

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Estudo da alterabilidade de rochas básicas da Mina N4 na Serra dos Carajás
(PA)**

Natália de Faria Silva
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2022**

NATÁLIA DE FARIA SILVA

**Estudo da alterabilidade de rochas básicas da Mina N4 na Serra dos Carajás
(PA)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Eduardo A. Gomes Marques

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S586e
2022
Silva, Natália de Faria, 1996-
Estudo da alterabilidade de rochas básicas da Mina N4 na
Serra dos Carajás (PA) / Natália de Faria Silva. – Viçosa, MG,
2022.

1 dissertação eletrônica (106 f.): il. (algumas color.).

Inclui anexos.

Orientador: Eduardo Antônio Gomes Marques.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2022.

Referências bibliográficas: f. 76-79.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.663>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Mecânica de rochas - Carajás, Serra dos (PA).
2. Intemperismo. I. Marques, Eduardo Antônio Gomes, 1965-.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
III. Título.

CDD 22. ed. 624.15132

NATÁLIA DE FARIA SILVA

**Estudo da alterabilidade de rochas básicas da Mina N4 na Serra dos Carajás
(PA)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 27 de maio de 2022.

Assentimento:

Natália de Faria Silva
Autora

Eduardo Antonio Gomes Marques
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 16/10/2025 às 19:21:40 e pelo orientador em 16/10/2025 às 19:46:58. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **CY15.R567.OUR9** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

Na conclusão deste trabalho, gostaria de agradecer, primeiramente, aos meus pais pelo suporte ao longo da vida, por me permitirem sonhar e tentar alcançar os objetivos que tracei pelo caminho. Mãe, serei eternamente grata por me transmitir a importância do estudo e por lembrar sempre como ele poderia ser transformador para uma mulher, mesmo que você não tenha tido a oportunidade de se dedicar como gostaria.

Agradeço ao professor Eduardo Marques pelo apoio irrestrito no desenvolvimento da pesquisa e pela preocupação com a formação técnica e também profissional de seus orientandos, sendo sempre uma referência de conhecimento e generosidade.

Devo lembrar também de todos os amigos que me acompanharam ao longo de toda a trajetória, especialmente no período de desenvolvimento deste trabalho, quando as inseguranças naturais foram intensificadas pelas circunstâncias excepcionais de uma pandemia. Meus amigos sabem a importância que têm em minha vida. Cito nominalmente Joyce e Cassiano como exemplos, pelo suporte durante todo o mestrado.

Felipe, meu parceiro de vida, obrigada pela companhia nas inúmeras idas diárias ao laboratório, pelo companheirismo e por me ajudar a acreditar que sou capaz de realizar o que, muitas vezes, nem eu mesma acredito.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

SILVA, Natália de Faria, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2022. **Estudo da alterabilidade de rochas básicas da Mina N4 na Serra dos Carajás (PA)**. Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques.

O emprego de rochas para fins de engenharia enfrenta desafios por se tratar de um material natural não dimensionado, o que ressalta a importância de sua caracterização adequada para consideração em projeto. O registro de casos de ruína de estruturas em razão da falha de rochas preliminarmente classificadas como resistentes e inalteradas evidenciou a necessidade de estudo não apenas da resposta do material ao novo estado de tensão, mas também às novas solicitações intempéricas do ambiente. Para buscar entender como o intemperismo atua sobre amostras de rocha básica provenientes de uma mina localizada na Serra dos Carajás, com que velocidade se dá o processo e quais modificações são provocadas na rocha, este trabalho se propôs a avaliar a alteração e a alterabilidade desta amostra, por meio de simulação do processo de intemperismo com realização de ensaio de ciclagem acelerada em laboratório. O método adotado foi a ciclagem acelerada com imersão em sulfato de sódio. Ao longo do processo, uma detalhada caracterização mineralógica, física e de propriedades mecânicas foi feita para se investigar quais modificações ocorriam em suas propriedades. Foram realizados ensaios de determinação de índices físicos, velocidade propagação de onda, descrição petrográfica, martelo de Schmidt, compressão a carga puntiforme e compressão uniaxial, além de registro dos aspectos visuais para análise qualitativa. A caracterização anterior à ciclagem classificou a rocha como metabasalto hidrotermalizado, resistente, com baixa porosidade e são. Os resultados obtidos nos índices de qualidade ao longo da ciclagem mostraram que os 100 ciclos realizados não alcançaram nível de alteração capaz de promover variações expressivas nas propriedades da rocha, sendo a alteração física predominante, visualizada na fissuração provavelmente resultante da diferença de coeficientes de dilatação, impondo resposta diferencial frente às oscilações térmicas durante processo. A característica de baixa porosidade, indicando poucas microfissuras interconectadas parece ser responsável pela baixa alterabilidade do metabasalto hidrotermalizado durante a ciclagem com sulfato de sódio, propiciando uma alteração maior apenas superficial na maioria dos corpos de prova.

Palavras-chave: mecânica das rochas; alterabilidade; ciclagem acelerada

ABSTRACT

SILVA, Natália de Faria, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2022. **Study of the alterability of basic rocks of Mine N4 in Serra dos Carajás (PA)**. Adviser: Eduardo Antonio Gomes Marques.

The use of rocks for engineering purposes faces challenges because it is an undesigned natural material, which highlights the importance of its proper characterization to provide useful data for the project. The recorded failures involving apparently strong and fresh rocks has increased the study of rock weathering, to understand not only its response to the new state of stress due to engineering intervention, but also its response to the new environmental condition. In order to understand how weathering acts on basic rock samples from N4 Mine located at Serra dos Carajás, which speed the process happens and what changes are caused on the rock, this research aimed to evaluate the alteration and weatherability of this sample, through simulating the weathering process with a accelerated cycling test in laboratory, the adopted method was accelerated cycling with immersion in sodium sulfate. Throughout the process a detailed characterization of mineralocical, physical and mechanical properties was carried out to investigate which changes occurred in its properties. Tests were performed to determine physical properties, P wave propagation velocity, thin section description, Schmidt hammer, point load strength and uniaxial compressive strenght, also the visual aspects were documented for qualitative analysis. The characterization prior to cycling classified the rock as hydrothermalized metabasalt, strong, with low porosity and classified as sound rock. The results obtained in the quality indexes along the cycling showed that the 100 cycles performed were not enough to achieve an alteration level capable of promoting expressive variations in the rock properties, with the physical alteration being the most frequent, seen in the cracking that according to the location of it, probably it is the result of the difference in expansion coefficient, imposing a differential response to the thermal oscillations during the process. The property of low porosity, indicating few interconnected microcracks, seems to be responsible for the low weatherability of the hydrithermalized metabasalt during accelerated cycling with sodium sulfate, providing a greater alteration only on the surface in most specimens.

Keywords: rock mechanics; weatherability; accelerated cycling

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tipos de alteração em função da temperatura e precipitação.....	17
Figura 3.1 - Esquema da metodologia adotada.....	21
Figura 3.2 – Exemplos dos blocos característico recebido para as amostras.....	23
Figura 3.3 – Condições climáticas plotadas no ábaco de Peltier (1950) em vermelho.	24
Figura 3.4 - Corpos de prova imersos em solução de sulfato de sódio.....	25
Figura 3.5 – Fragmentos sendo saturados a vácuo.	28
Figura 3.6 - Montagem do ensaio de velocidade de propagação.....	31
Figura 3.7 – Forma da onda e velocidade de propagação na interface do software	32
Figura 3.8 - Configuração do ensaio de Martelo de Schmidt.....	33
Figura 3.9 - Montagem ensaio de resistência a compressão com instrumentação para medida de deformação.....	34
Figura 3.10 - Modos de ruptura observados entre os corpos de prova ensaiados – A) Cataclase; B) Cisalhamento; C) Fendilhamento.....	35
Figura 3.11 – Configuração axial do ensaio de resistência à compressão puntiforme.	36
Figura 4.1 – Imagens em luz transmitida com polarizadores cruzados - A1) Porfiroclasto de feldspato cortado por venulações de carbonato; A2) Bolsão de quartzo cortado por venulações de carbonato; C1) Diferentes venulações na rocha; C2) Venulação espessa composta por epidoto, actinolita, quartzo, carbonato e minerais opacos; D1) Textura geral da rocha; D2) Cristal de feldspato porfiroclástico fraturado, com as fraturas preenchidas por clorita e carbonato.	40
Figura 4.2 – Imagem transmitida com polarizadores cruzados – B1) Venulações da segunda, terceira e quarta famílias; B2) Aspecto dos maiores cristais de feldspato da rocha.....	42
Figura 4.4 – Curvas de tensão x deformação axial.....	46
Figura 4.5 – Corpos de prova ensaiados e rompidos.	50
Figura 4.6 – Gráfico de correlações de resistência para metabasalto em estudo.....	51
Figura 4.7 – Ábaco de Deere e Miller (1966) com as informações plotadas.....	52
Figura 4.8 – Corpo de prova nº 9: A) Ciclo 65; B) Ciclo 85.	54
Figura 4.9 – Fissuras nas quais se observa bordas impregnadas de sulfato de sódio.	55
Figura 4.10 – Corpo de prova nº 6 desagregado.	55
Figura 4.11 – Evolução do estado visual do corpo de prova nº 9, nos ciclos 65, 75 e 100.	56
Figura 4.12 - Evolução do estado visual do corpo de prova nº 10, nos ciclos 60, 65, 75, 90 e 100.....	57
Figura 4.13 – Evolução do estado visual do corpo de prova nº 19, nos ciclos 75, 90 e 100. ..	58
Figura 4.14 – Evolução do estado visual do corpo de prova nº 3-2, nos ciclos 90 e 100.....	59
Figura 4.15 – Evolução visual do corpo de prova nº 4-2, nos ciclos 60, 75, 90 e 100.....	60
Figura 4.16 – Imagens transmitida com polarizadores cruzados – A) Aspecto dos cristais de plagioclásio substituídos para carbonato e argilominerais; B) Aspectos dos cristais de actinolita substituídos para clorita e carbonato; C) Aspecto dos cristais de plagioclásio substituídos por carbonatos e argilominerais; D) Aspecto dos cristais de actinolita substituídos por cloritas.....	62
Figura 4.17 – A) Fissuras e rachadura visíveis na superfície do corpo de prova; B) Interior do corpo de prova com paredes impregnadas de sulfato.	66

Figura 4.18 – A) Fissuras não muito persistentes visíveis na superfície do corpo de prova; B) Interior do corpo de prova sem sinais de ataque de sulfato.	67
Figura 4.19 – Paredes interiores da rachadura do corpo de prova nº 17.....	69
Figura 4.20 – A) CP nº 2 interior impregnado; B) CP nº19 fissura superior; C) CP nº 31 alguns sinais esbranquiçados; D) CP nº 33 interior impregnado de sulfato.	70
Figura 4.21 – Ruptura não válida ao longo de rachadura preexistente no ciclo 20.....	72
Figura 4.22 – Rupturas não válidas por fissuras preexistentes no ciclo 100.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Ensaio realizados em laboratório.....	21
Tabela 3.2 – Dados climáticos de estação meteorológica na Mina de Ferro.	24
Tabela 4.1 – Modal de composição mineralógica das lâminas.	39
Tabela 4.2 – Modal de composição mineralógica da lâmina.	41
Tabela 4.3 – Dados do ensaio de índices físicos.	42
Tabela 4.4 – Valores de velocidade longitudinal – V_p	43
Tabela 4.5 – Valores obtidos no ensaio de Martelo de Schmidt.	44
Tabela 4.6 – Valores de resistência a compressão uniaxial e módulo de elasticidade.	45
Tabela 4.7 – Valores de $I_{s(50)}$ dos 10 corpos de prova ensaiados.....	49
Tabela 4.8 – Dados de perda de massa em percentual.....	53
Tabela 4.9 – Modal de composição mineralógica das lâminas.	61
Tabela 4.10 – Valores de Índices petrográficos para o metabasalto.....	64
Tabela 4.11 – Valores de índices físicos avaliados ao longo do processo de ciclagem.	65
Tabela 4.12 – Velocidades de propagação obtidas nos ciclos 0 e 10.	67
Tabela 4.13 - Velocidades de propagação obtidas nos ciclos 0 e 20.....	68
Tabela 4.14 - Velocidades de propagação obtidas nos ciclos 0 e 100.	69
Tabela 4.15 – Valores de $I_{s(50)}$ obtidos ao longo do processo de ciclagem.	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivo	12
2	CARACTERIZAÇÃO DO TEMA	13
2.1	Alteração e alterabilidade de rochas	13
2.1.1	Fatores intrínsecos	14
2.1.2	Condições intempéricas	16
2.2	Complicações geotécnicas devido à alteração	17
2.3	Métodos de estudo da alterabilidade de rochas	18
3	METODOLOGIA	20
3.1	Descrição do material	22
3.2	Caracterização das condições climáticas locais	23
3.3	Ciclagem acelerada com solução de sulfato de sódio	24
3.4	Descrição petrográfica	26
3.5	Índices Físicos	27
3.5.1	Peso específico	28
3.5.2	Porosidade	29
3.5.3	Capacidade de absorção d'água	30
3.6	Velocidade de propagação de onda	30
3.7	Martelo de Schmidt	32
3.8	Ensaio de resistência à compressão uniaxial	33
3.9	Ensaio de resistência à compressão puntiforme	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1	Caracterização da rocha em condição sã	38
4.1.1	Descrição petrográfica	39
4.1.2	Índices Físicos	42
4.1.3	Velocidade de propagação de onda	43
4.1.4	Martelo de Schmidt	43
4.1.5	Resistência à compressão uniaxial	45
4.1.6	Resistência à carga puntiforme	49
4.1.7	Correlação dos parâmetros de resistência	50
4.2	Ciclagem acelerada com imersão em sulfato de sódio	52

4.3	Caracterização da rocha após ciclagem	61
4.3.1	Análise petrográfica	61
4.3.2	Índices Físicos	65
4.3.3	Velocidade de propagação de onda	67
4.3.4	Resistência à carga puntiforme.....	71
5	CONCLUSÃO	74
	REFERÊNCIAS	76
	ANEXO A – Descrição petrográficas das lâminas – Ciclo 0.....	80
	ANEXO B – Descrição petrográfica das lâminas – Ciclo 100.....	99

1 INTRODUÇÃO

O emprego de rochas em diferentes áreas da engenharia civil e na mineração apresenta diversos desafios, uma vez que se trata de um material natural, com propriedades não projetadas, que deve ser investigado devidamente conforme as exigências da função a ser aplicada, para sua consideração correta em projeto. Também deve haver uma busca pelo entendimento de como estas propriedades, adotadas em projeto, se deterioram com o tempo, o que tem fomentado os estudos sobre intemperismo, mecanismo que muitas vezes controla a velocidade de transformação do material rochoso, principalmente em locais como o Brasil, em função das condições climáticas vigentes.

Este trabalho desenvolve um estudo da alterabilidade de amostras de rocha provenientes de blocos de rochas de investigação de uma mina, pertencente à Vale S.A., localizada na Serra dos Carajás no estado do Pará. Para tal, foi feita em laboratório a simulação de processos de alteração, para análise de características intrínsecas da rocha frente às condições externas do meio, em um período de tempo experimental. Concomitantemente, foi feita uma detalhada caracterização mineralógica, física e de propriedades mecânicas da rocha em estudo.

Neste trabalho, o termo alteração é utilizado sempre em referência ao processo de alteração intempérica ou intemperismo, enquanto o termo alterabilidade refere-se à velocidade com que uma rocha se intemperiza. Há dificuldade no estudo da alterabilidade, em razão das muitas variáveis correlacionadas ao processo intempérico, não havendo apenas uma metodologia única definida e facilmente aplicável a diferentes tipos de rocha. Para a avaliação, deve ser considerado o estado inicial de alteração da amostra e a quais condições ela será exposta em campo, para escolha do meio de simulação em laboratório em tempo hábil para a experimentação.

Para esta pesquisa foram executados ensaios de ciclagem acelerada com imersão em sulfato de sódio, determinação de índices físicos, velocidade de propagação de onda, compressão a carga puntiforme, compressão uniaxial e descrição petrográfica, a fim de se caracterizar o estado inicial de alteração das amostras recebidas e acompanhamento de eventuais transformações devido à ciclagem, através de índices de qualidade. A associação dos diferentes ensaios para caracterização dos índices busca representar as diferentes propriedades da rocha, como contribuem para a alterabilidade e como são modificadas.

1.1 Objetivo

O objetivo desta pesquisa é a avaliação da alteração e da alterabilidade de rochas metabásicas de uma mina na Serra dos Carajás, a partir da caracterização física, mineralógica e mecânica da rocha e acompanhamento da modificação destas propriedades por meio de ensaios laboratoriais ao longo de um processo de alteração acelerada em laboratório, a fim de se obter subsídios para previsão do seu comportamento a longo prazo.

2 CARACTERIZAÇÃO DO TEMA

Na engenharia, o emprego das rochas nas diferentes funções possíveis, como material de fundação, agregado, enrocamento ou escavações para túneis, galerias e taludes, fomenta a importância da devida caracterização deste material, para que se garanta a segurança e estabilidade das estruturas. Para garantir a integridade dos elementos e evitar a ruptura, os maiores pontos de estudo em projeto geralmente são as propriedades mecânicas, como a resistência de pico e a deformabilidade, para que se previna a ocorrência de falha estrutural da rocha quando submetida ao novo estado de tensão, afastando uma condição de tensão ou deformação além dos admissíveis. (OLIVEIRA, 2012; AZEVEDO & MARQUES, 2006). O registro de casos de ruína de estruturas em razão da falha de rochas preliminarmente classificadas como resistentes e inalteradas evidenciou a necessidade de estudo não apenas da resposta do material ao novo estado de tensão, mas também às novas solicitações intempéricas do ambiente criado pela intervenção para sua utilização em engenharia (FRAZÃO, 1993; MAIA, 2001; OLIVEIRA, 2012).

O intemperismo, ou alteração intempérica, promove modificações nas características de uma rocha, podendo ser estas de ordem física, química ou biológica, processadas como forma de adaptação às condições ambientais diferentes daquelas de sua formação. É um processo natural, que ocorre continuamente na crosta terrestre, podendo ser demarcado em períodos de tempo geológico (de até bilhões de anos), cuja velocidade de atuação pode ser acelerada como consequência da interferência de atividades humanas, como a engenharia civil e mineração. Nesses casos, podem ser constatadas modificações com efeitos desfavoráveis à utilização de algum tipo de rocha em um curto período, compatível a escala de tempo de engenharia.

A ação dos agentes exógenos do ambiente tem influência na amplitude das transformações da rocha, mas a resposta do material frente ao ambiente é uma combinação destes com as características intrínsecas da rocha, sendo necessário um estudo de seu estado de alteração inicial e sua alterabilidade para previsão de seu desempenho quando submetida à nova condição ambiental (MAIA, 2001; JAQUES, 2019).

2.1 Alteração e alterabilidade de rochas

Segundo Frazão (1993), no âmbito da engenharia, alteração é todo processo que modifica as características de uma rocha de forma a afetar seu desempenho. O desenvolvimento

da alteração consiste no conjunto de transformações que visam à estabilização da rocha à temperatura e pressão às quais está exposta, sucedendo em sua desintegração e decomposição, respectivamente mecanismos do intemperismo físico e químico, originando produtos de alteração (MINETTE, 1982).

O intemperismo físico é reconhecido pela desintegração da rocha, com perda de coesão entre os minerais, fissuração e fragmentação do elemento. Atinge diretamente as características de porosidade e permeabilidade, sem modificação quanto à composição mineral. Como principais mecanismos de desintegração podem ser destacados: dilatação e contração dos minerais devido à oscilação de temperatura, expansão de sais por cristalização ou expansão de minerais por absorção de água (FRAZÃO, 1993); situações de alívio de tensão em escavações; vibrações por detonação a fogo e abrasão pelo atrito entre partículas (MAIA, 2001).

O intemperismo químico é caracterizado pela transformação dos minerais primários constituintes da rocha em minerais secundários, seguindo geralmente para suas formas mais estáveis a temperatura e pressão em que se encontram na superfície terrestre. A estabilidade mineral está relacionada à sequência de formação destes minerais no magma. A presença de água favorece o evento de reações químicas, como oxidação, dissolução e hidratação. Destacadas por Marques et al. (2020) como relevantes na escala de tempo da engenharia no Brasil.

Os processos de intemperismo físico e químico podem ocorrer isoladamente, mas por terem suas atuações interdependentes, muitas vezes são verificados de forma simultânea, o avanço de um favorecendo a ocorrência do outro. O desgaste físico, por propiciar o fluxo de água e aumentar a superfície de contato da rocha devido à fragmentação, é apontado frequentemente como iniciador do processo de ordem química, sendo predominante nos estágios iniciais de intemperismo da rocha (JAQUES et al., 2020).

A alterabilidade de uma rocha está relacionada à sua propensão à alteração e, como exposto por Aires-Barros (1971), deve ser considerada uma função dependente das características da rocha e dos aspectos externos relacionados ao ambiente, além do fator tempo.

2.1.1 Fatores intrínsecos

Em relação aos fatores intrínsecos à rocha, as características condicionantes para sua alteração são: composição mineralógica, estado microfissural e presença de argilominerais expansivos (FRAZÃO, 1993).

O aspecto da composição química relaciona-se à estabilidade dos minerais constituintes nas condições superficiais, a partir da ideia de alterabilidade relativa, concepção introduzida por Goldich (1938) ao comparar a estabilidade de diferentes rochas sujeitas aos mesmos agentes de alteração (OLIVEIRA, 2012; LOPES, 2019). Goldich (1938) propôs duas séries de ordem de estabilidade dos minerais: a série contínua, formada por minerais félsicos e sílico-aluminosos, e a série descontínua, formada por minerais ferro-magnesianos. Essa ordem é inversa à sequência de cristalização dos minerais de origem magmática da Série de Bowen, indicando que minerais cristalizados em altas temperaturas são menos estáveis na superfície, enquanto minerais tardios apresentam maior resistência (Oliveira, 2012; Lopes, 2019). Assim, quanto maior for a diferença entre o ambiente de origem de seus minerais e o ambiente vigente na superfície terrestre, maior será a alterabilidade da rocha (GOMES, 2001).

Minette (1982) ressalta que o teor de sílica na composição de rochas ígneas e metamórficas está relacionado à alterabilidade química apresentada pelos seus minerais. Em termos gerais, quanto maior o teor de sílica, menos suscetível a alteração química é a rocha, o que faz com que rochas ácidas tendam a ser menos alteráveis que rochas básicas.

O estado microfissural diz respeito à microestrutura da rocha, a ocorrência de fissuras e poros interconectados, que permitam o fluxo e maior contato da superfície com a água, responsável por acelerar reações químicas e desgaste quando há percolação (LOPES, 2019). Em escala macro, fraturas, juntas, falhas e foliações no maciço podem funcionar como vias preferenciais para a circulação de água, o que também influencia o intemperismo (MARQUES et. al, 2020). Em rochas metamórficas, a complexidade estrutural decorrente do processo de transformação pode dificultar o entendimento do seu perfil de intemperismo (DOBEREINER, 1989).

Com a percolação de água, a presença de argilominerais expansivos na composição da rocha torna-se um fator determinante para a alteração, pois contribui para o fenômeno de desagregação. A variação de umidade permite a absorção de água nas estruturas interlamelares dos argilominerais, provocando sua expansão volumétrica e gerando tensões, resultando no enfraquecimento das ligações entre os minerais, ocasionando a desagregação, que facilita a atividade de alteração na rocha. A presença de argilominerais é uma importante característica da rocha apontada como causa de maior susceptibilidade à alteração, principalmente em rochas basálticas, que frequentemente já sofreram algum processo de alteração hidrotermal, sendo estes possíveis minerais secundários formados, como apresentado em diferentes trabalhos

(SCHNEIDER & ROCHA, 1968; FARJALLAT & OLIVEIRA, 1972; FRAZÃO & CARUSO, 1983; FRAZÃO, 1993; MAIA, 2001; GUZZI, 1995; GOMES, 2001; OLIVEIRA, 2012; FRASCÁ, 2019; SUÁREZ et al., 2021).

Em Frascá (2019), com avaliação da alterabilidade de basaltos pela descrição petrográfica a autora aponta que o tipo de argilomineral e sua disposição pela rocha podem ser mais importantes que o percentual apresentado na composição mineralógica. Portanto, seria significativa a influência destes minerais mesmo em baixas concentrações na rocha. Em Suárez et al. (2021) é observado que a disposição de esmectitas em um basalto preenchendo uma rede de micro e nanofissuras, dispostas de forma altamente interligada é capaz de iniciar um rápido processo de alteração da rocha, impossibilitando sua utilização como agregado pela excessiva produção de finos.

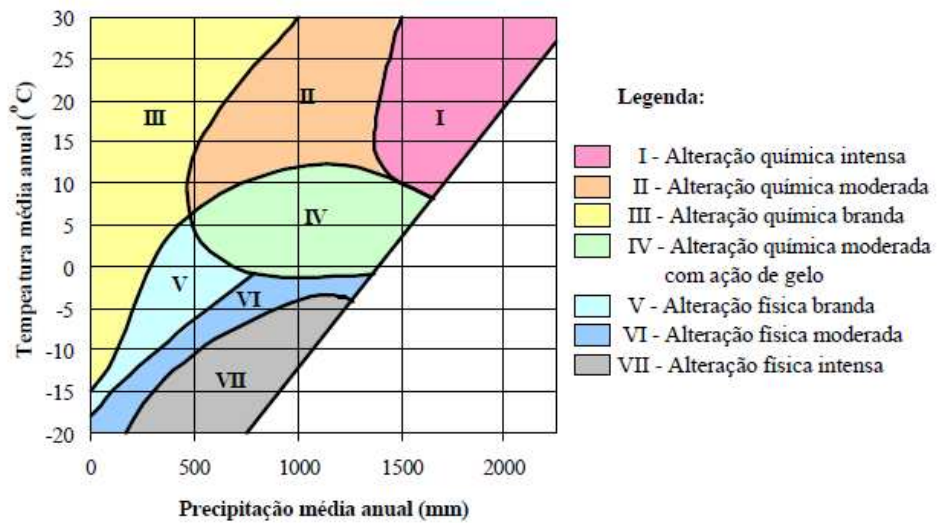
2.1.2 Condições intempéricas

Dos agentes exógenos de alteração, os relacionados ao clima são os mais relevantes para as rochas. Destacam-se a temperatura, a precipitação, a umidade relativa do ar, a pressão atmosférica e a ação do vento (MAIA, 2001).

O intemperismo, fortemente dependente do clima, tem na variação de temperatura (diária e sazonal) e na água proveniente da precipitação os principais catalisadores das reações de intemperismo químico. Em regiões de clima tropical, como uma porção considerável do território do Brasil, a combinação de altas temperaturas e elevada pluviosidade favorece o aceleração do processo de intemperismo, principal causa da grande espessura de perfil de intemperismo registrado no país (Marques et al., 2020).

Com os dados de temperatura média anual e precipitação média anual, Peltier (1950) propôs uma correlação gráfica, apresentada na Figura 2.1, para interpretação de qual tipo de alteração tende a predominar conforme as condições do meio.

Figura 2.1 - Tipos de alteração em função da temperatura e precipitação.



Fonte: Peltier (1950) adaptado por Maia, 2001.

2.2 Complicações geotécnicas devido à alteração

A utilização de rochas na engenharia pode apresentar problemas quando os efeitos da alteração não são devidamente previstos durante a vida útil da estrutura. As principais propriedades impactadas pelo intemperismo são resistência mecânica, deformabilidade, porosidade e aderência (MAIA, 2001). Para cada finalidade de aplicação das rochas, alguma propriedade pode ser considerada mais relevante em comparação às outras, mas em geral, a deterioração ocorre de forma correlacionada.

Em escavações em rocha, como taludes, poços profundos, túneis e frentes de mineração, principalmente nos cenários de escavações subterrâneas, o alívio de tensão no maciço é um processo físico que pode gerar descontinuidades importantes, facilitando o avanço do intemperismo, por também originarem rotas para o fluxo de água (MARQUES et al., 2020).

Em taludes naturais ou artificiais em rocha, rupturas e movimentos de massas podem ocorrer por consequência da variação volumétrica devido às oscilações térmicas e da perda de resistência pelo carreamento dos componentes minerais solúveis devido à exposição à precipitação (GUICINI & NIEBLE, 1976).

Oliveira (2012) traz uma revisão sobre os episódios de colapso devido à alteração de rochas ocorridos nos cenários de utilização de rochas supracitados com registro na literatura, apresentados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Episódios de colapso envolvendo alteração

Ano	Local	Estrutura	Acontecimento	Causa
1978-2001	Japão	Túnel	Deformações súbitas	Resistência da rocha alterada e propagação das deformações até superfície
1988-1998	Ouro Preto - MG (Brasil)	Talude	Movimento gravitacional de massa, na forma de mistura de solo e blocos de rocha	Intemperismo químico, erosão, chuvas intensas e intervenção humana
1992-2009	Santos - SP	Talude	Queda de blocos de rocha	Variação térmica do maciço rochoso e perda de sustentação por processos erosivos
1994	Turquia	Túnel	Instabilidade de taludes	Rochas fraturadas saturadas e altamente intemperizadas, com presença de argilominerais
1995	Brasil (Túnel Carvalho Pinto)	Túnel	Ruptura do emboque	Trincas generalizadas

Fonte: Oliveira, 2012.

2.3 Métodos de estudo da alterabilidade de rochas

Frazão (1993) expõe a busca de diversos autores por formas de parametrizar o estudo da alterabilidade de rochas, permitindo comparar diferentes materiais e prever as modificações ao longo do tempo. Essa tarefa ainda enfrenta obstáculos devido à variedade de agentes envolvidos no processo de alteração, à dificuldade de determinação de qual fator predomina sobre outro e à variabilidade das propriedades relevantes conforme a aplicação da rocha na engenharia.

O estudo da alterabilidade permite planejamento de maior supervisão ou reforço com materiais que se apresentem mais instáveis em curtos períodos de tempo (FARJALLAT & OLIVEIRA, 1972), também é importante para se evitar gastos e atrasos em prazos de projeto por desgaste não previsto do material (SUÁREZ et al. 2021) A definição quantitativa da alterabilidade permitiria, inclusive, aproximações para cálculo de tempo de ruína de uma obra (GUZZI, 1995).

Os principais ensaios para estudo da alterabilidade podem ser classificados entre ensaios diretos e indiretos. Os ensaios diretos tem objetivo de simular a alteração sobre o material, com condições ambientais similares ao local a que será exposto. Os ensaios indiretos são

empregados para caracterizar propriedades que permitam comparação do material alterado e intacto, com análise do grau de alteração da amostra (SALLES, 2013).

Entre os ensaios diretos podem ser tratados: ensaios de degradação, ensaios de desgaste e ensaios de impacto. Os ensaios de degradação são aqueles em que o material é submetido à ação de agentes intempéricos, para que o desenvolvimento da alteração nas amostras seja acelerado e possa se fazer a caracterização das propriedades do material em diferentes níveis alcançados de alteração (SALLES, 2013). Ensaios dessa natureza são os mais frequentemente empregados, dentre os quais os mais encontrados na literatura são: em campo, a ciclagem natural; em laboratório, lixiviação contínua e ciclagem com umedecimento e secagem, com suas variações quanto à solução para umedecimento, com procedimentos praticando água-estufa e também testes de ataque por etileno-glicol, água oxigenada, sulfatos de sódio e magnésio (LOPES, 2019).

De forma geral, nos ensaios de alteração, o que se busca é a obtenção de índices representativos do estado inicial e do estado final, ou em estágios intermediários definidos para a avaliação. Esses índices podem estar relacionados a diversas propriedades da rocha e devem ser escolhidos de acordo com a aplicabilidade, de modo a serem representativos em cada caso em estudo (FRAZÃO, 1993). Definidos como índices de qualidade, podem ser: petrográficos, geomecânicos, físicos, geoquímicos, granulométricos e relativos à propagação de onda (MAIA, 2001).

3 METODOLOGIA

Para realizar o estudo da alterabilidade de rocha, a metodologia adotada tem como finalidade simular em laboratório a alteração na amostra e obter índices de qualidade em estágios inicial, intermediário e final desta simulação. A avaliação por meio de ensaios de caracterização física, mineralógica e mecânica, permite identificar modificações nas propriedades da amostra ao longo do processo.

