ciclagens naturais, para o avanço na definição de indicadores confiáveis de durabilidade destas rochas.

Palavras-chaves: durabilidade, rochas básicas, ensaios de ciclagem, alterabilidade.

ABSTRACT

Basic igneous rocks are widely used in engineering works due to their high mechanical strength. However, when exposed to new environmental conditions resulting from excavation, stress release, and physicochemical weathering, they may undergo significant degradation, compromising the geotechnical performance of slopes, foundations, and associated structures. In the Quadrilátero Ferrífero region (MG), these lithotypes occur mainly as intrusive dikes within the Minas and Rio das Velhas supergroups, where their variable durability represents a relevant risk factor in mining pits. In this context, the present study aimed to evaluate the degree of degradation, i.e., the durability of basic rocks collected from three mines in the region, seeking to understand the associated alteration mechanisms and the consistency among different laboratory methods used to quantify this behavior. The samples were subjected to physical, chemical, mineralogical, and petrographic characterizations, as well as water absorption, apparent porosity, Slake Durability tests, saturation and oven-drying cycles, and continuous leaching with a Soxhlet extractor, the latter following expedited procedures proposed in the literature to reduce experimental time. A gneiss sample was included as a reference due to its well-known high durability. Overall, four of the five samples analyzed showed convergent trends, demonstrating consistency between the expedited methodology and conventional durability assessment methods. The results reinforce that combining mineralogical characterization, physic-mechanical testing and accelerated cycling procedures is essential for understanding the durability behavior of basic rocks in the Quadrilátero Ferrífero. Furthermore, the findings highlight the need for additional investigations, including a larger number of samples and natural cycling tests, to advance the development of reliable durability indicator for these rocks.

Keywords: durability, basic rocks, cycling tests, alterability.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	9
1.1 Apresentação	9
1.2 Objetivos	11
1.3 Justificativas e relevância do projeto	11
ALTERABILIDADE DAS ROCHAS	13
2.1 Revisão bibliográfica	13
2.1.1 Conceitos fundamentais	13
2.1.2 Rochas ígneas	14
2.1.3 Rochas básicas do Quadrilátero Ferrífero	15
2.1.3.1 Alterabilidade de rochas básicas	15
2.1.4 Estudos de alterabilidade	16
APRESENTAÇÃO DO ARTIGO CIENTÍFICO	19
3.1 Introdução	20
3.2 Revisão bibliográfica	21
3.2.1 Conceitos fundamentais	22
3.2.2 Rochas ígneas	22
3.3 Materiais e métodos	23
3.3.1 Áreas de proveniência das amostras	23
3.3.2 Fluorescência e Difratometria de Raios X	24
3.3.3 Microscopia óptica	25
3.3.4 Ensaios de absorção e porosidade aparente	25
3.3.5 Ensaios de saturação em água e secagem em estufa	26
3.3.6 Ensaio de ciclagem com extrator Soxhlet	27
3.3.7 Teste de Durabilidade <i>Slake</i>	29
3.4 Resultados	30
3.4.1 Caracterização das amostras	30
3.4.1.1 Caracterização petrográfica	30
3.4.1.1.1 Amostras VGA	31
3.4.1.1.2 Amostra TAM	32
3.4.1.1.3 Amostra FAZ	33
3.4.1.1.4 Amostra GNA	34
3.4.1.2 Massa específica e porosidade aparente	35
3.4.1.3 Classificação de resistência	35
3.4.1.4 Fluorescência e difratometria de raios X	36
3.4.2 Ensaios de Durabilidade	37
3.4.2.1 Ensaios de saturação em água e secagem em estufa	37
3.4.2.2 Ensaio de ciclagem com extrator Soxhlet	38
3.4.2.3 Ensaio de durabilidade <i>Slake</i>	39
3.4.3 Caracterização pós-ensaios de durabilidade	39
3.4.3.1 Caracterização petrográfica	39
3.4.3.2 Massa específica e porosidade aparente	40
3.5 Discussão	40
3.6 Conclusões	42
CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
APÊNDICE 1	50
APÊNDICE 2	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapas de localização das áreas amostradas.	24
Figura 2 - Etapas do ensaio de ciclagem em água e estufa.	27
Figura 3 - Extrator Soxhlet.	28
Figura 4 - Ensaio de ciclagem em extrator Soxhlet.	28
Figura 5 - Aparelho utilizado para o teste de durabilidade <i>Slake</i>	30
Figura 6 - Amostras de mão das minas de VGA (a), TAM (b), FAZ (c) e GNA (d).	31
Figura 7 - Fotomicrografias óticas da amostra VGA.	32
Figura 8 - Fotomicrografias óticas da amostra TAM.	33
Figura 9 - Fotomicrografias óticas da amostra FAZ.	33
Figura 10 - Fotomicrografias óticas da amostra GNA.	34
Figura 11 - Difrátogramas de raios X das amostras analisadas.	37
Figura 12 - Variação percentual de massa das amostras ao longo do ensaio água e estufa. ...	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de rochas ígneas de acordo com a percentagem de sílica.	22
Tabela 2 - Classificação da durabilidade de amostras de rocha pelo Id calculado.....	30
Tabela 3 - Resultados das análises de fluorescência de raios X.	36
Tabela 4 - Resultados do ensaio de durabilidade <i>Slake</i>	39
Tabela 5 - Valores calculados nos ensaios de massa específica e porosidade aparente.	40
Tabela 6 - Síntese dos resultados obtidos (%) com diversos métodos..	41

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

As rochas básicas, de maneira geral, são amplamente empregadas na construção civil e em obras de engenharia. Além de sua vasta disponibilidade, suas características geomecânicas contribuem para seu uso frequente em diferentes tipos de projetos, especialmente em obras de grande porte (Paige-Green, 2007).

A compreensão da durabilidade ou alterabilidade das rochas básicas é fundamental para a otimização de seu uso em obras de engenharia. Estudos realizados desde a década de 1960 nas rochas da Bacia do Paraná - focados nas características geotécnicas e tecnológicas dessas rochas, além de seu comportamento mecânico ao longo do tempo - revelaram que, apesar de suas diversas vantagens, a alterabilidade é um processo natural inerente a esses materiais que pode comprometer a vida útil das estruturas (Gomes, 2001). A diminuição da resistência mecânica, decorrente da alteração, impacta diretamente a segurança e a durabilidade das estruturas. A composição mineralógica, a textura e as condições ambientais são fatores determinantes na taxa de alteração, e o conhecimento desses parâmetros é essencial para o desenvolvimento de estratégias de proteção e manutenção dessas obras.

Dentre os diversos ensaios de ciclagem utilizados para a determinação da durabilidade das rochas, destacam-se os de ciclos de saturação e secagem, realizados conforme recomendações da NBR 12696/1992, e os de lixiviação contínua com o extrator Soxhlet, cujo procedimento é apresentado por Aires-Barros e Mouraz Miranda (1979). O método de ciclos de saturação e secagem consiste na exposição repetitiva das amostras a alternâncias entre saturação completa em água e secagem em estufa, simulando condições de variação de umidade que podem causar desgaste nas rochas. Por outro lado, o método de lixiviação contínua utilizando o extrator Soxhlet baseia-se na solubilização e mobilização de compostos específicos presentes em amostras sólidas, por meio de sucessivas lavagens.

Os ensaios de ciclagem artificial e de lixiviação contínua em extrator Soxhlet são reconhecidamente longos, exigindo acompanhamento contínuo em laboratório, frequentemente por vários meses, o que representa uma limitação prática em estudos que envolvem a avaliação da durabilidade de materiais rochosos.

Apesar dessas limitações, existem propostas metodológicas na literatura que são

voltadas à redução do tempo de execução dos ensaios, sem que os resultados sejam comprometidos. Franke (2009), por exemplo, sugeriu a substituição de água como solvente por uma solução de ácido acético, visando acelerar os testes de lixiviação usando o extrator Soxhlet. O uso dessa solução encurta o tempo necessário para observar efeitos mensuráveis de alteração.

Analogamente, Cavalari (2017) demonstrou que o ensaio de ciclagem água-estufa pode ser conduzido com ciclos mais curtos que aqueles prescritos pela NBR 12696/1992, sem perda de representatividade dos resultados. A autora verificou que a redução controlada dos intervalos de imersão e secagem intensifica a ação dos ciclos sobre as amostras, entretanto, mantendo o mesmo padrão de resposta observado com a metodologia convencional. Assim, embora as metodologias tradicionais continuem sendo o padrão de comparação, esses resultados indicam que existem alternativas válidas que permitem a otimização do tempo de execução em laboratório.

Além das metodologias citadas para a avaliação da durabilidade de rochas, o teste de durabilidade *Slake* também é amplamente empregado para simular a degradação de materiais rochosos submetidos a ciclos sucessivos de umedecimento e secagem (Franklin & Chandra, 1972; ISRM, 1979). Esse ensaio fornece um índice empírico que permite comparar a resistência relativa das rochas frente a processos de desagregação física. Sua aplicação é especialmente relevante em estudos de alterabilidade por apresentar procedimentos bem estabelecidos, boa reprodutibilidade e amplo respaldo na literatura técnica, sendo frequentemente utilizado de forma complementar a outros ensaios físicos e petrográficos na avaliação do comportamento de rochas expostas a condições ambientais variáveis.

Esses métodos, embora distintos em princípios e tempos de execução, buscam reproduzir de maneira controlada os principais agentes envolvidos nos processos de degradação das rochas em ambiente natural, permitindo a análise comparativa do comportamento dos materiais frente a diferentes mecanismos de alteração. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar comparativamente diferentes metodologias de avaliação da durabilidade de rochas básicas, considerando tanto ensaios convencionais de longa duração, quanto propostas de execução com ciclos reduzidos e/ou condições aceleradas. Busca-se investigar em que medida a redução do tempo de ensaio influencia os resultados obtidos, assim como avaliar a equivalência, as limitações e a aplicabilidade prática dessas metodologias na caracterização da alterabilidade dos materiais estudados. Dessa forma, pretende-se discutir se os métodos acelerados podem ser empregados como alternativas tecnicamente confiáveis aos procedimentos tradicionais, contribuindo para a

otimização do tempo de análise sem comprometer a representatividade dos resultados.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal investigar a durabilidade de rochas básicas intrusivas provenientes de taludes de três minas de ferro a céu aberto do Quadrilátero Ferrífero (MG), recorrendo a diferentes ensaios laboratoriais aplicados ao estudo de alteração e resistência de materiais rochosos. Para isso, adotam-se procedimentos consolidados na literatura para caracterização física, mineralógica e mecânica, bem como diferentes métodos de ciclagem acelerada descritos em estudos anteriores. Os objetivos específicos são listados a seguir:

- caracterizar macro e microscopicamente as amostras, a partir de descrição visual e análise em lâminas delgadas;
- determinar propriedades físicas relacionadas à absorção de água e porosidade aparente, conforme a ABNT NBR 5564 (2022);
- realizar análises mineralógicas e químicas através de difratometria e fluorescência de raios X, para determinação dos minerais constituintes e da composição química das amostras;
- aplicar diferentes ensaios de ciclagem acelerada, abrangendo (i) os ciclos água-estufa com tempos reduzidos propostos por Cavalari (2017) e (ii) o método de lixiviação em extrator Soxhlet adaptado conforme Franke (2009);
- executar o teste de durabilidade *Slake*, segundo Franklin & Chandra (1972) e recomendações da ISRM (1979) nas amostras, para determinação do índice de durabilidade;
- comparar dados obtidos no presente trabalho e aqueles já existentes na literatura.

1.3 Justificativas e relevância do projeto

Os materiais pétreos estão constantemente expostos à ação de intempéries. Quando estes estão sendo aplicados em obras ou encontram-se situados em áreas de risco geológico-geotécnico, torna-se crucial a realização de estudos de alterabilidade, que se juntam aos de caracterização geomecânica, especialmente no caso de utilização em regiões de clima tropical, considerando a forte influência dos agentes intempéricos sobre esses materiais. Assim, muitos são os ensaios que podem caracterizar o estado de alteração ou a alterabilidade de diferentes tipos de rochas.

A ampla utilização de rochas ígneas de composição básica em obras de engenharia,

como materiais de fundação, enrocamentos, lastros e revestimentos, reforça a necessidade de um aprofundamento nos estudos sobre os processos de alteração que afetam esses litotipos quando expostos aos processos exógenos. Em ambientes tropicais, o intemperismo atua de forma intensa, podendo provocar alterações mineralógicas, aumento da porosidade e redução progressiva da resistência mecânica das rochas, com impactos diretos sobre a durabilidade e a segurança das estruturas. A elevada alterabilidade frequentemente observada em rochas básicas pode resultar em variações significativas no comportamento geotécnico, favorecendo a instabilidade de taludes e o desenvolvimento de problemas hidrogeológicos (Frazão & Caruso, 1983; Frazão, 1993).

No contexto específico do Quadrilátero Ferrífero, onde atividades minerárias de grande porte coexistem com obras de infraestrutura implantadas em maciços rochosos frequentemente fraturados e submetidos a condições climáticas favoráveis ao intemperismo químico, a avaliação da durabilidade das rochas básicas assume papel estratégico. Apesar da relevância geotécnica e econômica desses materiais, os estudos voltados à investigação de mecanismos de alteração acelerada e de durabilidade de rochas básicas nessa região ainda são escassos. Nesse sentido, a aplicação integrada de ensaios físicos, petrográficos e de ciclagem acelerada contribui para reduzir incertezas associadas à seleção e ao desempenho desses materiais, além de fornecer subsídios técnicos para o desenvolvimento de soluções construtivas e medidas de contenção mais eficientes ao longo da vida útil das obras.

Os materiais e métodos empregados no trabalho serão mais bem detalhados no artigo científico, apresentado no Capítulo 3 deste volume.

CAPÍTULO 2

ALTERABILIDADE DAS ROCHAS

2.1 Revisão bibliográfica

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre as rochas básicas do Quadrilátero Ferrífero, com ênfase em sua composição mineralógica e nos principais métodos empregados na investigação de processos de alteração e durabilidade. São abordadas técnicas de caracterização petrográfica e mineralógica, bem como ensaios físicos e de ciclagem acelerada amplamente discutidos na literatura.

2.1.1 Conceitos fundamentais

O intemperismo refere-se ao conjunto de processos que promovem a fragmentação e decomposição de rochas e minerais, impulsionados por agentes atmosféricos (físicos e químicos) e biológicos (Leinz & Mendes, 1963).

