

Caracterização mineralógica de um kamafugito do noroeste mineiro: microscopia óptica e difração de raios-X

Luís Alberto Silva ^{1,2} 

Christopher Rocha de Rezende ² 

Marco Aurélio Maia Teodoro ² 

Vitória Marina Pereira Perboni ² 

André Luis Pimenta de Faria ² 

Luiz Werner Brandão ³ 

Natal Junio Pires ¹ 

Michelly dos Santos Oliveira ^{1*} 

Resumo

Kamafugitos constituem um grupo de rochas de composição variada, com grande potencial de exploração devido à presença de elementos de interesse econômico. Contudo, a literatura ainda apresenta poucas investigações detalhadas sobre esses materiais. Nesse contexto, este trabalho introduziu a primeira etapa da caracterização mineralógica de um kamafugito da região noroeste de Minas Gerais, utilizando difração de raios-X com refinamento de Rietveld para análise da estrutura cristalina dos minerais, além de microscopia óptica e eletrônica de varredura com espectroscopia de energia dispersiva. A interpretação dos dados mostrou uma rocha de textura porfirítica, com matriz de granulação fina, típica para esse tipo de rocha ígnea. Observou-se também que fósforo, titânio e ferro são os elementos de maior interesse, principalmente associados aos minerais apatita, perovskita e magnetita, respectivamente.

Palavras-chave: Caracterização; Kamafugitos; Minérios complexos.

Mineral characterization of a kamafugite from northwest Minas Gerais: optical microscopy and X-ray diffraction

Abstract

Kamafugites constitute a group of rocks with varied composition and significant exploration potential due to the presence of economically valuable elements. However, detailed investigations on these materials are still scarce in the literature. In this context, this study introduced the first stage of the mineralogical characterization of a kamafugite from the northwest region of Minas Gerais, employing X-ray diffraction with Rietveld refinement to analyze the crystalline structure of the minerals, along with optical microscopy and scanning electron microscopy with energy-dispersive spectroscopy. Data interpretation revealed a rock with a porphyritic texture and a fine-grained matrix, typical of this type of igneous rock. The primary interest elements identified were phosphorus, titanium, and iron, mainly related to apatite, perovskite and magnetite, respectively.

Keywords: Characterization; Kamafugites; Complex ores.

1 Introdução

O Brasil já é considerado uma superpotência no setor de mineração. Além de ser um dos maiores produtores de minério de ferro, o país também é responsável por 9% da produção mundial de alumínio, 7% do grafite e 90% do

nióbio. Ademais, o país também possui grande potencial para a extração de outros recursos minerais, como cobre, lítio, níquel, fosfato, potássio, urânio e terras raras [1]. Entre os vários tipos de depósitos existentes no Brasil, os

¹Departamento de Minas e Construção Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET, Araxá, MG, Brasil.

²Centro de Inovação e Tecnologia, CIT/SENAI, Instituto SENAI de Inovação em Processamento Mineral, ISIPM, Belo Horizonte, MG, Brasil.

³Magnor Consulting, Belo Horizonte, MG, Brasil.

*Autor correspondente: michelly@cefetmg.br

E-mails: luis_alberto803@hotmail.com; marcomaia.geo@hotmail.com; crdrezende@yahoo.com.br; vitoria.perboni97@gmail.com; apfaria@fiemg.com.br; brandaosilveira@gmail.com; natal.fg@gmail.com



kamafugitos são especialmente notáveis, sendo um grupo raro de rochas encontrados nos estados de Goiás e Minas Gerais [2]. O kamafugito é um termo que descreve várias rochas vulcânicas alcalinas que contêm kalsilita. Essas rochas são caracterizadas pela presença de kalsilita modal, melilita e perovskita, resultantes de sua extrema subsaturação de sílica, baixo teor de alumínio, enriquecimento em potássio e níveis extremamente altos de cálcio [3].