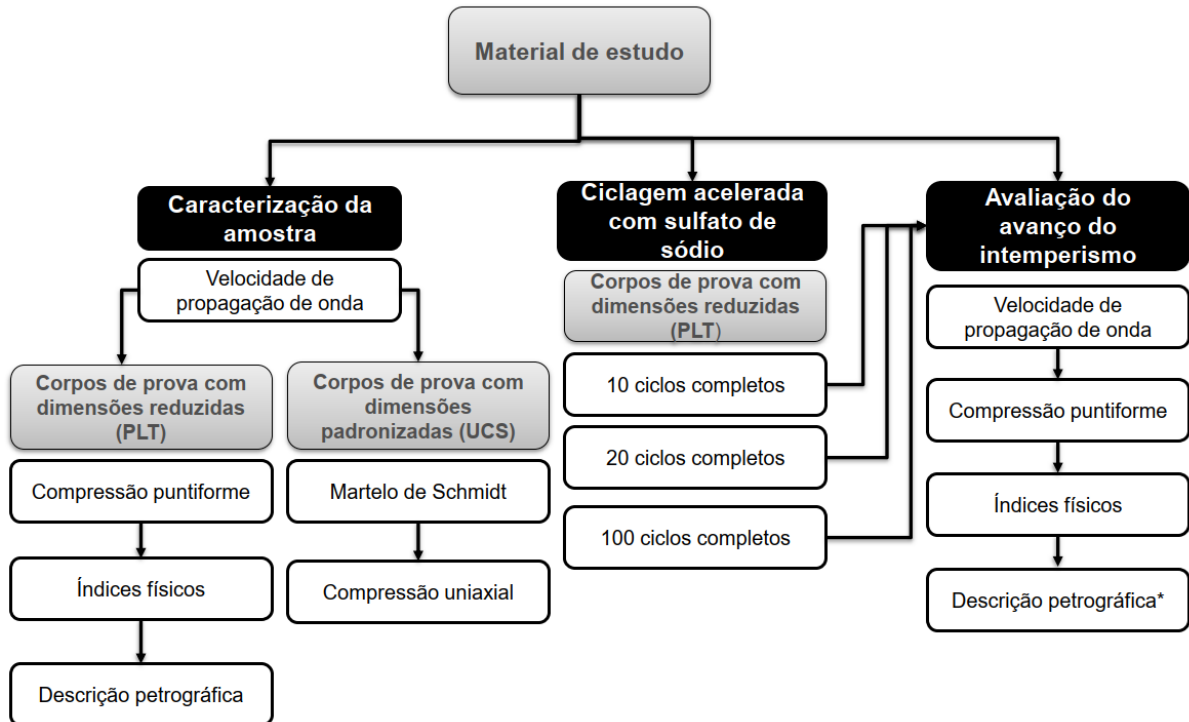
As amostras do estudo foram blocos de rocha provenientes de uma mina na Serra dos Carajás. A limitação do volume de material disponível impôs restrições metodológicas, como a escolha de quais ensaios seriam possíveis para obtenção dos índices de qualidade, em função das dimensões exigidas dos corpos de provas. Para a realização de compressão uniaxial, por exemplo, as diretrizes da ISRM (2007) indicam diâmetro mínimo de 50 mm e altura que atendam a relação altura/diâmetro (L/D) entre 2,5 e 3,0, sendo possível realização desse ensaio apenas na condição inicial da amostra.

Diante dessas limitações, optou-se pelo ensaio de resistência à carga puntiforme (*Point Load Test*) para estimar a resistência nos estágios pós-ciclagem. Essa escolha se deve à menor exigência dimensional do ensaio, padronizada pela ISRM (2007) como $0,3D < L < D$, e à sua melhor adequação aos ciclos de umedecimento e secagem.

O esquema de metodologia utilizado nesta pesquisa, apresentado na Figura 3.1, é baseado na metodologia desenvolvida por Frazão (1993).

Os testes em laboratório realizados para o cumprimento do estudo segundo descrito no esquema acima, suas diretrizes e equipamentos necessários são resumidos na Tabela 3.1. Os processos de preparação e quais condições a amostra deve atender em cada um dos ensaios são descritos em cada tópico que apresenta sua metodologia separadamente.

Figura 3.1 - Esquema da metodologia adotada.



*A descrição petrográfica na avaliação do avanço do intemperismo foi realizada apenas com lâminas do ciclo 100.

Fonte: A autora.

Tabela 3.1 - Ensaio realizados em laboratório.

Teste	Local	Equipamentos	Diretriz
Ciclagem acelerada com solução de sulfato de sódio	UFV	Vasilhame, balança e estufa	DNER-ME 089/94 (Adaptado)
Descrição petrográfica	Externo	Microscópio petrográfico	Le Matrie et al. (2002) e Fettes & Desmons (2007)
Índices Físicos	UFV	Dessecador, bomba a vácuo, balança e estufa	ISRM (2007)
Martelo de Schmidt	UFV	Proceq RockSchmidt	ISRM (2014)
Resistência à compressão puntiforme	UFV	PLT Controls	ISRM (2007)
Resistência à compressão uniaxial	UFV	Prensa EMIC DL60000	ISRM (2007)
Velocidade de propagação de onda	UFV	Pundit Lab	ISRM (2007)

Fonte: A autora.

Sendo a alteração de uma rocha dependente de fatores intrínsecos e também de fatores ambientais, dada a condição de recebimento da amostra em estudo, em estado são e com baixa porosidade, para um tempo hábil para a simulação em laboratório, foi feita a opção pelo meio com solução viável mais agressiva encontrada na literatura. Assim, foi realizado o ensaio direto de ciclagem acelerada por umedecimento e secagem com imersão em solução de sulfato de sódio, feito segundo adaptação do procedimento indicado em DNER-ME 089/94, especificado para a avaliação da durabilidade de agregados.

A adaptação foi feita com relação a concentração indicada no procedimento do DNER (350 g/L), visto que na tentativa de emprego desta concentração em temperatura ambiente, a excessiva formação de cristais impossibilitou a utilização da solução. Pelo volume de solução utilizada a cada ciclo e o montante de ciclos propostos para a realização do estudo, o aquecimento da solução para utilização de maior concentração se apresentou inviável.

Os estágios da ciclagem com retirada dos corpos de prova, para obtenção dos índices através dos ensaios, foram definidos inicialmente a cada 10 ciclos realizados. Mas, em função da pequena redução de massa e pouca variação em avaliação visual registrada a cada 10 ciclos, foi feita a opção por um maior espaçamento entre estágios de avaliação visando alcance de variações mais significativas nos índices devido à alteração. As retiradas dos corpos de prova para serem testados ocorreu, por fim, nos ciclos: 0, 10, 20 e 100.

Em cada marco definido até o ciclo 20, foram selecionados 10 corpos de prova para os ensaios. A escolha baseou-se em inspeção visual, priorizando as amostras que apresentavam aparente maior desgaste em relação às demais. Devido à pouca alteração visual observada nas amostras, decidiu-se que, após 20 ciclos, um maior número de corpos de prova seria submetido a 100 ciclos, com o objetivo de verificar a ocorrência de desgaste mais significativo da rocha.

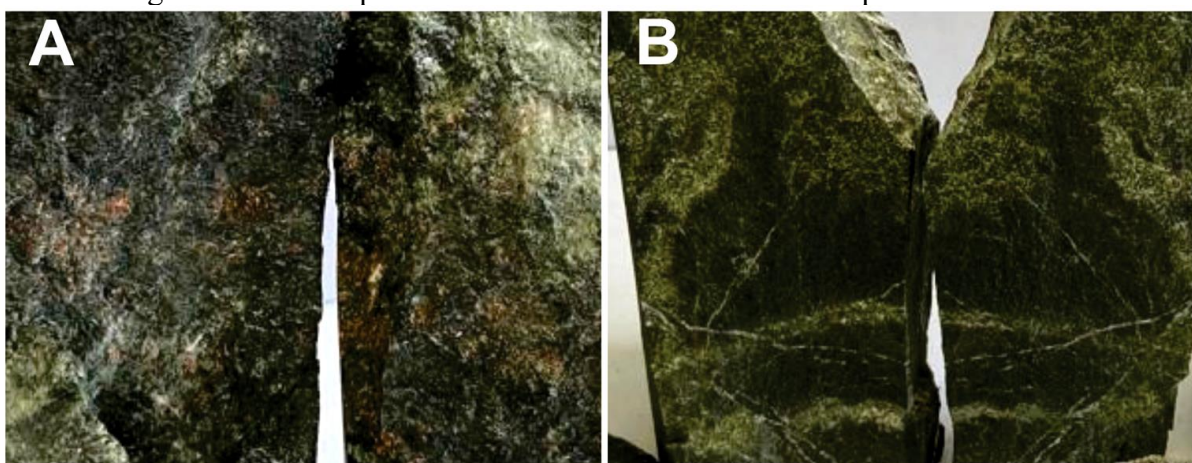
3.1 Descrição do material

As amostras cedidas para estudo consistiram em blocos de rocha provenientes de investigação em uma mina localizada na Serra dos Carajás, sem informações detalhadas sobre os locais exatos de coleta. Com base nas características macroscópicas dos blocos notou-se uma diferenciação em aspectos como: cor, textura, tonalidade dos minerais presentes na rocha e disposição destes veios pelo corpo rochoso.

Essas diferenças podem ser observadas na Figura 3.2: na Figura 3.2A, registra-se uma rocha cinza escura com minerais avermelhados e rosados; na Figura 3.2B, registra-se uma rocha cinza com veios de minerais claros e esverdeados.

Na ausência de caracterização prévia dos blocos, quanto à formação geológica ou composição mineralógica, os blocos foram tratados como único conjunto amostral. Reconheceu-se que a heterogeneidade pode ter resultado em variação da resposta à ciclagem e aos esforços mecânicos, entretanto, o estudo analisa os dados de forma conjunta. Além disso, o volume de amostras disponível não era suficiente para que todas as etapas de caracterização e experimentação com separação baseada pela análise visual.

Figura 3.2 – Exemplos dos blocos característico recebido para as amostras.



Fonte: A autora.

3.2 Caracterização das condições climáticas locais

Com foco de caracterização das condições climáticas às quais a rocha seria exposta, por se tratar de rochas provenientes de mina de exploração, sua aplicação ocorreria em frentes de lavra, onde o material antes confinado pode ser exposto às condições superficiais. Portanto, as condições climáticas consideradas no estudo correspondem às condições do local de origem das amostras.

Os dados apresentados na Tabela 3.2 foram extraídos de Queiroz (2015). Os dados pluviométricos utilizados são os resultados de uma média mensal dos anos de 1982 a 2013, enquanto os dados de temperatura média mensal são do ano de 2013, obtidos na estação meteorológica localizada em uma mina de ferro do Complexo Minerador de Carajás.

A partir dos dados de temperatura média e precipitação média foi caracterizado graficamente pelo ábaco de Peltier (1950) qual tipo de intemperismo é mais provável de ocorrer no local de origem das amostras.

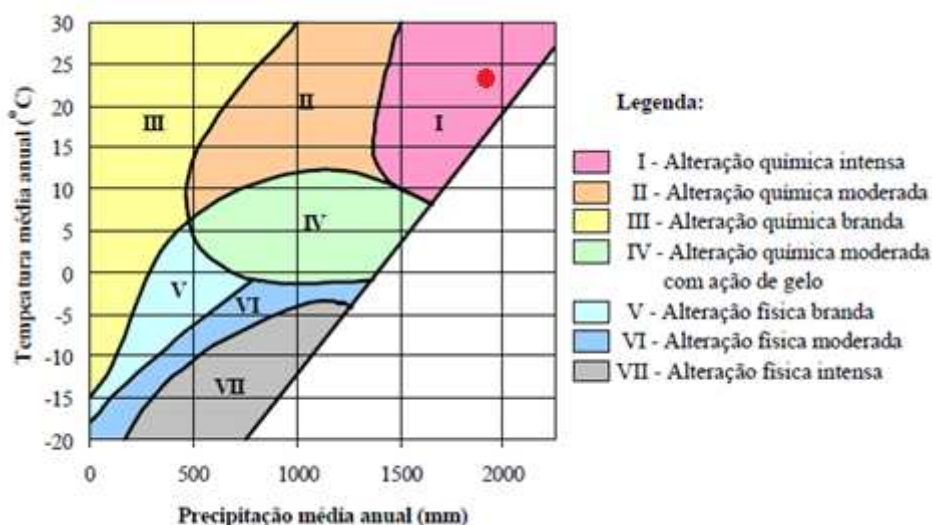
Tabela 3.2 – Dados climáticos de estação meteorológica na Mina de Ferro.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Precipitação média mensal (mm) 1982-2013	292.8	294.3	344.8	242.9	133.9	31.0	19.9	24.7	64.8	110.3	165.5	234.4
Temperatura média mensal (°C) - 2013	22.9	23.1	23.5	23.8	24.5	24.8	24.9	25.8	24.8	24.7	23.4	23.8

Fonte: Queiroz, 2015.

Com os dados de precipitação anual de 1959,9 mm e temperatura mensal média de 24,2 °C, na Figura 3.3 é verificado que a alteração química intensa tem sua atividade mais favorecida. Portanto, a consideração da alterabilidade dos materiais geológicos deve ser inserida em projetos de mineração.

Figura 3.3 – Condições climáticas plotadas no ábaco de Peltier (1950) em vermelho.



Fonte: Modificado de Maia, 2001.

Assim, ensaios que possam promover alteração química dos constituintes minerais das rochas são adequados para simular esse efeito em laboratório.

3.3 Ciclagem acelerada com solução de sulfato de sódio

O procedimento empregado para a simulação da alteração da rocha em laboratório foi uma adaptação do procedimento sugerido na norma técnica DNER-ME 089/94 para avaliação de durabilidade do agregado rochoso. O material da amostra foi ensaiado na forma de corpos

de prova com dimensões exigidas para o ensaio de carga puntiforme, por isso não foi necessária a análise granulométrica indicada no procedimento quando feito para estudo de agregados.

As soluções de sulfato de sódio de cada ciclo eram preparadas, no mínimo, 48 horas antes da realização do início do ciclo, em uma concentração de 200 g/L, com a adição do sal anidro feita em volumes de 2 L de água para que a agitação para a dissolução fosse facilitada. O volume necessário foi determinado com base nas dimensões do recipiente e dos corpos de prova, para que o nível da solução ficasse 1 cm acima da amostra, garantindo total imersão. A disposição dos corpos de prova foi feita como mostrado na Figura 3.4, com preocupação que esses tivessem a área lateral livre para promover o máximo contato possível com a solução.

Figura 3.4 - Corpos de prova imersos em solução de sulfato de sódio.



Fonte: A autora

A concentração empregada foi ajustada à solubilidade do sulfato de sódio informada pelo fabricante para a temperatura de 20°C. Por não ser viável o aquecimento da solução para permitir uma maior concentração, não foi adotada a concentração indicada no procedimento do DNER (350 g/L), visto que na tentativa de emprego desta concentração em temperatura ambiente, a excessiva formação de cristais impossibilitou a utilização da solução.

Cada ciclo de alteração consistiu na imersão dos corpos de prova da amostra em solução de sulfato de sódio, em temperatura ambiente, por um período de 18 horas, após o qual a massa total em superfície seca com pano era registrada, seguida pela secagem em estufa a 105 0°C - 110 °C, por 12 horas, ao fim das quais a massa total da amostra seca também era registrada. A

mudança na massa seca em estufa, obtida ao fim de cada ciclo, foi considerada a perda de massa total da amostra. Do fim de um ciclo ao início do consecutivo, os corpos de prova esfriavam à temperatura ambiente por aproximadamente 18 horas, até a imersão em uma nova solução.

O acompanhamento durante os ciclos para a verificação da ocorrência de degradação dos corpos de prova foi feito de forma qualitativa, pela análise visual, em que mudanças de cor, desagregação e desenvolvimento de fissuras foram observadas e registradas por fotos; e de forma quantitativa, pela observação do registro da perda de massa a cada ciclo finalizado.

3.4 Descrição petrográfica

Informações importantes à engenharia para conhecimento do comportamento da rocha podem ser fornecidas pela descrição petrográfica, em que é feita a classificação da rocha segundo sua composição mineral, caracterização das frações de minerais essenciais, acessórios e secundários, além do arranjo de disposição estrutural, aspectos texturais e o tipo de microfissuração presente nas amostras. Com essa análise, também é possível a identificação do grau de alteração da rocha, assim como os processos de alteração sofridos.

A análise petrográfica foi realizada em laboratório externo à UFV, por geólogo especializado, sob supervisão do orientador desta pesquisa, em lâminas petrográficas produzidas a partir de fragmentos da amostra no estado inicial (0 ciclos) - 4 lâminas, e na amostra ciclada (100 ciclos realizados), com 2 lâminas. Nos dados obtidos foram empregados os dois índices petrográficos propostos Irfan e Dearman (1978), denominados respectivamente, Índice Micropetrográfico (Imp) e Índice de Microfissuramento (Imf), como realizado por Jaques (2019), a fim de se caracterizar os estágios de intemperismo.

O índice micropetrográfico é definido pela razão entre percentuais de minerais de formação primária (formando o material são) e minerais secundários (considerados a porção de material alterado) descritos em cada lâmina analisada e, portanto, evidencia a condição da rocha quanto ao intemperismo químico. Um Imp alto retrata predominância de minerais que ainda não sofreram decomposição para suas formas mais estáveis, e assim, um menor grau de intemperismo químico.

O índice de microfissuramento corresponde à média do valor absoluto obtido na contagem do número de microfissuras e vazios que interceptam cada uma das linhas longitudinais traçadas para contagem na lâmina petrográfica analisada. Geralmente, são traçadas no mínimo de 3 a 5 linhas em cada lâmina. No presente trabalho foram traçadas 4

linhas de 10 milímetros por lâmina. Nesta avaliação foram consideradas apenas as microfissuras identificadas, excluindo venulações que podem ter sido fraturas preenchidas posteriormente também presentes na descrição das lâminas.

3.5 Índices Físicos

Propriedades índices são indicadores relativamente fáceis de serem obtidos e devido a essa facilidade são muito empregadas na diferenciação das variedades de rochas existentes, por refletirem características da matriz rochosa, como estruturas, texturas e composição (GOODMAN, 1989).

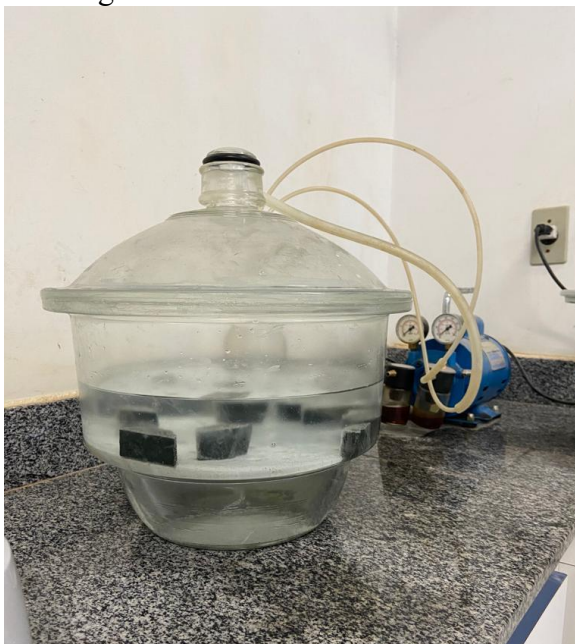
A caracterização física, obtida a partir da determinação da massa específica aparente, da porosidade aparente e da absorção de água aparente, permite, por meio de correlações empíricas inferir qualitativamente o comportamento da rocha quando submetida a esforços. Por exemplo, geralmente, maior porosidade e maior absorção de água tendem a estar associadas a menor resistência, enquanto maior densidade aparente geralmente indica maior rigidez. Tais correlações são essencialmente empíricas, variando conforme a litologia, o grau de alteração e a microestrutura do material. Portanto, não substituem a necessidade de ensaios mecânicos diretos para a caracterização confiável da resistência e da deformabilidade da rocha.

Neste trabalho, a caracterização física foi empregada para produção de indicadores a serem relacionados a alteração da rocha em estudo, uma vez que a variação destes pode ser consequência de uma mudança na estrutura interna, maior fissuração e modificações na composição mineral, devido ao processo de ciclagem acelerada.

O método de ensaio de flutuabilidade foi utilizado para a caracterização física da rocha, conforme a ISRM (2007). Na realização do ensaio foram selecionados no mínimo dez fragmentos de rocha resultantes da execução do ensaio de carga puntiforme, com massa de, no mínimo, 50 g cada. O procedimento do ensaio seguiu como o descrito a seguir:

- Saturação dos fragmentos em imersão em água, com utilização de um conjunto dessecador e bomba como mostrado na Figura 3.5, para produzir vácuo sobre o conjunto, por um período de pelo menos uma hora, com uma pressão não maior que 800 Pa (6torr).

Figura 3.5 – Fragmentos sendo saturados a vácuo.



Fonte: A autora.

- Em um cesto perfurado suspenso no fundo da balança e imerso em água, é feita a leitura da massa submersa da amostra (M_{sub}).
- Retirados os fragmentos têm sua superfície seca com um pano e, em seguida, é feita a leitura da massa dos fragmentos ao ar (M_{sss}).
- Espalhados em uma bandeja, são colocados em uma estufa capaz de manter a amostra a uma temperatura de $105 \pm 3^\circ\text{C}$, por pelo menos 24 horas, após esse período, é feita a leitura da massa da amostra seca em estufa (M_s).

3.5.1 Peso específico

O peso específico, definido como o peso da rocha por unidade de volume, está relacionado à sua constituição mineralógica, por refletir a densidade dos grãos dos minerais componentes e também ser indicativo da porosidade de uma rocha (GOODMAN, 1989). Em função da possibilidade de não conexão entre todos os poros, esta propriedade é classificada como sendo *aparente* ao se caracterizar rochas.

Durante o desenvolvimento da alteração na rocha, um dos efeitos observados é a redução do peso específico aparente, em razão do aumento da porosidade e também pela mudança de composição mineralógica, com minerais primários se decompondo em minerais secundários mais estáveis, o que pode significar uma variação da densidade dos grãos constituintes (LOPES, 2019).

Peso específico seco, γ_d , dado por:

$$\gamma_d = \frac{P_s}{V} \quad (3.1)$$

$$P_s = M_s \quad (3.2)$$

$$V = \frac{M_{SSS} - M_{sub}}{\rho_w} \quad (3.3)$$

Em que:

P_s - peso dos sólidos;

V - volume da amostra;

ρ_w – massa específica da água.

3.5.2 Porosidade

A porosidade de uma rocha é a razão de seu volume de vazios e o seu volume total, representada como n , uma constante adimensional. Também é denominada aparente, pelos mesmos motivos do peso específico.

Com o avanço do intemperismo, a porosidade aparente tende a aumentar, como consequência de um dos principais aspectos físicos de sua ação, que é a fissuração do maciço, reduzindo sua integridade. Por isso, a porosidade pode servir como um índice de qualidade da rocha, tendo também boa correlação com as propriedades mecânicas e o módulo de elasticidade (GOODMAN, 1989).

Porosidade aparente, n , dado por:

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 \quad (3.4)$$

$$V_v = \frac{M_{SSS} - M_s}{\rho_w} \quad (3.5)$$

Em que:

V_v - volume de vazios (ou poros);

V - volume total da amostra;

ρ_w – massa específica da água.

3.5.3 Capacidade de absorção d'água

A propriedade de capacidade de absorção d'água é estreitamente relacionada à porosidade, portanto, com o aumento do grau de intemperismo a elevação desse índice ocorre de forma proporcional ao aumento da porosidade, indicando uma mudança na estrutura interna, por surgimento de novos vazios ou expansão dos já existentes capazes de reter água, como observado em um estudo de perfil de intemperismo por Jaques (2019). Pelo mesmo motivo da massa específica e porosidade, também é denominada aparente.

Absorção d'água aparente, α , dado por:

$$\alpha = \frac{(M_{SSS} - M_s)}{M_s} \quad (3.6)$$

3.6 Velocidade de propagação de onda

A propagação de ondas elásticas em um material se dá através da transmissão da vibração entre partículas. A onda elástica de compressão, também chamada longitudinal, por se propagar no mesmo sentido em que provoca expansão ou contração do meio, é transmitida sem distorção da forma do material, podendo esse ser sólido ou fluido.

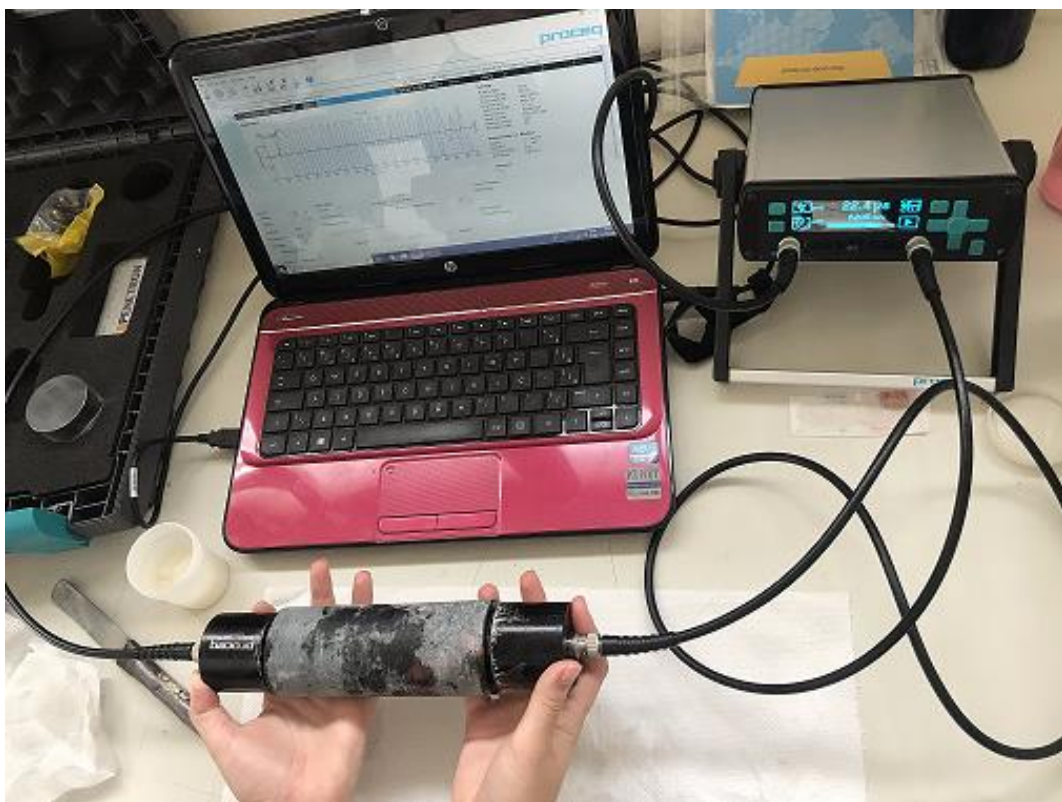
A velocidade de propagação da onda compressional nas rochas depende das suas propriedades elásticas, pois as forças que produzem a deformação dependem dessas constantes, e de sua densidade. Como apresentado em Goodman (1989), na prática as fissuras existentes em um espécime de rocha podem predominar sobre os efeitos anteriormente citados na velocidade de propagação da onda. Portanto, esse índice também pode ser utilizado para analisar grau de fissuramento e intemperismo, como é empregado neste trabalho, a fim de acompanhar o possível surgimento ou aumento de fissuras devido à ciclagem.

O ensaio de velocidade de propagação de onda é um ensaio não destrutivo, de simples execução, em que transdutores são posicionados nas extremidades do corpo de prova a ser atravessado pelo pulso de onda ultrassônica, como representado na Figura 3.6, sendo um transdutor o emissor do pulso e o outro receptor. O tempo gasto no percurso é determinado através de um osciloscópio no equipamento Pundit Lab+, no qual, o cálculo da velocidade é feito após a entrada do dado de comprimento longitudinal do corpo de prova testado, exibido

na interface do software do equipamento juntamente com a forma da onda propagada, como apresentado na Figura 3.7.

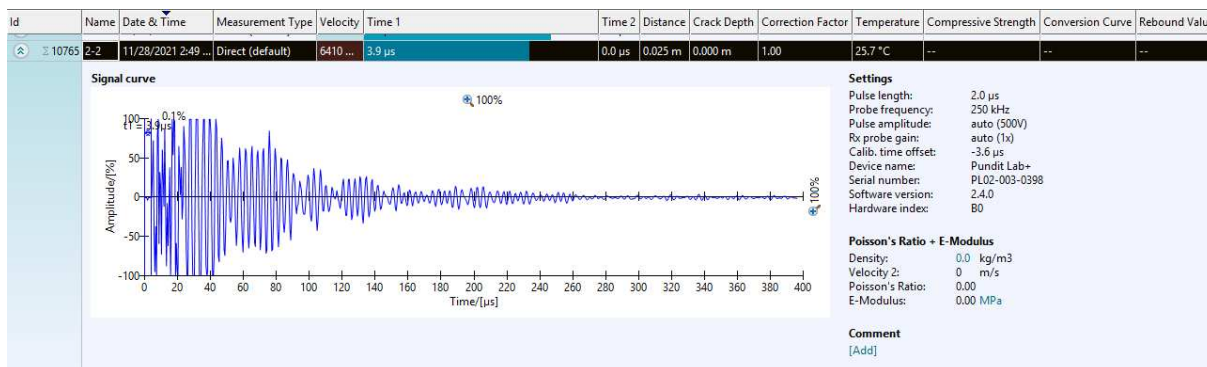
Os espécimes testados foram os mesmos utilizados no ensaio de compressão uniaxial e no ensaio de compressão a carga puntiforme, apesar destes últimos não atenderem as dimensões mínimas indicadas por ISRM (2007). Para análise do avanço do intemperismo e seus efeitos justifica o emprego do ensaio para comparação de valores iniciais e finais da amostra ao longo do processo de ciclagem.

Figura 3.6 - Montagem do ensaio de velocidade de propagação



Fonte: A autora.

Figura 3.7 – Forma da onda e velocidade de propagação na interface do software



Fonte: Punditlink.

3.7 Martelo de Schmidt

O ensaio de Martelo de Schmidt é um método que permite estimar a resistência à compressão uniaxial e o módulo de elasticidade das rochas, também podendo ser utilizado para estimativa de propriedades em paredes de descontinuidades, através da dureza da superfície ensaiada do material. Por ser portátil, simples, com baixo custo, não destrutivo para rochas classificadas pelo menos como moderadamente resistentes (>80 MPa) e com aplicabilidade em laboratório e em campo, tem se tornado mais popular e tendo a funcionalidade de suas correlações expandida (ISRM, 2014).

O método consiste na aplicação de um impacto em uma superfície, do material que se deseja caracterizar, transmitido por um êmbolo que se choca em um pistão no mecanismo interno do equipamento quando pressionado em um ponto na face ensaiada. Depois da distância máxima do deslocamento do êmbolo para o impacto, o mesmo retorna uma fração desse deslocamento, sendo este retorno proporcional à energia do impacto absorvida pelo material e é denominado rebote. A parcela de energia absorvida é dependente da propriedade de dureza do material de tal forma que, quanto maior a dureza da superfície, menor será a penetração do pistão, e então, maior será o valor do rebote (LOPES, 2019).

Neste trabalho, o ensaio foi realizado segundo o procedimento indicado pela ISRM (2014), utilizando o Martelo de Schmidt da Proceq, tipo L, indicado para corpos de prova de diâmetro NX como os utilizados, com 20 leituras de valores de Q, espaçados em pelo menos uma medida igual ao diâmetro do martelo e com distanciamento de um raio dos limites do corpo de prova para evitar a dissipação de energia em forma de onda ou fraturamento. Os espécimes foram apoiados em uma base de aço com um entalhe para garantir que estivessem totalmente

imóveis, como visto na Figura 3.8. Quando as dimensões do corpo de prova não permitiram que a 20 leituras fossem feitas de forma colinear, foi feita uma rotação diametral do mesmo.

Figura 3.8 - Configuração do ensaio de Martelo de Schmidt



Fonte: A autora.

3.8 Ensaio de resistência à compressão uniaxial

A representação da resistência de uma rocha em estado de compressão simples é muito empregada para classificação das rochas e em projetos de engenharia. Neste segundo contexto, é muito utilizada por reproduzir o estado de tensões a que uma rocha está submetida em situações como taludes de corte e pilares de mina (Azevedo & Marques, 2006). A possível exclusão de descontinuidades e estruturas que possam controlar o desempenho resistente de um maciço rochoso, devido ao efeito escala, faz com que o parâmetro de resistência obtido neste ensaio seja representativo de propriedade da matriz rochosa, mas ainda assim reflita características do estado do maciço, como seu grau de intemperismo, grau de fissuramento e composição mineralógica.

Na realização do ensaio, seguindo o procedimento indicado pela ISRM (2007), os 9 corpos de prova cilíndricos foram preparados com a relação altura e diâmetro (H/D) entre 2,5 e 3,0, com diâmetros NX próximos a 54 mm e base e topo retificados e paralelos, para se garantir a não ocorrência de concentração de tensões e tensões de tração, respectivamente.

Também como o recomendado, o carregamento uniaxial foi aplicado a uma carga constante de 0,5 MPa/s, sendo esse fator influente na resistência apresentada pela rocha, assim como a condição de umidade da amostra, neste caso em condição natural de teor de umidade.

A aplicação do carregamento foi feita pela máquina servocontrolada EMIC DL6000, com a montagem do ensaio apresentada na Figura 3.9. Durante este processo a medida da deformação axial foi por meio de Transformadores Diferenciais Lineares Variáveis (LVDT) até certo ponto antes da ruptura, em que o equipamento sinalizava a necessidade de retirada dos transformadores para evitar que algum dano fosse causado ao instrumento.

Figura 3.9 - Montagem ensaio de resistência a compressão com instrumentação para medida de deformação



Fonte: A autora.

