



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 11, nº 2 (2025)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2025v11n2ID40118>

Revista
de Geociências do Nordeste
Northeast Geosciences Journal



Produção do
LABORATÓRIO DE GEOPROCESSAMENTO
E GEOGRAFIA FÍSICA
UFRN LAGEF

Minerais ricos em elementos terras raras (REE) do Metacarbonatito Passo Feio, Cinturão Dom Feliciano, Brasil: microscopia e microanálise por sonda eletrônica

REE-rich minerals of the Passo Feio Metacarbonatite, Dom Feliciano Belt, Brazil: microscopy and electron probe microanalysis

Daniel Triboli VIEIRA¹, Edinei KOESTER², Marcelo Barcellos da ROSA³, Lucas MIRONUK⁴, Delia del Pilar Montecinos de ALMEIDA⁵, Daniel Grings CEDEÑO⁶, Rodrigo Chaves RAMOS⁷, Vivianne Andrade BASTOS⁸, Luisa CAON⁹

¹ Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, Brazil. EMAIL: daniel.triboli@ufrgs.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0616-5407>

² Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, Brazil. EMAIL: Koester@ufrgs.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4424-4782>

³ Departamento de Química, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, RS, Brasil. EMAIL: marcelo.b.rosa@ufrgs.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5959-0381>

⁴ Departamento de Química, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, RS, Brasil. EMAIL: lmironuk15@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7906-0254>

⁵ Curso de Geologia, Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA, Caçapava do Sul, RS, Brazil. EMAIL: deliaalmeida@unipampa.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6412-8578>

⁶ Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, Brazil. EMAIL: danielgrings@tectosgeo.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6168-6585>

⁷ Secretaria de Meio Ambiente e Preservação Ecológica, Prefeitura Municipal de Sapiranga, RS, Brazil. EMAIL: rodrigoramos@sapiranga.gov.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7116-5062>

⁸ Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, Brazil. EMAIL: vivianneab.vab@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4460-5285>

⁹ Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, Brazil. EMAIL: luisa.caon@ufrgs.br
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4301-6953>

Resumo: Este estudo oferece uma análise petrográfica detalhada dos minerais ricos em elementos terras raras (REE) encontrados no Metacarbonatito Passo Feio, situado no Terreno São Gabriel, dentro do Cinturão Dom Feliciano, Brasil. A pesquisa emprega técnicas de microscopia e microanálise por sonda eletrônica para investigar minuciosamente as características mineralógicas da rocha. O metacarbonatito apresenta relações de campo complexas, influenciadas por processos pós-magmáticos e tectônicos. Sua composição é dominada por calcita, com a presença de dolomita em menor proporção, e exibe texturas granoblásticas. Além disso, a apatita e minerais acessórios, como pirocloro e monazita, atuam como hospedeiros para os elementos de terras raras, cujas composições sugerem uma interação entre processos magmáticos e hidrotermais. As microanálises realizadas com microsonda eletrônica revelam padrões compostionais consistentes em apatita, monazita e pirocloro, evidenciando um enriquecimento em REEs leves. Esses resultados destacam o potencial do Metacarbonatito Passo Feio para a exploração de REEs, especialmente nas fases que contêm monazita e pirocloro.

Palavras-chave: Carbonatito; REEs leves; Escudo Sul-riograndense.

Abstract: This study presents a comprehensive petrographic analysis of REE-rich minerals in the Passo Feio Metacarbonatite, located within the São Gabriel Terrane of the Dom Feliciano Belt, Brazil. The investigation employs microscopy and electron probe microanalysis to examine the mineralogical characteristics in detail. The metacarbonatite exhibits complex field relationships, marked by post-magmatic and tectonic features. It is primarily composed of calcite with subordinate dolomite, displaying granoblastic textures. Apatite and accessory minerals, including pyrochlore and monazite, serve as hosts for rare earth elements (REEs), with their compositions indicating a combination of magmatic and hydrothermal processes. Electron probe microanalysis reveals consistent compositional trends in apatite, monazite, and pyrochlore, demonstrating an enrichment in light REEs. These findings underscore the potential of the Passo Feio Metacarbonatite for REE exploration, particularly in monazite- and pyrochlore-bearing phases.

Keywords: Carbonatito; LREE; Sul-riograndense Shield.

Recebido: 06/05/2025; Aceito: 13/08/2025; Publicado: 21/08/2025.

1. Introdução

Os elementos terras raras leves (ETRLs) — La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm e Eu — são vitais para diversas tecnologias de ponta. Eles são usados em ímãs de alta eficiência, materiais luminescentes, baterias para veículos híbridos e elétricos, catalisadores para refino de petróleo e redução de emissões automotivas, vidros especiais, polimento de superfícies finas, cerâmicas de alta resistência, comunicação e amplificação de sinais (detectores, radares, sonares, equipamentos de GPS), lasers e armas (Sousa Filho et al., 2019). Por isso, entender a geologia dos carbonatitos, que são uma das principais fontes naturais de ETRLs (Verplank e Van Gosen, 2016), é crucial para a prospecção desses elementos.

O enriquecimento de ETRLs nos carbonatitos é uma característica intrínseca, que se origina dos mecanismos de geração do magma. Isso pode ocorrer por imiscibilidade líquida ou por fusão parcial do manto, com ou sem cristalização fracionada posterior (Wang et al., 2020). O estudo detalhado da petrologia dos carbonatitos é fundamental para compreender os mecanismos que controlam o enriquecimento de ETRLs, ajudando a entender sua distribuição e a facilitar sua prospecção e exploração (Verplank e Van Gosen, 2016).

No sul do Brasil, no Escudo Sul-rio-grandense, o Metacarbonatito Passo Feio (Fig. 1) é uma potencial fonte de ETRLs. No entanto, a pesquisa nesta área é desafiadora, pois o escudo passou por múltiplos eventos tectônicos e episódios magnéticos ao longo de milhões de anos, resultando em um quadro geológico altamente heterogêneo (Cerva-Alves et al., 2017; Morales et al., 2019).

Para este estudo de quantificação e distribuição de ETRLs no Metacarbonatito Passo Feio, foi realizada uma petrografia detalhada nos principais minerais hospedeiros dos ETRLs: os cristais de apatita, pirocloro e monazita. A ênfase é na caracterização textural e microestrutural desses minerais, utilizando microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise de química mineral por espectroscopia de raios-X por dispersão de comprimento de onda (WDS) em microssonda eletrônica.

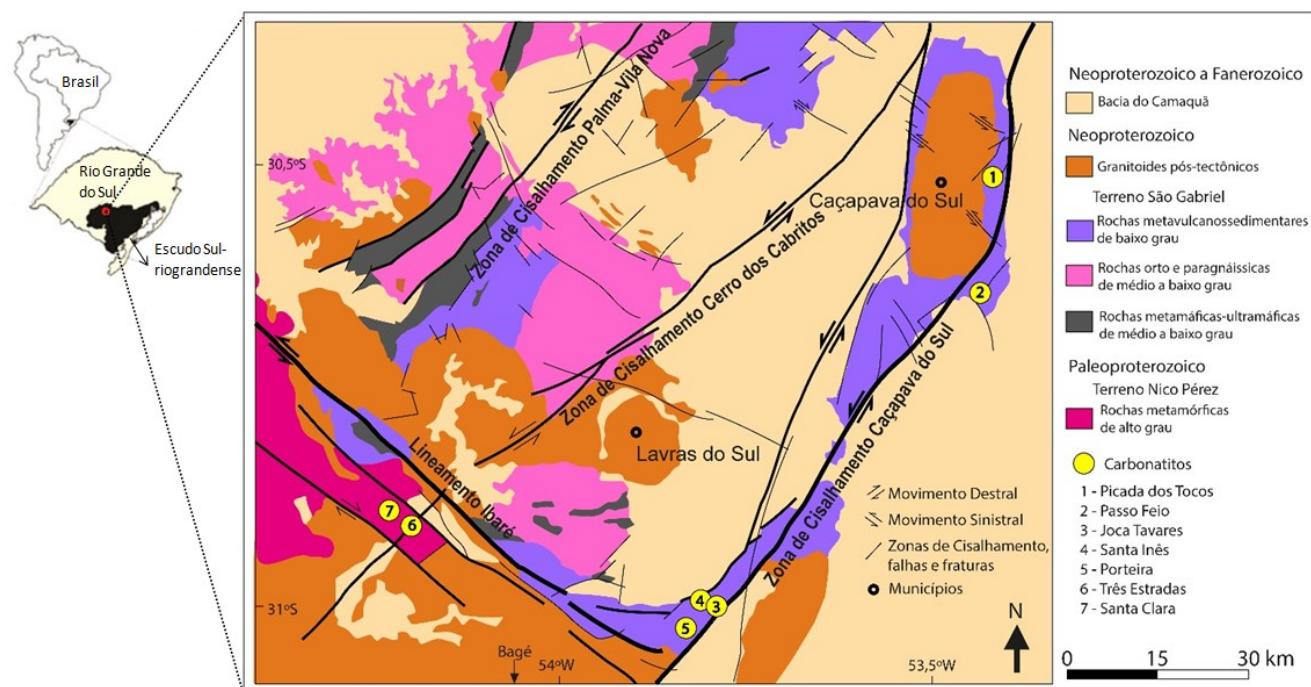


Figura 1 – Mapa geológico simplificado do Terreno São Gabriel e da região do Complexo Passo Feio, destacando os carbonatitos (pontos amarelos).