De forma geral, a suscetibilidade das rochas a esses processos varia de acordo com características intrínsecas, como a composição mineralógica e textural, e fatores extrínsecos, relacionados ao ambiente em que se encontram. Além disso, é levada em conta a alterabilidade relativa entre diferentes tipos de rochas. Por exemplo, o basalto apresenta maior propensão à alteração do que o granito, devido à menor estabilidade química dos minerais predominantes no basalto (plagioclásio e piroxênio) em comparação com os minerais presentes no granito (quartzo, ortoclásio e biotita), considerando-se as mesmas condições físico-químicas do ambiente. Nesse contexto, a alteração corresponde ao conjunto de transformações mineralógicas, químicas e físicas decorrentes da atuação do intemperismo sobre a rocha, e se manifesta por modificações como a neoformação de minerais, mudanças texturais, aumento de porosidade e redução da resistência mecânica. Já a alterabilidade refere-se à suscetibilidade ou ao potencial que determinada rocha apresenta para sofrer tais transformações, quando submetida a condições ambientais específicas. Assim, enquanto a alteração descreve o estado ou o processo ocorrido, a alterabilidade expressa uma propriedade inerente do material, relacionada a sua maior ou menor propensão à degradação ao longo do tempo.

Em ambientes quentes e úmidos, o intemperismo tende a ocorrer de forma mais intensa e acelerada, favorecendo a decomposição mineral e a formação de solos espessos e alterados, especialmente em rochas ricas em minerais máficos e feldspatos, como os basaltos já citados.

Quando as demais variáveis se mantêm constantes, esse tipo de clima intensifica reações como hidrólise, oxidação e dissolução. Por outro lado, em climas frios e secos, predominam os processos físicos, como a crioclastia e a variação térmica, os quais promovem principalmente a desintegração mecânica das rochas, com menores taxas de transformação mineralógica (Young, 1972; Ollier, 1984; Nahon, 1991; Goudie & Viles, 2012). Os processos de intemperismo e alteração constituem a base conceitual para o desenvolvimento de métodos experimentais empregados na avaliação da durabilidade de rochas.

2.1.2 Rochas ígneas

As rochas ígneas constituem um dos principais grupos litológicos da crosta terrestre, originando-se a partir da solidificação do magma, seja em profundidade (rochas intrusivas) ou na superfície (rochas extrusivas). Essas rochas podem ser classificadas com base em diferentes critérios, sendo um deles o teor de sílica (SiO_2) presente no magma que lhes deu origem. Com exceção dos carbonatitos, a sílica é o principal óxido constituinte das rochas ígneas, servindo como parâmetro fundamental para classificações de caráter mais abrangente. De acordo com a classificação química tradicionalmente adotada na petrologia ígnea, rochas com teores de SiO_2 superiores a 66% são denominadas ácidas; aquelas com teores entre 52% e 66% são classificadas como intermediárias; rochas com concentrações entre 45% e 52% enquadram-se na categoria básica; e aquelas com teores iguais ou inferiores a 45% são classificadas como ultrabásicas.

Além da classificação baseada no teor de sílica, as rochas ígneas também podem ser classificadas por meio de diagramas que consideram sua composição química total e mineralógica. Entre os mais utilizados nessa classificação, destacam-se o diagrama QAPF e o diagrama TAS, ambos recomendados pela *International Union of Geological Sciences (IUGS)*. A escolha do diagrama mais adequado é baseada na natureza das rochas analisadas e na disponibilidade de dados petrográficos e geoquímicos, podendo estas ferramentas ser utilizadas de forma complementar ao longo do estudo. Neste trabalho, essas ferramentas são apresentadas como referência conceitual para a classificação das rochas ígneas, sem prejuízo de outras abordagens adotadas.

- i) Diagrama QAPF (Quartzo - Alcalifeldspato - Plagioclásio - Feldspatoides): esse diagrama é amplamente empregado para classificar tanto rochas ígneas intrusivas, quanto rochas vulcânicas (extrusivas). A correta aplicação do diagrama requer dados petrográficos detalhados e uma contagem modal representativa dos minerais, conforme definido por Streckeisen (1976) e sistematizado pela IUGS

Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks (Le Maître *et al.*, 2002).

- ii) Diagrama TAS (Total-Alcali vs. Sílica): desenvolvido por Le Bas *et al.* (1986), se baseia na relação entre os teores de sílica e álcalis totais ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) e é tradicionalmente aplicado à classificação de rochas ígneas extrusivas ou intrusivas hipoabissais, principalmente quando a identificação de minerais é limitada. Quando aplicável, esse diagrama pode auxiliar na caracterização geoquímica geral das amostras.

2.1.3 Rochas básicas do Quadrilátero Ferrífero

Na região do Quadrilátero Ferrífero, as rochas de composição básica estão majoritariamente associadas à sequência metavulcanossedimentar do Supergrupo Rio das Velhas, particularmente no Grupo Nova Lima, e compreendem basaltos toleíticos, metabasaltos e metagabros. As litologias ocorrem intercaladas a rochas ultramáficas e félsicas, formando sequências típicas de arcos vulcânicos ou ambientes de platô oceânico arqueano. A gênese destas rochas está associada ao magmatismo máfico a ultramáfico que caracterizou os eventos tectono-magmáticos do Arqueano, especialmente o Evento Rio das Velhas II (2,79-2,74 Ga) (Noce, 2000). É comum que as rochas exibam texturas reliquiais como intergranular, subofítica ou porfirítica e, após metamorfismo regional, se transformem em anfibolitos ou xistos máficos (Fonseca, 2011; Endo *et al.*, 2019b).

Ainda que exista o predomínio de rochas metassedimentares no Supergrupo Minas, pontualmente ocorrem corpos máficos intrusivos na forma de diques e soleiras de composição gabro-diabásica ou metabasáltica, especialmente nas Formações Cauê e Gandarela. São corpos discordantes ou subconcordantes às unidades encaixantes, interpretados como produtos de eventos de magmatismo tardi- ou pós-deposicional (Noce, 2000; Endo *et al.*, 2019b).

2.1.3.1 Alterabilidade de rochas básicas

A alterabilidade de rochas básicas é bastante influenciada pela presença de argilominerais secundários, formados por processos hidrotermais ou pela decomposição de componentes vítreos da rocha (Frazão & Caruso, 1983). Esses minerais, reconhecidos como os principais produtos de alteração, desempenham um papel essencial no aumento da susceptibilidade das rochas à alteração devido às suas propriedades físico-químicas. Entre eles, destacam-se dois grupos principais de argilominerais (Maia, 2001):

- esmectitas: são os argilominerais mais expansivos presentes nas rochas básicas. São compostos por uma estrutura lamelar 2:1, formada por uma camada octaédrica de Al^{3+} intercalada entre duas camadas tetraédricas de Si^{4+} . A

capacidade de expansão significativa das esmectitas torna as rochas mais suscetíveis a fissuras e desagregação quando em contato com água;

– cloritas: apresentam uma estrutura mais estável, classificada como 2:1:1, devido a uma camada de brucita ($\text{Mg}[\text{OH}]_2$) nos espaços interlamelares. Apresentam baixa capacidade de troca catiônica e absorção de água, o que as torna menos expansivas que as esmectitas. Contudo, ainda exercem influência na alteração de rochas básicas, especialmente quando presentes em microfissuras ou vesículas.

A composição química de rochas básicas favorece a formação de minerais secundários mais reativos e suscetíveis ao intemperismo do que rochas de composição ácida (Rasmussen *et al.*, 2010). Variáveis climáticas, como a temperatura e a precipitação, controlam a taxa de alteração e o desenvolvimento desses produtos, incluindo fases de baixa cristalinidade e hidróxidos de ferro, que tendem a elevar a porosidade, a permeabilidade e a debilidade estrutural das rochas. Em ambientes úmidos, é observada a maior formação de materiais de ordem curta, como alofana e ferrihidrita, enquanto condições mais secas favorecem minerais mais estáveis. A geração de argilas expansivas, como montmorilonitas ou nontronitas, também pode ocorrer em climas tropicais sujeitos à hidrólise parcial, dependendo das características do litotipo e do estágio de intemperismo (Melfi & Pedro, 1978). Esses processos são igualmente relevantes em rochas básicas intrusivas, onde a evolução mineralógica influencia diretamente o comportamento geotécnico, promovendo desagregação progressiva e perda de resistência ao longo do tempo (Parfitt, 1980; Rasmussen *et al.*, 2010).

Os perfis lateríticos resultantes de intemperismo químico também desempenham um importante papel ao refletirem a composição mineralógica da rocha pós alteração. Como exemplo da influência do intemperismo químico em rochas básicas, Faria Júnior *et al.* (2018) analisaram perfis lateríticos desenvolvidos sobre clorita-anfibólio xisto na região de Bom Jesus da Penha (MG), sob clima tropical úmido, onde a elevada temperatura e precipitação favorecem um intemperismo químico intenso. No estudo, evidencia-se que a mineralogia primária é quase completamente substituída por argilominerais neoformados, como caulinita e montmorillonita, o que evidencia a alta reatividade da rocha às condições climáticas locais. Além disso, elementos como Ni, Co, Cu, ETR e Sc são redistribuídos verticalmente com enriquecimento no horizonte saprolítico, reforçando o papel dos argilominerais do tipo 2:1, como do grupo das esmectitas, na adsorção e fixação de metais.

2.1.4 Estudos de alterabilidade

Para a avaliação de alterabilidade e grau de alteração em rochas, podem ser realizados diversos ensaios em condições quase naturais ou por meio de ensaios acelerados em laboratório. Recomenda-se que as investigações sejam realizadas em condições mais próximas ao natural, pois simulam de forma mais realista o ambiente ao qual as rochas serão expostas em obra. Entretanto, sua aplicação é limitada quando se necessita de resultados rápidos, devido ao tempo prolongado de execução.

Por outro lado, os ensaios acelerados permitem a obtenção de informações de maneira mais ágil, embora exijam uma análise mais criteriosa dos resultados, já que as condições impostas podem intensificar artificialmente os processos de alteração (Frazão, 2002).

A avaliação de alterabilidade por meio de ensaios acelerados pode ser conduzida utilizando diferentes métodos, destacando-se alguns dos principais a seguir:

- i. saturação em água e secagem em estufa: trata-se da realização de ciclos consecutivos de imersão de amostras em água seguidos por secagem em estufa, com o objetivo de analisar a correlação entre o número de ciclos realizados e o grau de alteração observado nas amostras (Cavalari, 2017);
- ii. lixiviação contínua em extratores Soxhlet: nos ensaios utilizando extratores Soxhlet, simulam-se condições de intemperismo natural a partir de ciclos contínuos de evaporação e condensação de água com o objetivo de solubilizar e mobilizar elementos químicos presentes na rocha. O extrator Soxhlet submete amostras de rocha a períodos controlados de variação de temperatura e precipitação, promovendo a lixiviação contínua dos constituintes solúveis do material (Maia, 2001; Corrêa *et al.*, 2020);
- iii. ciclagem de saturação em etilenoglicol: esses ensaios são utilizados para identificar argilominerais expansivos em rochas, pois o etilenoglicol reage com esse grupo mineral, podendo levar à desintegração do material. Embora seja uma técnica eficaz, seu uso é pouco recomendado, já que tende a intensificar as condições ambientais de forma exagerada (Frazão & Caruso, 1983);
- iv. teste de durabilidade *Slake*: amplamente utilizado para simular a degradação de rochas submetidas a ciclos de umedecimento e secagem. Originalmente proposto por Franklin & Chandra (1972) e posteriormente sistematizado pela *International Society for Rock Mechanics* - ISRM (1979).

Alguns procedimentos sugeridos por diversos autores para a avaliação de índices de alterabilidade das rochas foram reunidos por Paraguassú *et al.*, (2014):

- através de análises petrográficas, pode-se qualificar e quantificar minerais sãos e alterados de uma rocha, avaliar o estado microfissural e determinar a concentração de minerais secundários;

- quando uma rocha se altera e ocorre a diminuição de sua resistência mecânica, comparam-se valores de uma rocha sã com valores em um dado estado de alteração; e

- à medida que o grau de alteração de uma rocha aumenta, sua massa específica aparente diminui, enquanto sua capacidade de absorção de água aumenta. Esses índices variam entre zero (rocha sã) e um (rocha totalmente alterada).

Estudos mais recentes têm ampliado a discussão sobre avaliação de alterabilidade e durabilidade de rochas, buscando integrar diferentes métodos experimentais e índices físicos, petrográficos e mecânicos. As abordagens contemplam desde ensaios de ciclagem acelerada até parâmetros como absorção de água, porosidade aparente e resistência mecânica, permitindo uma interpretação mais abrangente do comportamento das rochas diante de processos de intemperismo. Nesse contexto, ensaios clássicos, como o teste de durabilidade *Slake*, continuam sendo amplamente utilizados, ao passo que outros métodos vêm sendo investigados de forma complementar, com o objetivo de aprimorar a representatividade dos resultados e reduzir incertezas associadas às condições de ensaio (Khajevand & Fereidooni, 2022; Ersöz & Topal, 2024).

CAPÍTULO 3

APRESENTAÇÃO DO ARTIGO CIENTÍFICO

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ANÁLISE DE DURABILIDADE DE ROCHAS BÁSICAS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO (MG)¹²

Resumo

Rochas ígneas de composição básica são comumente empregadas em obras de engenharia devido à sua alta resistência mecânica. No entanto, quando desconfinadas e submetidas a novas condições ambientais em escavações superficiais e subterrâneas, podem se transformar rapidamente em material de baixa resistência, a depender de suas características químicas, mineralógicas, texturais e estruturais, que definem seu grau de durabilidade. Rochas básicas são comuns no Quadrilátero Ferrífero (MG), principalmente na forma de diques em rochas dos supergrupos Minas e Rio das Velhas, e quando apresentam baixa durabilidade oferecem riscos a taludes de cavas de mineração. Neste estudo, buscou-se avaliar a durabilidade de amostras destas rochas coletadas em taludes de três cavas de mineração de ferro da região, com emprego dos seguintes ensaios: Índice de durabilidade *Slake*, ciclos de saturação e secagem em estufa e lixiviação contínua com extrator Soxhlet. Objetivando reduzir o tempo laboratorial, foram adotadas simplificações sugeridas na literatura para os dois últimos ensaios. Análises complementares de caracterização física (massa específica, absorção e porosidade aparente), química e mineralógica permitiram esclarecer as diferenças do grau de durabilidade encontradas para estes litotipos. Entre os cinco indicadores de durabilidade investigados, quatro se mostraram coerentes na avaliação da durabilidade destas rochas e de uma amostra de gnaiss, empregada como referência devido à sua elevada durabilidade. Contudo, ensaios adicionais são necessários, com mais amostras, para se avançar em indicadores confiáveis de durabilidade destas rochas.

Palavras-chaves: durabilidade, rochas básicas, ensaios de ciclagem, alterabilidade.

¹ Artigo elaborado em coautoria com Luiz Henrique Stanislau Ferreira, Luis de Almeida Prado Bacellar e Maria Carolina Rodrigues Marcussi, submetido à Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental.