O esquema de ciclos de descarregamento e carregamento foi executado para a obtenção do módulo de elasticidade através da inclinação da parte linear da curva de tensão x deformação da amostra, esta forma, segundo Azevedo e Marques (2006) faz com que a parte linear da curva de carregamento seja mais representativa do módulo de elasticidade propriamente, e não do módulo de deformação, como pode ocorrer na curva com apenas um carregamento. Os ciclos foram definidos quando atingidos os percentuais de 40%, 50% e 60% da tensão máxima

registrada em um corpo de prova da amostra rompido em compressão simples anteriormente. O cálculo do módulo de elasticidade (E) pela inclinação da reta foi feito a partir do gráfico de tensão x deformação conforme a Equação 3.7.

$$E = \frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\varepsilon_a} \quad (3.7)$$

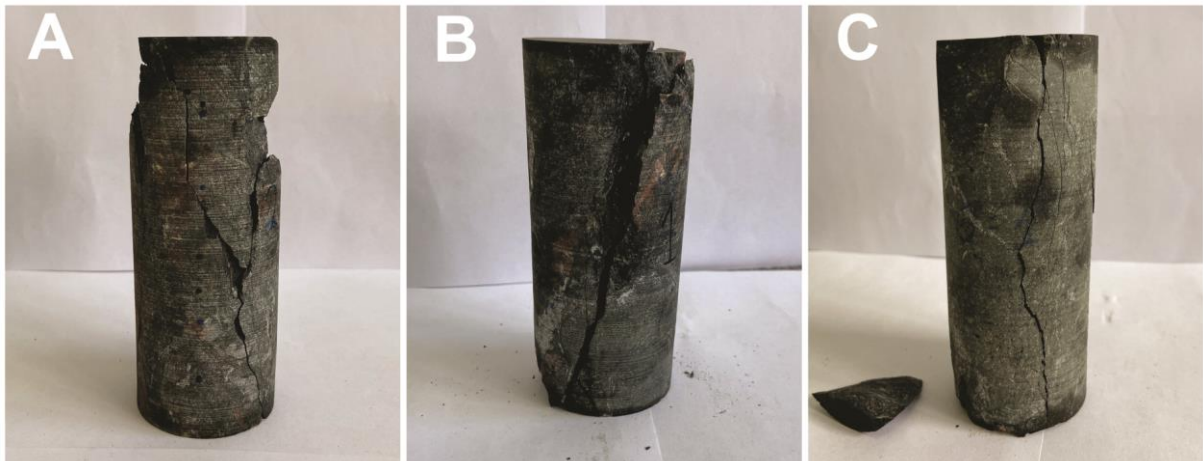
Em que:

$\Delta\sigma_c$ – variação da tensão expressa em MPa;

$\Delta\varepsilon_a$ – variação da deformação axial expressa em porcentagem.

Neste ensaio também deve ser feita a observação dos tipos de modo de ruptura apresentados pela amostra ensaiada, os três tipos básicos - fendilhamento, cisalhamento e cataclase, podem ocorrer de forma isolada ou combinada (Azevedo & Marques, 2006). Na Figura 3.10 são apresentados alguns corpos de prova para observação dos tipos de ruptura ocorrida.

Figura 3.10 - Modos de ruptura observados entre os corpos de prova ensaiados – A) Cataclase; B) Cisalhamento; C) Fendilhamento.



Fonte: A autora.

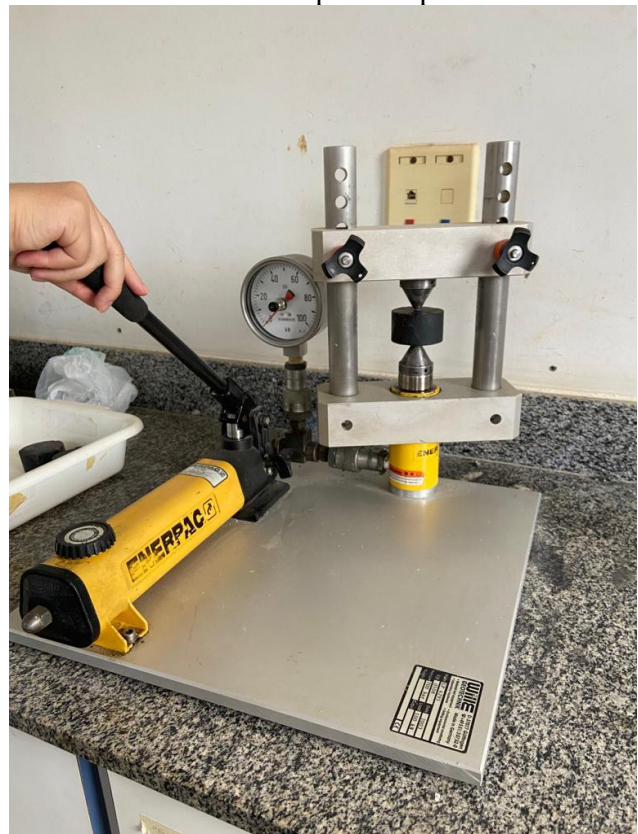
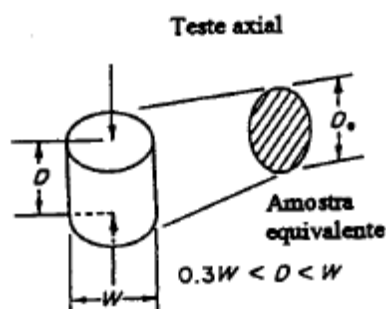
3.9 Ensaio de resistência à compressão puntiforme

A resistência à compressão puntiforme é obtida por meio de ensaio em que amostras de rocha são carregadas por ponteiros cônicos e a ruptura acontece pelo desenvolvimento de fraturas de tração paralelas ao eixo de carregamento. Caso esta ruptura ocorra em um plano que não inclua os dois pontos de aplicação da carga, não é considerada válida. Este teste, por ter

fácil execução, rápida, mais simplificada e permitir uma variação maior das formas dos blocos ensaiados que o ensaio de compressão uniaxial tem sua aplicação muito recorrente. Como resultado é obtido o Índice de resistência à carga pontual ($I_{s(50)}$), que pode ser empregado diretamente para classificação da rocha quanto à resistência e pode ser correlacionável com o parâmetro de resistência à compressão uniaxial (MARQUES et al. 2015).

Mesmo permitida a realização do teste com amostras de formas regulares e irregulares, com as dimensões que se enquadrem nas relações necessárias para configuração do ensaio, o cálculo do $I_{s(50)}$ é padronizado para amostras cilíndricas com o diâmetro D igual a 50 mm em teste diametral, sendo exigido a definição de um diâmetro equivalente D_e para configurações de teste axial e bloco (regular ou irregular), que corresponda a uma seção de uma amostra equivalente com área igual a seção transversal real do corpo de prova ensaiado, como esquematizado na Figura 3.11a.

Figura 3.11 – Configuração axial do ensaio de resistência à compressão puntiforme.



Fonte: A) Adaptado de ISRM (2007); B) A autora.

Todos os corpos de prova foram ensaiados na configuração de teste axial, como visto na Figura 3.11b, portanto o cálculo do Índice de resistência à carga pontual, $I_{s(50)}$, foi feito como se segue:

$$I_{s(50)} = F \frac{P}{D_e^2} \quad (3.8)$$

$$F = \left(\frac{D_e}{50} \right)^{0,45} \quad (3.9)$$

$$D_e^2 = \frac{4A}{\pi} \quad (3.10)$$

Em que:

F – Fator de correção de tamanho;

P – Carga de ruptura;

D_e – Diâmetro equivalente para a configuração de teste axial, em $A = WD$.

Os testes de resistência à compressão puntiforme foram realizados nos corpos de prova da amostra no estado inicial e no estado alterado, resultante da ciclagem acelerada em sulfato de sódio, para análise de perda de resistência com avanço da alteração. A amostra não apresentava foliação, então os corpos de prova foram todos obtidos apenas em uma direção.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização da rocha em condição sã

A caracterização do estado de intemperismo inicial da amostra, necessária para comparação do resultado alcançado com o ensaio de ciclagem, foi realizada com a execução dos ensaios propostos para a avaliação do avanço do intemperismo, e também, determinação dos parâmetros de dureza da rocha, resistência à compressão uniaxial e o módulo de elasticidade.

Em uma análise macroscópica anterior aos ensaios laboratoriais, com foco nas características de cor, brilho dos minerais, porosidade e superfície das discontinuidades, foi feita a classificação qualitativa do grau de alteração da rocha, de acordo com as classes de alteração da ISRM (1981), apresentadas no Quadro 4.1. As rochas no estado em que foram recebidas foram classificadas no grau W1, com minerais sem sinal de descoloração e sem visualização da existência de poros.

Quadro 4.1 – Classificação do estado de intemperismo para maciço e matriz rochosa.

Classe	Denominação	Descrição
W1	Rocha sã	Nenhum sinal visível de alteração do material. Pode ocorrer alguma leve descoloração nas paredes da discontinuidade principal
W2	Rocha levemente intemperizada	Descoloração indica alteração da rocha e das discontinuidades. A rocha pode estar toda descolorida e pode estar menos resistente que no estado sã.
W3	Rocha moderadamente intemperizada	Menos da metade da rocha está decomposta e/ou desintegrada em solo. Rocha sã ou descolorida forma arcabouço descontínuos ou como núcleos pétreos.
W4	Rocha muito intemperizada	Mais da metade da rocha está decomposta e/ou desintegrada em solo. Rocha sã ou descontínua em forma de arcabouço descontínuo ou como núcleos pétreos.
W5	Rocha completamente intemperizada	Toda a rocha está decomposta e/ou desintegrada em solo. A estrutura original do maciço ainda está conservada.
W6	Solo residual	A rocha está toda transformada em solo. A estrutura da rocha e do maciço estão destruídos. Há grande variação do volume, mas o solo não foi transportado.

Fonte: ISRM (1978).

4.1.1 Descrição petrográfica

Após a descrição petrográfica, na qual foram analisadas quatro lâminas, três destas foram classificadas como metabasalto hidrotermalizado e uma como basalto rico em clorita, cujas características são descritas a seguir conforme a classificação feita pelo responsável pela análise petrográfica.

Para fins deste estudo, a classificação da rocha é adotada de forma unificada como metabasalto hidrotermalizado, considerando que a composição mineralógica foi basicamente a mesma em todas as lâminas, todas não apresentaram foliação e a principal diferença observada foi apenas o maior percentual de clorita presente na lâmina B,

4.1.1.1 Metabasalto hidrotermalizado

Em geral, as lâminas com rocha classificada como um metabasalto hidrotermalizado são constituídas por: clorita (Fe-Mg em sua maioria, Chl), feldspatos (Plagioclásio e K-Feldspato, Fd) e quartzo (Qtz), como minerais essenciais; titanita (Ttn), epidoto (Ep), minerais opacos (Op), zircão (Zr), apatita (Apt) e carbonato (Cb), como minerais acessórios; sericita (Ser), carbonato (Cb) e argilominerais (Argila), como minerais secundários. A Tabela 4.1 apresenta o modal de composição com os percentuais médios obtidos nas visadas em cada lâmina.

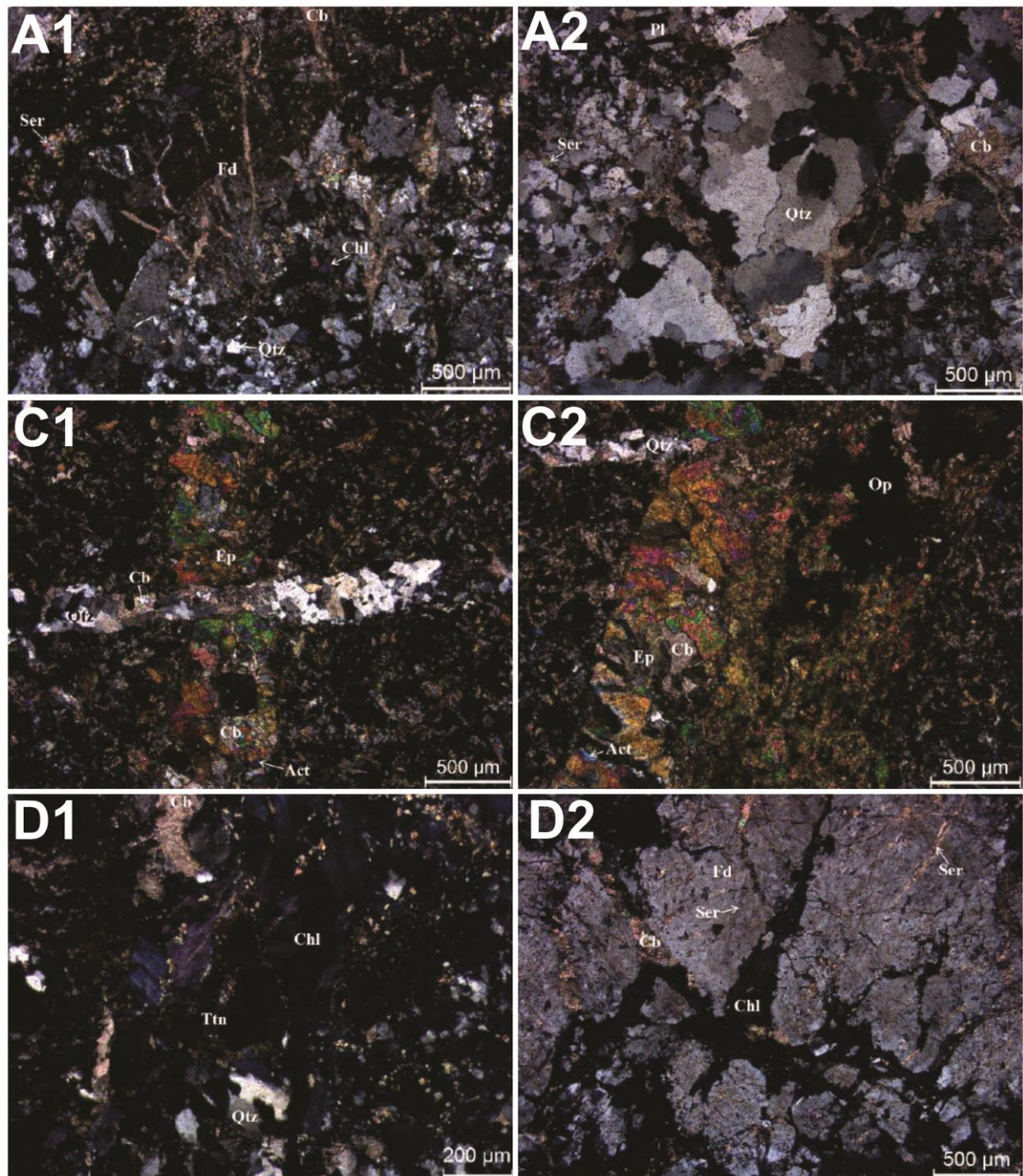
Tabela 4.1 – Modal de composição mineralógica das lâminas.

Lâmina	Qtz	Fd	Ttn	Op	Apt	Zr	Chl	Act	Ep	Ser	Cb	Argila
A	7	51	2	1	<1	<1	19	-	1	9	9	1
C	1	42	4	1	-	<1	7	15	7	6	16	1
D	23	27	2	1	<1	<1	41	-	<1	2	3	1

A rocha analisada apresenta estrutura sem foliação presente, com cristais de clorita decussados pela rocha. Com textura inequigranular porfiroclástica e matriz de granulação fina a média (sempre menor que 1 mm) e cristais maiores, de granulação média (entre 1 e 2 mm).

Venulações ocorrem no que podem ter sido antigas fraturas, muitas vezes interconectadas, cortando a rocha sem orientação preferencial. Encontram-se preenchidas por cristais de carbonato e clorita (minoria), ocorrendo de forma intergranular (maioria) e intragranular, aspectos que podem ser observados nas imagens microscópicas da Figura 4.1. Em algumas regiões é possível observar quartzo intercalado ao carbonato no preenchimento de venulações. Também são observadas algumas pequenas fraturas sem preenchimento com a mesma direção destas venulações.

Figura 4.1 – Imagens em luz transmitida com polarizadores cruzados - A1) Porfiroclasto de feldspato cortado por venulações de carbonato; A2) Bolsão de quartzo cortado por venulações de carbonato; C1) Diferentes venulações na rocha; C2) Venulação espessa composta por epidoto, actinolita, quartzo, carbonato e minerais opacos; D1) Textura geral da rocha; D2) Cristal de feldspato porfiroclástico fraturado, com as fraturas preenchidas por clorita e carbonato.



O quartzo ocorrendo algumas vezes em bolsões e aglomerados e os carbonatos podem ser devido a um processo hidrotermal tardio, responsável por esse enriquecimento. Na literatura, Zucchetti (2007) em seu estudo das “Rochas máficas do Grupo Grão Pará e a relação com a mineralização de ferro dos depósitos N4 e N5, Carajás, PA” relata o processo de alteração

hidrotermal hematítica dos metabasaltos com difusão do fluido hidrotermal pelos planos de falha e de contato entre jaspilitos e basaltos e também nas amígdalas presentes nos metabasaltos servindo de canal para a passagem, o que concorda com a descrição petrográfica que indica enriquecimento de quartzo e carbonatos que ocorrem em “bolsões” e preenchendo fraturas.

4.1.1.2 Basalto rico em clorita

A lâmina com uma rocha classificada como um basalto rico em clorita (Chl) é constituída por: clorita (Fe-Mg e Mg) e feldspatos (Plagioclásio e K-Feldspato - Fd), como minerais essenciais; titanita (Ttn), quartzo (Qtz), epidoto (Ep), minerais opacos (Op), actinolita (Act) e carbonato (Cb), como minerais acessórios; sericita (Ser), carbonato (Cb) e argilominerais (Argila), como minerais secundários, com o modal de composição exposto na Tabela 4.3.

Tabela 4.2 – Modal de composição mineralógica da lâmina.

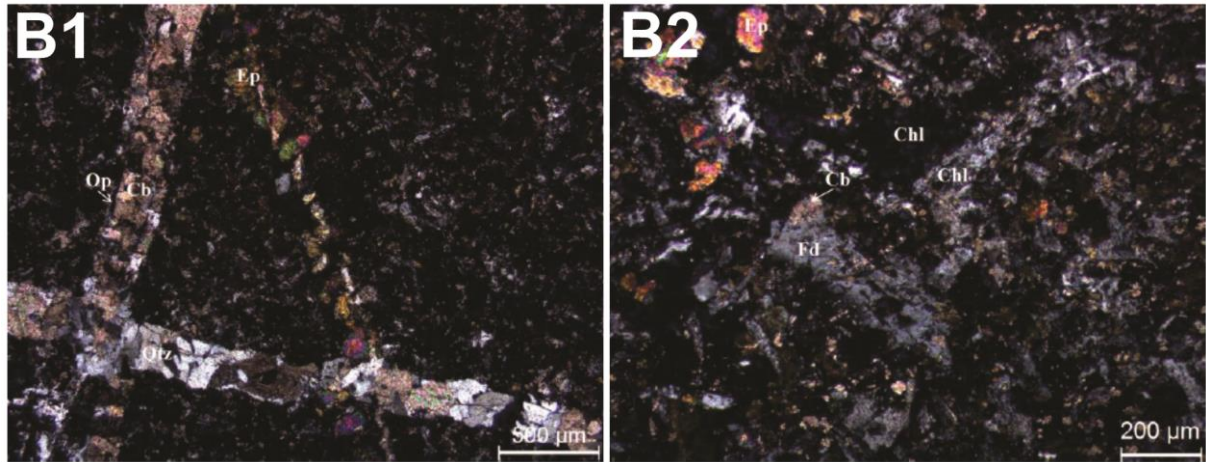
Lâmina	Qtz	Fd	Ttn	Op	Apt	Zr	Chl	Act	Ep	Ser	Cb	Argila
B	2	27	4	1	-	-	53	< 1	3	3	6	1

Apt – Apatita; Zr - Zircão.

Observa-se que a composição mineralógica é basicamente a mesma dos basaltos hidrotermalizados, mas com maior presença de clorita. Assim como nas outras lâminas, também não há presença de foliação, com cristais de clorita decussados pela rocha. Apresenta textura equigranular com matriz variando em granulação de fina a média (sempre menor a 1 mm) e raros cristais de granulação média (entre 1 e 4 mm).

Famílias diferentes de venulações ocorrem nesta rocha, tendo sido identificadas quatro principais e algumas finas derivando das principais, muitas vezes se interceptando, com quartzo presente em todas em diferentes concentrações e cristais de carbonato que são tardios nestas venulações, como pode ser visto nas imagens da Figura 4.2. As relações entre estas são complexas e não foi possível se determinar uma ordem de formação precisa.

Figura 4.2 – Imagem transmitida com polarizadores cruzados – B1) Venulações da segunda, terceira e quarta famílias; B2) Aspecto dos maiores cristais de feldspato da rocha.



4.1.2 Índices Físicos

O valor inicial do ensaio de caracterização dos índices físicos é apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Dados do ensaio de índices físicos.

Massa sss (g)	Massa seca (g)	Massa sub (g)	Vv (cm ³)	Volume (cm ³)	n (%)	γ (kN/m ³)	Ab (%)
785.36	784.36	498.83	1.00	286.53	0.35	26.85	0.13

Baixos valores de porosidade aparente, entre 1% e 2%, são comuns em rochas metamórficas, em que a porosidade depende principalmente das fissuras em sua origem (Marques et al., 2020). Os valores observados na amostra estudada são menores que a maior parte dos encontrados em outros trabalhos na caracterização de basalto em estado são, como Gupta e Rao (1998) no basalto de Nagpur – Índia; Oliveira (2012) nos basaltos dos grupos densos cinza da região da Usina de Itaipu no sul do Brasil; Gomes (2007) em basaltos maciços em Ribeirão Preto – São Paulo, respectivamente com os valores de 0,66%, 0,75% e 0,60%. Em Moon e Jayawardane (2004) é encontrado um valor próximo de porosidade, sendo de 0,32% para o basalto são de Karamu, Nova Zelândia.

O valor de peso específico seco é um pouco menor que o valor de 27,1 kN/m³ apresentado como característico para basaltos por Goodman (1989), e um pouco abaixo também de todos os valores registrados para os basaltos de baixa porosidade anteriormente citados. Gupta e Rao (1998), Oliveira (2012), Gomes (2007) e Moon e Jayawardane (2004), respectivamente obtiveram os valores de 29,6 kN/m³, 29,6 kN/m³, 29,2 kN/m³ e 28,1 kN/m³. O menor valor apresentado pela rocha pode ser devido ao processo de alteração hidrotermal

sofrido, apontado na descrição petrográfica, com modificação dos componentes químicos e reflexo no seu valor de peso específico.

4.1.3 Velocidade de propagação de onda

Os dados resultantes no ensaio de velocidade de propagação de onda nos corpos de prova, os mesmos testados no ensaio de compressão uniaxial, são apresentados na Tabela 4.4, sendo a velocidade média de propagação de 6210 m/s.

Tabela 4.4 – Valores de velocidade longitudinal – V_p .

CP	V_p (m/s)
1	6157
2	6154
3	6205
4	6250
5	6250
6	6157
7	6295
8	6205
9	6215
Média	6210

Em Goodman (1989), é apresentada a faixa típica de valores de 6500 – 7000 m/s para velocidade de propagação em basaltos, já em Schön (2015) a amplitude de valores de velocidade longitudinal para basaltos apresentada é de 4500 – 6200 m/s. Tais variações entre diferentes tipos de basalto se devem principalmente à diferença de composição mineralógica e consequente diferença de densidade dos minerais constituintes, que reflete na variabilidade das velocidades de propagação nas rochas.

4.1.4 Martelo de Schmidt

Conforme ISRM (2014), nenhum ponto de leitura foi descartado, visto que as propriedades correlacionáveis com este parâmetro, resistência à compressão uniaxial e o módulo de elasticidade, são relacionadas à densidade, distribuição e conectividade dos elementos microestruturais fracos, portanto, toda a amplitude de valores de rebote deve ser considerada para refletir a natureza heterogênea e a eventual variação dos valores destas propriedades mecânicas.

Os valores de Q obtidos na leitura com o equipamento eletrônico utilizado foram corrigidos para a obtenção do valor R, o rebote propriamente dito. A diferenciação dos valores

existe, pois no equipamento de esclerômetro eletrônico para que não houvesse influência da direção de aplicação do impacto no resultado obtido, como ocorre no equipamento mecânico, o valor registrado não é diretamente o comprimento de rebote do êmbolo e sim, um registro baseado na velocidade de rebote. Winkler e Matthews (2014) propõem uma conversão de valores entre Q e R, que possui boas respostas para valores de Q maiores que 40, como as médias obtidas nas amostras deste trabalho e, portanto, foi a utilizada para obtenção de R, resultando nos valores apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Valores obtidos no ensaio de Martelo de Schmidt.

Repetições	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10	CP11
1	43.5	44.5	57.0	35.0	45.0	40.5	39.5	32.0	37.0	32.0	39.0
2	52.5	48.0	56.0	48.5	48.5	47.0	51.0	50.5	49.0	43.0	55.5
3	54.5	51.0	60.5	56.5	58.5	49.5	54.0	50.0	47.5	53.0	60.5
4	61.0	49.0	51.5	56.5	60.5	49.0	47.5	42.0	51.5	52.5	52.0
5	66.0	47.0	41.5	61.5	58.5	33.5	36.5	34.5	38.5	34.5	39.5
6	66.0	42.5	60.0	53.0	54.0	33.5	34.5	38.0	32.0	35.0	37.5
7	62.5	53.0	59.0	56.5	44.5	48.5	50.5	49.0	49.5	41.5	47.0
8	60.5	52.5	58.5	54.5	52.0	47.5	53.0	45.5	55.0	54.0	53.5
9	49.0	58.5	56.0	52.5	55.5	41.0	45.5	47.0	42.5	46.0	44.5
10	42.0	52.0	45.0	38.5	50.5	38.0	36.5	32.5	38.5	37.0	36.5
11	47.0	42.0	57.0	48.0	52.0	42.0	33.0	42.0	41.5	35.5	40.5
12	54.5	47.0	53.0	54.0	61.5	52.0	38.5	51.5	41.5	48.0	47.0
13	58.5	54.0	57.5	63.0	58.5	52.5	51.0	52.5	56.0	53.5	56.0
14	64.5	59.5	51.5	55.0	58.5	52.0	42.5	38.5	53.0	51.5	41.5
15	64.0	49.0	39.5	63.0	57.5	38.0	36.0	34.5	35.0	39.5	38.0
16	62.5	44.0	54.5	62.0	58.5	35.5	32.5	35.0	35.0	36.0	41.0
17	58.5	49.0	58.5	61.0	64.5	45.0	46.5	44.0	50.5	53.0	49.5
18	59.0	49.5	62.0	58.0	57.5	53.0	49.5	58.5	55.0	46.5	51.5
19	49.0	52.5	52.0	54.5	49.5	45.0	46.5	41.5	49.0	50.0	45.0
20	41.0	47.0	38.5	45.5	44.5	37.0	34.0	32.5	43.5	34.5	40.0
Valor médio (Q)	55.8	49.6	53.5	53.9	54.5	44.0	42.9	42.6	45.1	43.8	45.8
Fator de correção	0.93										
Valor corrigido (Q)	51.9	46.1	49.7	50.1	50.7	40.9	39.9	39.6	41.9	40.8	42.6
Média	44.9										
Desvio padrão	4.8										
Valor corrigido (R)	43.30	37.51	41.12	41.49	42.09	32.33	31.33	31.01	33.31	32.17	33.98

Média	36.3
Desvio padrão	4.8

O baixo valor de desvio padrão observado pode estar relacionado ao nível de intemperismo da rocha, caracterizada como não intemperizada ou levemente intemperizada, com reduzida presença de vazios e microfissuras, sendo a heterogeneidade dos minerais a responsável pela maior diferença dos valores de dureza da rocha obtidos em cada ponto ensaiado da sua superfície. O valor médio de rebote obtido é bem próximo do relatado em Moon e Jayawardane (2004) de 33 ± 7 , para um basalto também caracterizado com baixa porosidade.

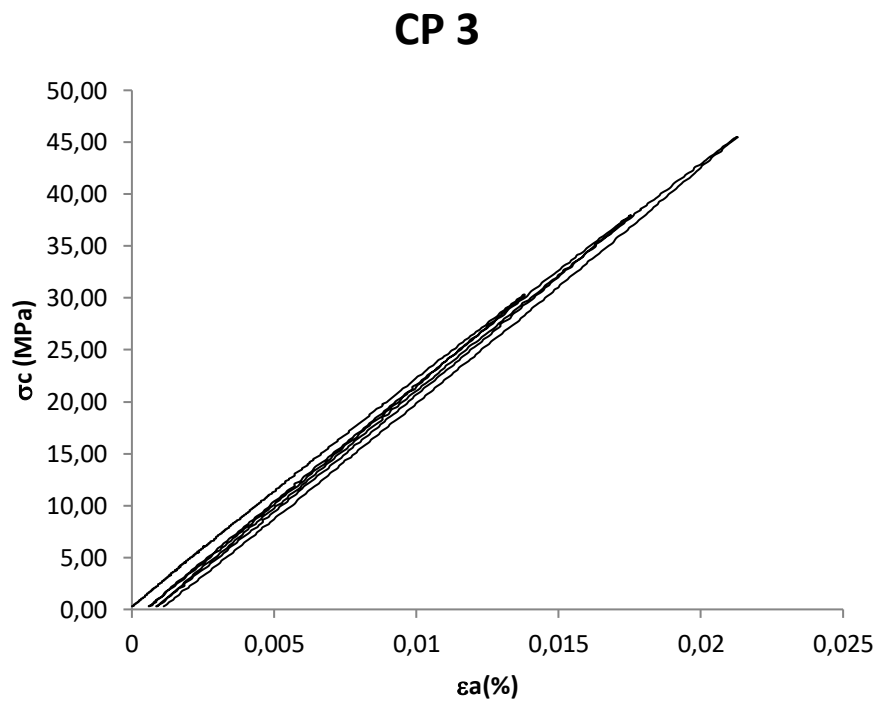
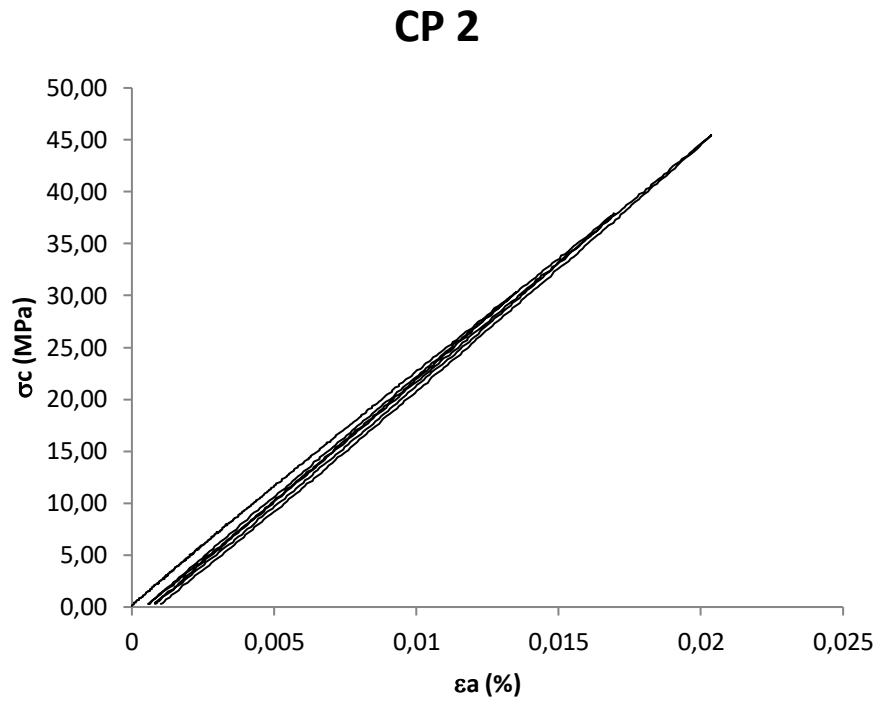
4.1.5 Resistência à compressão uniaxial

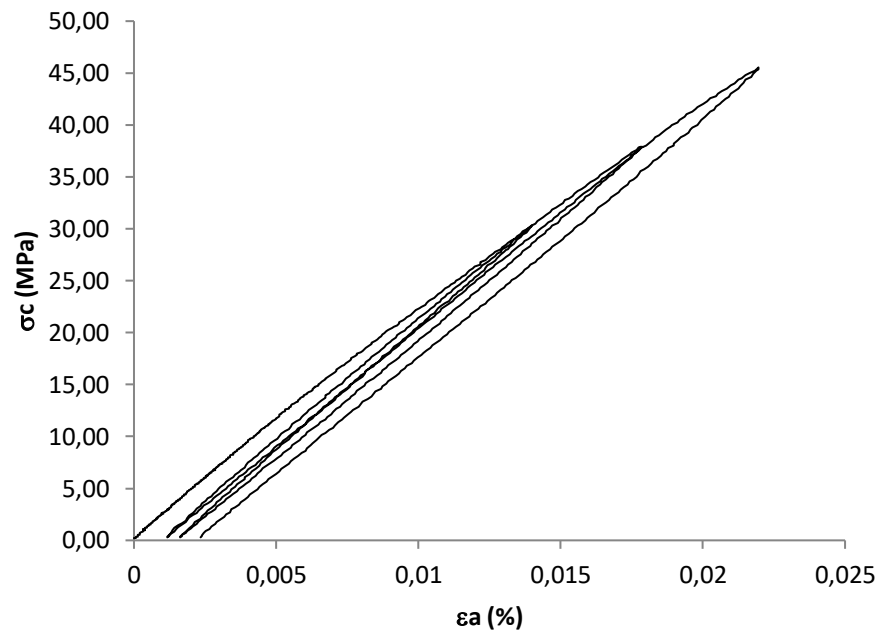
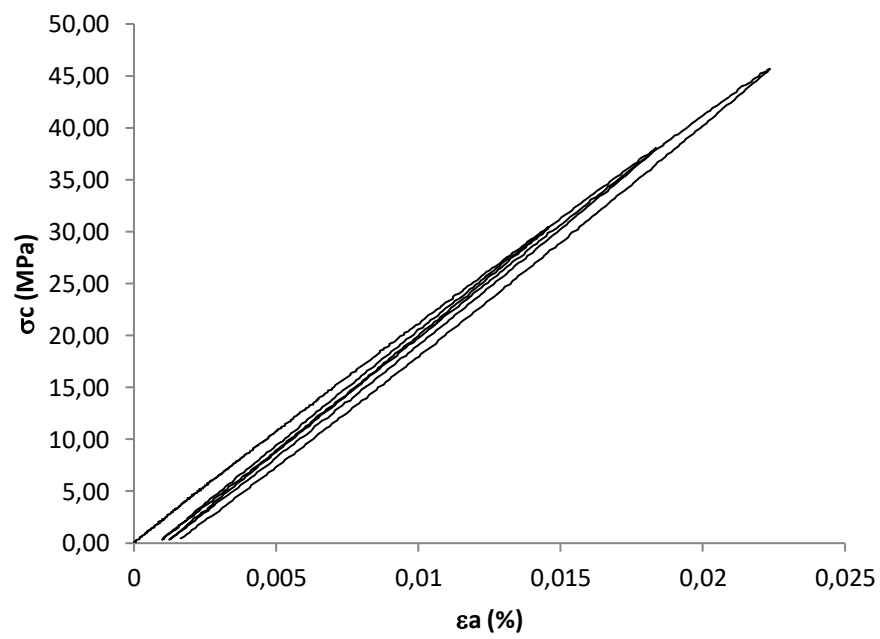
O ensaio de compressão uniaxial feito com o intuito de caracterização da resistência à compressão uniaxial e de um dos parâmetros das propriedades elásticas da rocha, o módulo de elasticidade, tem como resultado não apenas o registro da força máxima resistida pela amostra, mas também um trecho da curva tensão x deformação para obtenção do módulo com foco na parte linear da curva de carregamento. Portanto, os valores de resistência máxima à compressão (σ_c) e módulo de elasticidade (E) são apresentados na Tabela 4.7 e as curvas resultantes do ensaio na Figura 4.4.