Fonte: Modificado de Monteiro et al. (2020).

2. Metodologia

Neste estudo, dez lâminas delgadas foram preparadas e analisadas no Núcleo de Preparação de Amostras (NPA) do Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica (CPGq), no Instituto de Geociências (IGeo) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil. A análise petrográfica e a determinação da porcentagem modal foram realizadas com um microscópio petrográfico Leica DMLP no CPGq-IGeo.

Os dados de química mineral dos principais minerais portadores de ETRs do Metacarbonatito Passo Feio — apatita, monazita e pirocloro — foram obtidos no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Institut für Mineralogie, Universität Münster, Alemanha. Para isso, utilizou-se uma microssonda eletrônica JEOL-8530F, sob condições analíticas de tensão de aceleração de 15 kV, corrente elétrica de 25 nA e um tamanho de feixe de elétrons fixo de 5 µm para todas as análises. Os resultados demonstraram alta precisão para concentrações em torno de 100 ppm, com erros inferiores a 0,1%.

Além disso, foram realizadas análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) usando um equipamento JEOL-LV6400, com espectroscopia de energia dispersiva (EDS), no Laboratório de Geologia Isotópica (LGI), CPGq-IGeo-UFRGS. Essas análises forneceram imagens e dados químicos complementares. O sistema EDS foi calibrado com uma tensão de aceleração de 15 kV e uma corrente elétrica de 10 nA.

3. Resultados

3.1 Trabalho de Campo e Petrografia

O Metacarbonatito Passo Feio apresenta afloramentos escassos, com menos de 1 m², exibindo uma rocha leucocrática de textura fina equigranular. A olho nu, é possível observar finas camadas (com aproximadamente 2 mm de espessura) de minerais máficos intercaladas com porções ricas em calcita.

Este metacarbonatito mostra relações de campo complexas. Não foram encontrados afloramentos que exibam o contato entre o carbonatito e as rochas do Complexo Passo Feio (Fig. 2A). Ele apresenta evidências claras de processos pós-magmáticos ligados à atividade tectônica rúptil-dúctil, caracterizados por dobramentos, brechas e foliação tectônica intergranular, com cristais alongados de carbonato e mica orientados ao longo da foliação (Fig. 2B).

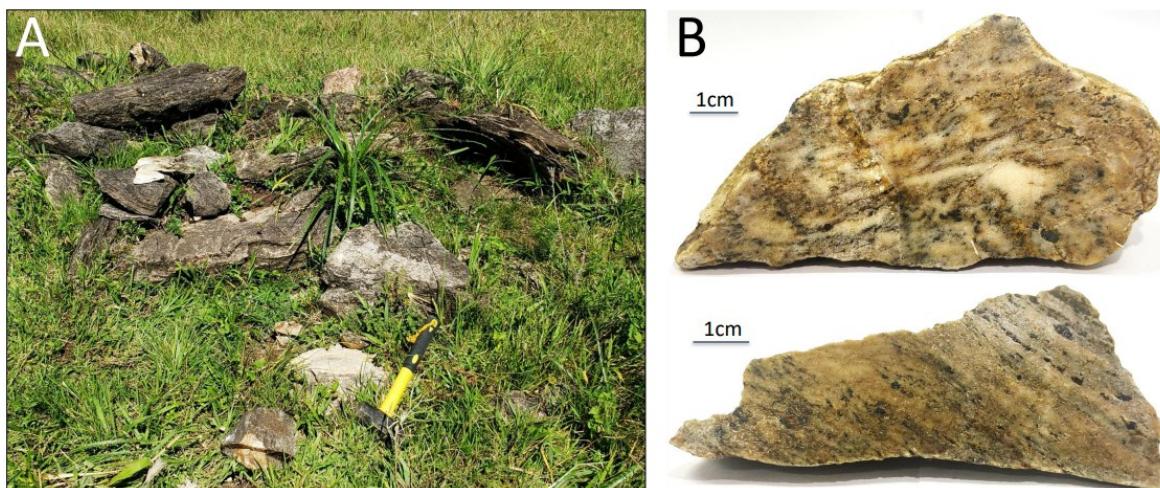


Figura 2 – Aspectos Macroscópicos do Metacarbonatito Passo Feio. A) Fotografia de campo mostrando a exposição do metacarbonatito na região do Passo Feio, com fragmentos de rocha visíveis. O martelo tem 20 cm de comprimento. B) Fotografias de duas amostras de mão do metacarbonatito, exibindo sua textura (seta preta).

Fonte: Autores (2025).

O Metacarbonatito Passo Feio é composto principalmente por carbonatos primários, sendo a calcita (70-85% em volume) o mineral dominante, com uma quantidade menor de dolomita. A calcita principal se apresenta como grãos subédricos, com aproximadamente 0,4 mm, que formam contatos poligonais e uma textura granoblástica poligonal. Esses cristais exibem extinção ondulosa de moderada a forte (Fig. 3A). A dolomita, por sua vez, aparece como pequenos cristais subédricos nos espaços entre os cristais de calcita (Fig. 3B).

Os carbonatos geralmente contêm inclusões de barita, zircão e monazita, e também podem ser encontrados como inclusões anédricas em cristais de apatita (Fig. 3C). Calitas tardimagnéticas estão presentes na forma de veios ou veinhas que cortam os carbonatos primários (Fig. 3D, E e F).

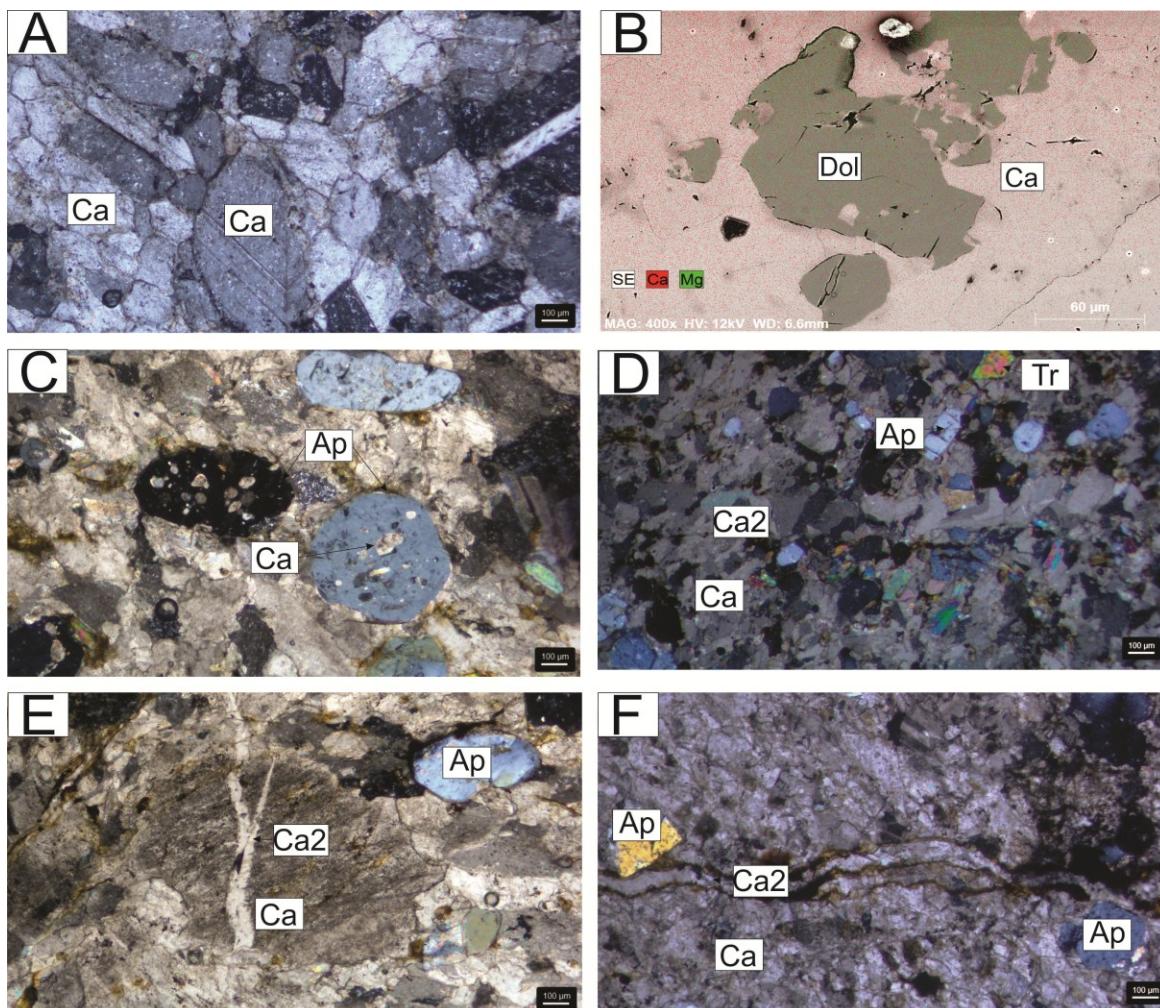


Figura 3 – Microfotografias com Luz Polarizada Cruzada e Imagens de MEV das Amostras A) Cristais de calcite com texturas poligonais. B) Imagem de elétrons retroespelhados (BSE) destacando dolomita e calcite. C) Cristais de apatita dentro de uma calcita. D) Apatita, calcita (primária e tardimagnética) e tremolita, com os padrões de interferência coloridos típicos de cristais de carbonato. E) Cristais de apatita e calcita mostrando relações de corte. F) Imagem ee cristais de apatita com calcita circundante em uma matriz finamente fraturada, sugerindo alteração pós-magmática.