² Os autores agradecem à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), pela infraestrutura e suporte técnico; ao professor Pedro M. Alameda Hernandez e ao pós-doutorando Ángel Tamayo, pelo apoio nos ensaios; à FAPEMIG (Projeto APQ-1613-22) e ao CNPq (Processo 309181/2025-9) pelo apoio financeiro.

Abstract

EVALUATION OF THE DURABILITY DEGREE OF BASIC ROCKS FROM THE QUADRILÁTERO FERRÍFERO (MG)

Basic igneous rocks are commonly used in engineering works due to their high mechanical strength. However, when unconfined and subjected to new environmental conditions in surface and underground excavations, they can quickly transform into low-strength material, depending on their chemical, mineralogical, textural, and structural characteristics, which define their degree of durability. Basic rocks are common in the Quadrilátero Ferrífero region (Minas Gerais, Brazil), occurring as dikes within rocks of the Minas and Rio das Velhas Supergroups. When they exhibit low durability, they pose risks to slopes in open-pit mining operations. In this study, the durability of samples of these rocks collected from slopes of three iron ore pits in the region was evaluated using the following tests: Slake Durability, saturation and oven-drying cycles, and continuous leaching with a Soxhlet extractor. To reduce laboratory time, simplifications suggested in the literature were adopted for the latter two tests. Complementary analyses for physical (specific mass, absorption, and apparent porosity), chemical, and mineralogical characterization were performed to clarify the differences in durability levels observed among these lithotypes. Among the five possible durability indicators, four proved consistent in assessing the durability of these rocks and of a gneiss sample, which was used as a reference due to its high durability. However, additional tests with more samples are required to advance toward reliable durability indicators for these rocks.

Keywords: durability, basic rocks, cycling tests, alterability.

2.2 Introdução

As rochas básicas são amplamente utilizadas em obras de engenharia devido às suas propriedades geomecânicas (Paige-Green, 2007). Entretanto, a integridade ou durabilidade destas rochas pode ser comprometida num curto intervalo de tempo quando expostas a novas condições ambientais, reduzindo sua resistência mecânica, afetando a segurança de fundações, taludes e de diversas estruturas de engenharia que as usam como material de construção (Frazão & Caruso, 1983; Frazão, 1993; Gomes, 2001; Frazão, 2002; Paraguassú *et al.*, 2014). Ou seja, a durabilidade reflete o intemperismo futuro da rocha quando exposta a novas condições de pressão — como o desconfinamento — e bioclimáticas.

A composição química destas rochas gera uma assembleia mineral mais favorável ao intemperismo que aquelas de composição mais ácida (Rasmussen *et al.*, 2010). Quando

solidificadas rapidamente, como rocha vulcânica ou hipoabissal, apresentam textura mais fina, reduzindo igualmente a durabilidade. Estes fatores, aliados às novas condições a que são submetidas, são determinantes na intensidade e durabilidade deste processo (Frazão, 2002; Frascá, 2003, 2003b), sobretudo em regiões tropicais, onde o intemperismo químico é muito intenso.

Há muitos ensaios propostos para avaliação da durabilidade, que são aplicados conforme o tipo de solicitação a que estas rochas serão submetidas. Entre estes, destacam-se: análise química e petrográfica (Frascá, 2003a, b); absorção aparente e porosidade aparente (ABNT, 2022); ciclagem natural a condições atmosféricas locais; ciclagem artificial com saturação em água (ou outras soluções, Frazão & Caruso, 1983) e secagem e estufa (recomendado pela extinta NBR 12696/1992); lixiviação contínua em extrator Soxhlet (Aires-Barros & Mouraz Miranda, 1979); índice de durabilidade *Slake* (Franklin & Chandra, 1972).

Os ensaios de ciclagem artificial e os de lixiviação Soxhlet apresentam o inconveniente de serem demorados, exigindo o acompanhamento contínuo por meses em laboratório. No entanto, há algumas propostas na literatura de redução do tempo de execução destes ensaios. Franke (2009), por exemplo, sugeriu empregar soluções levemente ácidas em lugar da água para acelerar os ensaios de lixiviação Soxhlet. Similarmente, Cavalari (2017) demonstrou que o ensaio de ciclagem em água e estufa pode ser feito com ciclos mais rápidos do que recomendado pela norma NBR 12696/1992, sem prejuízo nos resultados.

Esta pesquisa teve como objetivo principal investigar a durabilidade de rochas básicas provenientes de taludes de três minas a céu aberto de ferro do Quadrilátero Ferrífero (MG). Um problema encontrado para avaliar a durabilidade de rochas é a carência de normas técnicas nacionais válidas para avaliação desta propriedade. A opção foi adotar como padrões o ensaio de absorção e porosidade aparente, preconizados pela NBR 5564 (ABNT, 2022), e o teste de durabilidade *Slake*, pois este consta de procedimentos bem estabelecidos (Franklin, & Chandra, 1972; ISRM, 1979) e um extenso volume de resultados na literatura técnica (Santi, 1998; Silva & Lana, 2002; Leão, 2017; Khajevand & Fereidooni, 2022; Ersöz & Topal, 2024).

Os resultados obtidos foram confrontados com aqueles gerados pelos ensaios de umedecimento e secagem em estufa e pelo método com extrator Soxhlet, aplicados segundo os procedimentos metodológicos mais expeditos propostos por Cavalari (2017) e Franke (2009), respectivamente. A comparação foi realizada com o objetivo de verificar a durabilidade por meio de métodos que reduzissem o tempo necessário de execução em laboratório.

2.3 Revisão bibliográfica

2.3.1 Conceitos fundamentais

O intemperismo refere-se ao conjunto de processos que promovem a fragmentação e decomposição de rochas e minerais, impulsionados por agentes atmosféricos (físicos e químicos) e biológicos (Leinz & Mendes, 1963; Young, 1972; Ollier, 1984; Nahon, 1991; Goudie & Viles, 2012). De forma geral, a suscetibilidade das rochas a esses processos varia de acordo com características intrínsecas, como a composição mineralógica e textural, e fatores extrínsecos, relacionados ao ambiente em que se encontram. De acordo com a estabilidade química dos minerais predominantes numa assembleia, uma rocha apresenta maior propensão à alteração do que outra ao ser exposta às mesmas condições físico-químicas.

Em ambientes quentes e úmidos, o intemperismo tende a ocorrer de forma mais intensa e acelerada, principalmente por reações de hidrólise, oxidação e dissolução, favorecendo a decomposição mineral e a formação de solos espessos, especialmente em rochas ricas em minerais máficos e feldspatos, como rochas básicas e ultrabásicas.

2.3.2 Rochas ígneas

As rochas ígneas originam-se a partir da solidificação do magma, seja em profundidade (rochas intrusivas) ou na superfície (rochas extrusivas), e podem ser classificadas, dentre outros critérios, com base na sua concentração absoluta de sílica (SiO_2). Com exceção dos carbonatitos, a sílica é o principal óxido constituinte destas rochas (TAB. 1), servindo como parâmetro fundamental para classificações mais abrangentes, conforme apresentado por Best, 1982.

Tabela 1 - Classificação de rochas ígneas de acordo com a percentagem de sílica. Fonte: Best (1982)

Concentração de Sílica (%)	Nomenclatura
> 66	Ácida
52 a 66	Intermediária
45 a 52	Básica
< 45	Ultrabásica

Além da concentração em sílica, as rochas ígneas também podem ser classificadas por diagramas composicionais recomendados pela IUGS, entre os quais se destacam o QAPF e o TAS. O diagrama QAPF, baseado na contagem modal de minerais (Quartzo, Álcali-feldspato, Plagioclásio e Feldspatoides), é amplamente utilizado para rochas intrusivas e extrusivas (Streckeisen, 1976; Le Maître, 2002). Já o diagrama TAS, desenvolvido por Le Bas *et al.*

(1986), classifica rochas extrusivas, intrusivas hipoabissais ou mesmo plutônicas, a partir da composição química total, considerando os teores de álcalis totais ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) e SiO_2 , sendo especialmente útil quando a identificação mineralógica é dificultada por cristais muito finos ou com elevado grau de alteração.

As rochas máficas do Quadrilátero Ferrífero, representadas por basaltos, metabasaltos e metagabros do Grupo Nova Lima, estão relacionadas ao magmatismo máfico-ultramáfico do Evento Rio das Velhas II (2,79–2,74 Ga) (Noce, 2000), exibindo texturas reliquiais e transformando-se em anfibolitos ou xistos máficos após metamorfismo (Fonseca, 2011; Endo *et al.*, 2019). No Supergrupo Minas, ocorrem pontualmente como diques e soleiras gabro-diabásicas a metabasálticas (Noce, 2000; Endo *et al.*, 2019).

A alterabilidade dessas rochas está ligada à formação de argilominerais secundários, sobretudo esmectitas, altamente expansivas, compostas por uma estrutura lamelar 2:1, e cloritas, que possuem uma estrutura classificada como 2:1:1, esta mais estável, mas também influente no processo, especialmente quando presente em microfissuras ou vesículas (Frazão & Caruso, 1983; Maia, 2001). As condições climáticas controlam fortemente a intensidade do intemperismo e a geração de minerais neoformados. Em climas tropicais, a depender dos litotipos e das condições climáticas, argilas expansivas (montmorilonitas) podem se formar em consequência da hidrólise parcial (Melfi & Pedro, 1978).

Para avaliar a alterabilidade em laboratório, destacam-se os seguintes métodos: lixiviação em Soxhlet (Maia, 2001; Franke, 2009; Corrêa *et al.*, 2020); ciclagem por saturação em água e secagem (ABNT NBR 12696, 1992; Cavalari, 2017), e ciclagem com etilenoglicol, embora esta última frequentemente intensifique artificialmente os efeitos (Frazão & Caruso, 1983); caracterização petrográfica e físico-mecânica para quantificar minerais alterados, avaliar o grau microfissural e relacionar a alteração com propriedades como massa específica e absorção de água, definindo índices entre zero (rocha sã) e um (totalmente alterada) (Frazão, 2002; Paraguassú *et al.*, 2014).

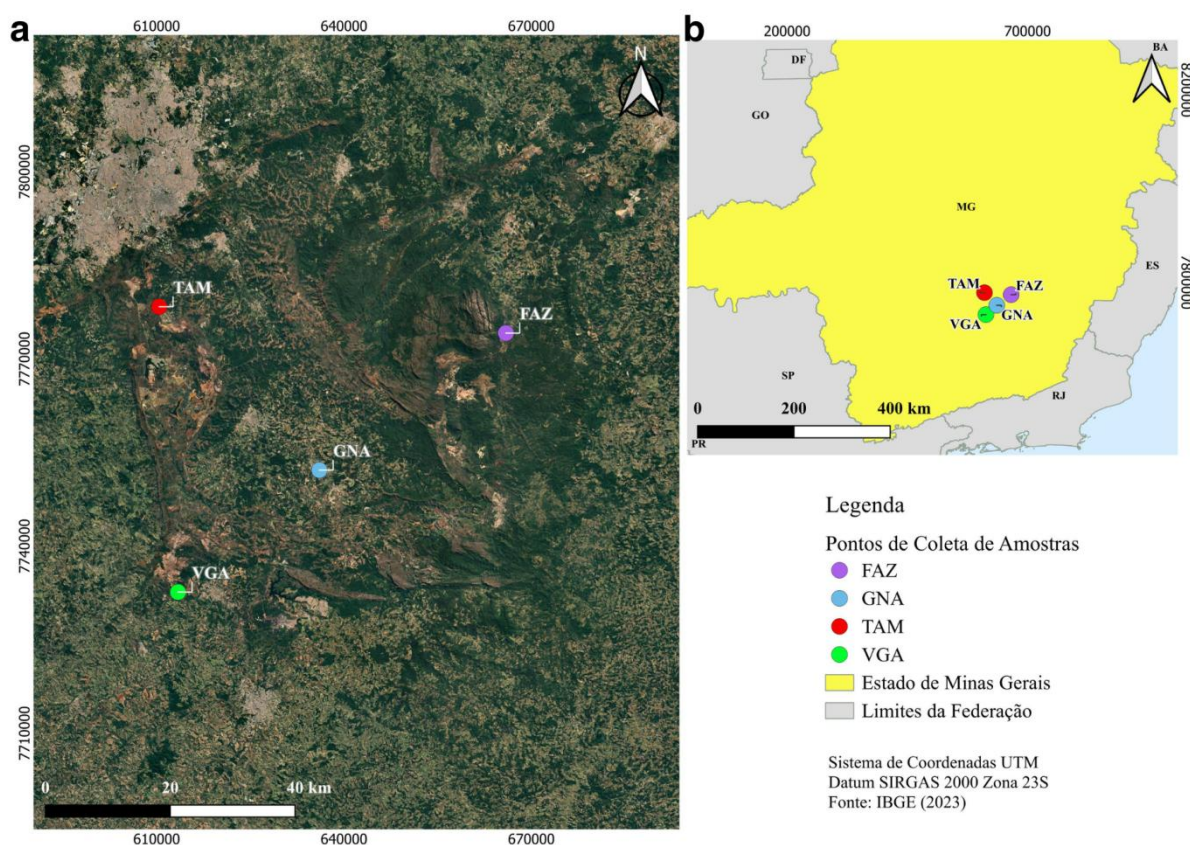
2.4 Materiais e métodos

2.4.1 Áreas de proveniência das amostras

Para este estudo, foram selecionadas amostras de rochas básicas intrusivas em unidades dos supergrupos Rio das Velhas e Minas (Endo *et al.*, 2019) e uma amostra de gnaiss, reconhecidamente de elevada durabilidade, para fins comparativos. As amostras de rochas básicas analisadas neste estudo são provenientes de três minas situadas no Quadrilátero Ferrífero, e encontram-se armazenadas no Centro Tecnológico de Geotecnia Aplicada da Escola

de Minas. O material corresponde a testemunhos de furos de sondagem, dos quais foram selecionadas aproximadamente dez amostras representativas de cada área. Para fins de organização e distinção ao longo do trabalho, as amostras foram identificadas pelas siglas VGA, TAM e FAZ (FIG. 1). As amostras de gnaiss (GNA) são provenientes da Pedreira Irmãos Machado, no Complexo Metamórfico do Bação (Endo *et al.*, 2019).

Figura 1 - Mapas de localização das áreas amostradas. (a) Pontos de coleta sobre imagem de satélite. (b) Localização regional dos pontos em relação ao estado de Minas Gerais e estados vizinhos.



2.4.2 Fluorescência e Difratometria de Raios X

A espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX) é uma técnica multielementar que permite identificar e quantificar elementos químicos a partir da emissão de raios X secundários gerados pela excitação da amostra (Jenkins *et al.*, 1999; Janssens, 2004). Esse processo ocorre quando elétrons das camadas internas são removidos pela radiação primária e substituídos por elétrons das camadas externas, resultando na emissão de fótons característicos de cada elemento (Klein & Dutrow, 2012).