Devido à complexidade dos depósitos kamafugíticos torna-se essencial conduzir uma caracterização minuciosa e detalhada de suas principais propriedades. Isso possibilita um entendimento mais completo do depósito, contribuindo para a definição de rotas viáveis de processamento mineral [4]. Nesse sentido, alguns autores já se debruçaram sobre o estudo das características de rochas kamafugíticas pertencentes ao grupo Mata da Corda na Província Ígnea do Alto Paranaíba [5,6], mas as pesquisas ainda são incipientes. Para Neumann et al. [7], a caracterização de minérios é uma fase essencial para o aproveitamento eficiente de um recurso mineral, fornecendo ao engenheiro as informações mineralógicas e texturais necessárias para o correto dimensionamento da rota de processo. Esse processo de caracterização determina e quantifica toda a assembleia mineralógica do minério, identificando os minerais de interesse e de ganga, além de quantificar a distribuição dos elementos úteis entre os diferentes minerais presentes. Adicionalmente, avalia as texturas da rocha e define o tamanho de partícula necessário para a liberação dos minerais de interesse, assim como outras propriedades físicas e químicas relevantes, fornecendo dados cruciais para a definição das rotas de processamento mais adequadas.

Diante do exposto, o objetivo do trabalho foi realizar a caracterização mineralógica de um kamafugito pertencente a um depósito da região noroeste de Minas Gerais, visando, com essa caracterização, possibilitar um maior entendimento deste litotipo, complementando o trabalho de caracterização física e química realizado por Silva et al. [4].

2 Metodologia

Os ensaios de caracterização e os testes experimentais foram realizados no Centro de Inovação e Tecnologia do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (CIT SENAI). A amostra do presente estudo pertence a um depósito kamafugítico da região noroeste de Minas Gerais e foi denominada de kamafugito fresco (KF). A amostra foi seca à temperatura ambiente, britada em 6# (3,36 mm), homogeneizada e quarteada em alíquotas para os ensaios de caracterização subsequentes. A caracterização mineralógica do KF consistiu na realização de ensaios de difração de raios X, microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura com detector de energia dispersiva (MEV-EDS).

O difratograma foi obtido a partir da análise da amostra pulverizada em um difratômetro Rigaku, modelo SmartLab 9 kW, o qual conta com um tubo de raios X que emite radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1,5418\text{\AA}$) e utiliza o sistema θ - 2θ . A varredura foi feita

entre 5 - 80° (2 - θ) e com voltagem, corrente e tempo de leitura de $40,0$ kV, $30,0$ mA e $0,6$ segundo/passos, respectivamente. O *software* Match! foi utilizado na identificação das fases da amostra e a semiquantificação das fases cristalinas foi realizada por meio do método de refinamento de Rietveld.

A partir da análise de lâminas delgadas polidas, obtidas de fragmentos de rochas do KF coletados no depósito, foi realizada a caracterização mineralógica utilizando estudos petrográficos com microscópios ópticos da marca Leica, modelos DMEP e DMLP, além de uma lupa trinocular estereomicroscópica Leica, modelo Mz 75. Esses estudos possibilitaram a identificação dos principais minerais constituintes da rocha, a análise das relações texturais, bem como a detecção de evidências dos processos geológicos aos quais as rochas foram submetidas. Adicionalmente, um dos principais objetivos dessa etapa foi verificar as associações minerais de interesse e selecionar áreas com potencial para uma investigação mais detalhada por meio de MEV-EDS. Estas análises foram realizadas em equipamento MEV-FEG Jeol JSM-7100F-LV acoplado com detector EDS Oxford nas próprias lâminas delgadas analisadas por microscopia óptica após recobrimento destas com filme de carbono. Para a aquisição dos dados foi utilizada tensão de aceleração de 10 kV e distância de trabalho próxima a 10 mm e para as imagens eletrônicas foi utilizado elétrons retroespalhados. Ressalta-se que estes parâmetros foram ajustados conforme necessário.