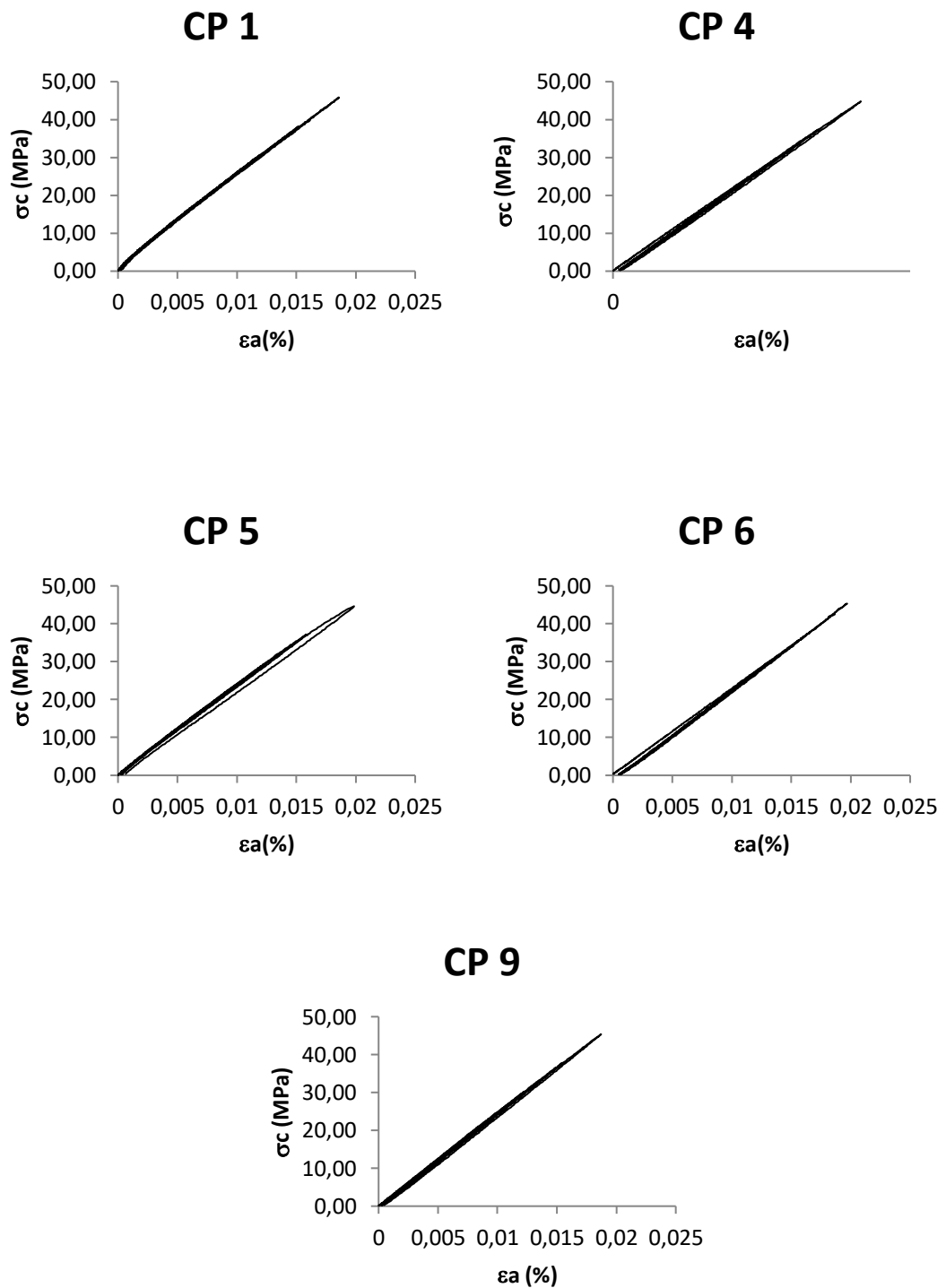
Tabela 4.6 – Valores de resistência a compressão uniaxial e módulo de elasticidade.

CP	σ_c (MPa)	E (GPa)
1	86.27	236.56
2	76.39	222.22
3	98.01	226.60
4	117.03	220.46
5	46.05	233.52
6	56.74	237.23
7	51.97	225.91
8	84.22	222.12
9	108.00	248.78

Figura 4.3 – Curvas de tensão x deformação axial.



CP 7**CP 8**



Os valores de resistência à compressão máxima obtidos nos corpos de prova resultaram no valor de resistência média de 80,52 MPa, com desvio padrão de 25,06 MPa. O alto valor de desvio pode ser justificado pela rocha ensaiada não ser completamente isotrópica e apresentar macroscopicamente e também nas descrições das lâminas, presença de venulações e fissuras preenchidas com diferentes minerais, além de diferença de composição mineralógica entre os blocos que compõem a amostra em estudo. Para o módulo de elasticidade da rocha foi obtida

média de 230,38 GPa, com desvio padrão de 9,36 GPa e é observado o comportamento próximo de um comportamento elástico, por apresentar baixíssimas deformações residuais demonstrada nos ciclos de carregamento e descarregamento.

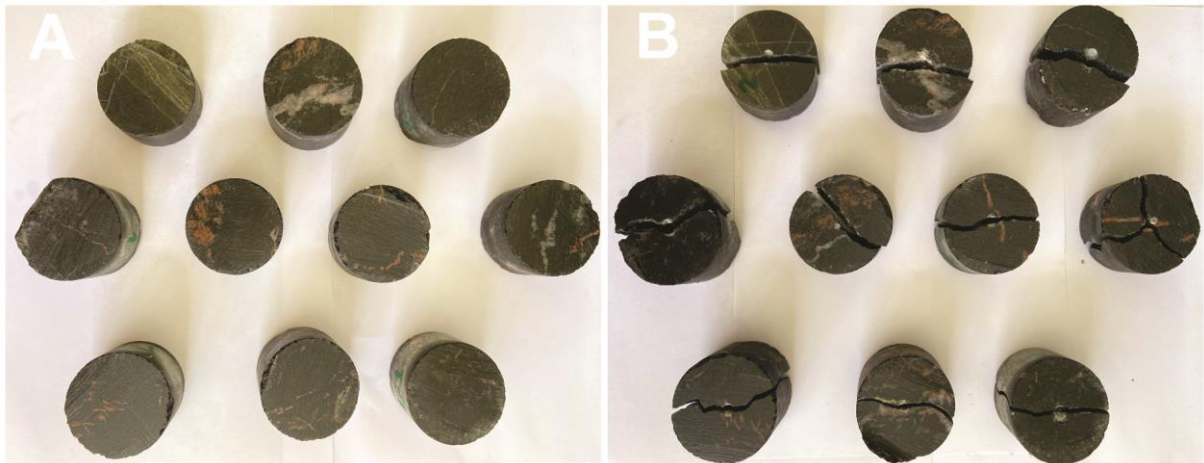
4.1.6 Resistência à carga puntiforme

Para a determinação do Índice de carga puntual, $I_{s(50)}$, usado na obtenção da resistência inicial da amostra, anterior à ciclagem, foram ensaiados 10 corpos de prova, com seus valores apresentados na Tabela 4.7 e, conforme ISRM (2007) para o cálculo do valor médio, os dois maiores e os dois menores valores foram desconsiderados. Todas as rupturas ocorreram de forma válida, já que, da observação das faces internas não foi constatada presença de estruturas parciais. Os corpos de prova ensaiados são exibidos na Figura 4.4 – Corpos de prova ensaiados e rompidos.

Tabela 4.7 – Valores de $I_{s(50)}$ dos 10 corpos de prova ensaiados

CP	Índice $I_{s(50)}$ de resistência para $D=50\text{mm}$ (MPa)
1	2.50
2	3.10
3	2.39
4	5.04
5	3.51
6	2.71
7	3.76
8	4.65
9	4.82
10	9.12
Valor médio do $I_{s(50)}$ descontando valores distantes da média (MPa)	3.76

Figura 4.4 – Corpos de prova ensaiados e rompidos



Fonte: A autora.

4.1.7 Correlação dos parâmetros de resistência

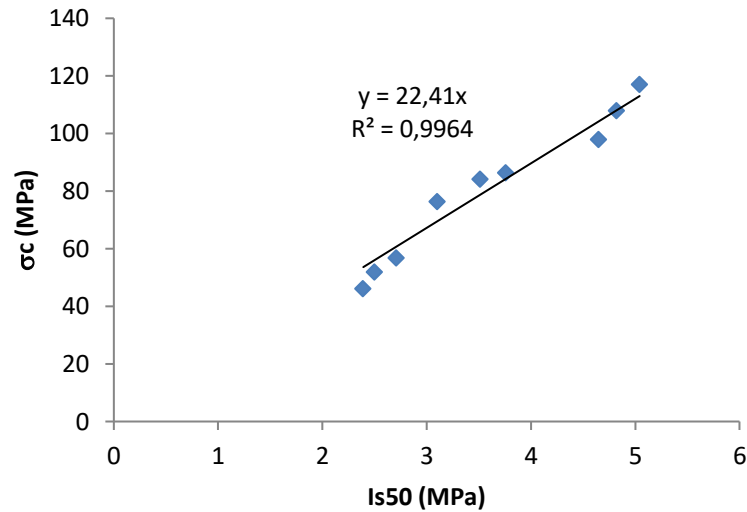
4.1.7.1 Correlação de resistência à compressão uniaxial e resistência à carga puntiforme

Inicialmente, o teste de resistência a carga puntiforme era utilizado principalmente para prever a resistência à compressão uniaxial, parâmetro de resistência utilizado para a classificação de rochas quanto à sua resistência. Mais tarde, por se tratar de uma correlação apenas aproximada, o índice de resistência à compressão puntiforme passou a ser empregado diretamente para classificação quanto à resistência (ISRM, 2007). Entretanto, empiricamente, por meio de uma relação linear proposta por Bieniawski (1989), o valor do Índice de resistência à compressão puntiforme ($I_{s(50)}$) ainda é frequentemente correlacionado ao valor resistência à compressão uniaxial (q_u), por meio da Equação 4.1:

$$q_u = a I_{s(50)} \quad (4.1)$$

Para correlação dos dados de resistência à compressão uniaxial e resistência à compressão puntiforme, foi gerado o gráfico com os dados obtidos na caracterização inicial da amostra. Como apresentado no gráfico na Figura 4.5, foi obtida a equação $\sigma_c = 22,41.I_{s(50)}$ e um $R^2 = 0,96$, que indica bom ajuste do modelo linear a correlação.

Figura 4.5 – Gráfico de correlações de resistência para metabasalto em estudo

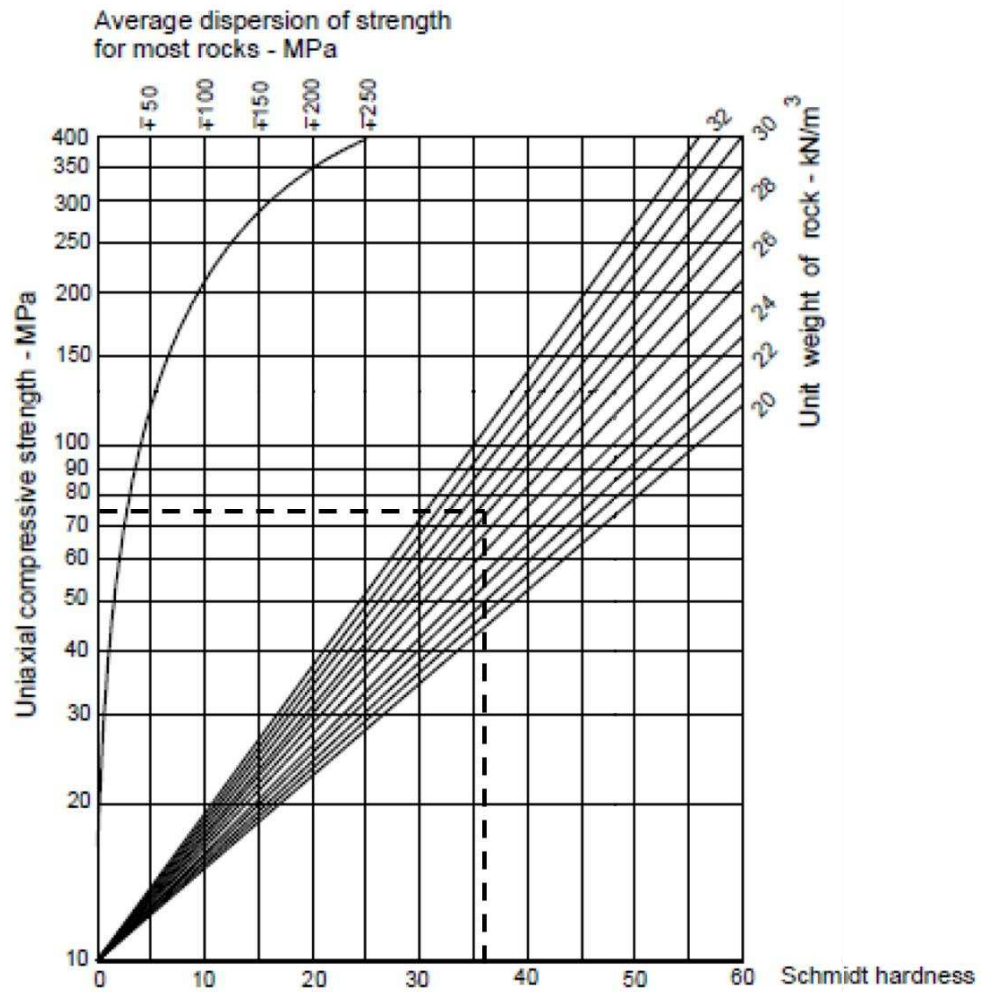


O valor de a obtido se encontra na faixa de valores médios, que segundo ISRM (2007) é de a resistência à compressão uniaxial ser 20-25 vezes o valor de resistência à compressão puntiforme. Pelo exposto, é considerado possível utilizar os ensaios de compressão puntiforme para prever a resistência à compressão uniaxial para as rochas estudadas.

4.1.7.2 Correlação do valor de rebote e resistência à compressão uniaxial

Para a correlação do valor de rebote obtido com o valor de resistência à compressão uniaxial das amostras ensaiadas, foi utilizado o ábaco de Deere e Miller (1966), apresentado na Figura 4.6, com os dados de entrada de massa específica como 27 kN/m^3 e valor de rebote 36,3. O valor estimado pela correlação no ábaco é de, aproximadamente, 75 MPa, valor próximo ao valor médio de resistência à compressão uniaxial obtido diretamente no ensaio que foi de 80,5 MPa, indicando uma boa estimativa com o uso do ábaco.

Figura 4.6 – Ábaco de Deere e Miller (1966) com as informações plotadas



Fonte: Lopes, 2019.

4.2 Ciclagem acelerada com imersão em sulfato de sódio

Este ensaio direto de alteração em laboratório permitiu acompanhar as modificações na amostra quando submetidas às condições de ensaio, com a finalidade de se inferir o comportamento do material quando exposto ao intemperismo. Neste tópico, antes de avaliações da variação nas propriedades físicas e mecânicas da rocha, são apresentados os dados quantitativos e qualitativos averiguados durante todo processo de ciclagem acelerada.

Os dados quantitativos de perda de massa são apresentados na Tabela 4.8 em percentual de perda de massa relativa nos intervalos de ciclos, para que a retirada de corpos de prova para a avaliação das propriedades não fosse considerada no valor.

Tabela 4.8 – Dados de perda de massa em percentual.

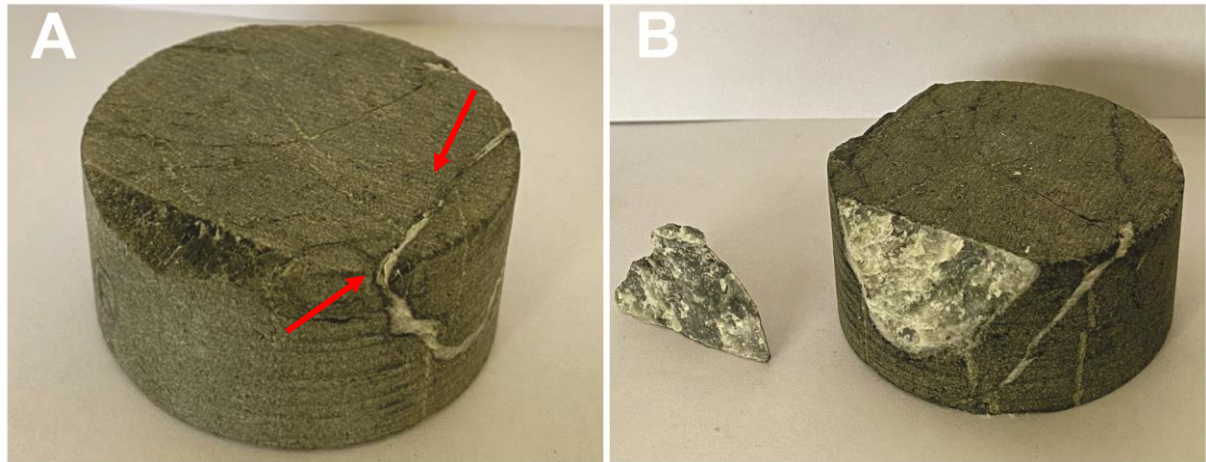
Intervalo de ciclos	Exame quantitativo Perda de massa relativa (%)
0 – 10	0.09
10 – 20	0.06
20 – 30	0.01
30 – 40	0.05
40 – 50	0.03
50 – 60	0.02
60 – 70	0.00
70 – 80	0.03
80 – 90	0.11
90 – 100	0.02

A redução do número de corpos de prova expostos à alteração ao longo dos ciclos, devido à retirada de 10 corpos de prova a cada estágio de avaliação, pode ter contribuído para a redução do percentual de perda de massa em razão da diminuição do volume de amostra exposta, mas a tendência de maior perda nos ciclos iniciais também foi observada em outros trabalhos de avaliação da alteração, como Santiago (2008) para a ciclagem água-estufa e acelerada com etilenoglicol em rochas básicas intrusivas e Oliveira (2012) na ciclagem água-estufa em basaltos, ambos com uma baixa perda de massa verificada.

A precipitação de sal na superfície e nos poros acessíveis dos corpos de prova pode ter interferido na avaliação da perda de massa relativa, ao mascarar o desgaste em função do ganho de massa proporcionado pelo sal. Ressalta-se que a ausência de lavagem entre os ciclos teve como objetivo não comprometer a impregnação ou absorção do sal nos corpos de prova, favorecendo o ataque químico à rocha.

O maior percentual de redução, observado no intervalo dos 80 aos 90 ciclos, foi devido à desagregação no corpo de prova nº 9 verificada no ciclo 85. Como visto na Figura 4.7, o lasqueamento de parte da amostra ocorre em uma massa já cortada por um veio de composição mineral diferente, segundo a descrição petrográfica, composto provavelmente por quartzo e/ou carbonatos, que possivelmente, em razão da diferença mineralógica e consequente diferença nos coeficientes de dilatação, propiciou uma maior fissuração e abertura para o ataque do sulfato de sódio, sendo essa observação recorrente nos corpos de prova que continham veios aparentes.

Figura 4.7 – Corpo de prova n° 9: A) Ciclo 65; B) Ciclo 85.

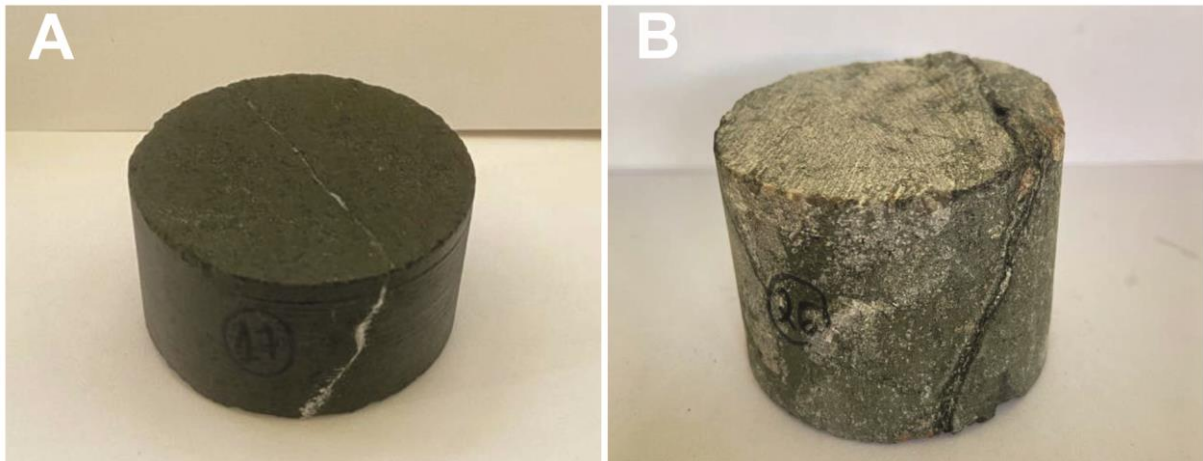


Fonte: A autora.

Na Figura 4.7A, é apresentado o registro do corpo de prova no ciclo 65, em que é observada a presença de abertura nos contatos com o veio, que permitiram maior penetração do sulfato e se propagaram até o lasqueamento do corpo de prova, ocorrido no ciclo 85. Na Figura 4.7B é possível observar a impregnação do sulfato nas paredes internas da fratura, pelo que se considera que a precipitação do sal na abertura possa ter sido fator atuante para enfraquecimento da estrutura da rocha.

Nos aspectos visuais na análise qualitativa, devido ao processo de extração e usinagem a superfície dos corpos de prova exibiam aparência lisa nos ciclos iniciais, o que perceptivelmente dificultou o ataque do sulfato, com menor área de contato pela ausência de rugosidade. Portanto, nos primeiros ciclos (período entre 0 e 20 ciclos), os sinais de impregnação do sal e aumento das fissuras se destacam apenas nos corpos de prova que já possuíam fissuras aparentes em sua superfície, como é exposto na Figura 4.8.

Figura 4.8 – Fissuras nas quais se observa bordas impregnadas de sulfato de sódio.

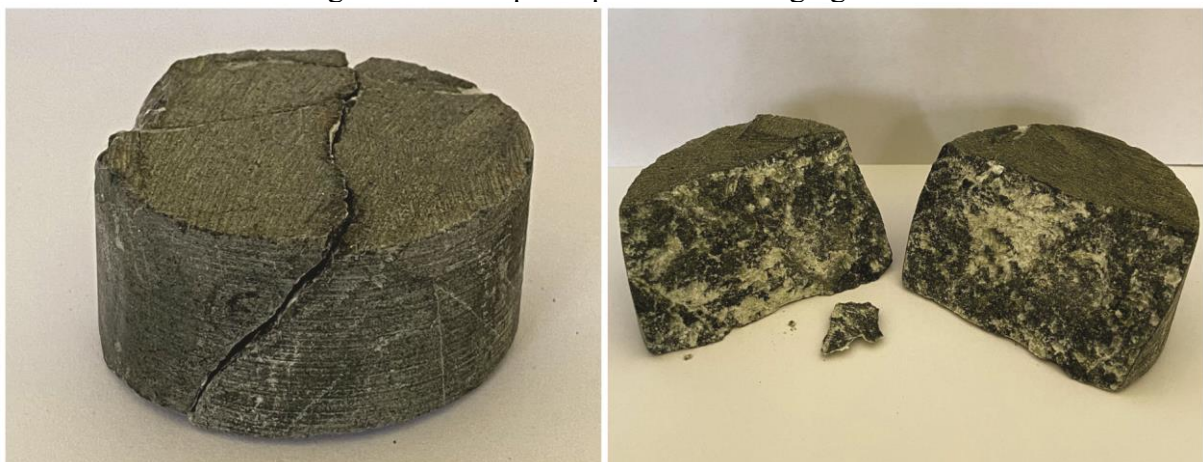


Fonte: A autora.

A partir do ciclo 50, é observada maior aspereza nas superfícies dos corpos de prova, modificação esta que visivelmente favorece o ataque do sulfato de sódio, com maior aderência do sal, pelo aumento da superfície de contato pela existência de reentrâncias (aumento da superfície específica). As fissuras começam a apresentar ampliação das aberturas e início do preenchimento destas pelo sal precipitado.

No ciclo 58, o corpo de prova n° 6, que apresentava fratura persistente por todo o corpo de prova (Figura 4.9, foto da esquerda), rompeu ao longo da fratura durante o manuseio dos processos da ciclagem, e após observação das paredes internas mostradas na foto da direita da Figura 4.9, constatou-se o acúmulo de sal, o que provavelmente causou a ruptura pelo enfraquecimento das ligações de contato entre as paredes da descontinuidade.

Figura 4.9 – Corpo de prova n° 6 desagregado.

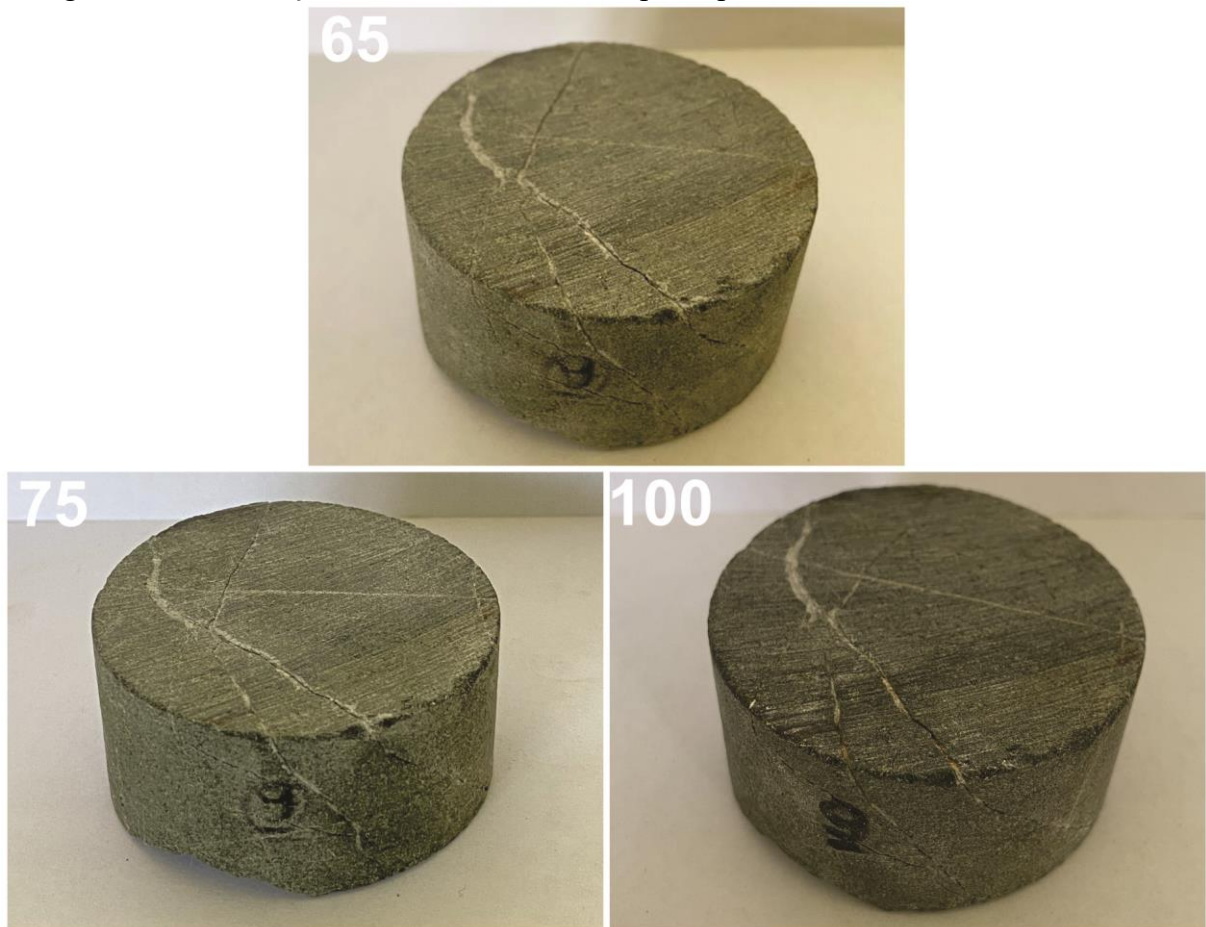


Fonte: A autora

Nos corpos de prova em que as modificações no aspecto macroscópico devido à alteração pela ciclagem foram mais destacadas, o acompanhamento do progresso destas foi registrado em fotografias que são apresentadas a seguir.

Na Figura 4.10, o corpo de prova n° 9 permite a observação do aumento da rugosidade superficial com avanço dos ciclos; da maior impregnação de sais nas fissuras do ciclo 65 para o 75, em que as bordas estão mais esbranquiçadas; e no ciclo 100, a abertura da fissura que se apresenta preenchida por sal, que apresenta mudança na coloração com aspecto mais amarelado.

Figura 4.10 – Evolução do estado visual do corpo de prova n° 9, nos ciclos 65, 75 e 100.