Já a difração de raios X (DRX) é amplamente utilizada na caracterização mineralógica, possibilitando a identificação de fases cristalinas por meio da comparação entre difratogramas

experimentais e padrões de referência, como os disponibilizados pelo *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (JCPDS) (Ali *et al.*, 2022). Seu desenvolvimento histórico, desde a descoberta dos raios X em 1895 até a consolidação da cristalografia moderna em 1913, consolidou-a como uma das principais ferramentas na análise de minerais, especialmente argilominerais, como esmectita, caulinita e illita (Brindley & Brown, 1980; Gomes, 1984; Moore & Reynolds, 1997; Meunier, 2005; Środoń, 2006; Cullity & Stock, 2014).

Para este estudo, uma amostra de rocha de cada área foi preparada por cominuição, peneiramento em malha 325 mesh e separação de frações representativas. Posteriormente, as quatro porções foram submetidas a análises de FRX no laboratório da GEOSOL, e de DRX no Laboratório de Geossintéticos do Centro Tecnológico de Geotecnia Aplicada da Escola de Minas da UFOP.

2.4.3 Microscopia óptica

A análise de amostras por microscopia óptica é executada em lâminas delgadas. A técnica permite uma descrição detalhada da mineralogia, bem como a caracterização textural em escala microscópica das rochas estudadas. Para essa etapa, foi selecionada uma amostra representativa de cada área de proveniência, priorizando fragmentos com boa integridade física e ausência de fraturas intensas ou alteração macroscópica evidente, para garantir adequada observação das características mineralógicas e texturais originais do material. As análises foram realizadas no Laboratório de Microscopia e Microanálises do Departamento de Geologia da UFOP.

2.4.4 Ensaios de absorção e porosidade aparente

Os ensaios de absorção e porosidade aparente foram realizados de acordo com a norma NBR 5564:2022. Estes são muito utilizados para caracterizar a capacidade de retenção e a conectividade dos poros em materiais rochosos ou solos, uma vez que esses parâmetros apresentam uma correlação direta com o comportamento de armazenamento e transmissão de fluidos (Ünal & Altunok, 2019).

O ensaio consiste, primeiramente, na coleta e preparação das amostras, fragmentando-as até atingirem dimensões de aproximadamente 50mm e imergindo-as em recipientes com água. Inicialmente, a imersão é parcial e depois completa, totalizando 48 horas para alcançar a saturação. Em seguida, as amostras são pesadas em duas condições: saturadas (M_{sat}) e submersas (M_{sub}), para obter as massas em cada situação. Então, as amostras são levadas à estufa a $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$ até atingir a massa constante e depois resfriadas em dissecador antes da última pesagem. Ao final, são pesadas ao ar para obter a massa após secagem em estufa (M_{sec}).

Após a obtenção desses valores, calcula-se a massa específica aparente (ρ_a) (Equação (1)), porosidade aparente (η_a) (Equação (2)) e absorção de água (α_a) (Equação 3).

$$\rho_a = \frac{M_{sec}}{M_{sat} - M_{sub}} \quad (1)$$

$$\eta_a = \frac{(M_{sat} - M_{sec})}{(M_{sat} - M_{sub})} \times 100 \quad (2)$$

$$\alpha_a = \frac{(M_{sat} - M_{sec})}{M_{sec}} \times 100 \quad (3)$$

A porosidade aparente (η_a) e a absorção (α_a) são apresentadas em percentagem (%), enquanto a massa específica aparente (ρ_a) é indicada em g/cm³ (Oliveira, 2022). As análises foram executadas no Laboratório de Ferrovias e Asfalto, do Departamento de Engenharia Civil da UFOP.

2.4.5 Ensaios de saturação em água e secagem em estufa

Os ensaios de saturação em água seguiram a norma NBR12696 (ABNT, 1992), e consistiram em submeter amostras de rochas a ciclos alternados de saturação em água e secagem em estufa à temperatura de 105°. São realizados exames quantitativos e qualitativos para avaliação da integridade dos agregados após cada ciclo, conforme detalhado a seguir:

Exame quantitativo: consiste em determinar a perda de massa em relação à sua massa inicial de ensaio, de acordo com a Equação (4):

$$\text{Perda de massa (\%)} = \frac{(m_0 - m)}{m} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

m_0 = massa inicial da amostra, em g

m = massa das partículas da amostra, retidas na peneira de 19 mm, ao fim de cada ciclo, em g

Exame qualitativo: envolve a análise de danos visuais, como fissuras, rachaduras e lasqueamentos.

O ensaio compreende 120 ciclos, mas pode ser interrompido antes, caso haja desagregação total dos fragmentos de rocha. O objetivo é identificar a presença de minerais expansivos que possam comprometer a durabilidade e a integridade estrutural da rocha.

O presente estudo adotou a metodologia alternativa utilizada por Cavalari (2017), que visa otimizar o processo com ciclos mais rápidos, sem comprometer a confiabilidade dos resultados. O procedimento envolve a imersão de 10 fragmentos (passantes na peneira de 76mm e retidas na de 19m) de cada amostra em água por intervalos de 60 ± 5 minutos, seguida por secagem em estufa durante 3 ± 1 horas (FIG. 2-a-b). Após esse processo, as amostras são submetidas a um período de resfriamento de 60 ± 5 minutos (FIG. 2-b), sendo então pesadas

para continuidade da análise (FIG. 2-c). Conforme evidenciado pela autora, este procedimento apresenta resultados equivalentes aos obtidos pelo método descrito na NBR12696/1992, ainda que utilizando-se de ciclos reduzidos. Este e os próximos ensaios foram executados nos laboratórios do Centro Tecnológico de Geotecnia Aplicada da UFOP.

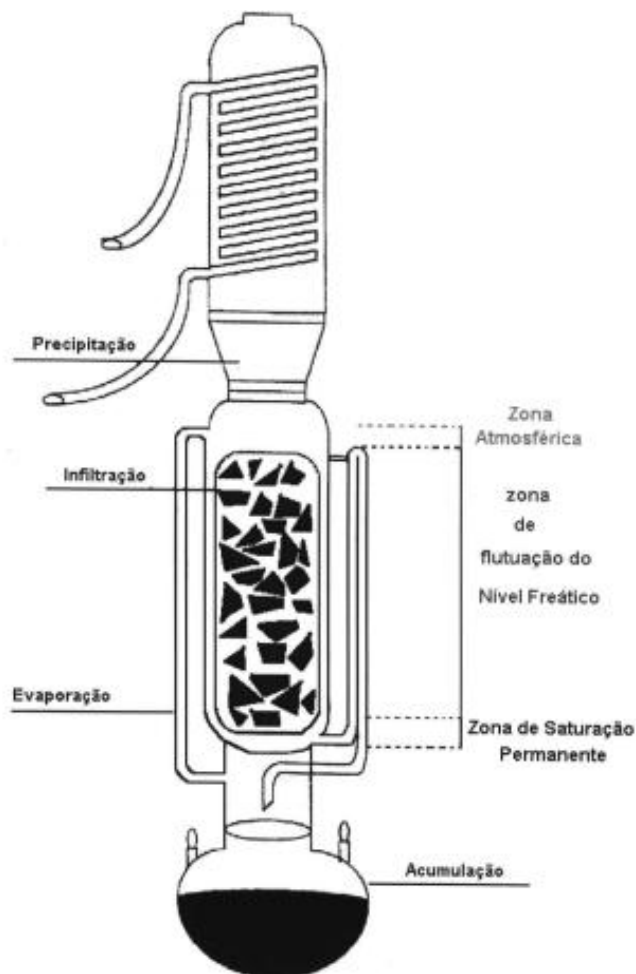
Figura 2 - Etapas do ensaio de ciclagem em água e estufa. (a) Etapa de saturação das amostras em água. (b) Amostras após secagem em estufa. (c) Pesagem das amostras após o resfriamento.



2.4.6 Ensaio de ciclagem com extrator Soxhlet

O ensaio com extrator Soxhlet (Aires-Barros & Mouraz Miranda, 1979) consiste na simulação de um processo de lixiviação contínua, análogo a uma chuva quente e intensa em condições de laboratório, por meio de ciclos de evaporação, condensação e percolação da solução sobre a amostra (FIG. 3).

Figura 3 - Extrator Soxhlet. Fonte: Gomes (2001)

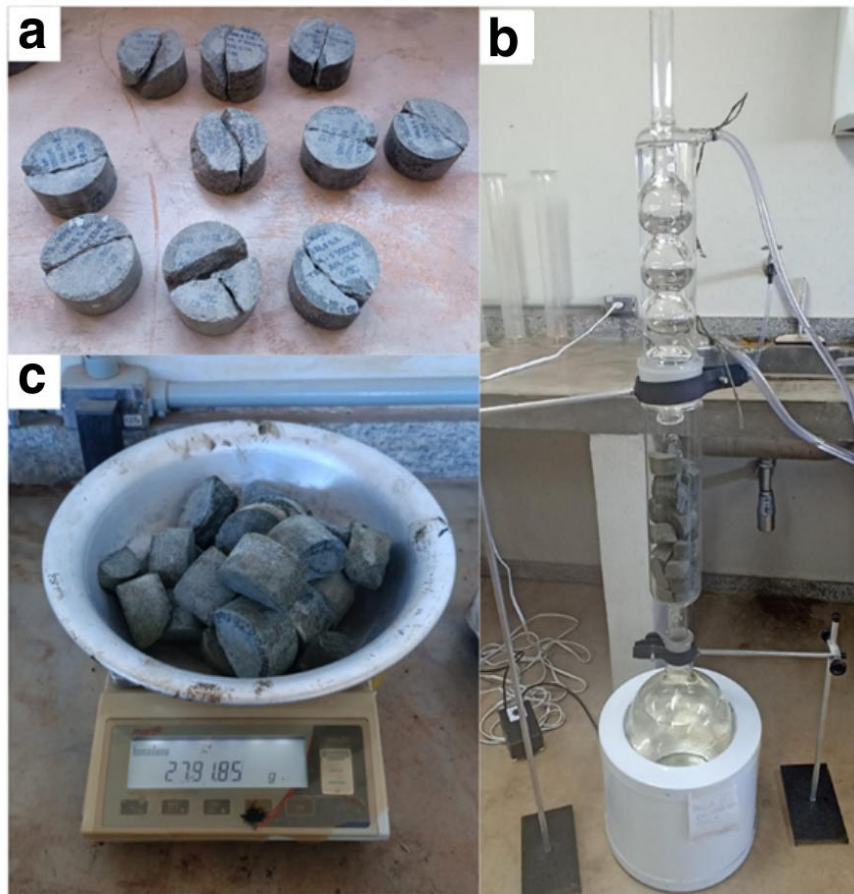


Neste estudo adotou-se os procedimentos mais expeditos propostos por Franke (2009), utilizando-se de solução de ácido acético a 2,5 mol/L a 100°C em vez do método tradicional, feito com água. Segundo este autor, o emprego de ácido nesta concentração tende a reduzir o tempo de ensaio, que usualmente dura meses, em alguns dias. Mesmo com esta redução do tempo, Franke (2009) encontrou boa correlação deste ensaio expedito com o tradicional.

As amostras, previamente pesadas e preparadas, foram submetidas ao ensaio durante cinco dias, ao final dos quais foram novamente pesadas para determinação da perda de massa associada ao desgaste induzido (FIG. 4).

Figura 4 - Ensaio de ciclagem em extrator Soxhlet. (a) Amostras após a etapa de preparação e separação para o ensaio. (b) Sistema Soxhlet montado e em operação, contendo as amostras. (c) Etapa de pesagem

das amostras após cinco dias consecutivos de ensaio.



2.4.7 Teste de Durabilidade *Slake*

O teste de durabilidade *Slake* (*Slake Durability Test*) é empregado para avaliar a resistência das amostras à desintegração por ciclos repetidos de umedecimento e secagem, conforme Franklin & Chandra (1972) e ISRM (1979). O ensaio consiste na preparação de 10 fragmentos equidimensionais (40-60g cada, totalizando 450-550g), com bordas arredondadas. As amostras são colocadas em um tambor perfurado, parcialmente submerso em água destilada (FIG. 5), e submetidas a rotação de 20 rpm por 10 minutos. Em seguida, são secas em estufa por 2 a 6 h e pesadas, permitindo avaliar a perda de massa após cada ciclo.

Como resultado do ensaio, obtém-se o índice de durabilidade a partir da relação entre as massas final e inicial, de acordo com a Equação (5):

$$\text{Índice de durabilidade Slake (Id)} = \frac{B-C}{A-C} \times 100\% \quad (5)$$

Onde:

A = peso seco inicial das amostras mais cilindro.

B = peso seco após o segundo ciclo da amostra mais cilindro.

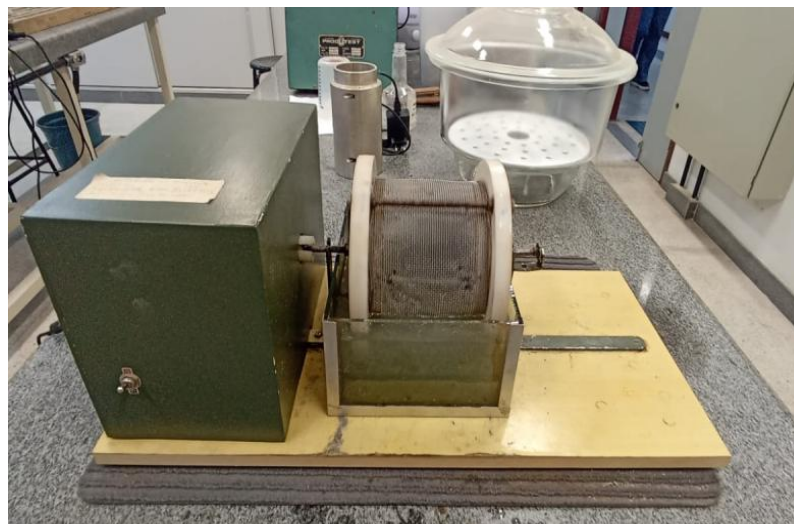
C = peso seco do cilindro.

Classifica-se a durabilidade do material de acordo com a TAB. 2.

Tabela 2 - Classificação da durabilidade de amostras de rocha de acordo com o Índice de Durabilidade *Slake* (Id) calculado (Franklin & Chandra, 1972; ASTM, 2008).

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

Figura 5 - Aparelho utilizado para o teste de durabilidade *Slake*.