3 Resultados e discussão

Os resultados da análise de difração de raios X da amostra de KF estão apresentados no difratograma da Figura 1. Na fração total, são identificadas e semiquantificadas as fases diopsídio (24,8%) e calcita (21,2%) como predominantes. Além dessas, são observadas em menores proporções apatita (12,9%), perovskita (9,4%), titanita (9,0%), magnetita (8,9%), mica (8,3%) e montmorillonita (5,6%). Esses resultados são corroborados pelos dados de análise química [4], destacando fósforo, ferro e titânio como os principais elementos de interesse. Vale destacar que os resultados são orientativos, pois não houve quantificação do material amorfo, o que pode gerar variações nas proporções indicadas, sobretudo considerando que o kamafugito é uma rocha ígnea vulcânica que pode conter material amorfo, vidro vulcânico, em sua composição. Dos quatro minerais mais representativos na amostra de KF, três coincidem com aqueles relatados no estudo de kamafugitos de Figueiredo et al. [8]: diopsídio, fluorapatita e perovskita. Segundo Melo [6] e Sgarbi et al. [9], os mafuritos são compostos por Mg-olivina, diopsídio, perovskita, titano-magnetita, flogopita e apatita. Já os uganditos possuem uma composição mineralógica similar aos mafuritos, diferenciando-se pela presença de pseudomorfos de leucita e menor quantidade de olivina. Assim, com base nessas informações, há indícios de que a amostra de KF seja um mafurito, corroborando com os achados de análise química do trabalho de Silva et al. [4].

A Figura 2 exibe uma imagem obtida por meio de lupa. De maneira geral, o material apresenta uma granulação

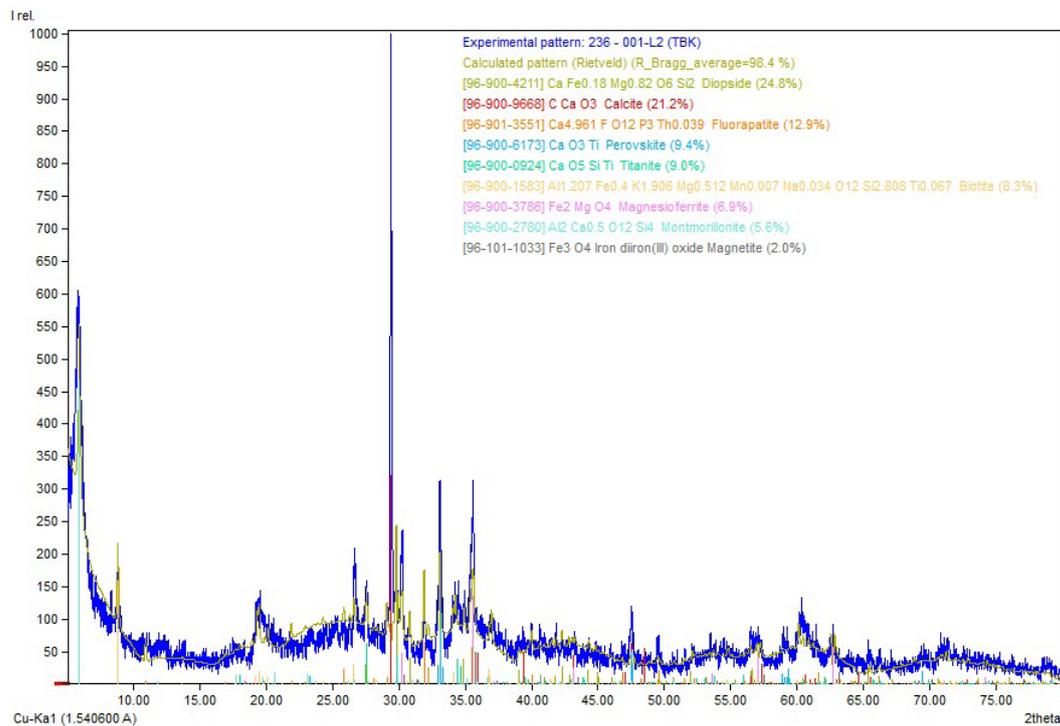


Figura 1. Difratoograma de raios X do KF com os picos identificados.