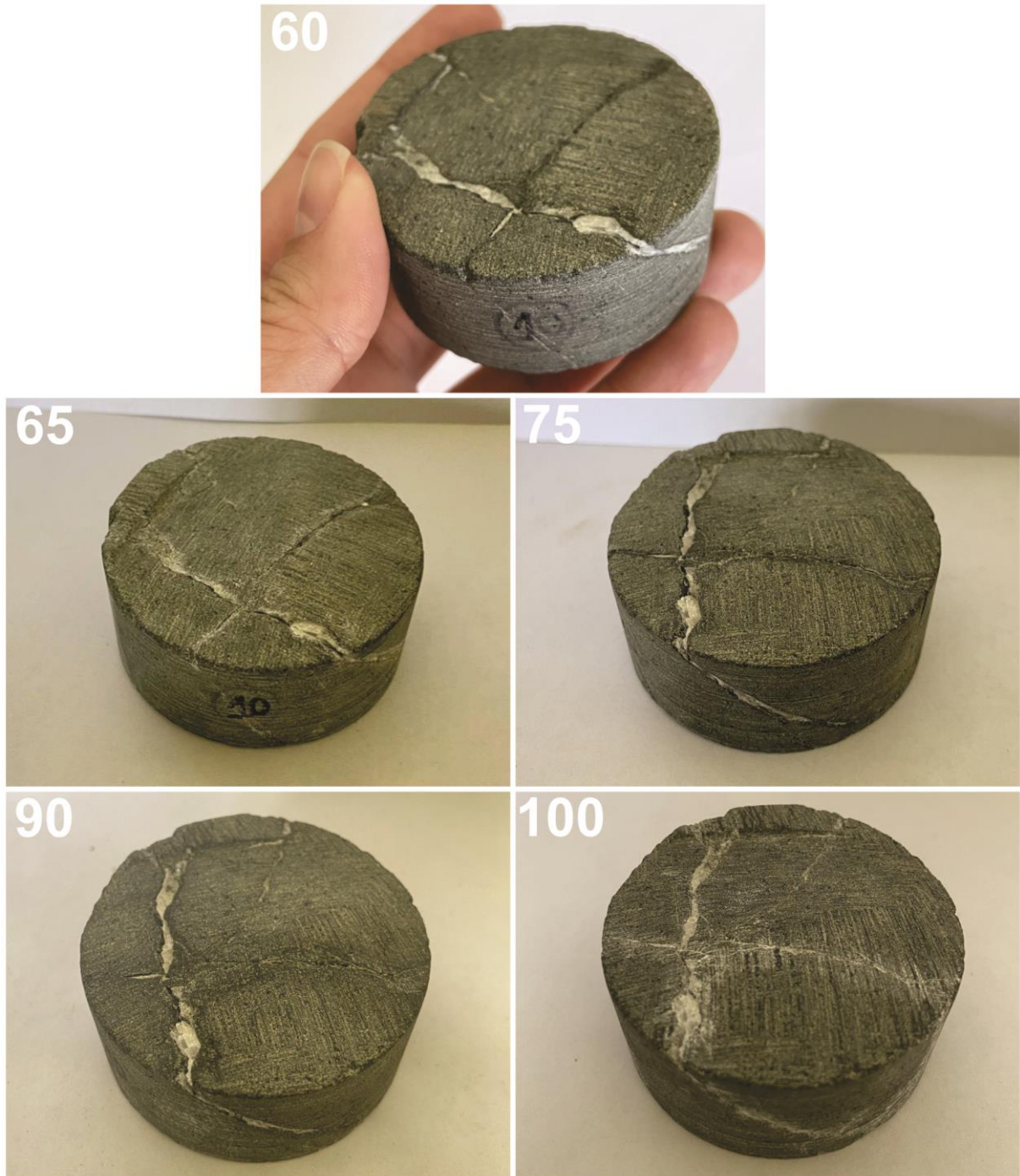


Fonte: A autora.

No corpo de prova n° 10 exibido na Figura 4.11, é observada uma fratura selada persistente por todo corpo de prova e um veio de minerais claros cortando a sua superfície. Com o avanço dos ciclos se percebe o mesmo padrão observado no corpo de prova n° 9 (Figura 4.10), com impregnação das fissuras, seguida por fissuração e aumento das aberturas, com posterior preenchimento das mesmas pelo sulfato de sódio precipitado. A maior abertura observada, com melhor visualização do registro do ciclo 75, ocorre no contato entre composições minerais

diferentes, no contorno do veio de minerais claros, em que provavelmente a diferença dos coeficientes de dilatação proporcionou uma maior fissuração com a variação de temperatura devido à secagem em estufa.

Figura 4.11 - Evolução do estado visual do corpo de prova n° 10, nos ciclos 60, 65, 75, 90 e 100.



Fonte: A autora.

A Figura 4.12 apresenta a evolução do corpo de prova n° 19 ao longo dos estágios da ciclagem. Observa-se progressão da fissuração superficial da amostra e também da abertura das

fissuras, mais evidente na comparação entre os registros dos ciclos 75 e 90. No registro do ciclo 100, destaca-se a fratura persistente por todo o corpo de prova, levemente aberta, por onde se dá a ruptura no ensaio de carga pontual. Por acontecer neste plano preferencial, a ruptura ocorre no plano que não inclui os dois pontos de aplicação da carga, não sendo considerada válida.

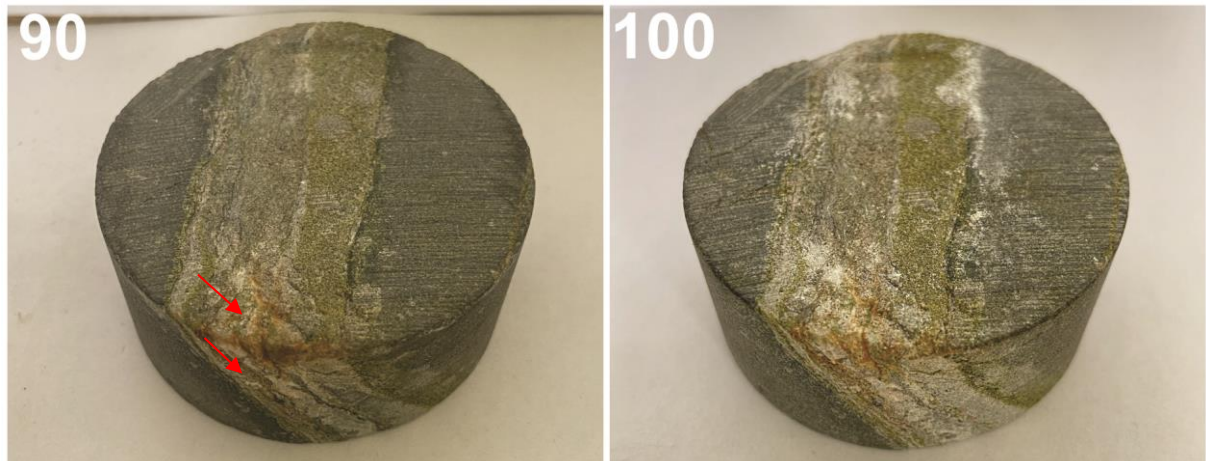
Figura 4.12 – Evolução do estado visual do corpo de prova n° 19, nos ciclos 75, 90 e 100.



Fonte: A autora.

Na Figura 4.13, no corpo de prova n° 33 as feições que apontam a ação da alteração são a maior rugosidade da superfície da amostra, com destaque no veio contendo mineral esverdeado (provavelmente clorita) - que pareceu ter sido mais alterado que os outros - fissuração e posterior abertura destas fissuras. No ciclo 100 percebeu-se o preenchimento de algumas destas aberturas pelo sulfato. Neste corpo de prova também se pode notar uma mudança na coloração superficial dos minerais constituintes do veio que corta a amostra por toda sua altura.

Figura 4.13 – Evolução do estado visual do corpo de prova n° 3-2, nos ciclos 90 e 100.



Fonte: A autora.

No corpo de prova n° 44, apresentado na Figura 4.14, a fissuração se inicia mais intensamente no contato entre os diferentes minerais no veio que corta toda a amostra, sendo observada a abertura das fissuras, sinalizando maior caminho para a percolação, seguida pelo preenchimento por sal precipitado do sulfato de sódio. No ataque superficial ocorre também a fissuração, mas em menor proporção que nos contatos de composições diferentes, aumento da rugosidade do corpo de prova, com maior aderência do sal e maior diferença na textura superficial na faixa composta por mineral esverdeado (provavelmente clorita), quando comparada ao estado inicial. Como sinal da alteração também se observa pontos de mudança de cor no corpo de prova.

Figura 4.14 – Evolução visual do corpo de prova n° 44, nos ciclos 60, 75, 90 e 100.



Fonte: A autora.

Em geral, no comportamento da rocha durante o ensaio direto de alteração não são observadas grandes modificações nos corpos de prova, a perda de massa não é muito significativa e não ocorre grande desintegração da amostra. O processo de alteração mais presente é a fissuração, ou seja, intemperismo físico, mais pronunciada em contatos de diferentes composições mineralógicas, provavelmente devido à variação de temperatura e os diferentes coeficientes de dilatação dos minerais.

O intemperismo físico controla a intensidade de alteração nos corpos de prova, sendo constatado que nos corpos de prova mais fissurados, em sua maioria os que possuíam veios de diferentes minerais, a percolação da solução para o interior da amostra foi responsável pelas maiores variações das propriedades avaliadas. Porém, estas variações quando presentes não são expressivas, evidenciando que para o número de ciclos realizados no ensaio a rocha sofreu pouca alteração, indicando baixa alterabilidade. Pode-se depreender da análise que os processos de intemperismo químico ainda são incipientes a despeito dos 100 ciclos realizados, e que o intemperismo físico ainda é o que prevalece na rocha, mas ainda em fase inicial, sendo assim

necessário um número maior de ciclos para produzir alteração intempérica significativa da rocha estudada.

4.3 Caracterização da rocha após ciclagem

4.3.1 Análise petrográfica

A descrição petrográfica, a partir do modal de composição das lâminas, permitiu a classificação da amostra em estudo e, com o foco no estudo da alterabilidade, o conhecimento dos possíveis produtos de intemperismo dos constituintes da rocha. A análise feita no estado inicial e final da ciclagem acelerada proporciona a percepção de modificação da amostra devido ao intemperismo químico, ainda que incipientes.

Nas modificações que sinalizam a ocorrência do intemperismo na descrição petrográfica, além da decomposição dos minerais para suas formas mais estáveis, aspectos físicos em nível microscópico também podem ser descritos, tais como mudanças na cor e textura dos componentes e aumento das microfissuras identificadas na lâmina. Para representação dessas variações em escala de valores indicativos, os índices petrográficos, índice micropetrográfico (Imp) e índice de microfissuramento (Imf) foram aplicados em todas as lâminas analisadas.

Após o término dos 100 ciclos de ciclagem artificial com sulfato de sódio, foi feita a descrição petrográfica de duas lâminas, a fim de se detalhar aspectos texturais, estruturais e a percepção de feições que evidenciassem a ação do intemperismo na amostra ciclada. As duas lâminas foram classificadas como rocha metabásica rica em clorita, considerado neste trabalho como metabasalto hidrotermalizado.

4.3.1.1 Metabásica

Em geral, as lâminas com rocha classificadas como metabásica são constituídas por: plagioclásio (Pl) e cloritas (Fe-Mg, Mg e Fe, Chl), como minerais essenciais; epidoto (Ep), titanita (Ttn), actinolita (Act), quartzo (Qtz) e minerais opacos (Op), como minerais acessórios: carbonato (Cb), argilominerais (Argila) e sericita (Ser), como minerais secundários.

Tabela 4.9 – Modal de composição mineralógica das lâminas.

Lâmina	Pl	Ep	Chl	Qtz	Ttn	Anf	Zr	Act	Op	Ser	Cb	Argila
1	50	2	37	2	3	-	< 1	< 1	< 1	2	3	1
2	46	2	39	2	3	2	-	-	< 1	1	3	2

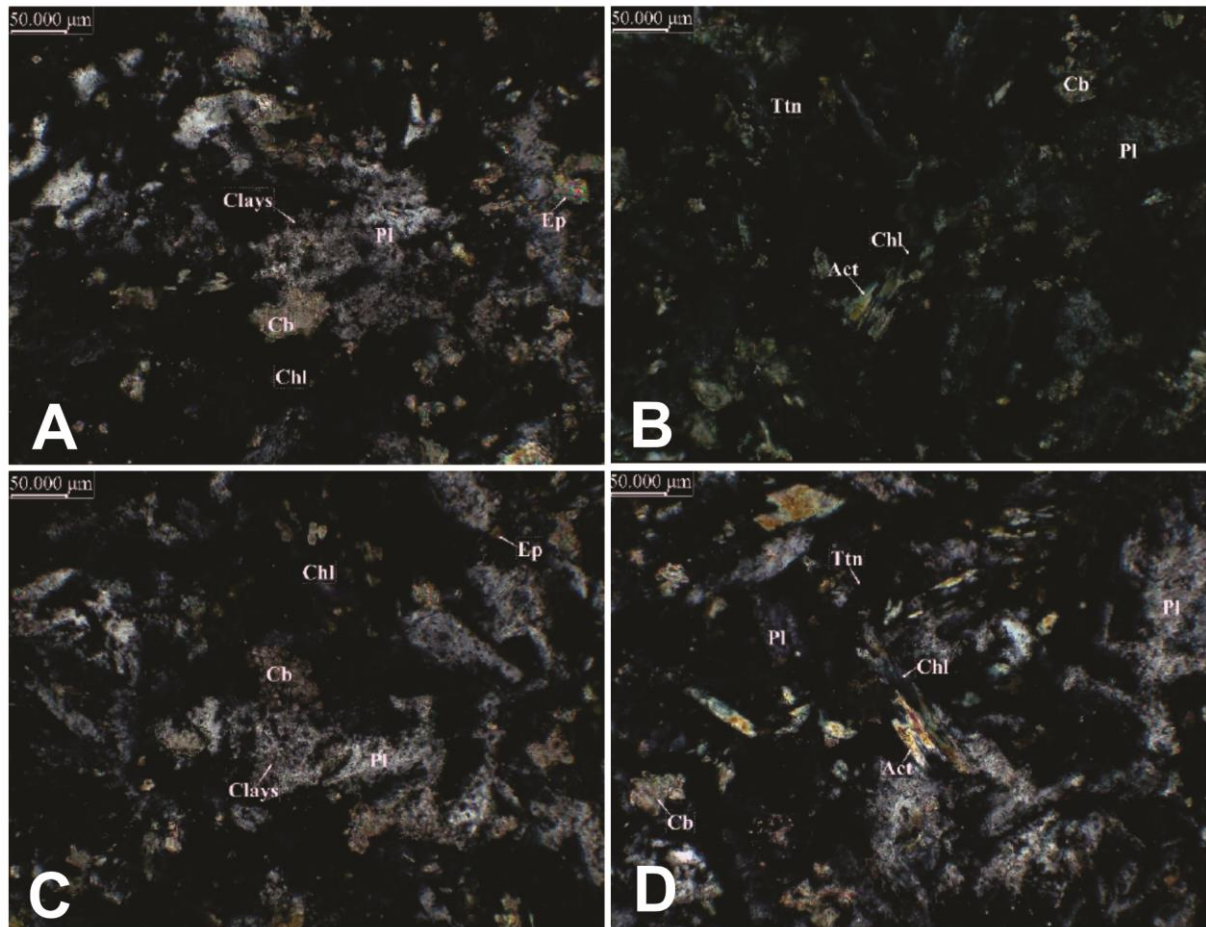
Os cristais que compõem a rocha ocorrem decussados, sem nenhuma direção preferencial. A rocha tem textura equigranular, com granulação fina (em geral cristais com espessura inferior a 0,25 mm, com ocasionais cristais atingindo 0,4 mm). O plagioclásio é o seu principal constituinte. Os cristais mostram um zoneamento composicional e estão substituídos pelos minerais secundários: argilominerais (muito finos para se definir se estão bem ou mal formados), carbonatos (subdioblásticos) e sericita (subdioblásticas a idioblásticas). Estes cristais substituídos ficam com um aspecto de “sujo”, aspecto este que pode ser devido ao ataque e impregnação do sulfato de sódio.

Os cristais de actinolita mostram uma coloração verde clara e estão intensamente substituídos para cloritas e localmente para carbonatos como visto na Figura 4.15B, ocorrendo alguns cristais como pseudomorfos. Já os cristais de titanita mostram uma coloração “amarronzada desbotada” e, aparentemente, estão quebradiços, podendo esta textura ser um produto do intemperismo.

Em uma das lâminas, os cristais de titanita e zircão ocorrem aparentemente “desbotados e quebradiços”, sendo este também um possível resultado da alteração.

Figura 4.15 – Imagens transmitida com polarizadores cruzados – A) Aspecto dos cristais de plagioclásio substituídos para carbonato e argilominerais; B) Aspectos dos cristais de actinolita substituídos para clorita e carbonato; C) Aspecto dos cristais de plagioclásio

substituídos por carbonatos e argilominerais; D) Aspecto dos cristais de actinolita substituídos por cloritas.



4.3.1.2 Índices Petrográficos

Os índices petrográficos empregados para caracterização do grau de intemperismo, por refletirem as mudanças químicas e físicas expressas nos parâmetros Imp e Imf, respectivamente, foram determinados em todas as lâminas, os valores estão apresentados na Tabela 4.10.

Para a contagem modal dos minerais classificados como material são ou material alterado, adotou-se um critério distinto daquele utilizado pelo geólogo na descrição petrográfica, apresentada no ANEXO A – Descrição petrográficas das lâminas – Ciclo 0 e ANEXO B – Descrição petrográfica das lâminas – Ciclo 100. Na descrição original, foi considerado material de alteração somente os minerais relacionados à última fase de hidrotermalismo e a processos mais tardios, levando a fragmentação do percentual de carbonato entre as classificações são e alterado, pois apenas parte do mineral seria resultado desses processos.

Essa diferenciação é por vezes descrita como imprecisa, pela dificuldade de se definir de forma clara as etapas de formação dos minerais, se originários em processos metamórficos

anteriores ou na hidrotermalização tardia. Por essa razão, neste estudo optou-se por uma contagem modal simplificada, com a consideração apenas dos percentuais de sericita e argilomineirais como minerais secundários, que compõem o material alterado.

Tabela 4.10 – Valores de Índices petrográficos para o metabasalto

Identificação da lâmina		Material são (%)	Material alterado (%)	Índice micropetrográfico (Imp)	Índice de microfissuramento (Imf)
Ciclo 0	A	90	10	9.00	0
	B	96	4	24.00	0.25
	C	92	8	11.50	0.25
	D	98	2	49.00	0
Ciclo 100	1	98	2	49.00	0.50
	2	98	2	49.00	0.75

De acordo com a Tabela 4.10, não houve significativa variação do índice micropetrográfico (Imp) após o processo de ciclagem. Caso o intemperismo químico tivesse ocorrido, menores valores seriam encontrados na amostra ao fim dos 100 ciclos. O valor do índice obtido nas lâminas das amostras cicladas é o igual ao de uma das lâminas não cicladas e corresponde ao maior valor de índice entre as todas as lâminas descritas, indicando a ausência do intemperismo químico relevante sobre a composição química da amostra ciclada.

As diferenças observadas no Imp entre as lâminas das amostras não cicladas podem refletir a heterogeneidade natural dos blocos que compõem o conjunto amostral, perceptível em variações texturais, tonalidade mineral, presença de veios e estrutura do maciço. De forma geral, a rocha pode ser classificada como um metabasalto hidrotermalizado pouco alterado e resistente ao ataque químico em solução de sulfato de sódio.

Embora não tenha sido constatada variação quanto a composição mineralógica significativa devido a ciclagem, são destacadas características microscópicas indicativas de intemperismo, como cristais com coloração desbotada, textura quebradiça e aspecto de “sujo”, possivelmente devido ao ataque de sulfato de sódio.

O índice de microfissuramento (Imf) observado na Tabela 4.10 indica um aumento da ocorrência de microfissuras nas lâminas após 100 ciclos de alteração, demonstrando um provável avanço do intemperismo físico. Esse comportamento é geralmente notado no

desenvolvimento do intemperismo, a alteração física mais predominante nos estágios iniciais, como observado em estudos de perfis de intemperismo, por exemplo, em Jaques et al. (2020).

4.3.2 Índices Físicos

O intemperismo modifica intensamente as propriedades físicas da rocha, portanto, o conhecimento dessa variação ao longo do processo de alteração é importante, visto que estas são correlacionáveis às propriedades mecânicas e de permeabilidade da rocha. As amostras utilizadas neste trabalho, obtidas em forma de blocos para investigação, quando recebidas apresentavam-se em condição de material são. A caracterização física foi feita no estado inicial e no estado ciclado, após 10, 20 e 100 ciclos, respectivamente.

Os resultados da caracterização dos índices físicos obtidos no estado inicial e nos estágios de avaliação do estado ciclado são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Valores de índices físicos avaliados ao longo do processo de ciclagem

Ciclo	n (%)	γ (kN/m ³)	Ab (%)
0	0.35	26.85	0.13
10	0.16	27.34	0.06
20	0.14	27.59	0.05
100	0.17	27.75	0.06

Como observado por Tugrul (2004), a ação do intemperismo sobre a rocha é intimamente relacionada à propriedade de porosidade, por influenciar a susceptibilidade à alteração, juntamente com a mineralogia e textura, permitindo maior contato com a água que propicia as reações químicas. Além disso, a porosidade permite inferir as modificações intempéricas sobre o tecido da rocha, como diferente padrão de distribuição e forma dos poros e microfissuras, geralmente acompanhadas com o aumento de seu valor.

No entanto, não foi observada variação esperada, com aumento do valor de porosidade ao longo da ciclagem, que indicaria um avanço da alteração. Pelo contrário, no resultado obtido tem-se a redução do valor de porosidade e absorção de água (em aproximadamente 50%), com aumento do peso específico (em 3,35% entre estágio inicial e final).

A redução da porosidade, mais acentuada até o ciclo 10 e praticamente constante ciclos seguintes, pode ser devido a diferenças texturais nas amostras ou ser devido à precipitação do sal nos poros acessíveis inicialmente, como mencionado por Nicholson (2001). Essa hipótese

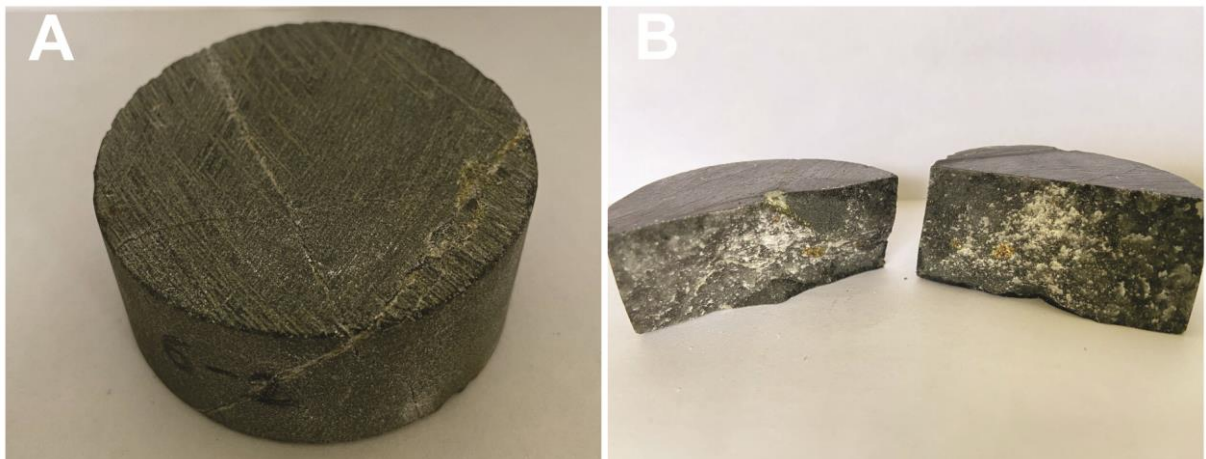
não pode ser descartada, uma vez que diferente do trabalho citado, as amostras não foram lavadas completamente entre os ciclos.

Em estimativa simplificada, ao final dos 10 ciclos, considerando a massa específica do sulfato de sódio anidro utilizado ($2,70 \text{ g/cm}^3$) e assumindo que a redução do volume de vazios ocorreu exclusivamente em razão da impregnação do sal, a variação do peso específico da rocha seria para aproximadamente $26,90 \text{ kN/m}^3$. Esse valor não explica integralmente o aumento observado, mas indica possibilidade de contribuição parcial.

A ausência de lavagem entre os ciclos teve como objetivo não interferir na impregnação ou absorção do sal no corpo de prova, favorecendo o ataque químico à rocha. Entretanto, na análise final dos resultados, admite-se que para a obtenção dos índices físicos e exclusão da possível mudança do peso específico pela entrada do sal no corpo de prova, este procedimento deveria ter sido realizado.

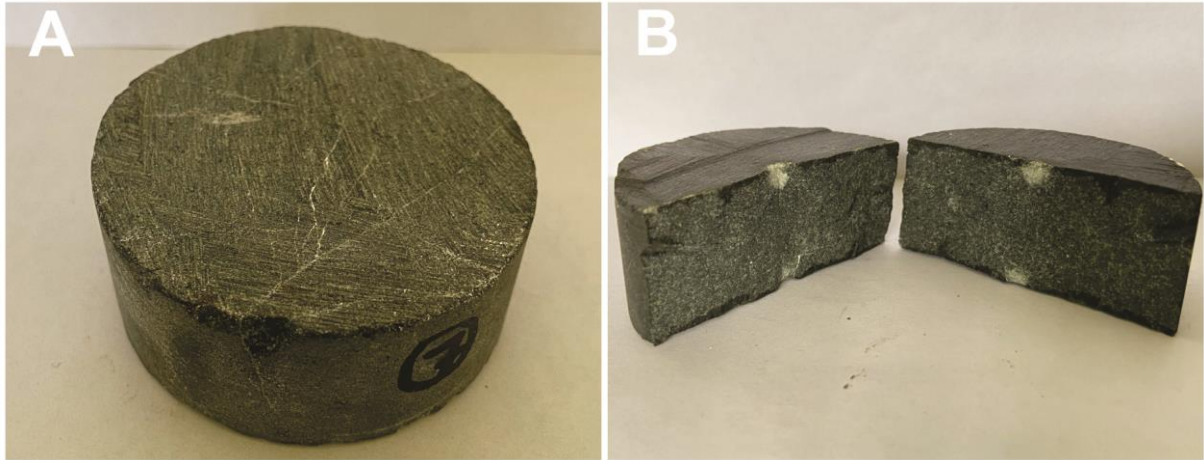
A baixa porosidade aparente já apresentada no estado inicial, analisada isoladamente, reduz a vulnerabilidade à alteração e favorece uma profundidade de alteração mais superficial, o que se constata na observação dos corpos de prova: maior desgaste superficial e indícios do ataque do sulfato de sódio internamente somente nos corpos de prova com fissuras e veios preexistentes aparentes na superfície (Figura 4.16 e Figura 4.17). Em rochas metamórficas e ígneas de muito baixa porosidade, é comum não haver aumento da porosidade com ciclagens, pelo menos até que substanciais modificações sejam observadas nas amostras, pois a própria variação textural pode ser afetar mais a porosidade do que o intemperismo.

Figura 4.16 – A) Fissuras e rachadura visíveis na superfície do corpo de prova; B) Interior do corpo de prova com paredes impregnadas de sulfato.



Fonte: A autora.

Figura 4.17 – A) Fissuras não muito persistentes visíveis na superfície do corpo de prova; B) Interior do corpo de prova sem sinais de ataque de sulfato.



Fonte: A autora.

4.3.3 Velocidade de propagação de onda

A velocidade de propagação da onda longitudinal pelos corpos de prova reflete tanto a estrutura quanto a composição mineralógica, em função das propriedades elásticas. Com o objetivo de avaliar possíveis modificações nesses aspectos devido à alteração decorrente da ciclagem, foram realizadas medições da velocidade de propagação nas amostras no estado intacto e nos estágios de ciclagem dos corpos de prova. Os dados são apresentados na Tabela 4.12 a Tabela 4.14.

Tabela 4.12 – Velocidades de propagação obtidas nos ciclos 0 e 10.

CP	CICLO 0 Velocidade (m/s)	CICLO 10 Velocidade (m/s)
1	6364	6364
3	6667	6667
5	6154	6154
8	6591	6591
16	6154	6154
23	5714	5714
24	6441	6441
26	6522	6522
28	6667	6667
29	6667	6667

Nos resultados obtidos, é observado que no estágio de 10 ciclos realizados não há nenhuma variação dos valores de velocidade de propagação medidos, indicando ausência de

possíveis modificações estruturais relevantes. Esse comportamento é coerente com os aspectos visuais e propriedades físicas caracterizadas nas amostras cicladas, que indicam possibilidade de impregnação do sal nos poros, sem qualquer modificação relevante quanto ao estado de fissuramento.

Tabela 4.13 - Velocidades de propagação obtidas nos ciclos 0 e 20.

CP	CICLO 0 Velocidade (m/s)	CICLO 20 Velocidade (m/s)
15	6111	6000
17	6122	6000
18	6410	6250
22	6102	6000
25	6296	6182
27	6667	5778
30	6216	6133
35	6154	6000
39	6667	6500
40	6410	6250

No estágio de 20 ciclos reduções são observadas nas velocidades de propagação registradas nos corpos de prova, com redução de 3,26% da velocidade média registrada de 6315 m/s para 6109 m/s. Essa tendência sugere início de degradação estrutural, possivelmente associada à formação de microfissuras fenômeno típico do intemperismo físico.

Nos corpos de prova são verificados leves aspectos visuais externos e internos que podem ser indícios da ação do intemperismo. Na Figura 4.18 é apresentado o corpo de prova n° 17, que possuía uma fratura atravessando toda dimensão da altura, no qual a impregnação do sulfato é mais claramente observada.

Figura 4.18 – Paredes interiores da rachadura do corpo de prova n° 17.



Fonte: A autora.

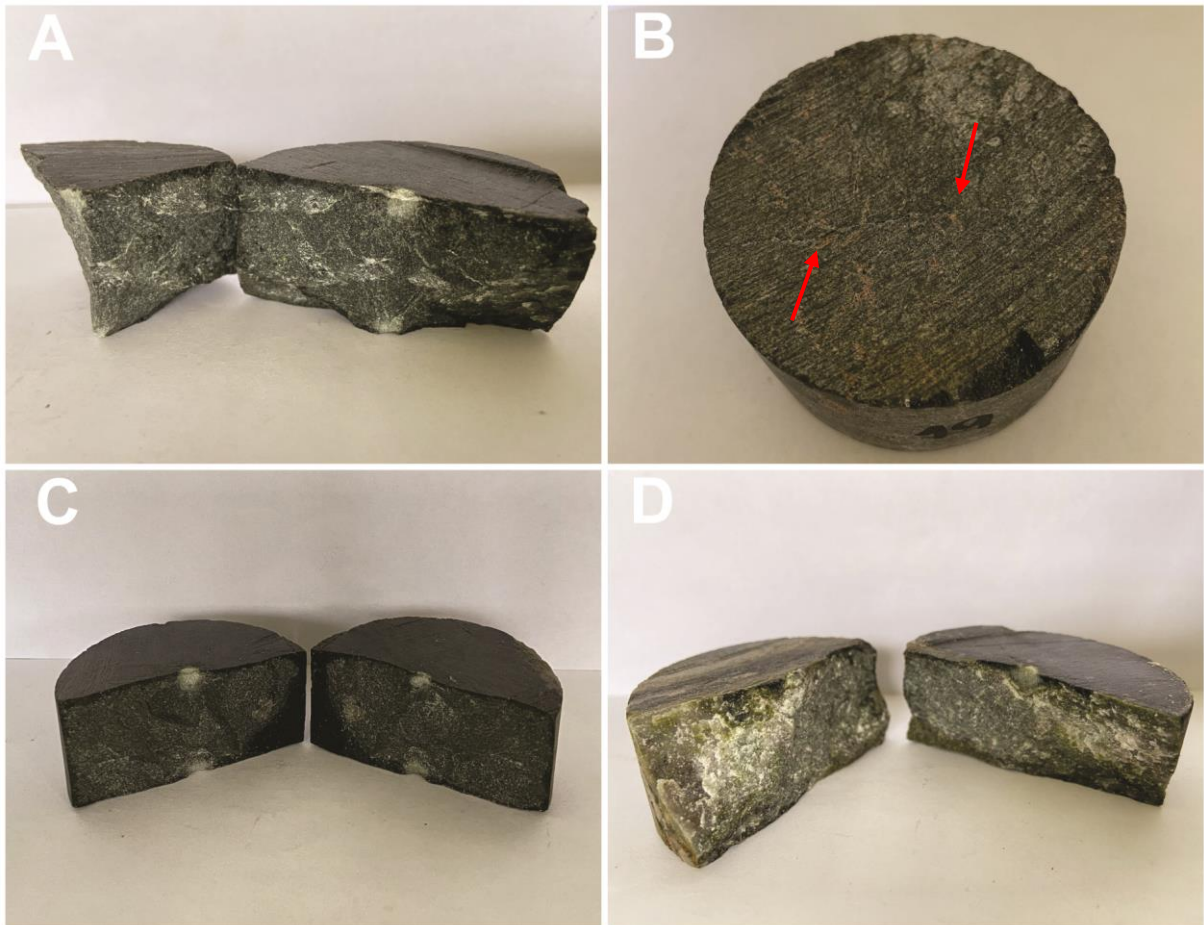
Tabela 4.14 - Velocidades de propagação obtidas nos ciclos 0 e 100.

CP	CICLO 0 Velocidade (m/s)	CICLO 100 Velocidade (m/s)
2	6666	5778
4	5897	5897
7	6410	6410
9	6364	6364
10	6410	6410
11	6666	6500
12	6154	6154
13	6667	6667
14	6410	6410
19	6734	6111
20	6122	6122
21	6136	6136
31	6666	5909
32	6410	6410
33	7352	6410
34	7352	6410
36	6410	6250
37	6153	6000
38	6667	6667

Após 100 ciclos, uma variação um pouco maior dos valores de velocidade de propagação em relação ao estado são é verificada, com redução de 3,75% da velocidade média,

de 6508 m/s para 6264 m/s. Alguns corpos de prova apresentaram uma redução mais acentuada, destacando-se os de nº 2, 19, 32 e 33, que exibiram um aspecto mais fissurado e impregnação interna de sulfato de sódio, como pode ser visto na Figura 4.19, convergindo para a constatação de fissuração e mudança na estrutura devido à ciclagem. Nos corpos de prova nº 9, 10 e 36 são observados os mesmos aspectos dos corpos de prova anteriormente citados, mas o resultado de velocidade de propagação de onda não reflete essa condição.