Abreviações: Ap = apatita; Ca = calcite primária; Ca2 = calcite tardimagnética; Dol = dolomita; Tr = tremolita.

Fonte: Autores (2025).

Os cristais de apatita (10-15% em volume) variam de 200 a 500 μm . Esses cristais são de origem magmática e se formaram precocemente. Eles são, por vezes, cortados por carbonatos secundários (Fig. 4A) ou alongados seguindo a foliação milonítica (Fig. 4C). É comum encontrar inclusões de monazita e carbonatos, tanto nas bordas (Fig. 4B) quanto no interior dos grãos (Fig. 4D). Os cristais de apatita são geralmente prismáticos e apresentam zonas de crescimento com oscilações (Fig. 5A e 5B).

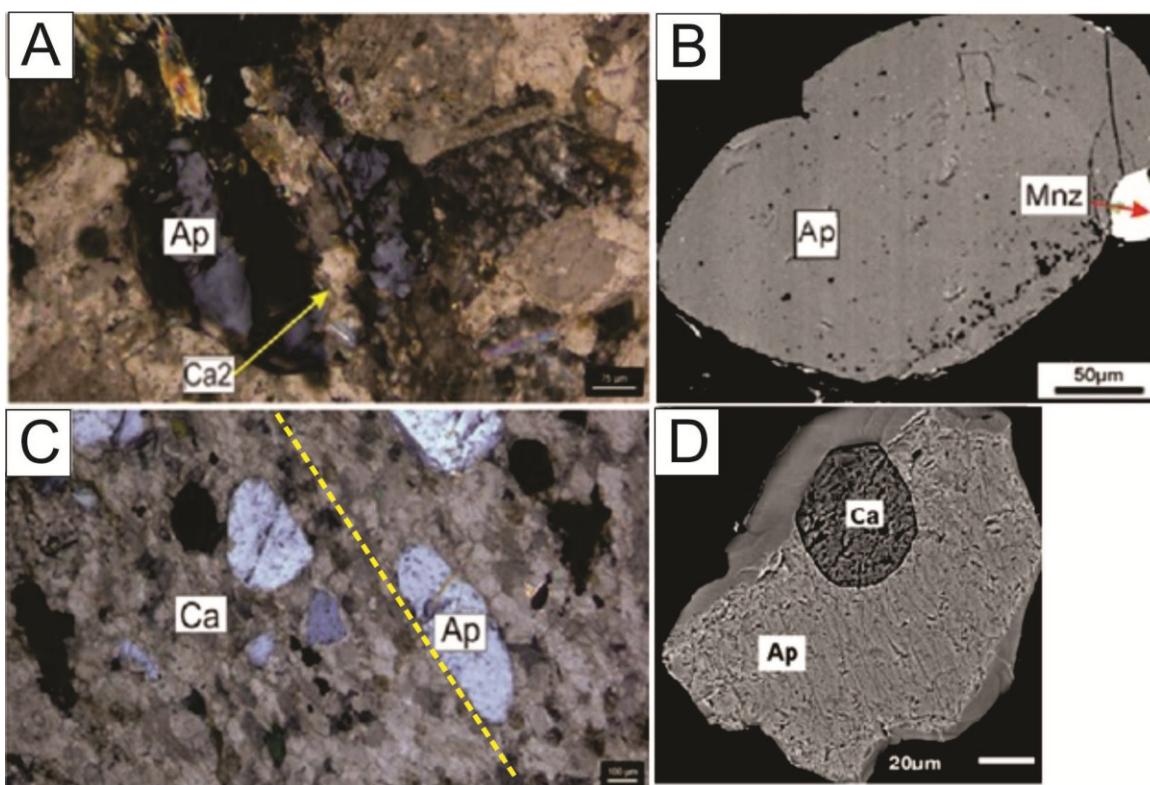


Figura 4 – Microfotografias com Luz Polarizada Cruzada e Imagens de MEV das Amostras A) Fotomicrografia mostrando apatita e calcite tardimagnética. B) Imagem de elétrons retroespalhados (BSE) destacando a apatita e uma inclusão de monazita (seta vermelha). C) Fotomicrografia exibindo grãos de apatita e calcite, com uma linha tracejada amarela indicando a foliação tectônica. D) Imagem de MEV mostrando, em alta ampliação, a inclusão de calcite dentro de apatita. Abreviações: Ap = apatita; Ca1 = calcite primária; Ca2 = calcite tardimagnética; Mnz = monazita.

Fonte: Autores (2025).

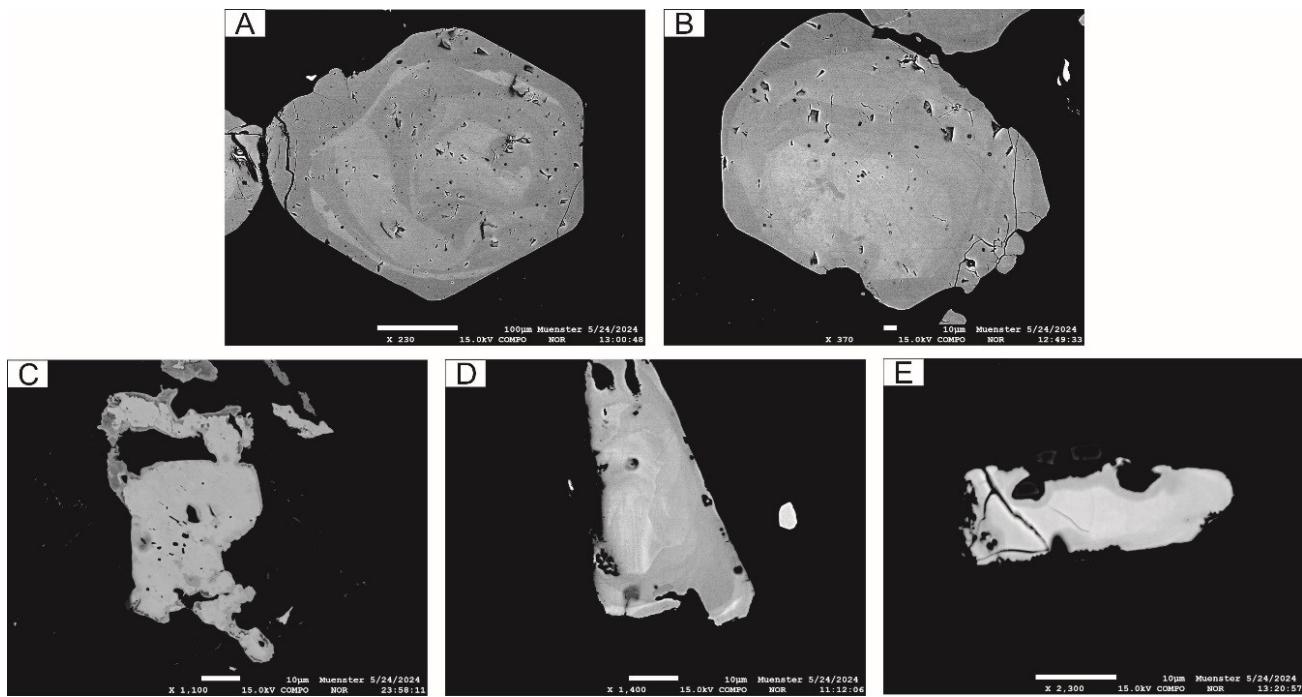


Figura 5 – Imagens de Elétrons Retroespalhados (BSE) de Cristais de Apatita e Pirocloro das Amostras A) Grão de apatita mostrando zoneamento oscilatório. B) Cristal de apatita com zoneamento concêntrico, fraturas e inclusões. C) Cristal de pirocloro anédrico com limites irregulares. D) Cristal de pirocloro exibindo zoneamento por heterogeneidade composicional. E) Cristal de pirocloro mostrando limites corroídos.

Fonte: Autores (2025).

Os anfibólios ocorrem como cristais de subédricos a euédricos, variando de 0,4 a 2 mm. A orientação desses cristais, juntamente com a de flogopita (alterada para clorita) e apatita, revela uma foliação tectônica (Fig. 6A). As micas aparecem como porfiroblastos subédricos, de 0,5 a 3 mm, por vezes deformados, formando bandas de torção (Fig. 6B). A barita ocorre como cristais anédricos, geralmente arredondados, de 0,05 a 100 mm, e está frequentemente associada a carbonatos.

O pirocloro se apresenta como cristais subédricos pequenos (0,05 mm), de cor marrom a vermelho-escuro (Fig. 6C). Esses cristais são encontrados como inclusões em apatitas, disseminados na matriz de carbonatos, ou em agregados e aglomerados. O pirocloro geralmente apresenta zoneamento, fraturas e bordas erodidas (Fig. 5C e 5D).

A pirita forma cristais euédricos de 0,5 a 2 mm, muitas vezes circundados por hematita e magnetita (Fig. 6D). Cristais de zircão e monazita ocorrem como inclusões em apatitas, carbonatos primários e flogopitas, sendo caracterizados por halos pleocróicos.