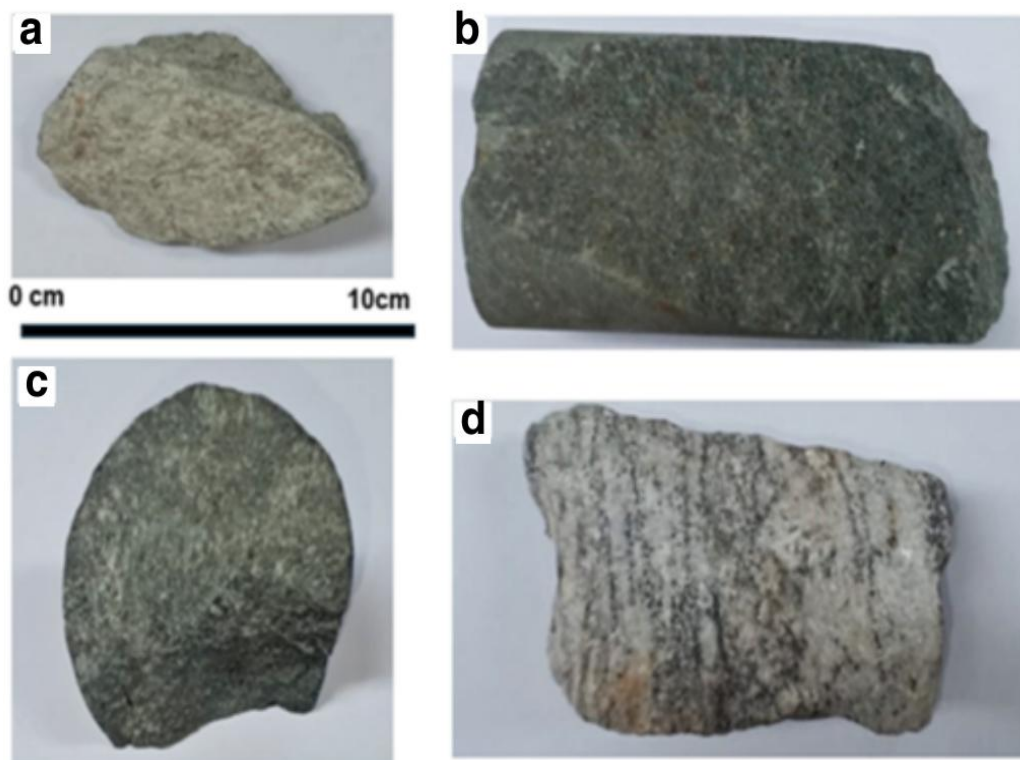
2.5 Resultados

2.5.1 Caracterização das amostras

2.5.1.1 Caracterização petrográfica

A caracterização foi feita em amostras de mão (FIG. 6) e descritas em microscópio óptico a partir de lâminas delgadas.

Figura 6 - Amostras de mão das minas de VGA (a), TAM (b), FAZ (c) e GNA (d).



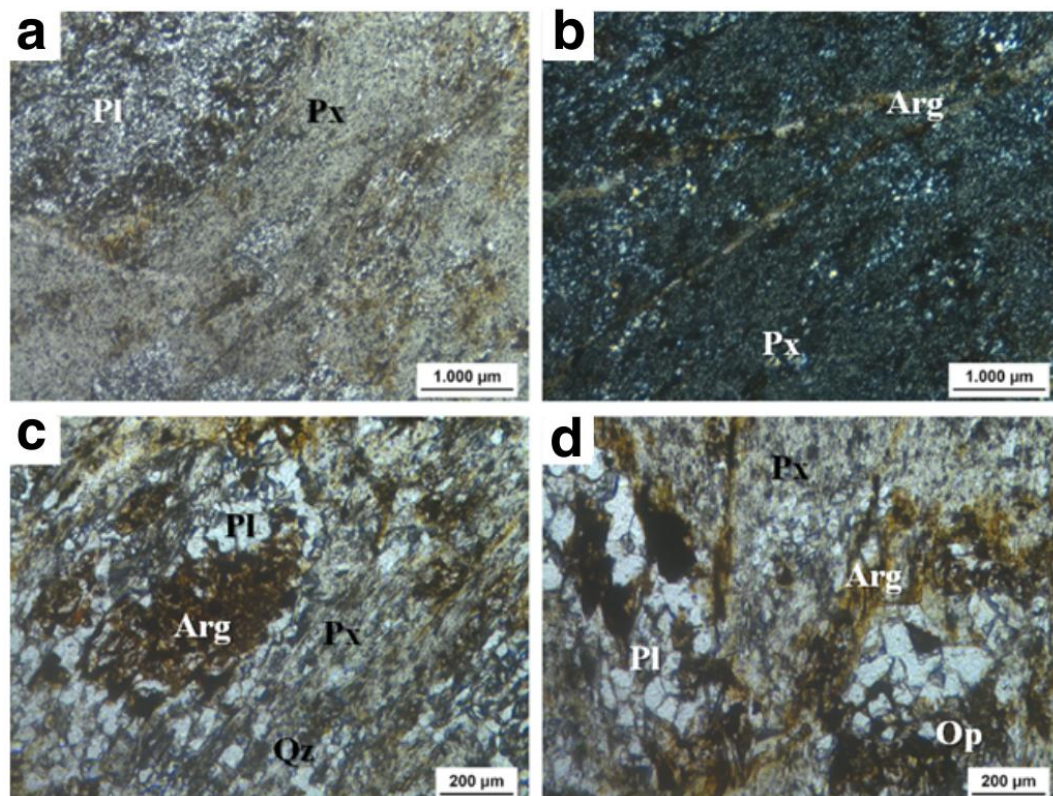
A rocha VGA possui tonalidade cinza-claro (FIG. 6-a), e apresenta manchas alaranjadas que indicam zonas de alteração na rocha. A rocha TAM apresenta coloração cinza-escuro, mesocrática (FIG. 6-b). A rocha FAZ possui coloração cinza-escuro, é mesocrática (FIG. 6-c), e sua granulação varia de fina a média (0,3 mm a 1,3 mm). A rocha GNA apresenta granulação média a grossa. Embora o bandamento típico da rocha não seja claramente perceptível em lâmina, sua presença pode ser identificada em amostra de mão (FIG. 6-d).

2.5.1.1.1 Amostras VGA

Sob microscópio de luz transmitida (FIG. 7), observa-se uma granulação fina (0,4 mm a 0,6 mm), acompanhada de aglomerados minerais com granulação variando de fina a média (0,6 mm a 2 mm). A associação mineral é composta por piroxênio, plagioclásio, quartzo, argila e minerais opacos, como magnetita e calcopirita. Cristais de piroxênio perfazem até 30% da amostra (FIG. 7-a) e apresentam uma orientação preferencial, associando-se a cristais de plagioclásio (40%), veios de argila (FIG. 7-b, c e d) e demais minerais de alteração (10%). Os cristais de quartzo representam até 15% da amostra (FIG. 7-c) e possuem uma granulação distinta, fina a média, o que sugere que sua origem seja por alteração ou processo genético distinto, sendo interpretado como resultado de modificações mineralógicas posteriores na rocha que originaram esses cristais. Minerais opacos representam cerca de 5% da assembleia mineral.

A rocha foi classificada como diabásio (dolerito).

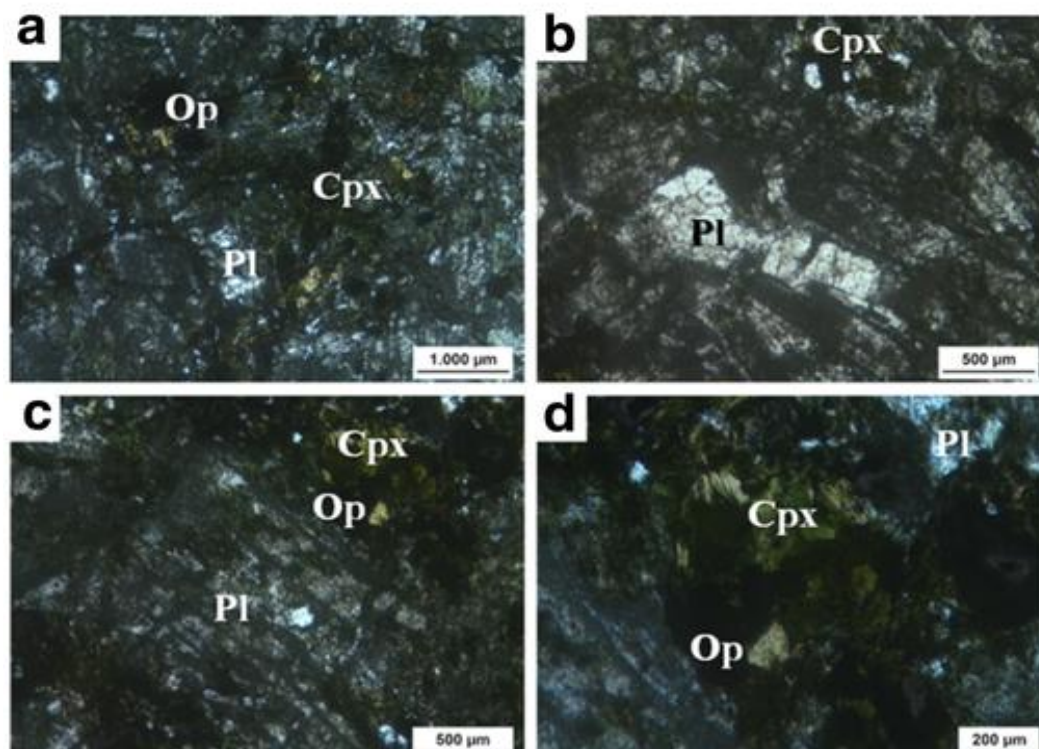
Figura 7 - Fotomicrografias óticas da amostra VGA. (a) Visão geral a luz plana, mostrando cristais de plagioclásio (Pl) e piroxênio (Px) orientados. (b) Luz plano-polarizada evidenciando a associação entre Px e minerais de alteração (argilominerais - Arg). (c) Textura com Pl, Px, quartzo (Qz) e alteração do plagioclásio (Arg). (d) Detalhe exibindo Pl, Px, minerais opacos (Op) e Arg preenchendo veios e fraturas na amostra.



2.5.1.1.2 Amostra TAM

A análise da seção delgada (FIG. 8) revelou uma granulação média a grossa (2,5 mm a 5 mm), com predomínio de grãos de plagioclásio anédricos a subédricos, que compõem 35% da rocha (FIG. 8-a, b, d). O segundo mineral mais abundante é o clinopiroxênio (FIG. 8-c), compondo cerca de 45% da mineralogia. Em alguns cristais, pode-se observar a clivagem bem definida, enquanto outros grãos exibem sinais de alteração. Como minerais acessórios, identificam-se minerais opacos (10%), como a magnetita, que por vezes aparece envolta por clinopiroxênio, ou associada a feldspatos. Há indícios de serpentinização, caracterizados pelo preenchimento dos espaços entre cristais de piroxênio e feldspato por serpentina, perfazendo até 10% da amostra. A morfologia observada em lâmina sugere que os minerais opacos podem ter substituído a olivina. Devido à sua textura mais grossa, esta rocha foi classificada como gabro.

Figura 8 - Fotomicrografias óticas da amostra TAM. (a) Visão geral a luz plana, mostrando cristais de plagioclásio (Pl) e clinopiroxênio (Cpx), associados a minerais opacos (Op). (b) Cristal de Pl envolto por cristal poiquilítico de Cpx, em luz plano-polarizada. (c) Cristais de Cpx e Pl intersticial, com fraturas e espaços preenchidos por serpentina. (d) Associação de Cpx, parcialmente substituído por serpentina, e Pl, com Op disseminados.

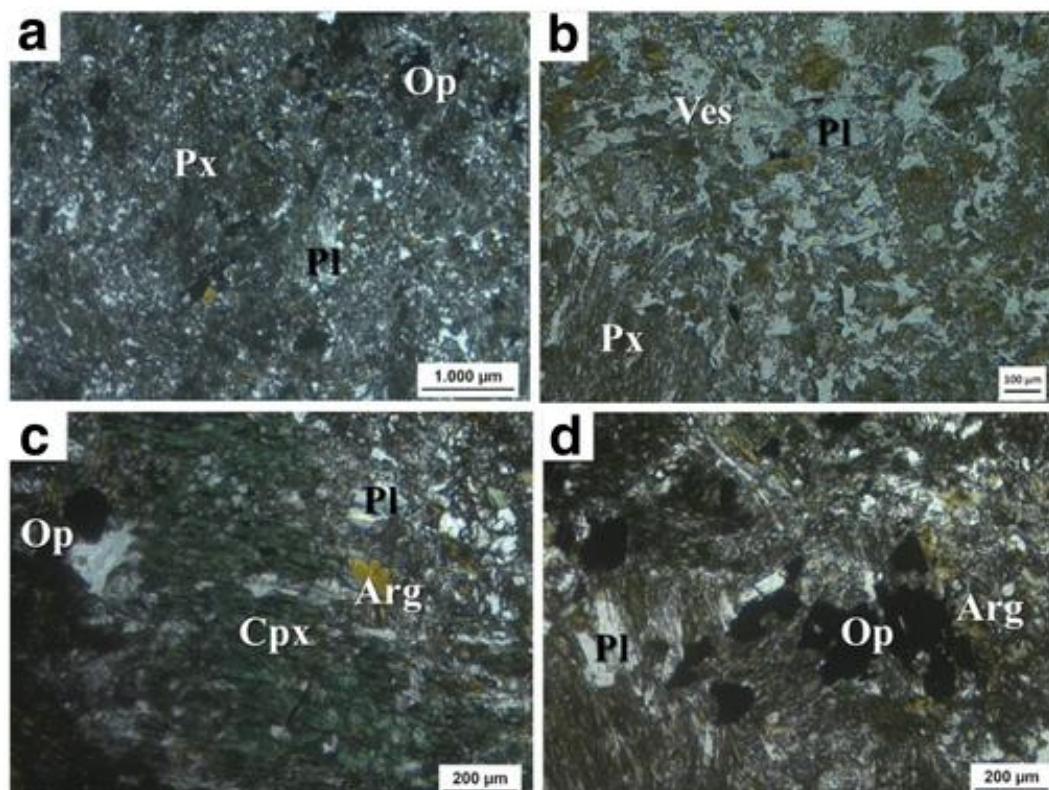


2.5.1.1.3 Amostra FAZ

Na lâmina delgada, foram observadas vesículas, representando cerca de 20% da amostra. Estas estão dispostas de forma aleatória, e não possuem ligação entre si. Quanto aos minerais encontrados, domina o plagioclásio (FIG. 9-a, b), que representa cerca de 46% da mineralogia. Em seguida, observa-se piroxênio (38%, FIG. 9-b, c) e olivina em grãos anédricos, em proporções de aproximadamente 4%. Minerais opacos (FIG. 9-d), como magnetita e ilmenita, correspondem a cerca de 6%, bem como os argilominerais, que compõem aproximadamente 6% da rocha, indicando baixo grau de alteração. Argilominerais foram identificados em associação com feldspatos e minerais opacos (FIG. 9-c, d). Esta amostra foi classificada como diabásio (dolerito).