Figura 4.19 – A) CP nº 2 interior impregnado; B) CP nº19 fissura superior; C) CP nº 31 alguns sinais esbranquiçados; D) CP nº 33 interior impregnado de sulfato.



Jaques (2019) com a análise da variação da velocidade de propagação de onda ao longo de um perfil de intemperismo de rochas graníticas também constatou uma baixa variação do valor desta propriedade índice entre os primeiros graus de alteração, de cerca de 6%. Um exame simultâneo aos seus outros resultados de caracterização dos níveis, mostrou que apenas em níveis em que as alterações químicas já atuaram na maior parte dos minerais há uma maior variação no valor da velocidade de propagação obtida, fase de alteração esta que não foi atingida com o processo de ciclagem empregado neste trabalho, como pode se concluir principalmente pela descrição petrográfica.

4.3.4 Resistência à carga puntiforme

Para a realização deste ensaio, conforme sugerido no procedimento ISRM (2007), foram testadas pelos menos 10 amostras de cada estágio de alteração avaliado, com os quatro resultados válidos mais distantes da média foram descartados para o cálculo do índice de resistência à compressão puntiforme ($I_{s(50)}$) médio. Os valores dos $I_{s(50)}$ médio de cada estágio são resumidos na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Valores de $I_{s(50)}$ obtidos ao longo do processo de ciclagem.

Ciclo	Nº de amostras	Nº válidas	$I_{s(50)}$ médio (MPa)
0	10	10	3.76
10	10	10	3.71
20	10	9	8.67
100	19	17	7.70

Não foi observada a tendência esperada de redução do parâmetro de resistência com o aumento do número de ciclos, comportamento associado a mudança da estrutura interna, aumento da fissuração e enfraquecimento das ligações dos minerais, o que não parece ter ocorrido de forma relevante na amostra, conclusão corroborada pelos resultados dos outros ensaios realizados. Nessa avaliação especificamente, pelo contrário, registrou-se aumento do valor médio de $I_{s(50)}$ em alguns estágios, o que contrasta com a expectativa teórica.

O aumento do parâmetro de resistência observado pode estar relacionado à heterogeneidade dos corpos de prova que integram a amostra em estudo. Variações no tamanho dos grãos constituintes, granulação inequigranular e equigranular, e textura porfírica, que poderia agregar maior resistência localizada. Essa hipótese quanto a textura não pode ser confirmada apenas com o que se consegue observar nas lâminas descritas pós ruptura dos corpos de prova.

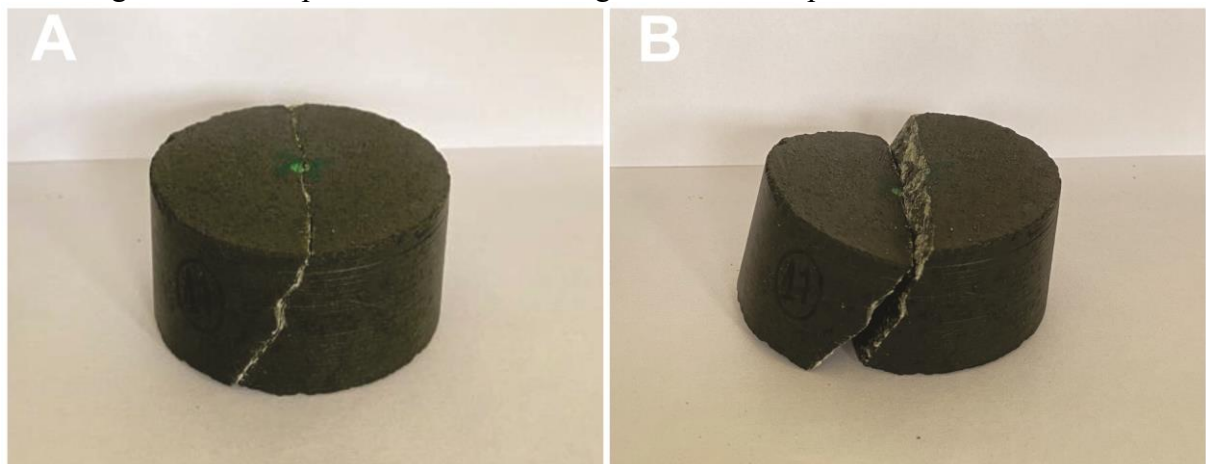
Entende-se que a precipitação de sal nos corpos de prova, embora possa ter contribuído de forma parcial para o aumento do peso específico da amostra ao longo dos ciclos, não se sustenta como hipótese para o ganho de rigidez na amostra. Caso fosse essa a explicação, tal efeito seria refletido no aumento das velocidades de propagação de onda longitudinal, o que não ocorreu nas medições.

Santiago (2008) com ciclagem água-estufa de rochas básicas intrusivas, após a realização de 100 ciclos, registrou perda de 58,1% da resistência à compressão puntiforme, mas

seus resultados de porosidade e absorção d'água sofreram um aumento de aproximadamente o mesmo percentual, o que não foi observado nas amostras do presente trabalho. Jaques (2019) registrou valores próximos de $I_{s(50)}$ nos dois primeiros níveis de intemperismo do seu perfil de estudo, sendo o observado para o grau W2 um pouco maior do que o do W1, mas não um aumento pronunciado como o resultado aqui registrado.

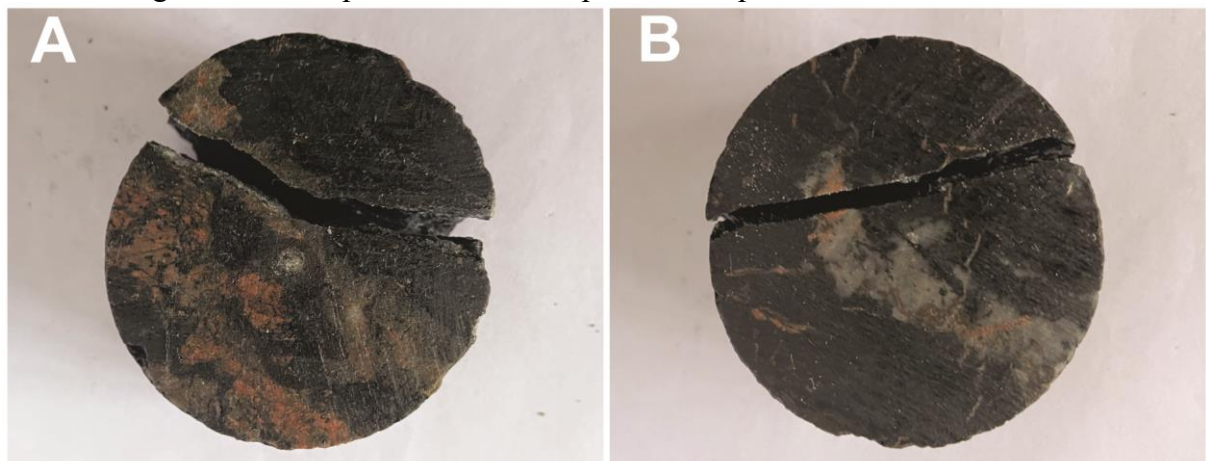
Com o avanço da ciclagem, observa-se maior ocorrência de rupturas não válidas, ocorridas fora das duas ponteiros cônicas de aplicação de carga e em planos de fraqueza pré-existentes no corpo de prova. Em um caso, a impregnação de sulfato de sódio das paredes internas da fratura é evidente (Figura 4.20) e pode ter contribuído para a ocorrência da ruptura não válida no ciclo 20. No ciclo 100, a ruptura não válida se deu ao longo de fissuras preexistentes (Figura 4.21).

Figura 4.20 – Ruptura não válida ao longo de rachadura preexistente no ciclo 20.



Fonte: A autora.

Figura 4.21 – Rupturas não válidas por fissuras preexistentes no ciclo 100.



Fonte: A autora.

A deterioração das propriedades de resistência da rocha é um aspecto fundamental no estudo da alteração das rochas, geralmente com tendência de redução da resistência observada com o avanço da alteração. Entretanto, esse não é um processo linear e há diversos exemplos de resultados na literatura que mostram especificidades de um comportamento podem resultar até mesmo em um aumento de resistência nas fases iniciais do processo intempérico e posterior queda acentuada.

Devido à variabilidade da resistência entre os blocos recebidos como amostras, em função de diferenças texturais, este fator pode ter influenciado nos resultados do ensaio, o que dificulta a conclusão sobre os valores obtidos no ensaio de carga puntiforme. Tentativas de correlação com os índices de qualidade obtidos foram feitas, mas nenhuma delas resultou em um R² com valor satisfatório que indicasse boa aplicação, devido a baixa variação dos índices, foram obtidos pequenos intervalos de valores. Reforça-se para estudos futuros, a necessidade de maior número de amostras e controle da heterogeneidade do conjunto para conclusões mais robustas.

5 CONCLUSÃO

O ensaio direto de degradação de ciclagem acelerada com imersão em sulfato de sódio, realizado por 100 ciclos, não alcançou um nível de alteração capaz de promover variações expressivas nas propriedades das rochas estudadas. A ação do intemperismo físico foi a mais evidente nos corpos de prova, dada pela fissuração verificada macro e microscopicamente. Na descrição petrográfica aspectos de descoloração dos minerais indicam início de alteração de ordem química, mas sem reflexo no índice petrográfico, que apontaria uma maior decomposição dos minerais primários em minerais secundários. O metabasalto hidrotermalizado apresentou baixa alterabilidade, com comportamento extremamente resistente durante a realização dos 100 ciclos de ciclagem com sulfato de sódio.

A porosidade aparente inicial muito baixa da amostra, indicando poucos poros interconectados, pode ter sido fator determinante para a lentidão no processo de alteração da amostra, apontada pela baixa variação dos índices de qualidade. A maior ocorrência de fissuras interconectadas propiciaria maior superfície para contato com a solução. Isso só seria possível com a realização de um número significativamente maior de ciclos, o que não foi possível ocorrer no prazo disponível para a pesquisa.

A presença de argilominerais na composição mineralógica da rocha, cuja identificação não foi possível de ser realizada em função das pequenas quantidades, não teve grande efeito para o processo de desagregação da rocha. O estado microfissural, com poucas microfraturas, aparenta ter contribuído também em favor da menor alteração, não tendo sido observadas variações significativas nos índices de porosidade e absorção d'água. Maiores indicativos de ataque pelo sulfato de sódio foram observados apenas em corpos de prova da amostra com fissuras e rachaduras superficiais.

Para tentativas futuras de realização de ensaio direto em amostras com essa condição inicial, seria aconselhável adaptar as durações de cada etapa de ciclo da alteração acelerada, a fim de se reduzir o tempo de imersão em solução, possibilitando a efetuação de um maior número de ciclos, pois como verificado por Loubser (2013) o número de ciclos teria mais influência na degradação da rocha do que seu tempo de exposição à solução. Outra indicação de melhoria para a metodologia aplicada, seria a lavagem dos corpos de prova antes da obtenção dos índices físicos, para exclusão da influência de precipitação de sal nos poros nos resultados obtidos.

Pela localização preferencial das fissuras e rachaduras, no decorrer da ciclagem, desenvolvidas adjacentes aos veios; da diferença de composição mineralógica, visível pela distinção de cor e confirmada na descrição mineralógica, deriva-se diferentes coeficientes de dilatação acarretando em variações volumétricas díspares, originadas pela oscilação de temperatura imposta pela imersão e secagem em estufa. Quando extrapolado para a condição de campo em que o material é exposto, uma baixa oscilação na temperatura média é observada, sendo, portanto, essa condição em ensaio laboratorial dificilmente repetida em campo.

Dos ensaios indiretos realizados para obtenção dos índices de qualidades, apesar da pouca alteração apresentada pelos corpos de prova, os que se apresentaram mais sensíveis às variações do estado das rochas foram o ensaio de propagação de onda ultrassônica e a descrição petrográfica. Este último por evidenciar através do índice petrográfico relacionado ao microfraturamento provavelmente por ser entre os testes realizados, o mais apropriado para verificar o avanço de fraturamento e fissuração, ocorrência o mais notória na amostra em fase inicial de alteração.

REFERÊNCIAS

AIRES-BARROS, L.; GRAÇA, R. C. Teste on accelerate abrasion and chemical mobilization of rocks. **Bullentin of the International Association of Engineering Geology**, v. 3, n. 1, p. 52-68, 1971.

AZEVEDO, I.C.D.; MARQUES, E.A.G. **Introdução à Mecânica das Rochas**. Caderno Didático. Ed. UFV, 2006.

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

CARDOZO, F. A. C.; ALMEIDA, L. F.; ZINGANO, A. C.; PIMENTA, M. M.; NOGUEIRA, R. T.; SOUZA, N. R. **Esclerômetro de Schmidt em basalto**: Comparação com ensaio de compressão uniaxial. *In*: VII Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, Belo Horizonte, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 089/94**: Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. DNER, 1994.

DOBEREINER, L. **Constructions problems related to excation on soft rocks**. *In*: Proceedings 12th Int. Cong. Soil Mech. Found. Eng., General Report, ISSMFE, Rio de Janeiro, 1989.

FARJALLAT, J.E.S.; NERY DE OLIVEIRA, J.A. Experimental studies on the weatherability of the capivara dam basalts, Rio Paranapanema, Brazil. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, v. 6, p. 83–96, dez. 1972.

FRASCÁ, M. H. B. O. Assessment of alterability of basalt used for riprap by petrographic examination. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 11, n. 1, p. 208-213, 2019.

FRAZÃO, E. B. **Metodologia para avaliação da alterabilidade de rocha a partir de estudo experimental em amostras de basalto da U.H.E de Três Irmãos – Estado de São Paulo**. 1993. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1993.

FRAZÃO, E. B.; CARUSO, L. G. **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 vol. II A, São Paulo - SP, p. 21-33, 1983.

GOLDICH, S. S. A study in rock-weathering. **Journal of Geology**, v. 46, p. 17-58, 1938.

GOMES, R. L. **Características tecnológicas e alterabilidade dos compartimentos entablamento e colunata de derrames basálticos da porção setentrional da Bacia do**

Paraná. 2001. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2001.

GOMES, R. L.; RODRIGUES, J. E. Quality ranking of twelve columnar basalt occurrences in the northern portion of the Paraná Basin- Brazil. **Engineering Geology**, v. 91, n. 2-4, p. 265-278, maio. 2007.

GOODMAN, R.E. **Introduction to rock mechanics**. 2ª Ed. New York: John Wiley & Sons, 1989. 562 p.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 1ª Ed. São Paulo: Blucher, 1976.

GUPTA, A. S.; RAO, K. S. Index properties of weathered rocks: inter-relationships and applicability. **Bullentin of Engineering Geology and the Environment**, v. 57, p.161-172, set. 1998.

GUZZI, T. C. E. **Índices de alteração e de alterabilidade de rochas, aplicação para amostras de basalto da Pedreira Bandeirantes, São Carlos (SP)**. 1995. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1995.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. Suggested methods for the quantitative description of discontinues in rock masses. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.** v. 15, n. 6, p. 319-368, 1978.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. **The complete ISRM suggested methods for characterization, testing and monitoring: 1974-2006**. Ankara, Turkey. 2007. 628 p.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. **The complete ISRM suggested methods for characterization, testing and monitoring: 2007-2014**. 2014. 293 p.

IRFAN, T. Y.; DEARMAN, W. The engineering petrography of a weathered granite in Cornwall, England. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, v. 11, p. 233-244, 1978.

JAQUES, D. S. **Caracterização morfológica, mineralógica e geomecânica de perfis de intemperismo de rochas graníticas em clima tropical**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2019.

JAQUES, D. S.; MAQUES, E. A. G.; MARCELLINO, L. C.; LEÃO, M. F.; FERREIRA, E. P. S.; LEMOS, C. C. S. Changes in the Physical, Mineralogical and Geomechanical properties of a Granitic rock from weathering zones in a tropical climate. **Rock Mechanics and Rock Engineering**. v. 53, p. 5345-5370, set. 2020.

LOPES, P. M. **Alterabilidade e comportamento geomecânico de rocas no AHE Simplício**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2019.

LOUBSER, M. J. Weathering of basalt and sandstone by wetting and drying: A process isolation study. **Geografiska Analler, Series A: Physical Geography**, v. 95, p. 295-304, 2013.

MAIA, P. C. A. **Avaliação do comportamento geomecânico e de alterabilidade de enrocamentos**. 2001. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2001.

MARQUES, A.; PAES, B.; MARQUES, E. A. G.; PEREIRA, L. Correlations between uniaxial compressive strength and point load strength for some Brazilian high-grade metamorphic rocks. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia*. v. 4, p. 47-58, out. 2015.

MARQUES, E. A. G.; VARGAS, E. A.; LEÃO, M. Weathering of rocks in Brazil. *In: Soft Rock Mechanics and Engineering*. Switzerland, 2020, cap. 10, p. 251-290.

MINETTE, E. **Quantificação Geomecânica e de Alterabilidade de um Diorito**. 1982. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1982.

MOON, V.; JAYAWARDANE, J. Geomechanical and geochemical changes during early stages of weathering of Karamu Basalt, New Zealand. **Engineering Geology**. v. 74, p. 57-72, 2004.

NICHOLSON, D. T. Pore properties as indicators of breakdown mechanisms in experimentally weathered limestones. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 26, p. 819-838, 2001.

OLIVEIRA, P. C. **Caracterização geológico-geotécnica de diferentes litotipos basálticos: basalto denso, basalto vesículo-amigdaloidal e brecha basáltica**. 2012. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2012.

PELTIER, L. C. The Geographic Cycle in Periglacial Regions as it is Related to Climatic Geomorphology. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 40, n. 3, p. 214-236, 1950.

QUEIROZ, A. C. P. S. **Dimensionamento da rede de monitoramento da qualidade do ar nas Minas de Ferro de Carajás – PA**. 2015. Dissertação (Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais), Instituto Tecnológico Vale, Belém, PA, 2015.

SALLES, R. O. **Comportamento geomecânico e de alterabilidade da rocha gnáissica da obra do AHE Simplício**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2013.

SANTIAGO, L. O. R. **Alteração e alterabilidade de rochas básicas intrusivas metamorfizadas e filitos sericíticos da região do Quadrilátero Ferrífero e sua implicação no comportamento mecânico**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

SCHÖN, J. H. **Physical Properties of Rocks: A Workbook**. Oxford: Elsevier, 2011.

SCHNEIDER, A. W.; ROCHA, F. X. S. **Emprego de Basaltos em Pavimentação Rodoviária**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR, Publicação 433, Rio de Janeiro, p. 1-43, 1968.

SUÁREZ, M.; GARCÍA-ROMERO, E.; BAS, A.; PÉREZ, R. Smectites: The key to the cost overruns in the construction of the third set of locks of the Panama Canal. **Engineering Geology**, v. 284, 106036, abr. 2021.

TEIXEIRA, J. B. G.; LINDENMAYER, Z. G. Serra dos Carajás. *In: Geologia do Brasil*. 2012, cap. 10, p. 176-182.

TUGRUL, A. The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey. **Engineering Geology**, v. 75, n. 3-4, p. 215-227, nov. 2004.

WINKLER, S.; MATTHEWS, J. A. Comparison of electric and mechanical Schmidt hammers in the context of exposure-age dating: are Q- and R-values interconvertible?. **Earth Surface Processes and Landforms**, 2014.

ZUCCHETTI, M. **Rochas máficas do grupo Grão Pará e sua relação com a mineralização de ferro dos depósitos de N4 e N5, Carajás, PA**. 2007. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2007.

ANEXO A – Descrição petrográficas das lâminas – Ciclo 0

INFORMAÇÕES BÁSICAS
Cliente: Eduardo Marques (Universidade Federal de Viçosa - UFV)
Responsável pela descrição: Ramon de Oliveira Aranda (Geólogo) - ES-045606/D
Objetivo: Identificação de aspectos básicos da rocha, como mineralogia, texturas, estruturas, tal como a sua classificação. Além disso, serão identificados índices micropetrográficos (fratura por área e percentagem de material alterado/intemperizado).
DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA
Identificação da amostra: EDU-A-01
Tipo de rocha: Metamórfica
Mineralogia
Minerais essenciais (>5%): Clorita (Fe-Mg, Mg-Fe e Fe, estes dois últimos são minoria), Feldspatos (Plagioclásio e K-Feldspato) e Quartzo
Minerais acessórios (<5%): Titanita, Epidoto (tipo s.s.), Minerais Opacos, Zircão, Apatita e Carbonato
Minerais secundários: Sericita, Carbonato e Argilominerais
Aspectos texturais
É uma rocha inequigranular porfiroclástica, com uma matriz variando em uma granulação de fina a média (sempre menor que 1 mm) e porfiroclastos com uma granulação média (entre 1 e 2 mm). A forma dos cristais varia de xenoblástica a idioblástica, formando uma textura granoblástica e decussada, com os cristais xenoblásticos mostrando contatos interlobados entre si.
Aspectos estruturais
A rocha ocorre sem uma foliação presente, com os cristais de clorita decussados pela rocha.
Características microscópicas
É uma rocha metamórfica com um protólito ígneo máfico. Para evidenciar os aspectos do metamorfismo que a rocha passou foram utilizados termos de petrografia metamórfica.
A rocha é composta em grande parte por cristais de clorita (Fe-Mg, maioria, Mg-Fe e Fe, ambos ocasionais), feldspatos (plagioclásio e K-feldspato) e quartzo, ocorrendo titanita, epidoto (principalmente do tipo s.s.), minerais opacos, apatita e zircão como fases acessórias.

Cristais de sericita, carbonato, epidoto e argilominerais ocorrem substituindo cristais de feldspato. Alguns poucos cristais mostram um processo de saussuritização (possivelmente plagioclásio) substituídos ao mesmo tempo para sericita, carbonato e epidoto. Alguns cristais de feldspato estão aparentemente substituídos para um outro tipo de feldspato (possivelmente um plagioclásio de composição mais albítica). Ocorre uma associação comum entre cristais de clorita-titanita, clorita-epidoto e clorita-plagioclásio, que podem ser produtos da alteração hidrotermal de algum mineral máfico. Alguns cristais de titanita estão aparentemente substituindo minerais opacos, porém não é possível se determinar com acurácia.

Os cristais de quartzo ocorrem xenoblásticos, enquanto os cristais clorita, feldspatos (os cristais maiores ocorrem mais bem formados), titanita, epidoto, minerais opacos, zircão, apatita, sericita e carbonato ocorrem subdioblásticos a idioblásticos. Não se é possível determinar a forma dos cristais de argilominerais devido a sua fina granulação. Alguns cristais de feldspato (nem todos), titanita, epidoto, minerais opacos, zircão, apatita, sericita e carbonatos podem ser descritos como hipidiomórficos a idiomórficos (para evidenciar sua origem ígnea).

É possível observar registros de uma sutil deformação nesta rocha, que é registrado principalmente pelos cristais de quartzo. Estes cristais ocorrem aparentemente em bolsões e recristalizados, mostrando extinção ondulante e formação de subgrãos.

Ocorrem porfiroclastos subdioblásticos a idioblásticos de feldspato. A maioria dos maiores cristais são de K-feldspato, que são rosados em amostra de mão, enquanto os menores cristais são cristais de K-feldspato e plagioclásio. Existe uma porção da lâmina onde estes cristais ocorrem em maior quantidade. É difícil se determinar o tamanho dos cristais maiores, pois muitos estão quase totalmente substituídos, dificultando a medição do tamanho dos cristais. Muitos cristais de feldspato mostram um zonamento composicional, enquanto alguns outros mostram as maclações típicas dos plagioclásios. Alguns cristais estão fraturados, com fraturas preenchidas principalmente por carbonato e cloritas.

Em algumas regiões ocorrem aparentes pseudomorfos (pode ser que foram alguma fase mineral máfica, como piroxênio e/ou anfibólio) que atualmente são representados por cristais de clorita, titanita, epidoto (ocasional) e carbonato.

Ocorrem algumas venulações (que podem ter sido antigas fraturas) que cortam a rocha sem uma orientação preferencial, muitas vezes interconectadas. Estas venulações são preenchidas por cristais de carbonato e clorita (minoria), ocorrendo intergranulares (maioria, sendo algumas não muito contínuas) e intragranulares. Em algumas regiões é possível se observar quartzo (intercalado ao carbonato) e um mineral incolor de granulação muito fina semelhante a quartzo (podem ser pequenos cristais de zeólita) preenchendo algumas venulações. Em algumas regiões é possível observar pequenas fraturas sem preenchimento acompanhando as direções destas venulações.

Esta rocha possivelmente passou por um processo de espilitização, onde os cristais de clorita (principalmente) substituíram alguma fase mineral máfica pretérita.

Além da espilitização, um processo hidrotermal tardio ocorreu nesta rocha, que possivelmente foi responsável pelo enriquecimento em quartzo (estes ocorrendo algumas vezes em “bolsões” e aglomerados) e carbonatos.

Com base nas interpretações texturais da rocha é possível inferir as seguintes etapas de formação de minerais que estão presentes na rocha:

- Minerais ígneos: Feldspatos (K-feldspato e plagioclásio) + Titanita + Zircão + Minerais Opacos + Apatita;
- Minerais metamórficos (metamorfismo hidrotermal - espilitização): Cloritas (Fe-Mg, Mg-Fe e Fe) + Feldspato (possivelmente um plagioclásio mais albítico) + Epidoto + Sericita + Titanita (?) + Carbonato + Argilominerais (pode ser que os cristais de sericita, epidoto, carbonato e argilominerais sejam frutos de um processo hidrotermal magmático tardio e não um processo metamórfico);
- Minerais hidrotermais tardios: Quartzo (enriquecimento) + Carbonato (enriquecimento e substituindo fases minerais) + Sericita (substituindo fases minerais) + Argilominerais (substituindo fases minerais);

Pode ser que minerais como sericita e argilominerais tenham se formado mais tardiamente por processos intempéricos, porém é muito difícil fazer esta distinção.

Contagem Modal:

Estimativa modal da mineralogia da rocha:

Visada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
Mineral											
Quartzo	5	10	10	1	15	1	10	10	2	10	7
Feldspato	70	63	55	45	25	47	42	53	48	61	51
Titanita	1	3	0	1	3	0	5	5	2	1	2
Minerais Opacos	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1
Apatita	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<1
Zircão	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	<1
Clorita	15	15	10	25	35	5	25	15	30	15	19
Epidoto	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1
Sericita	3	1	2	15	10	30	10	5	10	2	9
Carbonato	4	5	20	10	10	15	5	10	5	8	9
Argilominerais	1	1	1	2	1	1	0	1	1	1	1

Estimativa modal de material são x material alterado*:

Visada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
Mineral											
Material são	95	96	88	75	85	60	85	90	88	95	86
Material alterado	5	4	12	20	15	40	15	10	12	5	14

*Foi considerado material de alteração somente os minerais relacionados à última fase de hidrotermalismo e processos mais tardios que a rocha passou.

Classificação¹: Metabasalto Hidrotermalizado

Fotos



Figura 1: Amostra estudada neste trabalho. Minerais avermelhados são cristais de K-feldspato.



Figura 2: Lâmina delgada descrita neste trabalho.

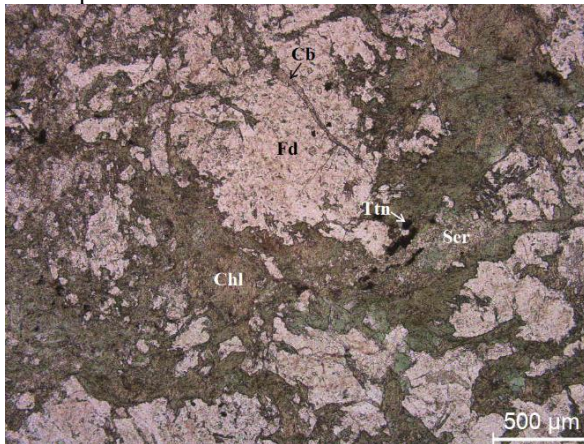


Figura 3: Textura geral da rocha. Imagem em luz transmitida plano polarizada, com a objetiva de 5x.

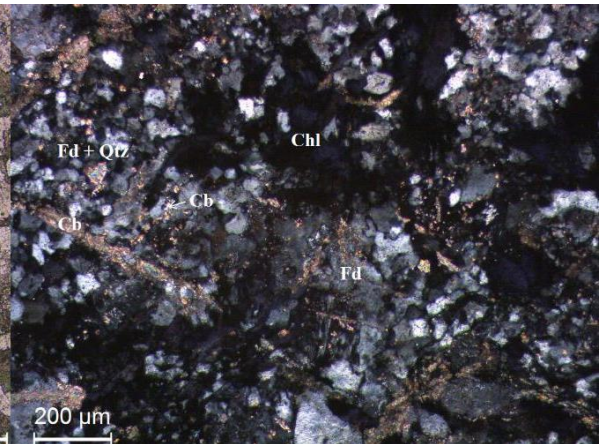


Figura 4: Textura geral da rocha. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados, com a objetiva de 10x.

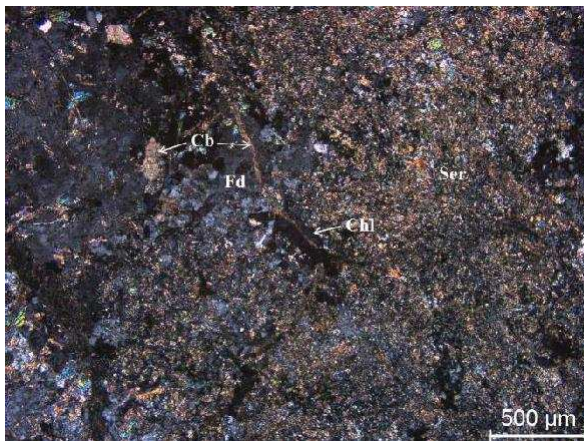


Figura 5: Cristais de sericita substituindo clorita. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados, com a objetiva de 5x.

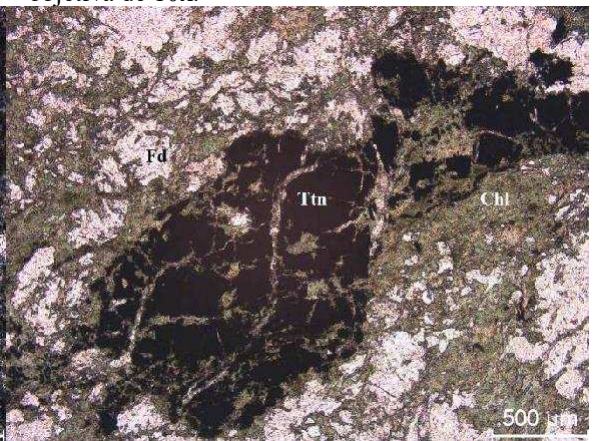


Figura 6: Pseudomorfo substituído para titanita e feldspatos. Imagem em luz transmitida plano polarizada, com a objetiva de 5x.

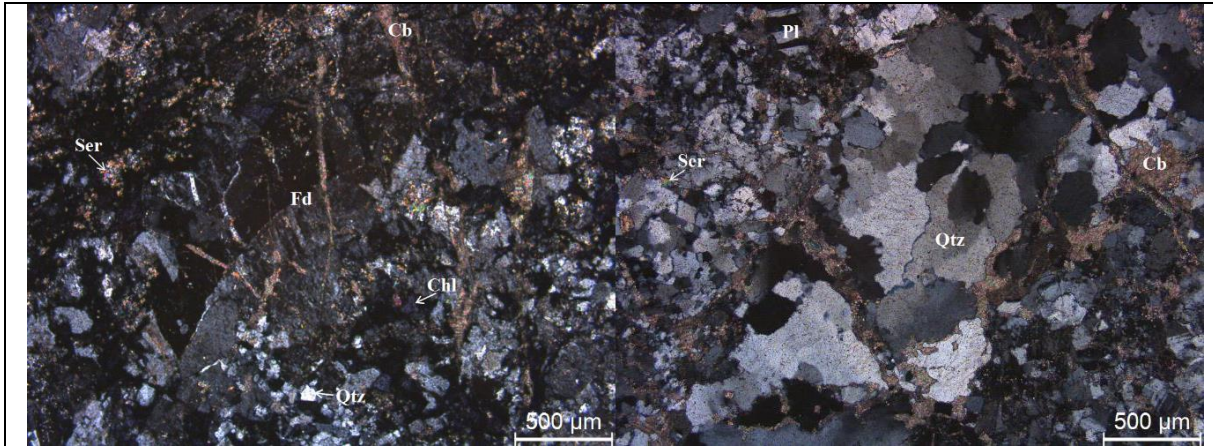


Figura 7: Porfiroclasto de feldspato cortado por Figura 8: “Bolsão” de quartzo cortado por venulações de carbonato. Imagem em luz venulações de carbonato. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados, com a transmitida com os polarizadores cruzados, com a objetiva de 5x. objetiva de 5x.