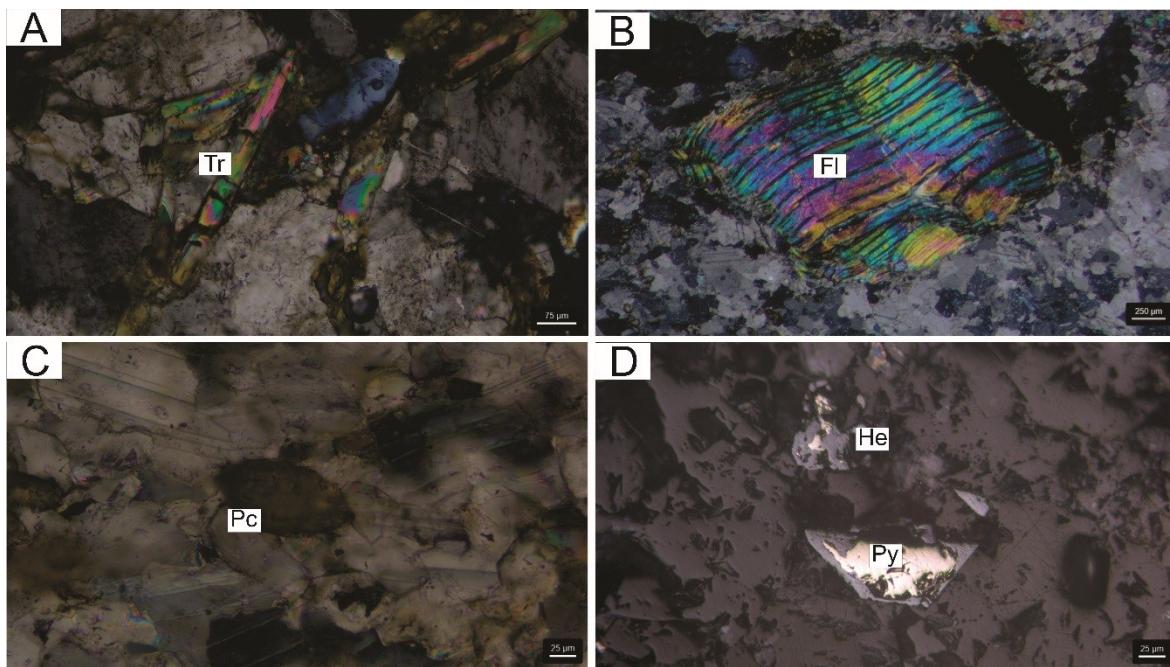


Figura 6 – Fotomicrografias das Amostras em Lâminas Delgadas A) Fotomicrografia com luz polarizada cruzada mostrando grãos de tremolita e calcite com alta birrefringência. B) Fotomicrografia com luz polarizada cruzada mostrando flogopita e calcite. C) Fotomicrografia com luz polarizada cruzada destacando pirocloro em uma matriz de calcite. D) Fotomicrografia com luz polarizada plana mostrando pirita e hematita. Abreviações: Ca = calcite; He = hematita; Pc = pirocloro; Phl = flogopita; Py = pirita; Tr = tremolita.

Fonte: Autores (2025).

3.2 Análise por Microssonda Eletrônica (WDS)

A composição dos cristais de apatita do metacarbonatito estudado é consistente (Tabela 1), com altas concentrações de P₂O₅ (até 42,25% em peso) e CaO (até 57,36% em peso), e flúor (F) em menor quantidade, variando de 1,36 a 2,67% em peso. As apatitas analisadas são fluorapatitas (Fig. 7A), um tipo comum em rochas carbonáticas magmáticas (Fig. 7B e Fig. 7C).

Tabela 1 – Composição do Núcleo (C) e da Borda (R) de Cristais de Apatita das Amostras Analisadas.

Amostra/(Wt%)	1		2		3		4		5	
	C	R	C	R	C	R	C	R	C	R
F	2.06	1.92	2.12	2.46	2.47	2.84	2.06	1.84	1.81	2.4
Na ₂ O	0.13	0.13	0.09	0.18	0.16	0.15	0.14	0.07	0.03	0.11
MgO	0.03	0.01	0.00	0.03	0.03	0.00	0.06	0.00	0.02	0.00
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
SiO ₂	0.38	0.06	0.19	0.04	0.20	0.07	0.31	0.11	0.32	0.13
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.03	0.00	0.09
La ₂ O ₃	0.09	0.06	0.00	0.15	0.30	0.45	0.27	0.45	0.33	0.42
Ce ₂ O ₃	0.07	0.09	0.34	0.18	0.61	0.43	0.52	0.11	0.63	0.11
Nd ₂ O ₃	0.32	0.12	0.50	0.00	0.36	0.00	0.02	0.09	0.09	0.06
MnO	0.00	0.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	0.04	0.03	0.02

FeO	0.54	0.26	0.00	0.00	0.05	0.04	0.02	0.05	0.03	0.00
Gd ₂ O ₃	0.00	0.00	0.23	0.11	0.00	0.02	0.12	0.00	0.23	0.25
Yb ₂ O ₃	0.00	0.10	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
SrO	0.26	0.42	0.42	0.35	0.33	0.36	0.37	0.46	0.31	0.43
ZrO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ThO ₂	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
UO ₂	0.03	0.02	0.00	0.05	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
BaO	0.00	0.12	0.03	0.00	0.06	0.08	0.00	0.11	0.13	0.10
Ta ₂ O ₅	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.01	0.05
Y ₂ O ₃	0.11	0.01	0.06	0.04	0.08	0.01	0.09	0.01	0.01	0.00
P ₂ O ₅	40.93	41.79	41.84	41.86	42.13	42.7	41.68	42.35	42.13	42.48
Nb ₂ O ₅	0.03	0.00	0.06	0.05	0.05	0.00	0.04	0.02	0.00	0.01
SO ₃	0.21	0.20	0.08	0.19	0.13	0.20	0.03	0.04	0.04	0.07
CaO	55.1	55.81	55.87	56.21	55.96	56.15	55.8	55.96	55.69	55.84
Total (Mass%)	100.95	101.14	101.95	101.96	103.07	102.53	101.56	101.87	101.93	102.31

Elem (A.P.F.U.)										
Ca	9.78	9.84	9.8	9.83	9.71	9.65	9.8	9.78	9.75	9.71
Na	0.04	0.04	0.03	0.06	0.05	0.05	0.05	0.02	0.01	0.04
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	0.07	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
La	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01
Ce	0.04	0.01	0.02	0.01	0.04	0.03	0.03	0.01	0.04	0.01
Pr	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Nd	0.02	0.01	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
P	5.74	5.82	5.8	5.78	5.78	5.8	5.79	5.85	5.83	5.84
Si	0.06	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.05	0.02	0.05	0.02
Cl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F	1.08	1.00	1.10	1.27	1.27	1.44	1.07	0.95	0.94	1.23
OH	0.08	0.00	0.1	0.27	0.27	0.44	0.07	0.05	0.07	0.23
Total	16.77	16.77	16.71	16.7	16.66	16.57	16.74	16.72	16.71	16.62

Amostra/(Wt%)	6		7		8		9		10	
	C	R	C	R	C	R	C	R	C	R
F	2.24	1.75	2.12	2.26	1.68	1.99	2.45	2.55	1.66	2.68
Na ₂ O	0.15	0.15	0.14	0.17	0.14	0.16	0.09	0.06	0.16	0.21
MgO	0.01	0.03	0.01	0.01	0.04	0.04	0.00	0.01	0.02	0.03
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
SiO ₂	0.09	0.13	0.05	0.05	0.1	0.36	0.25	0.33	0.11	0.46

TiO ₂	0.13	0.01	0.06	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00	0.04	0.01
La ₂ O ₃	0.00	0.18	0.00	0.00	0.15	0.12	0.24	0.27	0.30	0.54
Ce ₂ O ₃	0.45	0.38	0.34	0.43	0.18	0.59	0.25	0.50	0.50	0.79
Nd ₂ O ₃	0.22	0.45	0.00	0.00	0.18	0.42	0.02	0.32	0.49	0.00
MnO	0.07	0.00	0.06	0.02	0.00	0.00	0.05	0.03	0.07	0.04
FeO	0.01	0.00	0.00	0.05	0.01	0.08	0.01	0.00	0.08	0.00
Gd ₂ O ₃	0.19	0.05	0.02	0.02	0.00	0.02	0.18	0.37	0.09	0.10
Yb ₂ O ₃	0.00	0.00	0.05	0.01	0.07	0.08	0.00	0.00	0.12	0.00
SrO	0.34	0.34	0.41	0.45	0.29	0.44	0.39	0.40	0.46	0.29
ZrO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ThO ₂	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.10	0.01	0.00	0.00	0.00
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
UO ₂	0.00	0.00	0.07	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BaO	0.07	0.00	0.02	0.10	0.08	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02
Ta ₂ O ₅	0.00	0.11	0.05	0.00	0.09	0.00	0.00	0.03	0.03	0.10
Y ₂ O ₃	0.04	0.07	0.09	0.05	0.02	0.13	0.00	0.00	0.00	0.09
P ₂ O ₅	42.11	41.81	41.72	42.63	42.17	41.67	41.32	41.87	42.73	41.1
Nb ₂ O ₅	0.05	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.08	0.04
SO ₃	0.18	0.06	0.26	0.22	0.18	0.21	0.06	0.07	0.33	0.14
CaO	56.03	55.38	55.57	56.42	56.4	55.13	55.29	55.54	56.00	55.58
Total	102.39	100.93	101.06	102.89	101.91	101.53	100.68	102.36	103.31	102.24

Elem (A.P.F.U.)										
Ca	9.78	9.79	9.81	9.76	9.88	9.72	9.78	9.69	9.72	9.75
Na	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.03	0.02	0.05	0.07
Mn	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01
Fe	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
La	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03
Ce	0.03	0.02	0.02	0.03	0.01	0.04	0.02	0.03	0.03	0.05
Pr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nd	0.01	0.03	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.02	0.03	0.00
P	5.81	5.84	5.82	5.83	5.84	5.8	5.77	5.77	5.86	5.70
Si	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.06	0.04	0.05	0.02	0.08
Cl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F	1.15	0.91	1.11	1.15	0.87	1.04	1.28	1.31	0.85	1.39
OH	0.15	0.09	0.11	0.15	0.13	0.04	0.28	0.31	0.15	0.39
Total	16.70	16.76	16.72	16.69	16.80	16.71	16.66	16.61	16.75	16.68

Fonte: Autores (2025).