Figura 9 - Fotomicrografias óticas da amostra FAZ. (a) Visão geral em luz plano-polarizada mostrando plagioclásio (Pl), piroxênio (Px) e minerais opacos (Op). (b) Vesículas (Ves) distribuídas de forma aleatória na matriz, sem interconectividade, associadas a cristais de Pl e Px. (c) Cristais de clinopiroxênio (Cpx) e Pl intersticiais, com opacos (Op) e ocorrência de argilominerais (Arg) indicando alteração. (d)

Pl tabular associado a Op e Arg em cavidades.



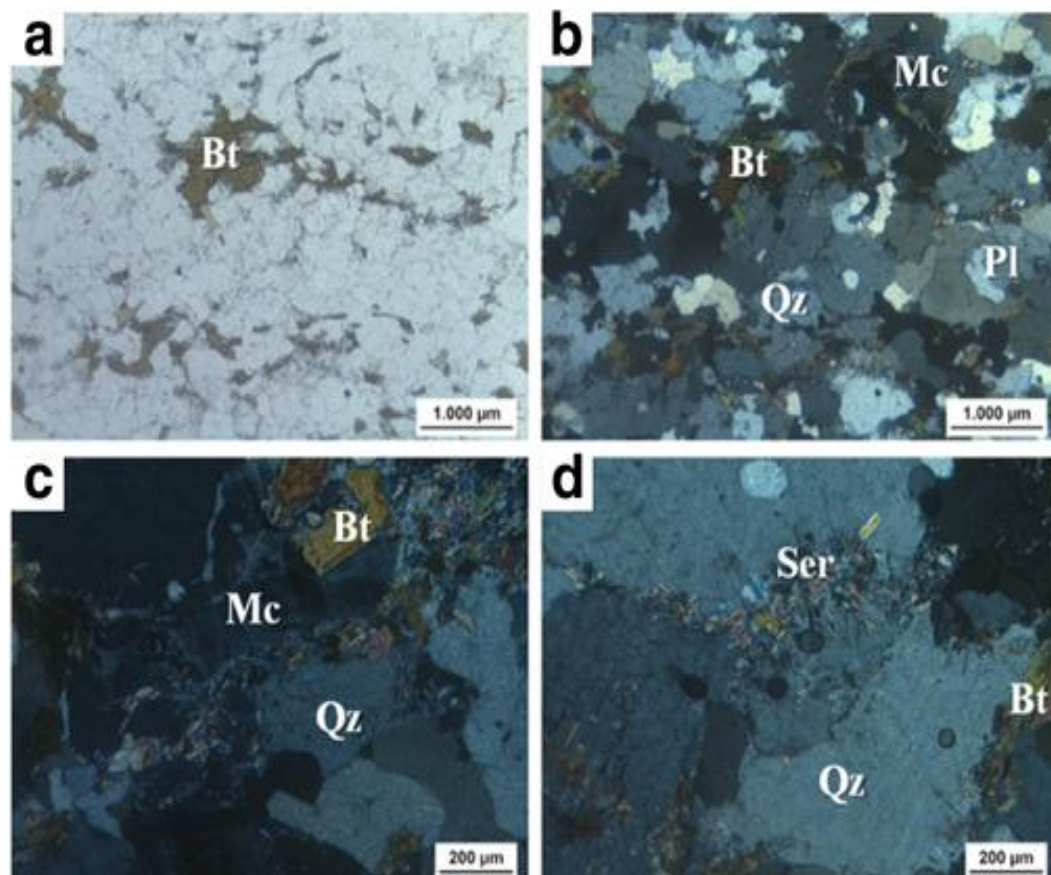
2.5.1.1.4 Amostra GNA

O mineral predominante é o quartzo (35%, FIG. 10-a, b, c), seguido por plagioclásio (15%, FIG. 10-a, b), que pode exibir macla polissintética, e microclíneo (15%, FIG. 10-b, c), com macla em padrão tartan. A biotita perfaz cerca de 25% da amostra (FIG. 10-a, b, c), distribuída predominantemente em porções melanocráticas. Minerais acessórios incluem apatita (5%) e opacos em volume inferior a 5%. A distribuição de biotita nas áreas melanocráticas e associação de quartzo e feldspato nas porções leucocráticas é o que define o bandamento composicional.

Os cristais de feldspato apresentam sinais de alteração, indicando possível sericitização (FIG. 10-d). Observam-se indícios de geração de mirmequita, além de evidências de cristalização de feldspatos a partir de reações metamórficas retrógradas. Esta amostra é a menos alterada entre as analisadas, sem evidência da formação de argilominerais.

Figura 10 - Fotomicrografias óticas da amostra GNA. (a) Associação de quartzo e feldspatos com biotita (Bt) em porções melanocráticas, em luz plana. (b) Bandamento composicional definido pela alternância entre níveis ricos em quartzo (Qz) e feldspatos (Pl, Mc) e níveis ricos em biotita (Bt). (c) Detalhe de cristais de microclina (Mc) com macla em padrão tartan, com feições de alteração, associados a quartzo (Qz) e biotita (Bt). (d) Evidências de sericitização (Ser) em feldspatos, associados a quartzo (Qz) e

biotita (Bt).



2.5.1.2 Massa específica e porosidade aparente

O ensaio de massa específica aparente e porosidade aparente, realizado conforme a NBR 5564 (ABNT, 2022), evidenciou contrastes entre as litologias analisadas. A amostra VGA registrou a maior porosidade (6,35%) e a menor massa específica (2,69 g/cm³), enquanto a amostra FAZ exibiu a menor porosidade (1,77%) e a maior massa específica (2,93 g/cm³). A amostra TAM apresentou valores intermediários (5,89% e 2,89 g/cm³). O gnaiss GNA, por outro lado, mostrou baixa massa específica (2,66 g/cm³), mas com porosidade (0,74%) e absorção de água (0,28%) muito inferiores às rochas básicas, refletindo uma matriz mais compacta e homogênea e menor suscetibilidade à degradação.

2.5.1.3 Classificação de resistência

De acordo com a adaptação feita por Araujo *et al.* (2014) para a classificação de resistência de rochas pelo método expedito da *International Society of Rock Mechanics*, as três rochas básicas se classificam como de resistência média à compressão uniaxial (entre 50 e 100 Mpa) e o gnaiss como muito resistente (entre 100 e 250 Mpa).

2.5.1.4 Fluorescência e difratometria de raios X

Os resultados de fluorescência de raios X (TAB. 3) indicam que as amostras VGA, FAZ e TAM apresentam composições químicas semelhantes, caracterizadas por baixos teores de SiO_2 . As amostras VGA e FAZ se enquadram no intervalo típico de rochas de composição básica, enquanto a amostra TAM apresenta teor de SiO_2 inferior a 45%, situando-se no limite inferior desse intervalo composicional. De maneira geral, todas as amostras exibem concentrações elevadas de Fe_2O_3 , CaO e MgO , assim como baixos teores de Na_2O e K_2O . As perdas ao fogo variam entre 3% e 5%, sendo o valor mais elevado observado na amostra VGA, que pode estar associado à presença de fases secundárias ou a processos de alteração.

No diagrama TAS, as amostras VGA e FAZ posicionam-se no campo dos basaltos, enquanto a amostra TAM situa-se próxima ao limite entre os campos basáltico e tefrítico, refletindo sua menor concentração de sílica.

Em contraste, a amostra de gnaiss apresenta composição ácida, com alto teor de SiO_2 e enriquecimento em álcalis, característica de gnaisses ricos em quartzo e feldspatos.

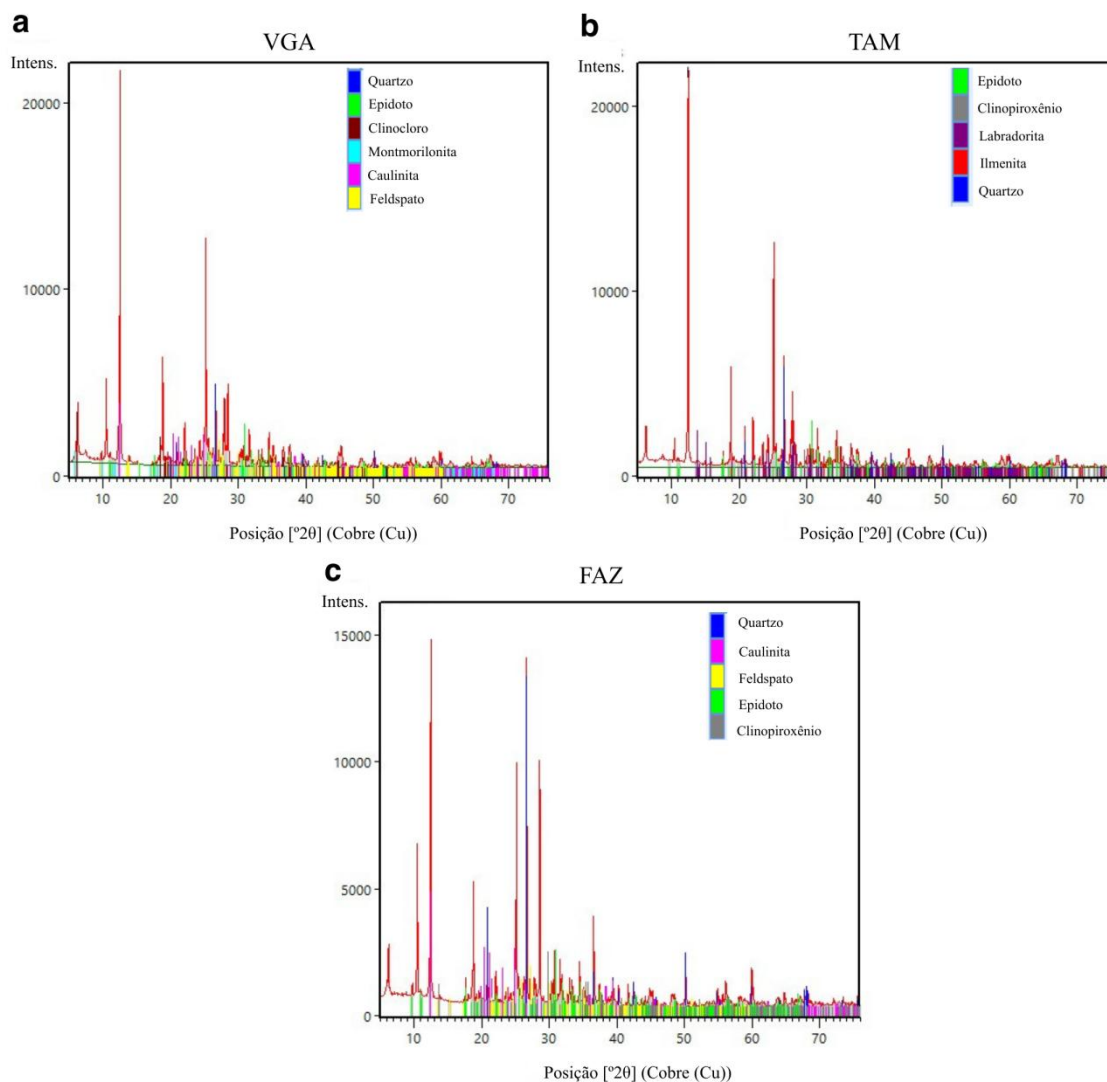
Tabela 3 - Resultados das análises de fluorescência de raios X.

Amostr a	Elementos (%)											LO I
	SiO 2	Al ₂ O 3	Fe ₂ O 3	Ca O	Mg O	TiO 2	P ₂ O 5	Na ₂ O	K ₂ O	Mn O	Som a	
VGA	45, 0	16,3	12,8	7,1 5	8,21	0,99	0,10	1,92	0,3 8	0,17	98,1 3	5,2 0
TAM	43, 8	15,4	15,3	7,6 8	5,65	3,63	0,84	2,65	0,5 5	0,21	99,8 8	4,1 3
FAZ	46, 4	13,6	15,1	8,7 3	5,86	2,93	0,51	1,37	0,3 1	0,19	98,5 5	3,5 7
GNA	70, 6	15,2	1,82	2,6 9	0,59	0,3	0,08	4,83	2,1 1	0,03	-	-

* LOI = perda ao fogo.

Os difratogramas de raios X das amostras VGA, TAM e FAZ (FIG. 11) apresentam diferenças quanto às fases identificadas. A amostra VGA (FIG. 11-a) contém quartzo, feldspato, epidoto, clinocloro, montmorilonita e caulinita. Na amostra TAM (FIG. 11-b) foram identificados quartzo, epidoto, clinopiroxênio, labradorita e ilmenita. A amostra FAZ (FIG. 11-c) apresenta quartzo, feldspato, clinopiroxênio, epidoto e caulinita.

Figura 11 - Difratogramas de raios X das amostras analisadas: (a) VGA, (b) TAM e (c) FAZ.