Legenda: Cb: Carbonato; Chl: Clorita; Fd: Feldspato; Pl: Plagioclásio; Qtz: Quartzo; Ser: Sericita; Ttn: Titanita

Informações adicionais

Contagem de venulações (perfis de 1 cm de espessura): 6/ 7/ 3/ 5

Foram contabilizados as venulações, que podem ter sido fraturas preenchidas por carbonato, principalmente, e clorita. A maior parte delas é intergranular, porém ocorrem algumas venulações intragranulares. A maior parte das venulações se concentra nas regiões mais pobres em clorita. Não foram identificadas fraturas na região de contagem.

Romem de Oliveira Amorim

1 A classificação ígnea segue o sistema de classificação de Le Matre et al. (2002), enquanto a classificação metamórfica segue o sistema de classificação de Fettes & Desmons (2007)

DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA
Identificação da amostra: EDU-B-01
Tipo de rocha: Metamórfica
Mineralogia
Minerais essenciais (>5%): Clorita (Fe-Mg e Mg) e Feldspatos (Plagioclásio e K-Feldspato)
Minerais acessórios (<5%): Titanita, Quartzo, Epidoto (tipo s.s.), Minerais Opacos, Actinolita e Carbonato
Minerais secundários: Sericita, Carbonato e Argilominerais
Aspectos texturais
É uma rocha equigranular, localmente porfiroclástica, com uma matriz variando em uma granulação de fina a média (sempre menor que 1 mm) e raros porfiroclastos com uma granulação média (entre 1 e 4 mm). A forma dos cristais varia de xenoblástica a idioblástica, formando uma textura granoblástica e decussada, com os cristais xenoblásticos mostrando contatos interlobados entre si.
Aspectos estruturais
A rocha ocorre sem uma foliação presente, com os cristais de clorita decussados pela rocha.
Características microscópicas
<p>É uma rocha metamórfica com um protólito ígneo máfico. Para evidenciar os aspectos do metamorfismo que a rocha passou foram utilizados termos de petrografia metamórfica.</p> <p>A rocha é composta em grande parte por cristais de clorita (Fe-Mg e Mg) e feldspatos (a maioria aparentemente é plagioclásio). Titanita, quartzo, epidoto (tipo s.s.), actinolita e minerais opacos são as fases acessórias presentes na rocha. Cristais de sericita, carbonato, epidoto e argilominerais ocorrem substituindo cristais de feldspato. Alguns poucos cristais mostram um processo de saussuritização (possivelmente plagioclásio) substituídos ao mesmo tempo para sericita, carbonato e epidoto. Cristais de titanita aparentemente estão substituindo minerais opacos, porém não é possível se determinar com certeza. Cristais de clorita, sericita e carbonato na matriz ocorrem frequentemente associados, podendo ser fruto da alteração de algum mineral máfico pretérito.</p> <p>Os cristais de quartzo ocorrem xenoblásticos, enquanto os cristais clorita, feldspatos, titanita, epidoto, actinolita, minerais opacos, sericita e carbonato ocorrem subidioblásticos a idioblásticos. Não se é possível determinar a forma dos cristais de argilominerais devido a sua fina granulação. Alguns cristais de feldspato (nem todos), titanita, epidoto, minerais opacos, sericita e carbonatos podem ser descritos como hipidiomórficos a idiomórficos (para evidenciar sua origem ígnea).</p>

Não foram observados cristais de feldspato porfiroclásticos como nas outras lâminas, somente cristais menores, onde muitos cristais mostram um zoneamento composicional. Foram identificados pouquíssimos cristais de feldspato com um tamanho próximo a 1 mm, sendo a grande maioria com um tamanho inferior a este.

Ocorrem alguns poucos pseudomorfos (pode ser que tenham sido alguma fase mineral máfica, como piroxênio e/ou anfibólio) que atualmente são representados por cristais de clorita (principalmente), plagioclásio, titanita, epidoto (ocasional) e carbonato. Alguns pseudomorfos ocorrem maiores e foram classificados como porfiroclastos.

Ocorrem diferentes famílias de venulações nesta rocha. A primeira família é composta por venulações formadas por epidoto, clorita, quartzo (ocasional) e titanita. Uma segunda família ocorre cortando esta primeira e é composta por epidoto, carbonato, clorita (ocorrem em algumas regiões e em outras não) e quartzo. Uma terceira família intercepta a segunda e é formada por cristais de carbonato, quartzo, minerais opacos e epidoto (pode ser que sejam cristais da matriz que foram “capturados” pelas venulações). Uma última família ocorre cortando a geração anterior e tem uma composição semelhante, porém é formada em grande parte por cristais de quartzo e carbonato (carbonatos mais tardios). Ocorre uma família de venulações bem finas compostas por cristais de carbonato (maioria) e quartzo e uma família composta por quartzo (maioria), carbonato e epidoto que ocorrem ora cortadas e ora cortando as venulações da segunda família, porém não foi possível identificar sua relação com as venulações da primeira família. Algumas finas venulações de carbonato e quartzo aparentemente estão derivando das venulações da terceira e quarta família. É possível observar que os cristais de carbonato são tardios nestas venulações. As relações entre estas venulações são complexas e não foi possível se determinar uma ordem de formação precisa. Muitos minerais destas venulações podem ser fases minerais da rocha que foram incorporados pelas venulações.

Esta rocha possivelmente passou por um processo de espilitização, onde os cristais de clorita (principalmente) substituíram alguma fase mineral máfica pretérita.

Além da espilitização, um processo hidrotermal tardio ocorreu nesta rocha, que possivelmente foi responsável pelo enriquecimento em quartzo e carbonatos.

Com base nas interpretações texturais da rocha é possível identificar as seguintes etapas de formação de minerais que estão presentes na rocha:

- Minerais ígneos: Feldspatos (K-feldspato e plagioclásio) + Titanita + Minerais Opacos;
- Minerais metamórficos (metamorfismo hidrotermal - espilitização): Cloritas (Fe-Mg e Mg) + Feldspato (possivelmente um plagioclásio mais albítico) + Actinolita + Titanita (?) + Epidoto + Sericita + Argilominerais + Carbonato (pode ser que os cristais de sericita, epidoto, carbonatos e argilominerais sejam frutos de um processo hidrotermal magmático tardio e não um processo metamórfico);

- Minerais hidrotermais tardios: Quartzo (enriquecimento) + Carbonato (enriquecimento e substituindo fases minerais) + Sericita (substituindo fases minerais) + Argilominerais (substituindo fases minerais);

Pode ser que minerais como sericita e argilominerais tenham se formado mais tardiamente por processos intempéricos, porém é muito difícil fazer esta distinção.

Contagem Modal:

Estimativa modal da mineralogia da rocha:

Visada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
Mineral											
Quartzo	5	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
Feldspato	20	10	40	27	15	25	34	30	40	25	27
Titanita	3	3	3	5	5	2	5	4	4	3	4
Minerais Opacos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Clorita	61	71	41	52	62	51	42	51	41	54	53
Epidoto	3	5	4	2	3	5	2	2	3	5	3
Actinolita	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	<1
Sericita	1	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3
Carbonato	5	5	5	8	8	10	10	5	6	5	6
Argilominerais	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1

Estimativa modal de material são x material alterado*:

Visada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
Mineral											
Material são	96	95	92	90	90	92	88	94	90	90	92
Material alterado	4	5	8	10	10	8	12	6	10	10	8

*Foi considerado material de alteração somente os minerais relacionados à última fase de hidrotermalismo e processos mais tardios que a rocha passou.

Classificação¹: Cloritito

Fotos



Figura 1: Amostra estudada neste trabalho.

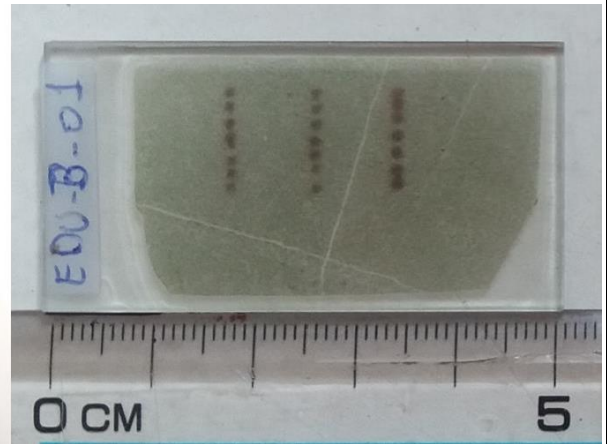


Figura 2: Lâmina delgada descrita neste trabalho.

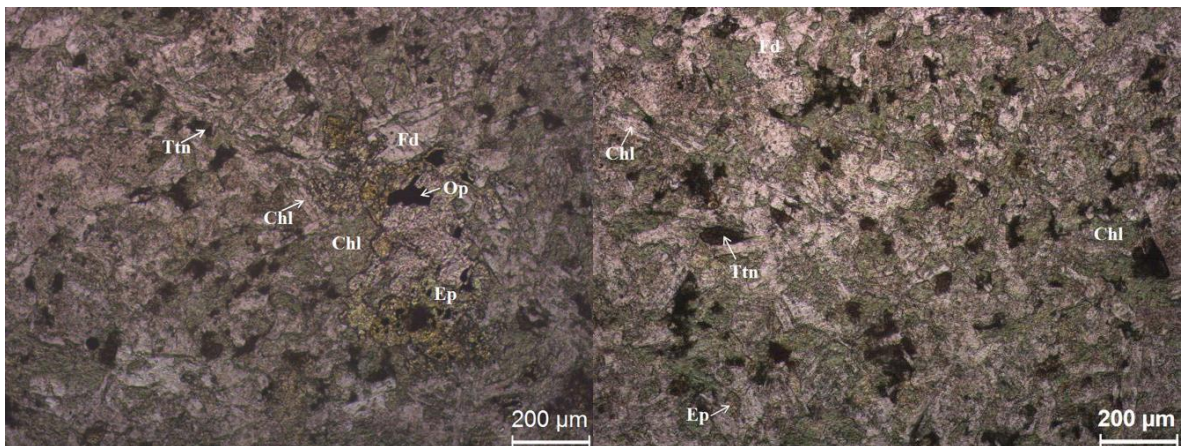


Figura 3: Textura geral da rocha. Imagem em luz transmitida plano polarizada, com a objetiva de 10x. Figura 4: Textura geral da rocha. Imagem em luz transmitida plano polarizada, com a objetiva de 10x.

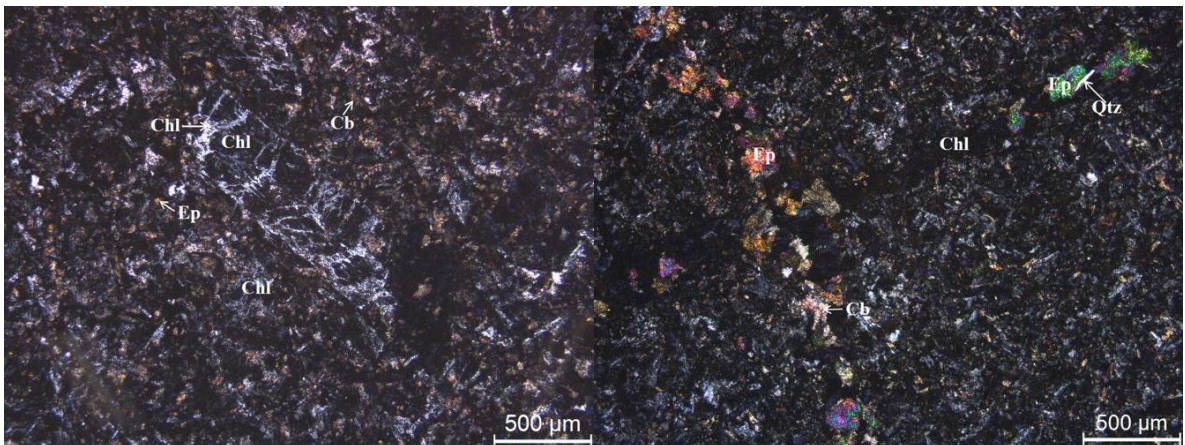


Figura 5: Pseudomorfo substituído para cristais de clorita. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados, com a objetiva de 5x. Figura 6: Venulações da primeira e segunda família clorita. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados, com a objetiva de 5x.

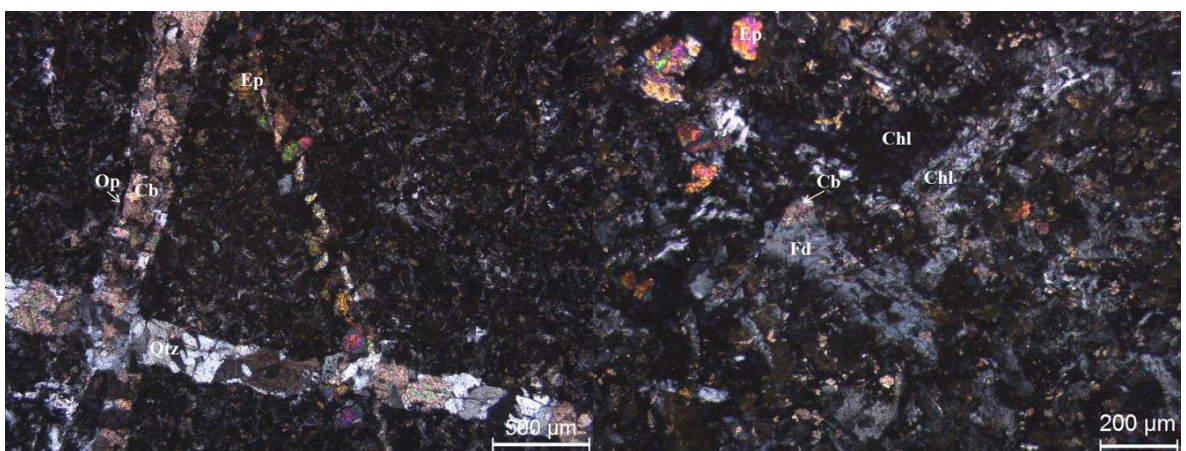


Figura 7: Venulações da segunda, terceira e quarta Figura 8: Aspecto dos maiores cristais de feldspato famílias. Imagem em luz transmitida com os da rocha. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados, com a objetiva de 5x. polarizadores cruzados, com a objetiva de 10x.

Legenda: Cb: Carbonato; Chl: Clorita; Ep: Epidoto; Fd: Feldspato; Op: Minerais Opacos; Qtz: Quartzo; Ttn: Titanita

Informações adicionais

Contagem de fraturas (perfis de 1 cm de espessura): 0/ 0/ 0/ 1

Não foram identificadas fraturas, somente uma fratura bem fina e não contínua, nem venulações.

Romão de Oliveira Aranda

¹ A classificação ígnea segue o sistema de classificação de Le Matrie et al. (2002), enquanto a classificação metamórfica segue o sistema de classificação de Fettes & Desmons (2007)

DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA

Identificação da amostra: EDU-C-01

Tipo de rocha: Metamórfica

Mineralogia

Minerais essenciais (>5%): Feldspatos (Plagioclásio e K-Feldspato), Actinolita, Epidoto (tipo s.s.), Clorita (Fe-Mg e Mg) e Carbonato

Minerais acessórios (<5%): Titanita, Quartzo, Minerais Opacos e Zircão

Minerais secundários: Sericita, Carbonato e Argilominerais

Aspectos texturais

É uma rocha equigranular, com uma matriz em uma granulação fina (sempre menor que 0,5 mm). A forma dos cristais varia de xenoblástica a idioblástica, formando uma textura decussada, com os cristais xenoblásticos mostrando contatos interlobados entre si.

Aspectos estruturais

A rocha ocorre sem uma foliação presente, com os cristais de actinolita e clorita decussados pela rocha.

Características microscópicas

É uma rocha metamórfica com um protólito ígneo máfico. Para evidenciar os aspectos do metamorfismo que a rocha passou foram utilizados termos de petrografia metamórfica.

A rocha é composta em grande parte por cristais de feldspatos (a maioria aparentemente é plagioclásio), clorita (Fe-Mg e Mg), actinolita, epidoto e carbonato. Titanita, quartzo, minerais opacos e zircão são as fases acessórias presentes na rocha. Cristais de sericita, carbonato, epidoto e argilominerais ocorrem substituindo cristais de feldspato e possivelmente fases máficas (totalmente substituídas). Cristais de titanita estão aparentemente substituindo minerais opacos, porém não é possível se confirmar.

Os cristais de quartzo ocorrem xenoblásticos, enquanto os cristais clorita, feldspatos, titanita, epidoto, actinolita, minerais opacos, zircão, sericita e carbonato ocorrem subidioblásticos a idioblásticos. Não se é possível determinar a forma dos cristais de argilominerais devido a sua fina granulação. Alguns cristais de feldspato (nem todos), titanita, epidoto, minerais opacos, zircão, sericita e carbonatos podem ser descritos como hipidiomórficos a idiomórficos (para evidenciar sua origem ígnea).

Cristais de quartzo são escassos, ocorrendo principalmente associados as venulações (próximo parágrafo) e frequentemente mostrando extinção ondulante.

Ocorrem diferentes famílias de venulações nesta rocha, formando um aspecto de *stockwork*, sendo difícil traçar uma ordem cronológica de formação. Porém, com as interpretações da lâmina se chegou a esta ordem de formação das venulações (não é possível se ter certeza):

- Família 1: carbonato + epidoto + actinolita (rara)
- Família 2: actinolita + carbonato + epidoto (maioria)+ quartzo (raro)
- Família 3: actinolita + carbonato + epidoto (maioria) + quartzo (principalmente na interseção com as outras famílias)
- Família 4: quartzo + carbonato + epidoto (restrito a interseção com as outras famílias)
- Família 5: quartzo + carbonato
- Família 6: epidoto (maioria) + actinolita + quartzo (ocasional) + carbonato (ocasional) + minerais opacos
- Família 7: carbonato (aparentemente derivada da anterior)

Além destas famílias, ocorre pequenas venulações compostas por carbonato, onde não foi possível identificar uma ordem cronológica.

Apesar das diferentes famílias classificadas, as venulações ocorrem quase concomitantes no tempo, possivelmente caracterizando stockworks.

Esta rocha possivelmente passou por um processo de espilitização, onde os cristais de clorita (principalmente) substituíram alguma fase mineral máfica pretérita.

Além da espilitização, um processo hidrotermal tardio ocorreu nesta rocha, que possivelmente foi responsável pelo enriquecimento em quartzo e carbonatos.

Com base nas interpretações texturais da rocha é possível identificar as seguintes etapas de formação de minerais que estão presentes na rocha:

- Minerais ígneos: Feldspatos (K-feldspato e plagioclásio) + Titanita + Minerais Opacos + Zircão;
- Minerais metamórficos (metamorfismo hidrotermal - espilitização): Cloritas (Fe-Mg e Mg) + Actinolita + Titanita (?) + Epidoto + Sericita + Carbonato + Argilominerais (pode ser que os cristais de sericita, epidoto, carbonato e argilominerais sejam frutos de um processo hidrotermal magmático tardio e não um processo metamórfico);
- Minerais hidrotermais tardios: Quartzo (enriquecimento) + Carbonato (enriquecimento e substituindo fases) + Minerais Opacos (enriquecimento) + Sericita (substituindo fases minerais) + Argilominerais (substituindo fases minerais);

Pode ser que minerais como sericita e argilominerais tenham se formado mais tardiamente por processos intempéricos, porém é muito difícil fazer esta distinção.

Contagem Modal:

Estimativa modal da mineralogia da rocha:

Visada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
Mineral											
Quartzo	1	0	0	0	0	0	1	0	5	0	1
Feldspato	40	15	38	41	48	48	47	48	48	54	42
Titanita	4	5	4	4	5	3	4	4	5	3	4
Minerais Opacos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Zircão	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	<1
Clorita	6	1	6	2	10	12	11	6	5	2	7
Actinolita	18	35	20	20	10	5	5	15	15	12	15
Epidoto	10	1	5	5	10	15	10	5	5	6	7
Sericita	5	12	5	10	5	5	5	5	5	5	6
Carbonato	15	30	20	15	10	10	15	15	10	15	16
Argilominerais	0	0	1	2	1	1	1	1	1	1	1

Estimativa modal de material são x material alterado*:

Visada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
Mineral											
Material são	80	65	75	75	85	85	85	80	85	85	80
Material alterado	20	35	25	25	15	15	15	20	15	15	20

*Foi considerado material de alteração somente os minerais relacionados à última fase de hidrotermalismo e processos mais tardios que a rocha passou.

Classificação¹: Actinolita-Clorita Metabasalto Hidrotermalizado

Fotos

Figura 1: Amostra estudada neste trabalho.

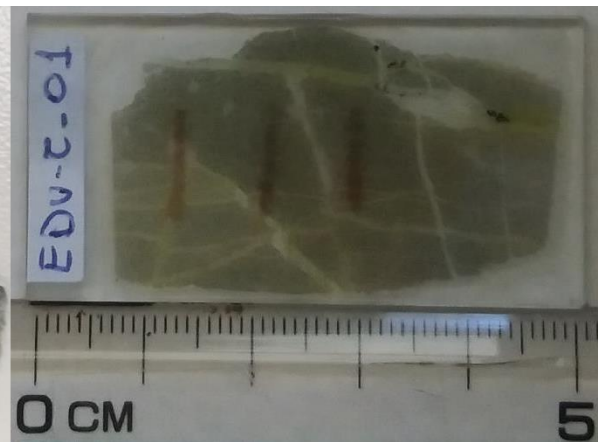


Figura 2: Lâmina delgada descrita neste trabalho.

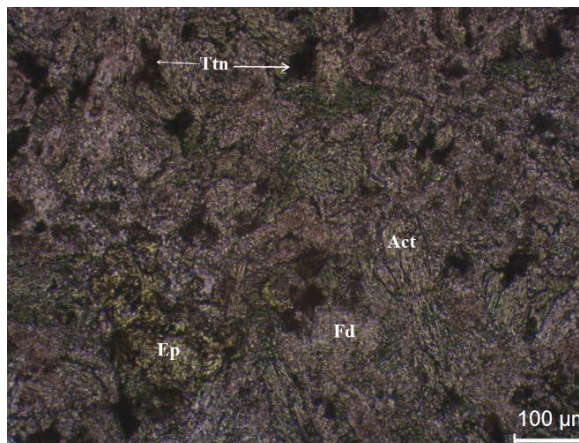


Figura 3: Textura geral da rocha. Imagem em luz transmitida plano polarizada, com a objetiva de 10x.

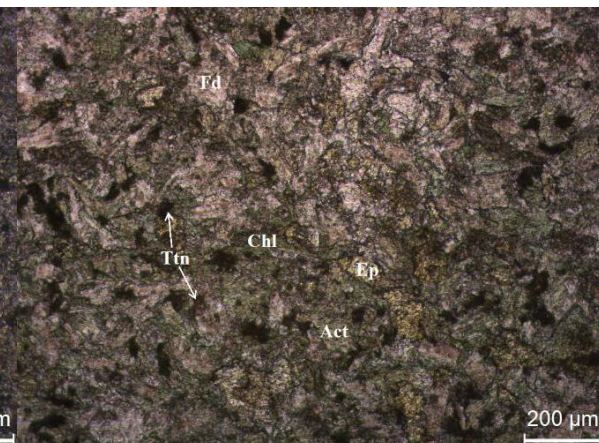


Figura 4: Textura geral da rocha. Imagem em luz transmitida plano polarizada, com a objetiva de 20x.

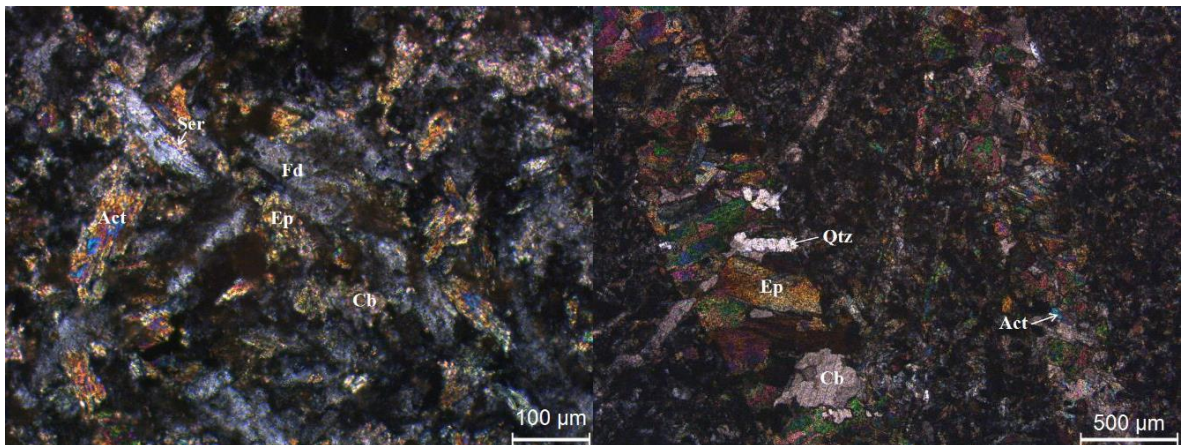


Figura 5: Textura geral da rocha. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados, com a objetiva de 20x. Figura 6: Diferentes venulações que ocorrem na rocha. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados, com a objetiva de 5x.

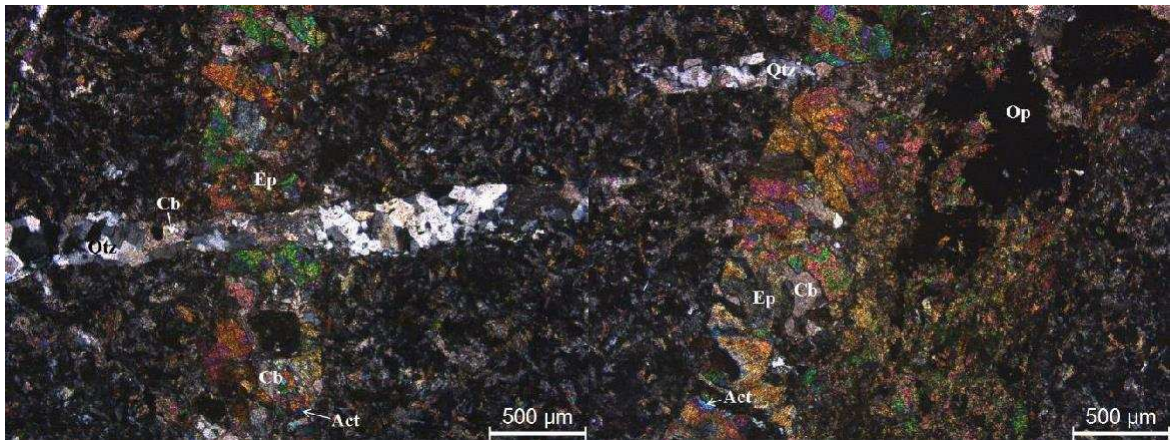


Figura 7: Diferentes venulações que ocorrem na rocha. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados, com a objetiva de 5x. Figura 8: Venulação espessa composta por epidoto, actinolita, quartzo (ocasional), carbonato (ocasional) e minerais opacos. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados, com a objetiva de 5x.

Legenda: Act: Actinolita; Cb: Carbonato; Chl: Clorita; Ep: Epidoto; Fd: Feldspato; Op: Minerais Opacos; Qtz: Quartzo; Ser: Sericita; Ttn: Titanita.

Informações adicionais

Contagem de fraturas (perfis de 1 cm de espessura): 0/ 0/ 1/ 0 -

Contagem de venulações (perfis de 1 cm de espessura, mesmo do anterior): 6/ 4/ 5/ 5

Não foram identificadas muitas fraturas, somente uma fratura bem fina.

Rommel de Oliveira Amorim

¹ A classificação ígnea segue o sistema de classificação de Le Matrie et al. (2002), enquanto a classificação metamórfica segue o sistema de classificação de Fettes & Desmons (2007)

DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA
Identificação da amostra: EDU-D-01
Tipo de rocha: Metamórfica
Mineralogia
Minerais essenciais (>5%): Clorita (Fe-Mg e Mg-Fe, minoria), Feldspatos (Plagioclásio e K-Feldspato) e Quartzo
Minerais acessórios (<5%): Titanita, Epidoto (tipo s.s.), Minerais Opacos, Apatita, Zircão e Carbonato
Minerais secundários: Sericita, Carbonato e Argilominerais
Aspectos texturais
É uma rocha inequigranular porfiroclástica, com uma matriz variando em uma granulação de fina a média (sempre menor que 1 mm) e porfiroclastos com uma granulação média (entre 1 a 4 mm). A forma dos cristais varia de xenoblástica a idioblástica, formando uma textura granoblástica e decussada. Os cristais xenoblásticos mostram contatos interlobados entre si, com alguns cristais de quartzo mostrando contatos poligonizados.
Aspectos estruturais
A rocha ocorre sem uma foliação presente, com os cristais de clorita decussados pela rocha.
Características microscópicas
É uma rocha metamórfica com um protólito ígneo máfico. Para evidenciar os aspectos de metamorfismo que a rocha passou foram utilizados termos de petrografia metamórfica. A rocha é composta em grande parte por cristais de clorita (Fe-Mg, maioria, e Mg-Fe, minoria), feldspatos (plagioclásio e K-feldspato) e quartzo, ocorrendo titanita, epidoto (tipo s.s.), minerais opacos, zircão e apatita como fases acessórios. Cristais de sericita, carbonato, epidoto e argilominerais ocorrem substituindo cristais de feldspato. Alguns cristais mostram um processo de saussuritização (possivelmente plagioclásio) substituídos ao mesmo tempo para sericita, carbonato e epidoto. Cristais de clorita-titanita, clorita-epidoto e clorita-feldspato (possivelmente plagioclásio) ocorrem ocasionalmente associados, podendo ser

fruto da substituição hidrotermal de alguma fase. Além disso, alguns cristais de feldspato aparentemente também estão substituídos por um outro tipo de feldspato (possivelmente mais albitico). Cristais de titanita possivelmente estão substituindo alguma fase opaca, porém não é possível ter certeza.

Os cristais de quartzo ocorrem xenoblásticos, enquanto os cristais clorita, feldspatos (os cristais maiores ocorrem mais bem formados), titanita, epidoto, minerais opacos, zircão, apatita, sericita e carbonato ocorrem subdioblásticos a idioblásticos. Não se é possível determinar a forma dos cristais de argilominerais devido a sua fina granulação. Alguns cristais de feldspato (nem todos), titanita, epidoto, minerais opacos, zircão, apatita, sericita e carbonatos podem ser descritos como hipidiomórficos a idiomórficos (para evidenciar sua origem ígnea).

É possível observar registros de deformação nesta rocha, que é registrado principalmente pelos cristais de quartzo. Estes cristais ocorrem aparentemente em bolsões e recristalizados, mostrando extinção ondulante e formação de subgrãos e novos grãos (mais ocasional). A maior parte dos cristais mostram contatos interlobados entre si, com alguns cristais mostrando contatos poligonizados. Estas texturas são indícios de deformação dinâmica e estática.

Ocorrem porfiroclastos subdioblásticos a idioblásticos de feldspato. Os maiores cristais são cristais de K-feldspato, que são rosados em amostra de mão, enquanto os menores cristais são de K-feldspato e plagioclásio. Alguns cristais mostram um zonamento composicional. Os cristais de feldspato estão fraturados, com fraturas preenchidas principalmente por carbonato e cloritas. Em algumas regiões ocorre uma concentração de cristais de feldspato muito alterados, onde não é possível se determinar o tamanho desses cristais com acurácia.

Em algumas regiões ocorrem aparentes pseudomorfos (pode ser que foram alguma fase mineral máfica, como piroxênio e/ou anfibólio) que atualmente são representados por cristais de clorita, epidoto (ocasional), carbonato e titanita.

Ocorrem algumas venulações (que podem ter sido antigas fraturas) que cortam a rocha sem uma orientação preferencial. Estas venulações são preenchidas por cristais de carbonato (maioria das vezes e ocorrendo intra- e intergranulares) e clorita (intregranulares). Em algumas regiões é possível observar pequenas fraturas acompanhando as direções destas venulações.

Esta rocha possivelmente passou por um processo de espilitização, onde os cristais de clorita (principalmente) substituíram alguma fase mineral máfica pretérita.

Além da espilitização, um processo hidrotermal tardio ocorreu nesta rocha, que possivelmente foi responsável pelo enriquecimento em quartzo (estes ocorrendo algumas vezes em “bolsões” e aglomerados) e carbonatos.

Com base nas interpretações texturais da rocha é possível identificar as seguintes etapas de formação de minerais que estão presentes na rocha:

- Minerais ígneos: Feldspatos (K-feldspato e plagioclásio) + Titanita + Apatita + Zircão + Minerais Opacos;

- Minerais metamórficos (metamorfismo hidrotermal - espilitização): Cloritas (Mg-Fe e Fe-Mg) + Feldspato (possivelmente um plagioclásio albítico) + Epidoto + Titanita (?) + Sericita + Carbonato + Argilominerais (pode ser que os cristais de epidoto, sericita, carbonato e argilominerais sejam frutos de um processo hidrotermal magmático tardio e não um processo metamórfico);
- Minerais hidrotermais tardios: Quartzo (enriquecimento) + Carbonato (enriquecimento e substituindo fases minerais) + Sericita (substituindo fases minerais) + Argilominerais (substituindo fases minerais);

Pode ser que minerais como sericita e argilominerais tenham se formado mais tardiamente por processos intempéricos, porém é muito difícil fazer esta distinção.