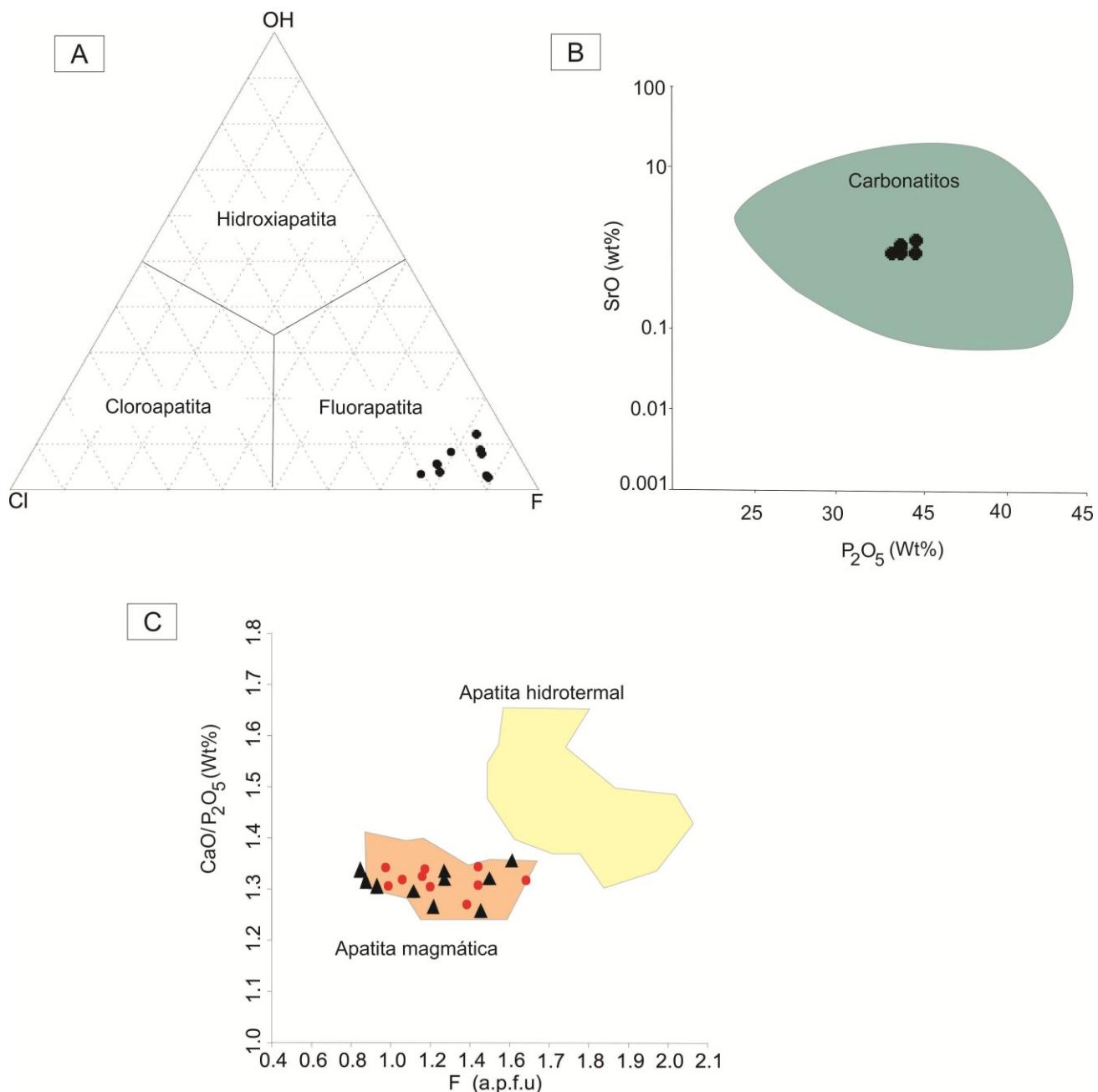


Figura 7 – Classificação e composição dos apatitas das amostras estudadas do Metacarbonatito Passo Feio. A) Classificação de apatita baseada no diagrama Cl-F-OH (segundo Patiño-Douce et al., 2011). B) Diagrama de classificação de apatita P₂O₅ (em peso%) vs SrO (em peso%), modificado de Soltys et al. (2020); C) Distribuição das apatitas estudadas no diagrama CaO/P₂O₅ vs F (a.p.f.u.), mostrando a composição dentro da faixa de apatitas magmáticas e hidrotermais de Catalão I (Biondi e Braga Jr., 2024). Legenda: triângulos = bordas; círculos = núcleos..
Fonte: Autores (2025).

A monazita é o principal fosfato de ETR (Elementos Terras Raras) encontrado no metacarbonatito estudado, geralmente associada a cristais de apatita (Fig. 9A). Os resultados da microanálise (Tabela 2) indicam que o Cério (Ce) e o Lantânia (La) são os ETRs mais abundantes, com concentrações que chegam a 35% em peso para Ce₂O₃ e 26% para La₂O₃. As concentrações de Nd₂O₃ variam entre 4% e 8% em peso.

Tabela 2 – Composição dos cristais de monazita das amostras analisadas

Amostra/(Wt%)	1	2	3	4	5	6	7	8
F	0.60	0.46	0.19	0.44	0.27	0.46	0.50	0.53
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
SiO ₂	0.21	0.08	0.19	0.25	0.29	0.20	0.12	0.14
TiO ₂	0.12	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.04
La ₂ O ₃	27.64	21.53	25.16	26.91	28.31	26.24	26.64	29.54
Ce ₂ O ₃	32.82	33.92	34.3	31.97	31.84	33.99	33.44	32.26
Nd ₂ O ₃	6.46	8.00	5.78	6.22	5.87	6.11	5.41	4.85
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	0.00	0.20	0.10	0.00	0.04	0.01	0.11	0.00
Gd ₂ O ₃	0.00	0.33	0.00	0.00	0.2	0.17	0.42	0.11
Yb ₂ O ₃	0.00	0.22	0.05	0.00	0.02	0.00	0.10	0.00
SrO	0.15	0.00	0.10	0.02	0.13	0.11	0.07	0.10
ZrO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ThO ₂	0.21	0.00	0.07	0.05	0.05	0.00	0.02	0.09
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
UO ₂	0.04	0.00	0.00	0.06	0.00	0.03	0.00	0.01
BaO	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00
Ta ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.10	0.06
Y ₂ O ₃	0.00	0.000	0.08	0.00	0.00	0.13	0.10	0.00
P ₂ O ₅	30.08	28.91	29.67	28.72	29.12	28.95	30.07	29.22
Nb ₂ O ₅	0.00	0.01	0.00	0.06	0.00	0.00	0.05	0.05
SO ₃	0.67	0.03	0.49	0.47	0.43	0.54	0.62	0.65
CaO	1.73	0.37	1.21	0.85	0.64	0.76	1.14	0.82
Total	100.73	94.08	97.5	96.01	97.23	97.92	99.05	98.48

Elem (A.P.F.U.)	1	2	3	4	5	6	7	8
F	0.42	0.35	0.14	0.33	0.2	0.34	0.37	0.39
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
SiO ₂	0.04	0.02	0.05	0.06	0.07	0.05	0.03	0.03
TiO ₂	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01
La ₂ O ₃	2.33	1.96	2.19	2.4	2.5	2.31	2.28	2.58
Ce ₂ O ₃	2.75	3.07	2.96	2.83	2.79	2.97	2.84	2.79
Nd ₂ O ₃	0.52	0.71	0.49	0.54	0.50	0.52	0.45	0.41
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	0.00	0.04	0.02	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00

Gd ₂ O ₃	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02	0.01	0.03	0.01
Yb ₂ O ₃	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
SrO	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01
ZrO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ThO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
UO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BaO	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ta ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
Y ₂ O ₃	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00
P ₂ O ₅	5.84	6.05	5.92	5.89	5.89	5.85	5.92	5.85
Nb ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
SO ₃	0.11	0.00	0.09	0.09	0.08	0.10	0.11	0.12
CaO	0.42	0.10	0.30	0.22	0.17	0.20	0.28	0.21
Total	12.54	12.4	12.2	12.4	12.2	12.4	12.4	12.4

Fonte: Autores (2025).