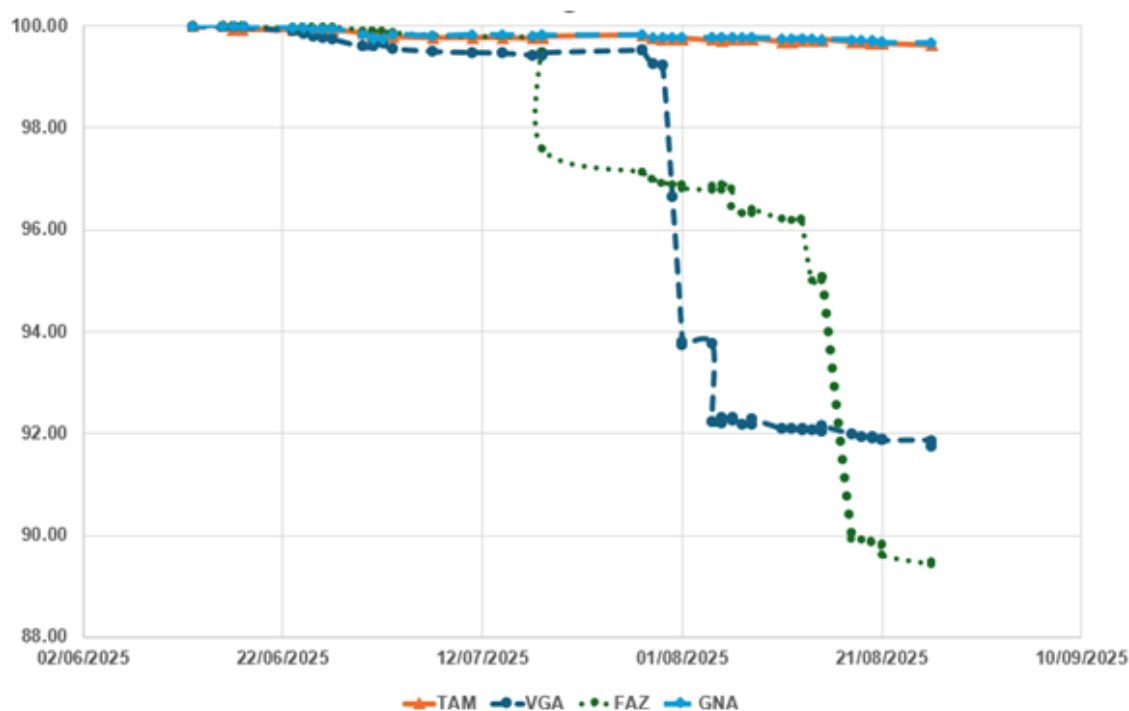
2.5.2 Ensaios de Durabilidade

2.5.2.1 Ensaios de saturação em água e secagem em estufa

Para tornar o ensaio mais eficiente, optou-se por realizar 51 ciclos, em vez dos 60 ciclos curtos de saturação em água e secagem em estufa propostos por Cavalari (2017). Essa redução foi adotada porque, a partir do 30º ciclo, as diferenças de comportamento entre as rochas já se mostravam evidentes, tal como indicado nos resultados apresentados por Cavalari (2017). As amostras TAM e GNA mantiveram comportamento estável, com preservação de massa de 99,6%, indicando alta resistência ao intemperismo acelerado. As amostras de VGA e FAZ apresentaram menor durabilidade, com queda acentuada entre o 19º e o 29º dia e estabilização em torno de 91,8% e 89,5% da massa inicial no 51º dia. Alguns fragmentos das amostras FAZ

e VGA desenvolveram uma série de fissuras antes de se fragmentarem parcial ou, como ocorreu na amostra FAZ, totalmente. Conforme preconizado pela norma, um dos dez fragmentos da rocha FAZ foi descartado por ter se desintegrado totalmente no 43º dia. Se for considerada a perda de massa até o 42º dia, quando nenhuma das 10 amostras de cada litotipo foi descartada, as perdas foram: GNA – 99,7%; TAM – 99,7%; FAZ – 95,1%; VGA – 92,1%. Dessa forma, as amostras VGA e, em menor grau, a amostra FAZ, apresentaram durabilidade menor que as amostras TAM e GNA (FIG. 12). Os dados completos do ensaio, incluindo as pesagens correspondentes a cada ciclo, encontram-se apresentados no Apêndice 1.

Figura 12 - Variação percentual de massa das amostras dos grupos TAM, VGA, FAZ e GNA ao longo de 51 ciclos de saturação em água e secagem em estufa.



2.5.2.2 Ensaio de ciclagem com extrator Soxhlet

Os ensaios de ciclagem em extrator Soxhlet foram conduzidos ao longo de cinco dias consecutivos, utilizando a solução de ácido acético como solvente para acelerar o processo, como recomendado por Franke (2009).

O procedimento possibilitou a quantificação da perda de massa a partir da comparação entre as pesagens inicial e final, fornecendo dados para avaliar a resistência dos materiais à desintegração sob os ciclos repetidos de saturação e drenagem de água ácida.

Os resultados obtidos evidenciam diferenças significativas entre as amostras. O gnaiss

preservou 99,8% da massa inicial, seguido pelas amostras FAZ (99,2%) e TAM (98,4%), todas enquadradas na categoria de durabilidade elevada. Em contrapartida, as amostras de VGA destacaram-se pelo desempenho inferior, mantendo apenas 71,9% da massa inicial.

2.5.2.3 Ensaio de durabilidade *Slake*

Este ensaio foi realizado em dois ciclos, a partir da metodologia proposta por Franklin & Chandra (1972). De acordo com os resultados, é possível classificar as amostras em uma escala de durabilidade a partir do Id calculado (TAB. 4).

Tabela 4 - Resultados do ensaio de durabilidade *Slake*.

Amostra	Índice de durabilidade <i>Slake</i> - Id (%)	Classificação – Durabilidade
TAM	98,4	Extremamente alta
VGA	74,5	Média
FAZ	98,5	Extremamente alta
GNA	99,9	Extremamente alta

As amostras GNA apresentaram durabilidade extremamente alta, evidenciando forte coesão interna e baixa suscetibilidade à desintegração. As amostras FAZ mostraram comportamento muito próximo, sendo também classificadas como durabilidade extremamente alta. As amostras TAM também se enquadraram na mesma classe, embora com leve tendência à fragmentação atribuída a descontinuidades ou variações mineralógicas, assim como alterações químicas na rocha. Já as amostras VGA apresentaram menor índice, classificado como médio, indicando maior vulnerabilidade à desintegração.

2.5.3 Caracterização pós-ensaios de durabilidade

Após os ensaios de ciclagem em água e estufa, as amostras foram reanalisadas.

2.5.3.1 Caracterização petrográfica

Notou-se um aumento significativo na proporção de minerais neoformados, especialmente de argilominerais nas três amostras. De fato, o percentual de argilominerais aumentou de 10% para 40% na amostra VGA, enquanto a amostra TAM mostrou o aparecimento de 25% de argilominerais, que substituem majoritariamente cristais de piroxênio e eventualmente bordejando minerais opacos. A amostra FAZ apresentou um incremento de 6% para 30% de argilominerais, que substituem cristais de piroxênio. As vesículas desta amostra permanecem vazias, sem indícios de cristalização interna de minerais neoformados,

sugerindo ausência de conexão destas estruturas. As fotomicrografias das amostras reanalisadas são apresentadas na FIG. 1 do Apêndice 2.

2.5.3.2 Massa específica e porosidade aparente

Observou-se uma redução significativa nos valores de absorção aparente de água e da porosidade aparente de três amostras (VGA, TAM e GNA) das quatro analisadas, acompanhada de uma discreta elevação na massa específica aparente (TAB. 5).

Tabela 5 - Valores de massa específica, absorção de água e porosidade aparente determinados antes e após o ensaio de ciclagem nas amostras.

Amostra	Massa Específica		Absorção de		Porosidade	
	Aparente (g/cm ³)		Água (%)		Aparente (%)	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
VGA	2,69	2,78	2,36	1,28	6,35	3,56
TAM	2,89	3,08	2,02	0,38	5,89	1,17
FAZ	2,93	3,00	0,60	0,92	1,77	2,74
GNA	2,66	2,68	0,28	0,17	0,74	0,47

2.6 Discussão

Com exceção da amostra de gnaisse (GNA), utilizada para balizar os resultados, a composição química das demais amostras mostrou-se muito similar, situando-se nos limites inferiores de rochas básicas (VGA e FAZ) e no limite superior daquelas de composição ultrabásica (TAM). Por essas razões, os parâmetros químicos comumente empregados para a classificação da durabilidade não foram aplicados neste trabalho.

Contudo, a amostra FAZ se diferenciou por apresentar alta incidência de vesículas (20%) e a amostra TAM pela textura mais grossa, compatível com a usualmente encontrada em gabros.

Quanto ao grau de intemperismo das amostras antes dos ensaios, evidenciado pela presença de minerais secundários como os argilominerais e, principalmente, pela perda ao fogo (LOI), a amostra VGA apresentou grau elevado; seguida da amostra TAM, em seguida, pela amostra FAZ, com menor perda ao fogo. Tais minerais não foram observados na amostra GNA. A presença de argilominerais é um indicativo indireto de durabilidade, pois quanto maior sua proporção, menos durável tende a ser a rocha (Gökceoğlu *et al.*, 2000). Similarmente, a

absorção (ou a porosidade) aparente costuma ter uma relação direta com a durabilidade (Frazão, 2002).

Os resultados do ensaio de absorção e porosidade aparente mostram-se, a priori, contraproducentes em relação ao esperado, com redução destes valores em três das quatro amostras após os ensaios de ciclagem (TAB. 5). Contudo, segundo Park *et al.* (2024), embora a porosidade frequentemente aumente em estágios avançados de intemperismo devido à desestruturação da rocha, em graus menos elevados, a porosidade e, conseqüentemente, a absorção de água, pode ser reduzida pelo bloqueio de poros e microfissuras por minerais neoformados, como os argilominerais. De fato, o aumento da proporção de argilominerais identificado nas lâminas delgadas após o ensaio de ciclagem em água e estufa indica expressiva neoformação destas fases secundárias, que possivelmente promoveram o fechamento parcial dos poros. Considerando que o ensaio determina apenas a absorção e a porosidade aparente, relacionadas aos poros interconectados e que permitem o ingresso de água, a obstrução desses canais por produtos de alteração pode justificar os menores valores obtidos após a ciclagem. Na amostra FAZ não ocorreu esta redução, o que pode ser creditado à elevada proporção de vesículas desta rocha que provocou muita desagregação durante o ensaio.

Ao se comparar os resultados dos cinco ensaios que direta ou indiretamente indicam a durabilidade da rocha (TAB. 6), verifica-se que, em quatro deles há coerência na tendência observada, com elevação da durabilidade na seguinte ordem: VGA, TAM, FAZ e GNA.

No método de ciclagem em água e estufa, contudo, ocorreu uma inversão nos resultados, com a amostra FAZ se mostrando menos durável. Como neste ensaio as condições aplicadas são extremas e distintas das encontradas em ambiente natural, uma vez que as amostras são expostas a vários ciclos de aumento repentino de temperatura em estufa (105°C), é possível que esta rocha tenha se fragmentado em consequência da expansão do ar aprisionado em seu elevado número de vesículas (20%). No ensaio Soxhlet, diferentemente, a temperatura aumenta gradualmente no início do ensaio e se mantém constante, abaixo de 100°C, ao longo de todo o procedimento.

Tabela 6 - Síntese dos resultados obtidos (%) com diversos métodos. As fontes em azul e vermelho indicam, respectivamente, os maiores e menores valores de durabilidade.

	Soxhlet	Ciclagem*	<i>Slake</i>	Absorção	LOI
VGA	71,9	92,1	74,5	2,36	5,2
TAM	98,4	99,7	98,4	2,02	4,13

FAZ	99,2	95,1	98,5	0,6	3,57
GNA	99,8	99,7	99,9	0,28	-

* Resultados após 40 ciclos.

2.7 Conclusões

Os resultados se mostraram coerentes, evidenciando em quatro dos cinco ensaios executados uma tendência decrescente de durabilidade das amostras VGA, TAM, FAZ e GNA.

O único resultado discrepante foi o de ensaio de ciclagem em água e estufa, no qual a amostra FAZ mostrou uma baixa durabilidade, que pode ser creditada à presença de abundantes vesículas isoladas, que podem ter favorecido a desagregação excessiva nos vários ciclos de secagem. Portanto, a análise das rochas em lâminas delgadas se mostrou fundamental na interpretação dos resultados.

Entre os ensaios realizados, o de durabilidade *Slake* e o de absorção de água e porosidade aparente são os únicos regidos por normas nacionais ou procedimentos bem estabelecidos, e como mostraram tendências afins, seu uso é recomendável para a avaliação do grau de durabilidade destas rochas. Contudo, são necessários estudos complementares, com maior número de amostras e comparações de diferentes procedimentos de execução de ensaios, a fim de obter resultados mais assertivos. Também é recomendável realizar ensaios de ciclagem natural, com rochas expostas às intempéries locais, e avaliar em campo evidências de diferenças de durabilidade entre os litotipos, pois estes dados podem confirmar as diferenças de durabilidade em condições identificadas em laboratório.

Os ensaios de ciclagem em água e estufa e com extrator Soxhlet, como usualmente realizados (Aires-Barros & Mouraz Miranda, 1979; ABNT NBR 12696, 1992), têm como desvantagem a demanda de elevado tempo de execução em laboratório. As adaptações metodológicas indicadas por Cavalari (2017) e Franke (2009), respectivamente, mostram-se promissoras ao reduzirem significativamente o tempo de ensaio. No caso do ensaio de ciclagem em água e estufa, é recomendável que se mantenha o número de 120 ciclos curtos, como recomendados por Cavalari (2017). No extrator Soxhlet, de mesma forma, é recomendável que também se eleve o tempo de ensaio, ao menos para sete dias, para permitir melhor caracterização das diferenças de durabilidade.

Por fim, ao avaliar a durabilidade, é importante considerar o contexto de ocorrência no campo ou o uso pretendido do material em eventuais obras (por exemplo, lastros, bases, materiais drenantes ou estruturas de contenção), pois estes fatores influenciam diretamente na escolha dos ensaios mais adequados.

Cabe destacar que os estudos sobre mecanismos de alteração acelerada de rochas básicas no Quadrilátero Ferrífero ainda são escassos, reforçando a necessidade de aprofundamento para subsidiar técnicas construtivas e de contenção mais eficientes.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÃO

O estudo realizado permitiu uma avaliação integrada da durabilidade de rochas básicas provenientes de três minas do Quadrilátero Ferrífero, a partir da combinação de análises mineralógicas, petrográficas, físicas e ensaios de ciclagem acelerada. De modo geral, os resultados evidenciaram um padrão consistente de desempenho entre as amostras, com quatro dos cinco métodos aplicados indicando a mesma ordem de durabilidade. Essa convergência reforça a influência da mineralogia, da textura e da estrutura interna sobre o comportamento de alteração dos litotipos.

A exceção observada no ensaio de ciclagem água-estufa, em que a amostra FAZ apresentou desempenho inferior, destacou a sensibilidade desse método à presença de vesículas e ao potencial de intensificação artificial dos processos de alteração. O resultado destaca a necessidade de interpretar ensaios acelerados de maneira integrada às análises petrográficas, para evitar conclusões enviesadas por características texturais específicas.

O trabalho demonstra que métodos como o teste de durabilidade *Slake* e a absorção e porosidade aparente são os mais consistentes para a avaliação da durabilidade das rochas estudadas, especialmente pela existência de procedimentos normativos e menor suscetibilidade a estimativas irreais de degradação. Por outro lado, os métodos acelerados, apesar de úteis para acelerar a obtenção de resultados, ainda carecem de padronização, principalmente no âmbito nacional.

Entre as limitações encontradas no desenvolvimento do trabalho destacam-se o tempo necessário para execução completa dos ensaios, mesmo com adaptações metodológicas; e a inviabilidade de realizar testes sob condições naturais prolongadas. As adaptações empregadas permitiram reduzir parcialmente o tempo de laboratório, mas ainda assim não substituem completamente estudos de ciclagem natural. Além disso, a representatividade geológica das amostras poderia ser ampliada para melhor capturar a variabilidade das rochas básicas do Quadrilátero Ferrífero.