Contagem Modal:

Estimativa modal da mineralogia da rocha:

Visada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
Mineral											
Quartzo	49	47	38	5	35	20	10	10	15	5	23
Feldspato	10	15	5	28	14	43	39	40	31	44	27
Titanita	1	3	3	2	1	2	1	4	3	2	2
Minerais Opacos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Apatita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<1
Zircão	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	<1
Clorita	35	30	50	60	40	25	40	35	45	45	41
Epidoto	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	<1
Sericita	1	1	1	1	1	2	2	5	1	1	2
Carbonato	3	2	2	3	5	5	5	4	2	1	3
Argilominerais	0	0	0	0	1	2	1	1	1	0	1

Estimativa modal de material são x material alterado*:

Visada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
Mineral											
Material são	98	98	98	97	98	97	97	96	98	97	97
Material alterado	2	2	2	3	2	3	3	4	2	3	3

*Foi considerado material de alteração somente os minerais relacionados à última fase de hidrotermalismo e processos mais tardios que a rocha passou.

Classificação¹: Metabasalto Hidrotermalizado

Fotos



Figura 1: Amostra estudada neste trabalho. Os minerais avermelhados são cristais de K-feldspato.

Figura 2: Lâmina delgada descrita neste trabalho.

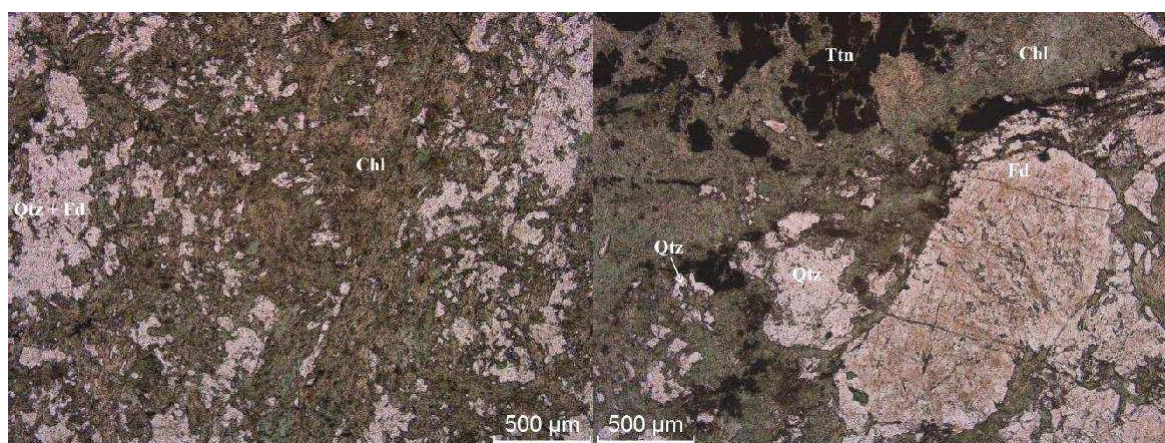


Figura 3: Textura geral da rocha. Imagem em luz transmitida plano polarizada, com a objetiva de 5x.

Figura 4: Textura geral da rocha evidenciando bem como os porfiroclastos de K-feldspato ocorrem. Imagem em luz transmitida plano polarizada, com a objetiva de 5x.

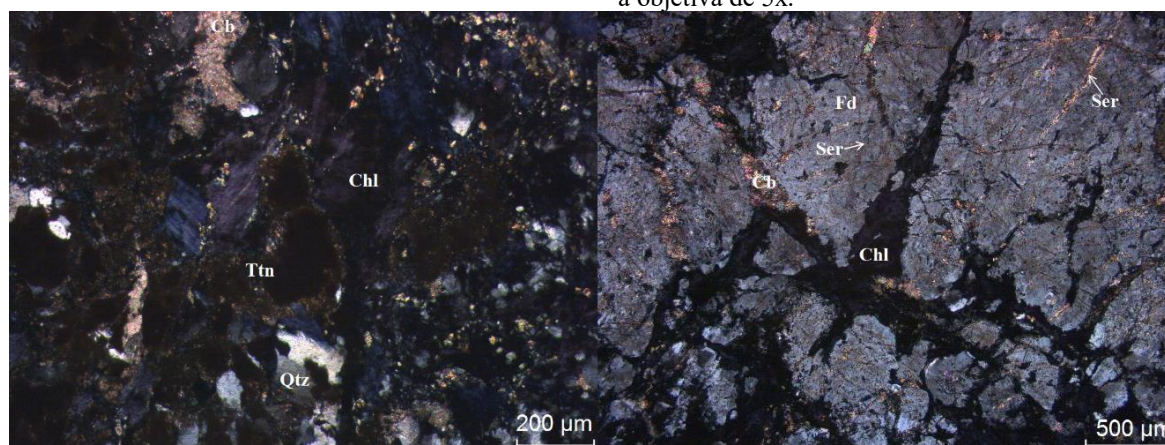


Figura 5: Textura geral da rocha. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados, com a objetiva de 10x.

para carbonato e sericita. Imagem em luz

Figura 6: Cristal de feldspato porfiroclástico fraturado, com as fraturas preenchidas por clorita e carbonato, e também mostrando uma substituição transmitida com os polarizadores cruzados, com a objetiva de 5x.

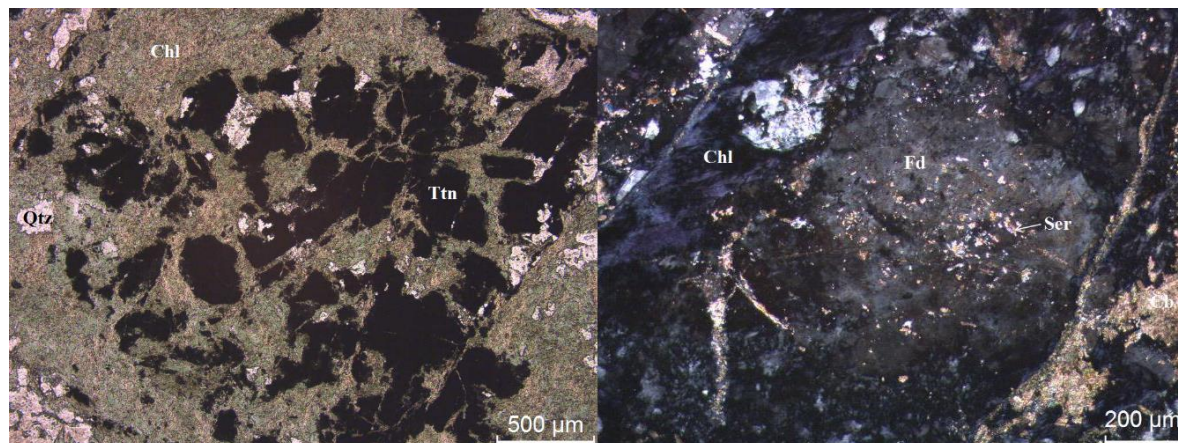


Figura 7: Pseudomorfo substituído para titanita e clorita. Imagem em luz transmitida plano polarizada, com a objetiva de 5x.

Figura 8: Cristal de feldspato substituído para sericita e carbonato. É possível se observar uma venulação preenchida por carbonato a direita. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados, com a objetiva de 10x.

Legenda: Cb: Carbonato; Chl: Clorita; Fd: Feldspato; Qtz: Quartzo; Ser: Sericita; Ttn: Titanita.

Informações adicionais

Contagem de venulações (perfis de 1 cm de espessura): 5/ 2/ 5/ 11

Foram contabilizados as venulações, que podem ter sido fraturas preenchidas por carbonato, principalmente, e clorita. Muitas venulações ocorrem intragulares, restrito aos cristais (no último perfil de contagem ocorreram cristais cortados por muitas venulações). Não foram encontradas fraturas na área de contagem.

Romem de Oliveira Aranda

¹ A classificação ígnea segue o sistema de classificação de Le Matrie et al. (2002), enquanto a classificação metamórfica segue o sistema de classificação de Fettes & Desmons (2007)

ANEXO B – Descrição petrográfica das lâminas – Ciclo 100

INFORMAÇÕES BÁSICAS
Cliente: Eduardo Marques (Universidade Federal de Viçosa-UFV)
Responsável pela descrição: Ramon de Oliveira Aranda (Geólogo) - ES-045606/D
Objetivo: Identificação de aspectos básicos da rocha, como mineralogia, texturas, estruturas, tal como a sua classificação seguindo critério internacionais. Além disso, será estimada a porcentagem de material intemperizado e fraturas por centímetro.
DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA
Identificação da amostra: EDU-01
Tipo de rocha: Metamórfica
Mineralogia
Minerais essenciais (>5%): Plagioclásio (50%) e Cloritas (Fe-Mg, Mg-Fe e Mg, 37%)
Minerais acessórios (<5%): Epidoto s.s. (2%), Quartzo (2%), Titanita (3%), Zircão (<1%), Actinolita (<1%) e Minerais Opacos (<1%)
Minerais secundários: Carbonato (3%), Sericita (2%) e Argilominerais (1%)
Aspectos texturais
É uma rocha equigranular, com uma granulação fina (em geral os cristais possuem uma espessura inferior a 0,25 mm, com ocasionais cristais atingindo cerca de 0,4 mm). A rocha mostra uma microestrutura decussada, com os cristais variando de xenoblásticos a idioblásticos e com os cristais mal formados mostrando contatos interlobados entre si.
Aspectos estruturais
Os cristais que compõem a rocha ocorrem decussados, sem nenhuma direção preferencial.
Características microscópicas
A rocha é formada em grande parte por cristais de plagioclásio (subdioblásticos) e cloritas (Fe-Mg, maioria, Mg-Fe e Mg, idioblásticos). Epidoto s.s. (subdioblásticos), quartzo (xenoblásticos), titanita (subdioblásticas), zircão (subdioblásticos), actinolita (subdioblásticas) e minerais opacos (subdioblásticos) são as fases acessórias presentes na rocha (Figuras 1 e 2).
Plagioclásio é o maior constituinte da rocha, ocorrendo como cristais quase tabulares e mostrando um zonamento composicional. Os cristais ocorrem substituídos, apresentando um aspecto “sujo”. Estes cristais estão substituídos por carbonato (subdioblásticos), sericita (subdioblásticas) e argilominerais (muito fino para se dizer se estão bem ou mal formados) (Figura 3). Clorita é o segundo maior constituinte da rocha, sendo a maior parte dos cristais

do tipo Fe-Mg, porém também ocorre uma menor quantidade de cloritas do tipo Mg-Fe e Mg. Muitos destes cristais ocorrem substituindo actinolita.

Os cristais de actinolita mostram uma coloração esverdeada e ocorrem quase totalmente substituídos para carbonatos e cloritas (a maior parte do tipo Fe-Mg) (Figura 4). Os cristais de epidoto podem ser minerais que substituíram cristais prévios da rocha, como plagioclásio, podendo este ser um produto de um processo metamórfico ou hidrotermal. É comum ocorrerem inclusões de minerais opacos (calcopirita, bornita, calcocita e pirita, em ordem de ocorrência) nestes cristais de epidoto. Já os cristais de titanita e zircão ocorrem aparentemente “desbotados e quebradiços”, sendo este um possível produto do intemperismo.

Pseudomorfos circulares (com até cerca de 1,9 mm de espessura) e substituídos principalmente por cloritas (do tipo Fe-Mg e Mg) ocorrem (Figura 5) nesta rocha. É difícil identificar quem era este mineral, mas provavelmente era um mineral rico em Mg e Fe.

Uma interpretação da mineralogia da rocha pode ser a seguinte:

- Cloritas, carbonato (parte deles, principalmente os associados a actinolita) e epidoto s.s.: são minerais metamórficos que substituíram minerais do protólito desta rocha (alguma rocha básica/máfica);
- Carbonatos (parte deles, principalmente os substituindo os plagioclásios), sericita e argilominerais: minerais intempéricos ou relacionados a um hidrotermalismo tardio;

Uma característica interessante desta rocha são as venulações que a cortam, ocorrendo algumas famílias de venulações (listadas abaixo em ordem de abundância):

- Família 1: Epidoto s.s. + Fe-Mg clorita (com até 0,3 mm de espessura) (Figura 6);
- Família 2: Carbonato (com até 0,1 mm de espessura);
- Família 3: Quartzo + carbonato + minerais opacos (aparentemente calcopirita e hematita) (com até 0,4 mm de espessura) (Figura 7);
- Família 4: Carbonato + epidoto s.s. (com até 0,7 mm de espessura) (Figura 8);

Pode ser que as venulações estejam preenchendo fraturas e falhas, porém é difícil perceber esta característica em lâmina. É possível observar alguns deslocamentos quando as diferentes famílias de venulações se interceptam.

Ocorrem somente duas fraturas na rocha (se considerarmos as falhas como fraturas).

A relação material sã/intemperizado nesta rocha é (%): 94/6

Contagem modal:

Estimativa modal da mineralogia da rocha (%):

Visada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
Mineral													
Plagioclásio	56	52	53	52	47	52	52	44	49	44	53	48	50
Epidotos	2	3	2	2	2	2	2	2	3	2	1	1	2
Cloritas	35	35	35	35	40	35	35	40	35	40	35	40	37

Quartzo	<1	2	1	2	1	1	2	2	2	1	2	3	2
Titanita	2	2	3	3	3	3	2	3	4	4	3	3	3
Zircão	0	0	<1	<1	<1	<1	<1	0	<1	0	0	0	<1
Actinolita	0	<1	<1	<1	1	1	1	1	1	<1	<1	<1	<1
Minerais Opacos	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1	<1	<1	<1
Sericita	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Carbonato	2	3	3	3	2	3	3	4	3	4	3	2	3
Argilominerais	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1

Classificação¹: Actinolita-Clorita Metabásica

Fotomicrografias

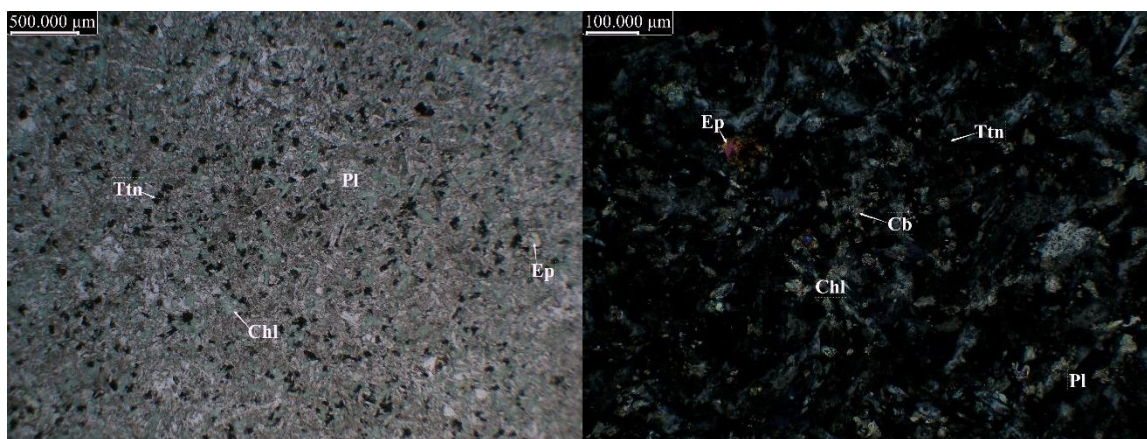


Figura 1: Textura geral da rocha. Imagem em luz transmitida plano polarizada com a objetiva de 10x. Figura 2: Textura geral da rocha. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados com a 2,5x, objetiva de 10x.

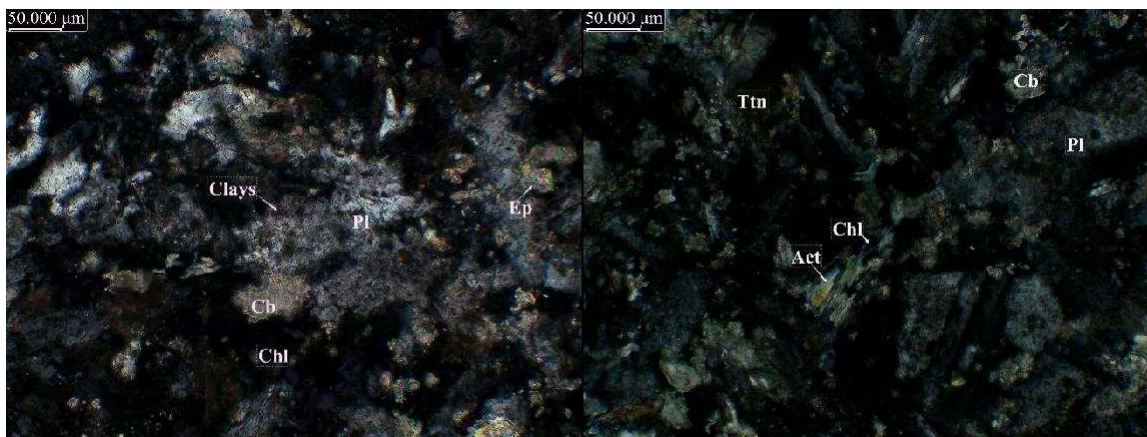


Figura 3: Aspecto dos cristais de plagioclásio substituídos para carbonato e argilominerais. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados com a objetiva de 20x. Figura 4: Aspecto dos cristais de actinolita substituídos para clorita e carbonato. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados com a objetiva de 20x.

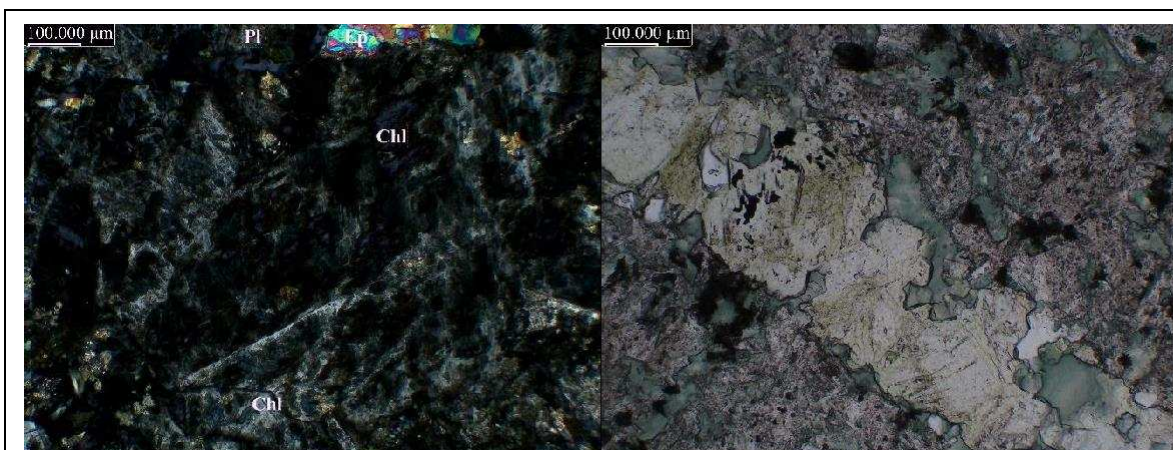


Figura 5: Aspecto dos pseudomorfos presentes na Figura 6: Aspecto das venulações da primeira rocha. Imagem em luz transmitida com os família. Imagem em luz transmitida plano polarizadores cruzados com a objetiva de 10x.

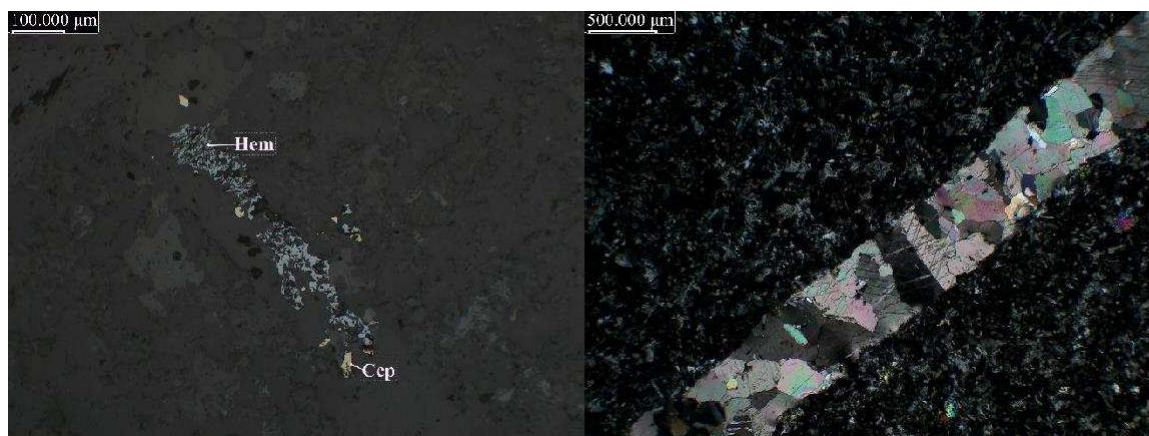


Figura 7: Aspecto dos opacos presentes na Figura 8: Aspecto das venulações da quarta família. venulação da terceira família. Imagem em luz transmitida com os polarizadores refletida polarizada cruzados com a objetiva de 2,5x.

Legenda: Cb: Carbonato; Ccp: Calcopirita; Chl: Clorita; Clays: Argilominerais; Ep: Epidoto; Hem: Hematita; Pl: Plagioclásio; Ttn: Titanita.

Informações adicionais

O Laboratório Arkad foi responsável pela confecção e descrição petrográfica da lâmina delgada polida de rocha, não sendo responsável pela amostragem.

Contagem de fraturas (4 perfis de 1 cm): 2/0/0/0

Romão de Oliveira Amorim

¹ A classificação ígnea segue o sistema de classificação de Le Maitre et al. (2002), enquanto a classificação metamórfica segue o sistema de classificação de Fettes & Desmons (2007)

DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA
Identificação da amostra: EDU-02
Tipo de rocha: Metamórfica
Mineralogia
Minerais essenciais (>5%): Plagioclásio (46%) e Cloritas (Fe-Mg, Mg e Fe, 39%)
Minerais acessórios (<5%): Epidoto s.s. (2%), Titanita (3%), Actinolita (2%), Quartzo (2%) e Minerais Opacos (<1%)
Minerais secundários: Carbonato (3%), Argilominerais (2%) e Sericita (1%)
Aspectos texturais
É uma rocha equigranular, com uma granulação fina (em geral os cristais possuem uma espessura inferior a 0,25 mm, com ocasionais cristais atingindo cerca de 0,4 mm). A rocha mostra uma microestrutura decussada, com os cristais variando de xenoblásticos a idioblásticos, com os cristais mal formados mostrando contatos interlobados entre si.
Aspectos estruturais
Os cristais que compõem a rocha ocorrem decussados, sem nenhuma direção preferencial.
Características microscópicas
A rocha é composta em grande parte por cristais de plagioclásio (xenoblásticos a subdioblásticos) e cloritas (Fe-Mg, Fe e Mg, estas duas últimas ocasionais, subdioblásticos a idioblásticos). Actinolita (subdioblásticas a idioblásticas), epidoto s.s. (subdioblásticos), titanita (subdioblásticas), quartzo (xenoblásticos) e minerais opacos (subdioblásticos) são as fases acessórias identificadas na rocha (Figuras 1 e 2).
Plagioclásio é o principal constituinte desta rocha. Os cristais mostram um zonamento composicional e estão substituídos por argilominerais (muito finos para se dizer se estão bem ou mal formados), carbonatos (subdioblásticos) e sericita (subdioblásticas a idioblásticas) (Figura 3). Estes cristais substituídos ficam com um aspecto de “sujo”. Clorita é o segundo mineral mais frequente na rocha, sendo a grande parte dos cristais do tipo Fe-

Mg (Figuras 1 e 2), porém também ocorrem uma menor quantidade dos tipos Mg e Fe. Estes minerais ocorrem substituindo os cristais de actinolita.

Os cristais de actinolita mostram uma coloração verde clara e estão intensamente substituídos para cloritas e localmente para carbonatos (Figura 4), ocorrendo alguns cristais como pseudomorfos. O epidoto presente na rocha é do tipo s.s. e pode ser que esteja substituindo alguma fase mineral, como plagioclásio (processo metamórfico ou hidrotermal). Muito comum nesta rocha é a ocorrência de inclusões de minerais opacos nos epidotos. Já os cristais de titanita mostram uma coloração “amarronzada desbotada” e aparentemente estão quebradiços, podendo ser esta textura um produto do intemperismo.

Uma interpretação da mineralogia da rocha pode ser a seguinte:

- Cloritas, carbonato (parte deles, principalmente os associados a actinolita) e epidoto s.s.: são minerais metamórficos que substituíram minerais do protólito desta rocha (alguma rocha básica);
- Carbonatos (parte deles, principalmente os substituindo os plagioclásios), sericita e argilominerais: minerais intempéricos ou relacionados a um hidrotermalismo tardio;

O que chama a atenção nesta rocha são as venulações que a cortam em diferentes sentidos, sendo identificados pelo menos 4 famílias de venulações principais (listadas em ordem cronológica):

- Família 1: Epidoto s.s. + Fe-Mg clorita + carbonatos (com até 0,4 mm de espessura) (Figura 5);
- Família 2: Carbonato (com até 0,1 mm de espessura) (Figura 6);
- Família 3: Epidoto s.s. + Fe-Mg clorita + quartzo + minerais opacos (com até 1,3 mm de espessura) (Figura 7);
- Carbonato + quartzo (com até 0,1 mm de espessura) (Figura 8);

Algumas venulações aparentemente ocorrem preenchendo falhas, sendo possível observar alguns deslocamentos das venulações quando são interceptadas por outras.

Ocorrem somente duas fraturas na rocha (se considerarmos as falhas como fraturas).

A relação material sã/intemperizado nesta rocha é (%): 94/6

Contagem modal:

Estimativa modal da mineralogia da rocha (%):

Visada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
Mineral													
Plagioclásio	44	46	45	52	45	44	48	50	45	45	39	44	46
Epidoto s.s.	3	2	2	2	1	3	1	2	2	2	2	3	2
Cloritas	40	40	40	35	40	40	40	35	40	40	45	40	39
Quartzo	3	3	2	3	2	2	2	3	2	2	2	2	2
Titanita	2	2	3	2	3	3	3	3	4	3	3	2	3
Anfibólios	1	2	5	3	4	2	1	2	3	2	2	2	2
Minerais Opacos	1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1	1	<1

Sericita	1	1	<1	<1	1	1	<1	<1	1	1	1	1	1
Carbonato	3	2	1	1	2	3	3	3	2	3	3	3	3
Argilominerais	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2

Classificação¹: Actinolita-Clorita Metabásica

Fotomicrografias

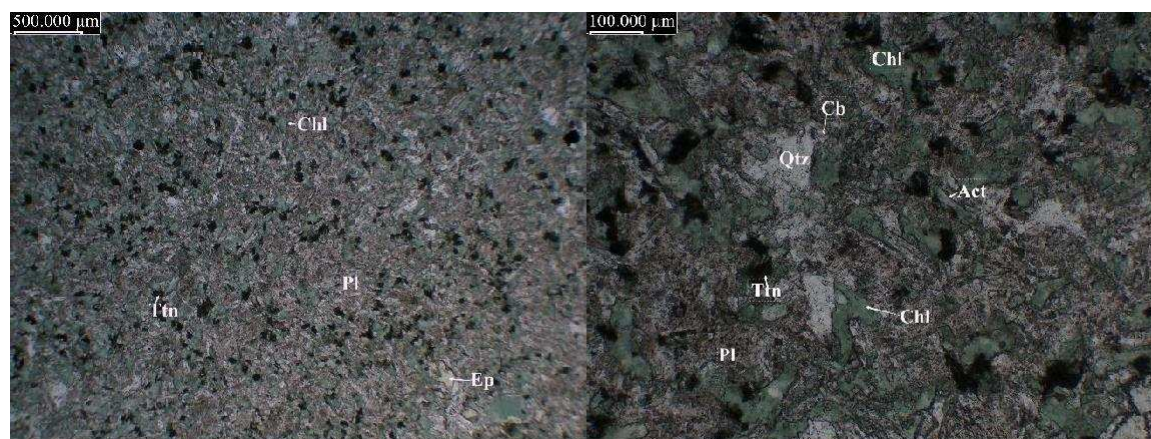


Figura 1: Textura geral da rocha. Imagem em luz transmitida plano polarizada com a objetiva de 10x. Figura 2: Textura geral da rocha. Imagem em luz transmitida plano polarizada com a objetiva de 2,5x.

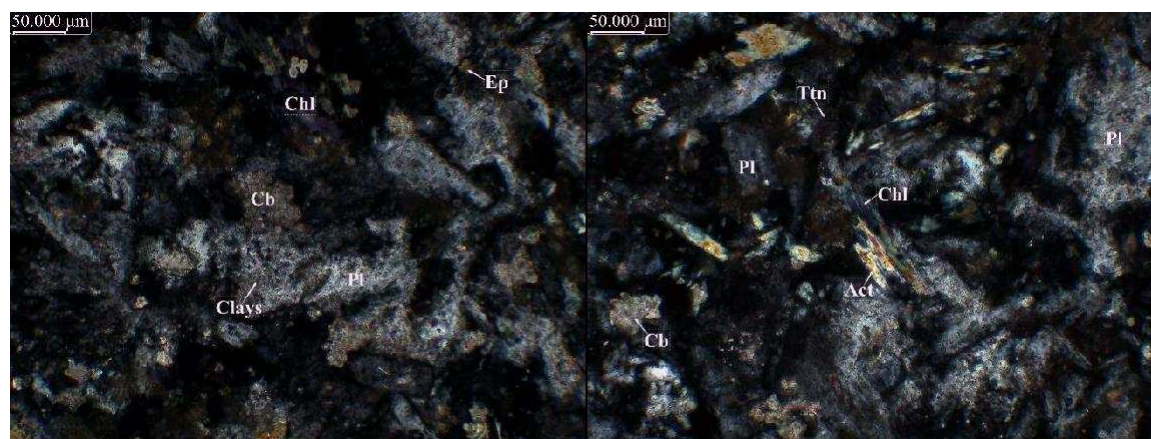


Figura 3: Aspecto dos cristais de plagioclásio substituídos por carbonatos e argilominerais. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados com a objetiva de 20x. Figura 4: Aspecto dos cristais de actinolita substituídos por cloritas. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados com a objetiva de 20x.

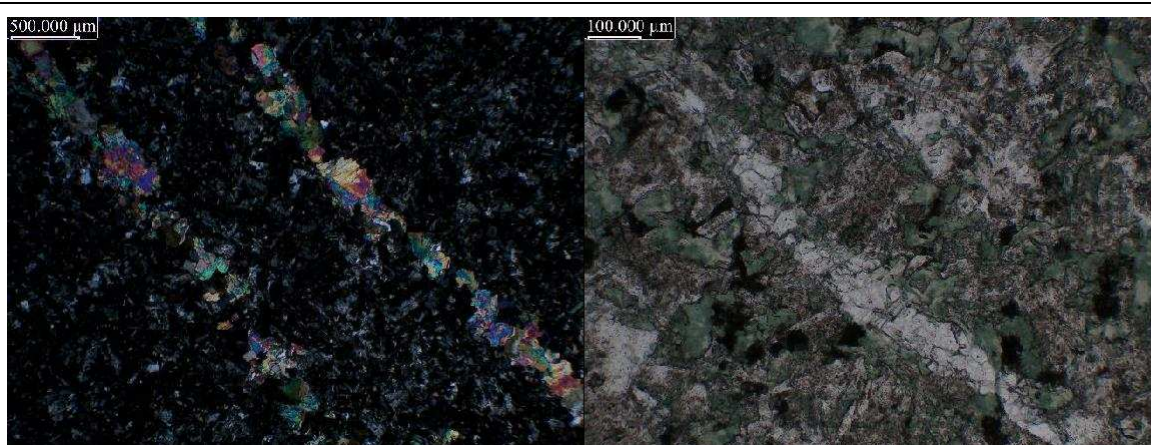


Figura 5: Aspecto das venulações da primeira família. Imagem em luz transmitida com os polarizadores cruzados com a objetiva de 2,5x. Figura 6: Aspecto das venulações da segunda família. Imagem em luz transmitida plano polarizada com a objetiva de 10x.



Figura 7: Aspecto das venulações da terceira família. Na imagem é possível observar esta venulação cortando as venulações da primeira e segunda família. Imagem em luz transmitida plano polarizada com a objetiva de 2,5x. Figura 8: Aspecto das venulações da quarta família. Imagem em luz transmitida plano polarizada com a objetiva de 2,5x.

Legenda: Cb: Carbonato; Chl: Clorita; Clays: Argilominerais; Ep: Epidoto; Pl: Plagioclásio; Qtz: Quartzo; Ttn: Titanita.

Informações adicionais

O Laboratório Arkad foi responsável pela confecção e descrição petrográfica da lâmina delgada de rocha, não sendo responsável pela amostragem.

Contagem de fraturas (4 perfis de 1 cm): 1/2/0/0

Romem de Oliveira Amorim

¹ A classificação ígnea segue o sistema de classificação de Le Matrie et al. (2002), enquanto a classificação metamórfica segue o sistema de classificação de Fettes & Desmons (2007)