O pirocloro é o principal mineral acessório de ETR (Elementos Terras Raras) no metacarbonatito analisado. Sua composição química é variável, com concentrações significativas de Nb₂O₅, TiO₂ e Cério (Ce), conforme mostrado na Tabela 3. No diagrama de classificação ternário (Figura 8C), o mineral se enquadra no grupo Nb = Ti > Ta (Hogarth, 1977), podendo ser classificado como pirocloro (oxicálcioapirocloro) e betafita. Já no diagrama da Figura 8D, a composição do pirocloro sugere uma origem hidrotermal. Essas composições são semelhantes às das monazitas-(Ce), como ilustrado na Figura 9B.

Amostra/(Wt%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F	0.05	0.39	0.22	0.00	0.01	0.31	0.10	0.00	0.00	0.02
Na ₂ O	0.08	0.10	0.05	0.00	0.06	0.08	0.11	0.01	0.12	0.07
MgO	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO ₂	0.00	0.02	0.00	3.24	2.24	0.00	0.01	5.12	0.00	0.01
TiO ₂	19.03	22.69	18.34	19.73	18.43	19.04	20.08	18.91	24.67	17.87
La ₂ O ₃	2.66	2.74	1.55	1.49	2.24	2.38	0.87	1.68	4.82	2.94
Ce ₂ O ₃	7.81	9.16	7.21	7.92	7.53	10.6	7.23	7.66	14.78	8.59
Nd ₂ O ₃	4.69	5.75	4.29	5.32	5.15	5.96	8.75	4.41	8.17	5.86
MnO	0.08	0.00	0.07	0.03	0.06	0.10	0.14	0.04	0.00	0.01
FeO	3.79	3.69	3.95	3.43	3.31	3.38	3.92	2.22	2.43	3.93
Gd ₂ O ₃	0.53	0.29	0.29	0.58	0.26	0.42	2.01	0.15	0.43	0.28
Yb ₂ O ₃	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00

SrO	0.05	0.13	0.17	0.16	0.16	0.13	0.00	0.27	0.00	0.09
ZrO ₂	0.06	0.08	0.00	0.04	0.00	0.08	0.06	0.17	0.01	0.05
ThO ₂	11.41	13.9	13.08	12.8	9.50	7.99	5.90	10.50	3.81	8.57
K ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.01	0.00	0.11	0.01	0.00
UO ₂	0.31	0.33	0.39	0.41	0.18	0.31	0.52	2.09	0.30	0.14
BaO	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.15	0.09	0.13	0.00
Ta ₂ O ₅	1.35	0.88	0.96	1.04	1.90	1.90	1.87	2.53	2.65	2.42
Y ₂ O ₃	0.38	0.3	0.34	0.36	0.23	0.29	2.11	0.27	0.45	0.23
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.01	0.06	0.03	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01
Nb ₂ O ₅	36.91	30.5	36.26	31.31	34.95	34.76	31.94	32.35	26.18	37.93
SO ₃	0.00	0.04	0.05	0.02	0.06	0.03	0.01	0.11	0.00	0.05
CaO	7.00	5.28	7.53	5.91	6.78	5.99	4.17	3.74	2.76	6.75
Total	96.2	96.3	94.87	93.7	93.1	93.75	90.00	92.59	91.71	95.82
[H ₂ O(calc.)](wt.)	0.27	0.30	0.30	0.36	0.36	0.38	0.38	0.47	0.38	0.30

Elem (A.P.F.U.)

U	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.025	0.00
Th	0.15	0.18	0.18	0.16	0.12	0.09	0.13	0.07	0.13	0.07
La	0.04	0.04	0.02	0.02	0.04	0.04	0.02	0.00	0.02	0.09
Ce	0.15	0.20	0.16	0.15	0.15	0.22	0.15	0.16	0.14	0.33
Pr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nd	0.08	0.11	0.09	0.106	0.11	0.11	0.09	0.18	0.08	0.17
Gd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00
Yb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
Ca	0.45	0.33	0.47	0.32	0.38	0.33	0.32	0.27	0.18	0.13
Vacancy	1.11	1.13	1.08	1.24	1.19	1.18	1.25	1.23	1.41	1.20
Total (a.p.f.u.)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Especies	Grupo do pirocloro oxicalciopirocloro	Grupo da betafia oxicalciopirocloro	Grupo do pirocloro oxicalciopirocloro	Grupo da betafia oxicalciopirocloro	Grupo do pirocloro oxicalciopirocloro	Grupo do pirocloro oxicalciopirocloro	Grupo do pirocloro oxicalciopirocloro	Grupo da betafia oxicalciopirocloro	Grupo do pirocloro oxicalciopirocloro	Grupo da betafia oxicalciopirocloro

Fonte: Autores (2025).

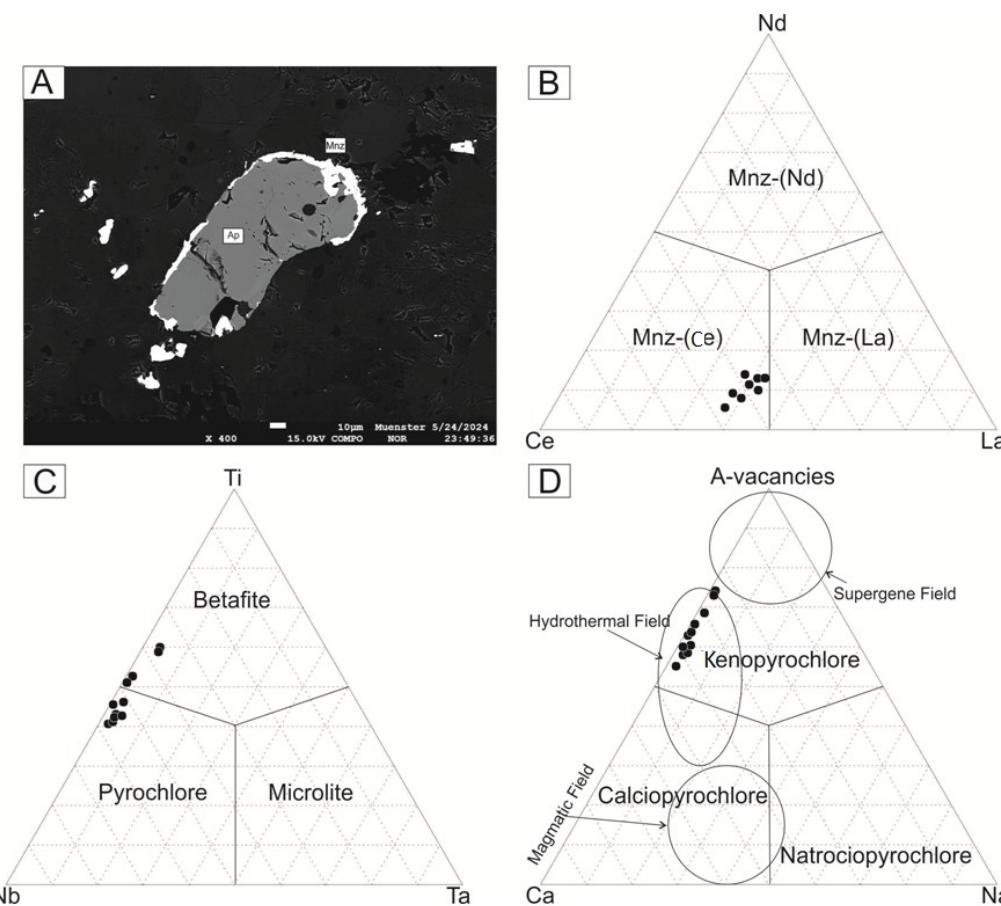


Figura 8 – Imagem de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) de apatita, monazita e diagramas de classificação ternária de pirocloro para o Metacarbonatito Passo Feio. A) Imagem de MEV de um cristal de apatita (Ap) envolto por uma borda de monazita (Mnz). B) Variabilidade composicional da monazita (Mnz) em termos de conteúdo de Cério (Ce), Lantânia (La) e Neodímio (Nd) (modificado por Nickel, 1992). C) Classificação de minerais do grupo da pirocloro com base nas proporções de Nióbio (Nb), Tântalo (Ta) e Titânio (Ti) (modificado por Finch et al., 2019). D) Classificação de minerais do grupo da pirocloro em termos de Cálcio (Ca), Sódio (Na) e vacâncias no sítio A (modificado por Zurevinski et al., 2004), destacando os campos de processos magmáticos, hidrotermais e supergênicos. Os pontos pretos representam as amostras analisadas.

Fonte: Autores (2025).

4. Discussões

De acordo com a classificação de Le Maitre et al. (2002), o Metacarbonatito Passo Feio é um **alcalito** com textura de granulação média e composição calciocarbonatítica, ou seja, com predominância de calcita sobre dolomita. A presença de carbonatos magmáticos tardios pode ser atribuída à percolação de fluidos hidrotermais, provavelmente decorrente de tectônica deformacional e intrusões graníticas, como sugerido por Cerva-Alves et al. (2017) e Morales et al. (2019).

A apatita é um dos principais minerais do metacarbonatito, representando cerca de 17% em peso das amostras analisadas. Conforme Chakhmouradian et al. (2017), a apatita é crucial na regulação das variações de P e ETRs (Elementos Terras Raras) em carbonatitos, fornecendo informações sobre as interações entre minerais e fluidos.