Com base no que foi alcançado, recomenda-se, para trabalhos futuros, ampliar o conjunto amostral; realizar ciclagens naturais controladas para comparação com os métodos acelerados; testar variações nos tempos e condições de cada ensaio; e incluir parâmetros mecânicos adicionais após cada etapa de ciclagem. Essas ações podem aprofundar o entendimento dos mecanismos de alteração e contribuir para o estabelecimento de indicadores

mais robustos e aplicáveis ao contexto geotécnico das rochas básicas da região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aires-Barros, L.; Mouraz Miranda, A. 1979. A alteração laboratorial de rochas pelo extrator de Soxhlet e sua repercussão na oxidação $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ e na variação da densidade aparente. **Comunic. Serv. Geol. Port.** T. LXIV: 243-256. Disponível em: https://docbase.ineg.pt/docs/Comunicacoes/communicacoes64_alteracao.pdf. Acesso em: 12 nov. 2024.
- Ali, A.; Chiang, Y. W.; Santos, R. M. 2022. X-ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization: A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions. **Minerals**, v. 12, n. 2, p. 205. <https://doi.org/10.3390/min12020205>
- Araujo, T. P.; Amaral Jr., F.; Amaral, C. G.; Zenóbio, A. A. 2014. Estudo da resistência de maciços de rocha branda em taludes de mineração. Mecânica das Rochas para Recursos Naturais e Infraestrutura SBMR 2014 – Conferência Especializada ISRM CBMR/ABMS e ISRM, 2014.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 2022. **NBR 5564**: Via férrea – Lastro ferroviário. Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 1992. **NBR 12696**: Agregados – Verificação do comportamento mediante ciclagem artificial água-estufa. Rio de Janeiro.
- ASTM – American Society for Testing and Materials. 2008. ASTM D4644-08: **Standard test method for slake durability of shales and similar weak rocks**. West Conshohocken, ASTM International, 7 p.
- Best, M. G. 1982. **Igneous and Metamorphic Petrology**. New York: W. H. Freeman, 752 p.
- Brindley, G. W.; Brown, G. 1980. **Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-ray Identification**. London: Mineralogical Society, 495 p.
- Cavalari, A. L. 2017. **Avaliação dos ciclos de alteração acelerada da NBR 12696/1992 para rocha granítica**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 66 p.
- Corrêa, F.A.; Ribeiro, R. P.; Paraguassú, A. B. 2020. Estudo da alterabilidade de rochas em extrator Soxhlet com novo sistema de condensação sem perda de água. CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. **Anais**. Campinas: Cobramseg, p. 4671–4678.
- Cullity, B. D.; S. R. 2014. **Elements of X-Ray Diffraction**. Boston: Pearson Education, 596 p.
- Endo, I.; Delgado, C. E. R.; Oliveira, M. M. F.; Zapparoli, A. de C.; Carlos, D. U.; Galbiatti, H. F.; Castro, P. de T. A.; Suita, M. T. de F.; Barbosa, M. S. C.; Lana, C. E.; Moura, L. G. B. de. 2019. **Estratigrafia e Arcabouço Estrutural do Quadrilátero Ferrífero**: Nota Explicativa do Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000. Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero, Ouro Preto, 482 p.
- Ersöz, T.; Topal, T. 2024. Classification and modification of slake durability test for different types of rocks. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 83, 139. DOI:10.1007/s10064-024-03607-y
- Faria Júnior, I. R.; Luvizotto, G. L; Rosolen, V. S. 2018. Concentração de elementos traços, terras raras

e escândio em perfil de intemperismo de rocha metaultramáfica (Bom Jesus da Penha, Minas Gerais). **Geologia USP. Série Científica**, 18(2), 3-17.

Fonseca, M. A. 2011. **Petrogênese de rochas ultramáficas do quadrilátero ferrífero e adjacências e sua relação genética com rochas metaultramáficas do tipo serpentinito e esteatito**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 87 p.

Franke, W.A. 2009. The durability of rocks — Developing a test of rock resistance to chemical weathering. **Am. J. Sci.**, 309:711-730. <https://doi.org/10.2475/08.2009.04>

Franklin, J. A.; Chandra, R. 1972. The slake-durability test. In: **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 9(3):325-328. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(72\)90001-0](https://doi.org/10.1016/0148-9062(72)90001-0)

Frasca, M. H. B. O. 2003. **Estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas para revestimento**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências Universidade de São Paulo, São Paulo, 282 p. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-03052013-150852/>. Acesso em: 13 nov. 2025.

Frasca, M. H. B. O. 2003b. Rochas para revestimento de edificações: variedades, seleção, usos e durabilidade. IV SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE. **Anais**. Fortaleza. 11p.

Frazão, E. B. 1993. **Metodologia para avaliação da alterabilidade de rochas a partir de estudo experimental em amostras de basaltos da UHE de Três Irmãos - Estado de São Paulo**. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 163 p.

Frazão, E. B. 2002. Tecnologia de rochas na construção civil. **Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, 132 p.

Frazão, E. B.; Caruso, L. G. 1983. Síntese do conhecimento sobre alterabilidade de rochas basálticas como material de construção em algumas barragens da Bacia do Alto Paraná. SIMPÓSIO SOBRE A GEOTECNIA DA BACIA DO ALTO PARANÁ. **Anais**. Rio de Janeiro. 2:21-33.

Gomes, C. B. 1984. **Técnicas Analíticas Instrumentais Aplicadas à Geologia**. São E. Blucher: PRO-MINERIO, São Paulo, 218 p.

Gomes, R. L. 2001. **Características Tecnológicas e Alterabilidade dos Compartimentos Entablamento e Colunata de Derrames Basálticos da Porção Setentrional da Bacia do Paraná**. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 385 p.

Gökceoğlu, C.; Ulusay, R.; Sönmez, H. 2000. Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles. **Engineering Geology**. 57(3-4): 215-237.

Goudie, A. S.; Viles, H. A. 2012. Weathering and the Global Carbon Cycle: Geomorphological Perspectives. **Earth-Science Rev.** 113:59-71. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.03.005>

Janssens, K. 2004. Chapter 4 X-ray based methods of analysis. In: JANSSENS, K.; RENÉ E. VAN GRIEKEN (Eds.). **Comprehensive Analytical Chemistry**. Amsterdam: Elsevier. 42:129–226. [https://doi.org/10.1016/S0166-526X\(04\)80008-4](https://doi.org/10.1016/S0166-526X(04)80008-4)

Jenkins, R. 1999. **X-Ray Fluorescence Spectrometry**. New York: Wiley, 210 p.

Khajevand, R.; Fereidooni, D. 2022. The effects of water acidity and engineering properties on rock durability. **Earth Sciences Research Journal**. DOI:10.15446/esrj.v26n1.76468

Klein, C.; Dutrow, B. 2012. **Manual of Mineral Science**. Hoboken, John Wiley & Sons, 716 p.

Leão, M. F. 2017. **Comportamento Geomecânico de Frente de Intemperismo em Filito da Região do Quadrilátero Ferrífero**. Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 178 p.

Le Bas, M. J.; Le Maître, R. W.; Streckeisen, A.; Zanettin, B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. **Journal of Petrology**, 27(3):745–750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>

Leinz, V.; Mendes, J. C. 1963. **Vocabulário geológico**: com a correspondente terminologia em inglês, alemão e francês. Editoria Nacional. 180 p.

Le Maître, R. W. 2002. **Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences**. Cambridge: Cambridge University Press, 254 p.

Maia, P. C. de A. 2001. **Avaliação do Comportamento Geomecânico e de Alterabilidade de Enrocamentos**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 351 p.

Melfi, A. J.; Pedro, G. 1978. Estudo geoquímico dos solos e formações superficiais do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**. 8: 11-22.

Meunier, A. 2005. **Clays**. Berlin, Springer-Verlag, 472 p.

Moore, D. M.; Reynolds Jr., R. C. 1997. **X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals**. New York, Oxford University Press, 378 p. doi:10.1017/S0016756898501501

Nahon, D. 1991. **Introduction to the Petrology of Soils and Chemical Weathering**. New York: John Wiley & Sons, 336 p.

Noce, C. M. 2000. Geochronology of the Quadrilátero Ferrífero: a Review. **Geonomos**, 8(1):11–27. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v8i1.144>

Oliveira, N. C. de M. 2022. **Análise da Dinâmica Hidrogeológica de Diversas Tipologias de Canga do sudeste do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. Tese de Mestrado em Ciências Naturais - Geologia Ambiental e Conservação de Recursos Naturais, Escola de Minas, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, 132 p.

Ollier, C. 1984. **Weathering**, second edition. London: Longman, 270 p.

Paige-Green, P. 2007. Durability testing of basic crystalline rocks and specification for use as road base aggregate. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**. <https://www.researchgate.net/publication/30510093>.

Paraguassú, A. B.; Rodrigues, J. E.; Ribeiro, R. P.; Frazão, E. B. 2014. **Indústria da Pedra**: da extração à aplicação final, Departamento de Geotecnia da EESC-USP, 130 p.

Park, J.; Jeong, S.; Jang, S.; Lee, J.; Ko, K.; Yang, M. 2024. Influence of Chemical Weathering and Microcracks on Permeability Variations in Crystalline Rocks. **Water**. 16(20):3007.

<https://doi.org/10.3390/w16203007>

Rasmussen, C.; Dahlgren, R. A.; Southard, R. J. 2010 Basalt weathering and pedogenesis across an environmental gradient in the southern Cascade Range, California, USA. **Geoderma**, 154(3-4):473–485. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.05.019>

Santi, P. 1998. Improving the Jar Slake, Slake Index, and Slake Durability Tests for Shales. **Environmental and Engineering Geoscience** IV(3):385-396. DOI: 10.2113/gseegeosci.IV.3.385

Silva, C. H. C.; Lana, M. S. 2002. Influência da durabilidade no comportamento geotécnico dos filitos da Mina Pau Branco. **Rev. Esc. Minas**. 65(3). <https://doi.org/10.1590/S0370-44672012000300019>

Środoń, J. 2006. Identification and quantification of clay minerals by X-ray powder diffraction. **Handbook of Clay Science**. Amsterdam: Elsevier, p.:765–787.

Streckeisen, A. 1976. To each plutonic rock its proper name. **Earth-Science Reviews**, 12:1–33. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(76\)90052-0](https://doi.org/10.1016/0012-8252(76)90052-0)

Ünal, M.; Altunok, E. 2019. Determination of Water Absorption Properties of Natural Building Stones and Their Relation to Porosity. **Engineering Sciences**, 14(1), p. 39-45.

Young, A. 1972. **Slopes**. Edinburgh: Oliver & Boyd, 288 p.

APÊNDICE 1

Tabela 1 - Valores de massa das amostras obtidos por ciclo no ensaio de ciclagem em água e estufa.

Massa das amostras (g)					
Ciclo	Data	VGA	TAM	FAZ	GNA
Inicial	13/06/25	1444,3	1 411,8	956,8	1255,3
1	16/06/25	1444,2	1411,8	956,8	1255,3
2	17/06/25	1444,0	1410,8	956,8	1255,0
3	18/06/25	1444,0	1410,8	956,8	1255,0
4	23/06/25	1443,0	1410,7	956,6	1254,8
5	24/06/25	1442,3	1410,7	956,6	1254,7
6	25/06/25	1441,4	1410,7	956,6	1254,6
7	26/06/25	1441,0	1410,7	956,5	1254,5
8	27/06/25	1440,7	1410,7	956,5	1254,5
9	30/06/25*	1438,49	1409,84	955,89	1253,24
10	01/07/25	1438,49	1409,13	955,88	1252,42
11	01/07/25	1439,93	1409,52	955,73	1252,24
12	02/07/25	1439,33	1409,05	955,66	1252,22
13	03/07/25	1438,06	1408,78	955,40	1253,15
14	07/07/25	1437,20	1408,52	954,94	1252,75
15	11/07/25	1436,91	1408,55	954,65	1253,04
16	14/07/25	1436,74	1408,55	954,76	1252,98
17	17/07/25	1436,13	1408,32	954,56	1252,93
18	18/07/25	1435,96	1408,45	954,88	1252,97
19	18/07/25	1436,84	1408,88	933,61	1252,91
20	28/07/25	1437,60	1409,28	929,22	1252,94
21	28/07/25	1437,60	1409,05	929,22	1252,94
22	29/07/25	1433,72	1408,26	927,97	1252,60
23	30/07/25	1433,15	1407,97	927,30	1252,44
24	31/07/25	1432,65 (1)/1395,91 (2)**	1408,01	926,98	1252,36
25	01/08/25	1354,81	1407,83	926,92	1252,34
26	01/08/25	1354,05	1408,36	926,20	1252,33

27	04/08/25	1354,25	1407,84	925,94	1252,31
28	04/08/25	1332,28	1408,24	926,60	1252,29
29	05/08/25	1331,91	1407,80	925,84	1252,28
30	05/08/25	1333,43	1408,33	926,93	1252,33
31	06/08/25	1332,35	1408,16	926,20	1252,37
32	06/08/25	1333,47	1408,57	922,70	1252,38
33	07/08/25	1331,56	1408,01	921,52	1252,36
34	08/08/25	1331,38	1407,96	921,42	1252,28
35	08/08/25	1332,85	1408,40	922,24	1252,27
36	11/08/25	1330,18	1407,39	920,41	1252,12
37	12/08/25	1330,08	1407,35	920,31	1252,12
38	13/08/25	1330,05	1407,70	920,39	1252,12
39	13/08/25	1329,90	1407,62	920,33	1252,06
40	14/08/25	1329,74	1407,56	908,90	1251,97
41	15/08/25	1329,30	1407,50	908,87	1251,92
42	15/08/25	1330,88	1408,08	909,62	1251,92
43	18/08/25	1328,58	1407,32	860,30	1251,84
44	19/08/25	1327,97	1407,13	860,13	1251,76
45	20/08/25	1327,79	1406,93	860,08	1251,60
46	20/08/25	1327,48	1406,79	859,82	1251,45
47	21/08/25	1327,13	1407,09	859,43	1251,32
48	21/08/25	1327,09	1407,04	859,27	1251,04
49	21/08/25	1326,92	1406,94	857,27	1251,04
50	26/08/25	1326,89	1406,43	855,65	1251,01
51	26/08/25	1325,28	1406,31	856,01	1250,95

* Balança de maior precisão passa a ser utilizada.

**As amostras foram pesadas novamente após perda e descarte de algumas porções que não ficaram retidas na peneira.

APÊNDICE 2

Figura 1 - Fotomicrografias das amostras após os ensaios de ciclagem, em LP. (a) Amostra FAZ - plagioclásio (Pl), piroxênio (Px) e fraturamento (Fr). (b) Amostra TAM - Pl, Px, argilominerais (Arg) e clorita (Chl), evidenciando substituição de Px e bordejamento de minerais opacos. (c) Amostra FAZ - clinopiroxênio (Cpx), Pl e minerais opacos (Op), com presença de cavidades (Cv).