As razões de CaO/P2O5 das apatitas analisadas (entre 1,27 e 1,31), juntamente com as baixas concentrações de SrO (< 1% em peso), indicam que esses minerais provavelmente interagiram com fluidos hidrotermais (Chakhmouradian et al., 2017). Apatitas ígneas geralmente exibem um enriquecimento de ETRs do núcleo para a borda, o que é consistente com os valores de Ce, La e Nd observados nas amostras. A presença de um zoneamento oscilatório (Figuras 5A e 5B)

com um leve enriquecimento de ETRL (Elementos Terras Raras Leves) do núcleo para a borda, especialmente de Ce, La e Nd, sugere que as apatitas se formaram em ambientes fortemente alcalinos, conforme Chakhmouradian et al. (2017). Portanto, as apatitas estudadas são majoritariamente ígneas, originadas de um ambiente alcalino, semelhante aos da Província Ígnea do Alto Paranaíba (Figura 7C).

No contexto das trocas de cátions dentro dos cristais de apatita (Toledo e Pereira, 2001), as trocas envolvendo ETRs são particularmente importantes para entender a evolução química dos magmas-mãe dos carbonatitos. Embora a composição da apatita demonstre que os ETRs são compatíveis com seus cristais, esses elementos também são compatíveis com outros minerais que podem precipitar junto com a apatita, influenciando a evolução química desta ao "extrair" elementos que poderiam ser incorporados em sua estrutura cristalina. Com isso, espera-se a formação de cristais de apatita empobrecidos em ETRs, seguida pela formação de outros minerais enriquecidos nesses elementos, como as monazitas (Chakhmouradian et al., 2017), como é o caso do metacarbonatito estudado.

A associação entre monazita e apatita é frequentemente observada em diversos tipos de rochas. Essa associação tem sido atribuída tanto à cristalização magmática (Wark e Miller, 1993) quanto a reações entre apatita e fluidos hidrotermais (Harlov, 2015). A monazita formada em um carbonatito pode ser resultado de interações entre fluidos ricos em CO₂ e cristais de apatita (Harlov, 2015). Nesse processo, os ETRs são lixiviados da apatita, aumentando a concentração desses elementos nos cristais anédricos de monazita nas bordas da apatita (ver Figuras 5B e 8A).

A gênese da monazita a partir da apatita implica que a monazita utiliza os tetraedros de P₂O₄ liberados pela decomposição da apatita, facilitando seu crescimento nas bordas dos cristais. O estudo de Finger et al. (1998) sugere que essa reação de substituição se inicia por volta de 350°C, o que está de acordo com as temperaturas de formação das microestruturas observadas no metacarbonatito estudado, onde as calcitas sofreram recristalização dinâmica, resultando em uma textura granoblástica poligonal e na formação de *kink bands* nos flogopitas (Figuras 3A e 6B). Kennedy e White (2001) relataram a recristalização por deformação dinâmica de calcita e mica em temperaturas que variam de 150 a 450°C.

As amostras de monazita analisadas apresentam altas concentrações de ETRs, com predominância de Ce, seguido por La e Nd. Essas amostras foram classificadas como monazitas-(Ce). De acordo com Chakhmouradian et al. (2017), a concentração gradual e o enriquecimento em ETRs, particularmente Ce³⁺ e La³⁺, são indicativos de fosfatos gerados em condições fortemente alcalinas, onde o ETR₃₊ provavelmente substitui o Ca²⁺ durante a cristalização do magma.

Outras características observadas no metacarbonatito incluem a formação de uma fase secundária de carbonato em veios e veios discordantes com a foliação tectônica (Figuras 3D, 3E e 3F). Há também evidências de **cominuição** nas bordas das pirocloros, seguida de fraturamento (Figuras 5D, 5E e 5F).

No diagrama de classificação Ti vs Nb vs Ta (Figura 8B), as pirocloros estudadas se enquadraram nos grupos de pirocloro e betafita. As pirocloros analisadas são frequentemente ricas em ETR (até 20,4% em peso de óxidos de ETR), Tório (Th) (até 13,9% em peso de ThO₂) e Urânio (U) (até 0,2% em peso de UO₂), mas pobres em Bário (Ba), similar às ceriopirocloros de Hogarth (1977).

As amostras de pirocloro exibem zoneamento irregular, bordas corroídas e halos de metamicização (Figuras 5C, 5D e 5E), características típicas de pirocloros gerados em ambientes hidrotermais (Xue et al., 2021), o que corrobora a classificação de Zurevinsk e Mitchell (2004) (Figura 8D). De acordo com Lumpkin e Ewing (1995) e Wall et al. (1996), a presença de vacâncias no sítio A da fórmula da pirocloro é distintiva de pirocloros fraturadas e parcialmente corroídas, típicas de alteração hidrotermal tardia e intemperismo (Biondi e Braga Jr., 2024). As pirocloros estudadas apresentam vacâncias consideráveis no sítio A, empobrecimento em Na-Ca-Si-Al e enriquecimento em ETRs e Ti, características típicas de pirocloros com alta vacância no sítio A causada por alteração hidrotermal (Lumpkin e Ewing, 1992).

Segundo um estudo de geoquímica de rocha total de Morales et al. (2019), o Metacarbonatito Passo Feio apresenta um enriquecimento em ETRs em relação aos ETRP (Elementos Terras Raras Pesados), provavelmente devido à concentração de minerais ricos em ETRs. O presente estudo de química mineral corrobora essa hipótese, devido à composição rica em ETRs observada nas monazitas, pirocloros e apatitas.

Morales et al. (2019) e Campestrini et al. (2024) observaram que as concentrações de ETRs do Metacarbonatito Passo Feio estão dentro dos padrões estabelecidos na literatura para este grupo de rochas (Figura 9A). Em diagramas de ETRs normalizados para condritos (Morales et al., 2019), o Metacarbonatito Passo Feio mostra um padrão similar ao encontrado em carbonatitos da Província Ígnea do Alto Paranaíba (Gomide et al., 2016) e do Complexo Alcalino de Lages (Gomes et al., 2018), dois importantes sítios ricos em ETRs no Brasil (Figura 9B).

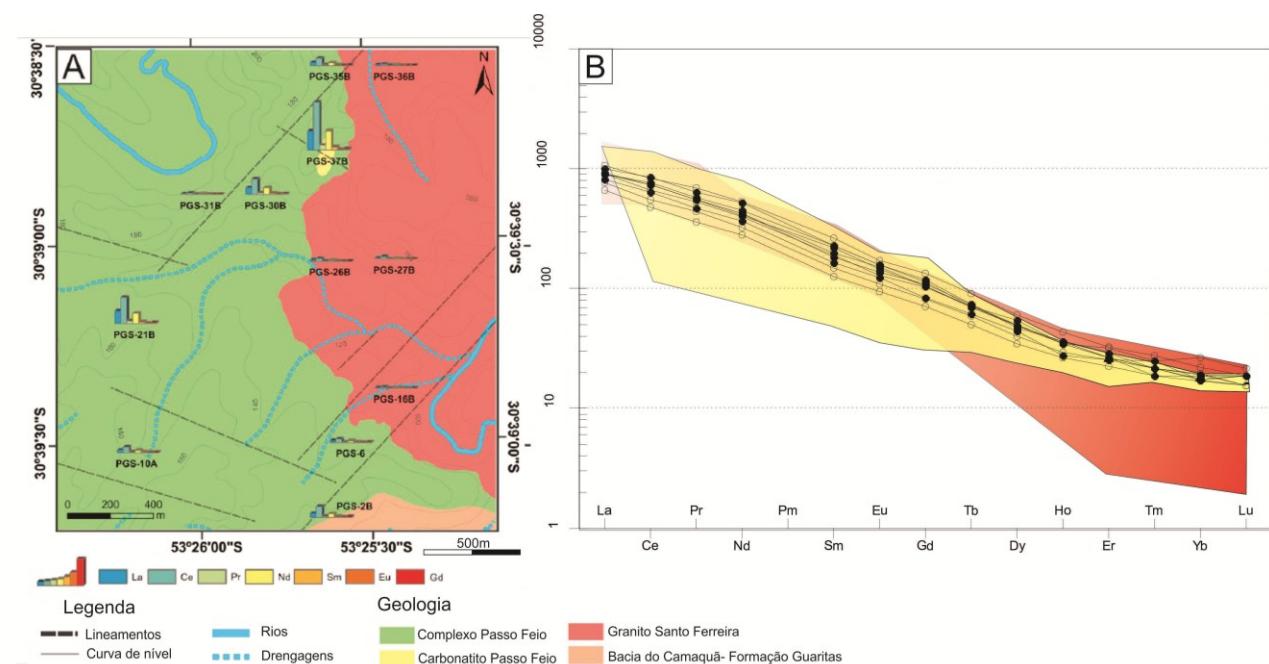


Figura 8 – Características Geoquímicas do Metacarbonatito Passo Feio, com base em estudos anteriores. A) Mapa geológico simplificado da área de estudo, destacando a distribuição de Elementos Terras Raras Leves (ETRL).

Fonte: Modificado por Morales et al. (2019). B) Assinaturas de ETR de rocha total normalizadas para condrito (Boynton, 1984) do metacarbonatito estudado.

Os processos metamórficos e hidrotermais também são evidenciados no metacarbonatito estudado pelas suas assinaturas de isótopos estáveis ($\delta^{13}\text{CV-PDB}$ e $\delta^{18}\text{OSMOW}$), conforme Morales et al. (2019), que indicam a ocorrência de processos de deformação metamórfica devido ao seu deslocamento do campo ígneo.

Essa característica pode ser explicada pelo processo descrito por Demény et al. (2006), no qual essa variação isotópica pode resultar tanto de processos deformacionais quanto hidrotermais. Assim, com base nas evidências petrográficas e na variação relativamente baixa de $\delta^{18}\text{O SMO}$, é possível sugerir a ocorrência de ambos os processos. É provável que, durante esses processos, grande parte das calcitas primárias tenha sofrido recristalização dinâmica, resultando em uma textura granoblástica poligonal e na formação de *kink bands* nos flogopitas.

Os processos metamórficos e hidrotermais também são evidenciados no metacarbonatito estudado pelas suas assinaturas de isótopos estáveis ($\delta^{13}\text{CV-PDB}$ e $\delta^{18}\text{OSMOW}$), conforme Morales et al. (2019), que indicam a ocorrência de processos de deformação metamórfica devido ao seu deslocamento do campo ígneo.

Essa característica pode ser explicada pelo processo descrito por Demény et al. (2006), no qual essa variação isotópica pode resultar tanto de processos deformacionais quanto hidrotermais. Assim, com base nas evidências petrográficas e na variação relativamente baixa de $\delta^{18}\text{OSMOW}$, é possível sugerir a ocorrência de ambos os processos. É provável que, durante esses processos, grande parte das calcitas primárias tenha sofrido recristalização dinâmica, resultando em uma textura granoblástica poligonal e na formação de *kink bands* nos flogopitas.

5. Considerações Finais

O Metacarbonatito Passo Feio é um alkivito primário. A rocha estudada apresenta pequenas porções de carbonato representadas por veios, possivelmente resultantes da percolação de fluidos hidrotermais concomitantes com as tensões tectônicas, como evidenciado por estruturas deformacionais formadas em torno de 450°C.

Em relação à distribuição de ETRs, o metacarbonatito estudado é rico em ETRLs (particularmente La e Ce), predominantemente concentrados no mineral principal, a apatita, e em fases minerais acessórias, como monazita e

pirocloro, formadas por processos hidrotermais. Embora as apatitas tenham uma concentração relativamente baixa de ETRLs, elas constituem mais de 16% da composição da rocha.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto de Geociências da UFRGS pelo suporte técnico e de infraestrutura. Além disso, reconhecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do RS (FAPERGS) pelo apoio financeiro.

Referências

- Biondi, J.C., Braga Jr, J.M. Main minerals of the Araxá alkali-carbonatite complex, Minas Gerais State, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 134, 104751, 2024.
- Boynton, W.V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In *Developments in geochemistry* (Vol. 2, pp. 63-114). Elsevier. 1984.
- Campestrini, G.N., Rosa, M.B., Vieira, D.T., Koester, E., Almeida, M.D., Porcher, C.C., Dubbon, I.G., Correa, V.C., Mironuk, L., Ramos, R.C., Amorim, A.F. *Geoquímica do Metacarbonatito Passo Feio, Caçapava do Sul, RS: contribuições para a pesquisa de ETR*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 51, 2024, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte, SBG, 1150, 2024.
- Cerva-Alves, T., Remus, M.V.D., Dani N., Basei, M.A.S. Integrated field, mineralogical and geochemical characteristics of Caçapava do Sul alvikeite and beforsite intrusions: A new Ediacaran carbonatite complex in southernmost Brazil. *Ore Geology Reviews*, 88:352-369. DOI: 10.1016/j.oregeorev. 2017.
- Chakhmouradian, A., Reguir, E., Zaitsev, A., Coueslan, C., Xu, C., Kynicky, J., Mumin, A., Yang, P. Apatite in carbonatitic rocks: Compositional variation, zoning, element partitioning and petrogenetic significance. *Lithos*, 274, 188-213. 2017.
- Demény, A., Sitnikova, M.A., Karchevsky, P.I. Stable C and O isotope compositions of carbonatite complexes of the Kola Alkaline Province: phoscorite-carbonatite relationships and source compositions. *Mineralogy Society of Serbia*. 10. 2006.
- Finch, A.A., McCreath, J.A., Reekie, C.D.J., Hutchison, W., Ismaila, A., Armour, B.A., Andersen, T., Simonsen, S.L. From mantle to Motzfeldt: A genetic model for syenite-hosted Ta Nb-mineralization. *Ore Geology Review*, 107, 402–416. 2019.
- Finger, F., Broska, I., Roberts, M.P., Schermaier, A. Replacement of primary monazite by apatite – allanite – epidote coronas in an amphibolite facies granite gneiss from the eastern Alps. *American Mineralogist*, 83, 248-258. 1998.
- Gomes, C. D. B., Comin-Chiaromonti, P., Azzone, R. G., Ruberti, E., & Rojas, G. E. E. Cretaceous carbonatites of the southeastern Brazilian Platform: a review. *Brazilian Journal of Geology*, 48, 317-345. 2018.
- Gomide, C. S., Brod, J. A., Vieira, L. C., Junqueira-Brod, T. C., Petrinovic, I. A., Santos, R. V., Mancini, L. H. Stable (C, O, S) isotopes and whole-rock geochemistry of carbonatites from Alto Paranaíba Igneous Province, SE Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 46(03), 351-376. 2016.
- Harlov D.E. Apatite: A Fingerprint for Metasomatic Processes. *Elements* 11, 171-176. 637. 2015.
- Hogarth, D.D. Classification and nomenclature of the pyrochlore group. *American Mineralogist*, 62, 403-410. 1977.
- Kennedy, L.A., White, J.C. Low-temperature recrystallization in calcite: Mechanisms and consequences. *Geology*, 29(11), 1027-1030. 2001.

- Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M.J., Bonin, B., Bateman, P. (eds). Frontmatter. In: *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*. Cambridge University Press; 2002: i-iv. 2002.
- Lumpkin G.R., Ewing C.R. Geochemical alteration of pyrochlore group minerals: microlite subgroup. *American Mineralogist*, 77, 179-188. 1992.
- Lumpkin G.R., Ewing C.R. Geochemical alteration of pyrochlore group minerals: pyrochlore subgroup. *American Mineralogist*, 80, 732-743. 1995.
- Monteiro, C. F., de Oliveira, I. L., Brod, J. A., Dantas, E. L., de Araujo, C. E. G., Zacchi, É. N. P., Fuck, R. A., Nd-Sr-Hf isotopes and U-Pb ages of mesoproterozoic Três Estradas Alkaline-Carbonatite Complex, Brazil: Implications for Sul-Riograndense Shield evolution and Rodinia break-up. *Precambrian Research*, 351, 105963. 2020.
- Morales, B.A.A., Almeida, D.P.M., Koester, E., Rocha, A.M.R., Dorneles, N.T., Rosa, M.B., Martins, A.A. Mineralogy, whole-rock geochemistry and C, O isotopes from Passo Feio Carbonatite, Sul-Riograndense Shield, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 94, 102-208. DOI: 10.1016/j.jsames.2019.05.024. 2019.
- Nickel E.H. Solid solutions in mineral nomenclature. *Mineralogy and Petrology*, 46(1), 49-53. 1992.
- Patino-Douce, A.E., Roden, M., Chaumba, J., Fleisher, C., Yogodzinski, G., Compositional variability of terrestrial mantle apatites, thermodynamic modeling of apatite volatile contents, and the halogen and water budgets of planetary mantles. *Chemical Geology*, 288, 14–31. 2011.
- Siegesmund, S., Basei, M.A.S., Oyhantçabal, P., Oriolo, S. (Eds.). Geology of Southwest Gondwana. Springer, *Regional Geology Reviews*, 688p. 2018.
- Soltys, A., Giuliani, A., Phillips, D. Apatite compositions and groundmass mineralogy record divergent melt/fluid evolution trajectories in coherent kimberlites caused by differing emplacement mechanisms. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 175, 1–20. 2020.
- Sousa Filho, P.C., Galaço, A.R.B.S., Serra, O.A. Terras Raras: tabela periódica, descobrimento, exploração no Brasil e aplicações. *Química Nova*, 42(10), 1208-1224. 2019.
- Toledo, M.C.M., Pereira, V.P. Variabilidade de composição da apatita associada a carbonatitos. *Revista do Instituto Geológico*, 22 (1/1), 27-64. 2001.
- Verplank, P.L., Mariano, A.N. Rare earth element ore geology of carbonatites. *Economic Geology Society*, 18, 5–32. 2016.
- Wall, F., William, C.T., Woolley, A.R., Nasraqui, M., Pyrochlore from weathered carbonatite at Lueshe, Zaire. *Mineralogical Magazine*, 60, 731-750. 1996.
- Wang, Z.Y. et al. Carbonatite-related REE deposits: An overview. *Minerals*, 10, 1-26. 2020.
- Wark, D., Miller, A., Calvin F. Accessory mineral behavior during differentiation of a granite suite: monazite, xenotime and zircon in the Sweetwater Wash pluton, southeastern California, U.S.A. *Chemical Geology*, 110(1), 49-67. 1993.
- Xue, Y., Sun, N., Li, G. Evolution of Nb-Ta Oxide Minerals and Their Relationship to the Magmatic-Hydrothermal Processes of the Nb-Ta Mineralized Syenitic Dikes in the Panxi Region, SW China. *Minerals*, 11, 1204. 2021.
- Zurevinski, S.E., Mitchell, R.H. Extreme compositional variation of pyrochlore-group minerals at the Oka carbonatite complex, Quebec: evidence of magma mixing? *Canadian Mineralogy*, 42, 1159e1168. 2004.