diversificada, com predominância de uma matriz afanítica formada por cristais extremamente pequenos. Espalhados por essa matriz, podem ser vistos grãos faneríticos de granulação fina, além de outros de granulação mais grossa, fenocristais, caracterizando uma textura porfírica. Esses fenocristais mais grossos são, possivelmente, perovskita e piroxênio. Grãos opacos visíveis na imagem sugerem a presença de óxidos de ferro, característicos de kamafugitos. As regiões mais claras podem estar associadas a minerais secundários, como calcita e argilas, possivelmente devido a processos de alteração.

Essa caracterização está alinhada com as observações de Melo [6], que menciona que os kamafugitos contêm fenocristais de olivina e piroxênio dispersos em uma matriz afanítica, com textura porfírica inequigranular e matriz fanerítica fina (< 1 mm), composta de cristais idiomorfos e alotriomorfos. Da mesma forma, Boulhosa et al. [10], ao estudarem kamafugitos da mesma região, notaram uma heterogeneidade granulométrica, com fenocristais dispersos em uma matriz de grãos finos, corroborando os achados deste estudo.

Esses autores também relatam que os kamafugitos são compostos de Mg-olivina, diopsídio, perovskita, minerais opacos, flogopita e apatita, com os primeiros minerais a cristalizar, como olivina, perovskita e clinopiroxênio, apresentando maior granulação e faces bem definidas, o que confirma a identificação dos fenocristais mencionados.

A Figura 3 exibe imagens do KF obtidas por meio de microscopia óptica. Na Figura 3a, destaca-se a complexa textura e mineralogia do kamafugito, onde se observa uma matriz afanítica contendo fenocristais dispersos e grãos opacos indicativos de

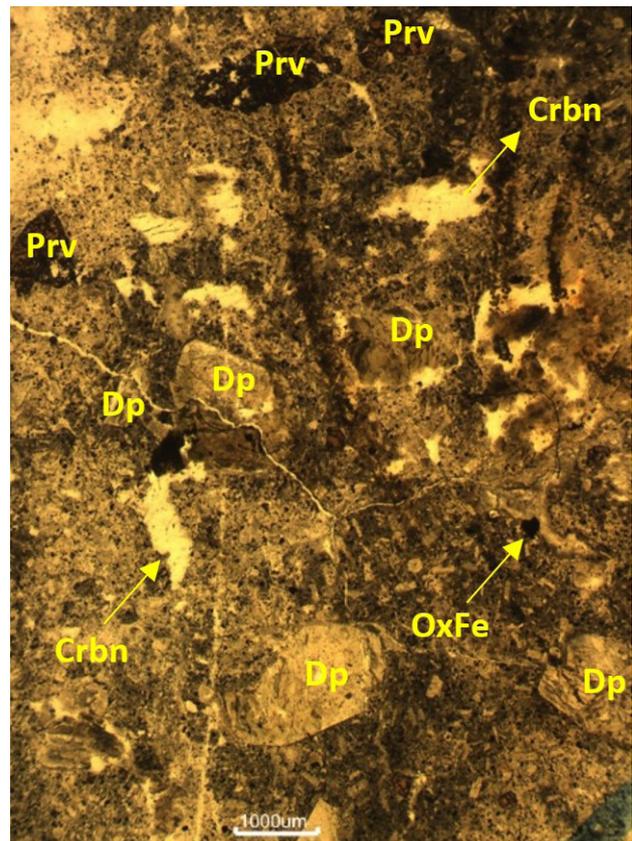


Figura 2. Fotomicrografias obtidas em lupa com 1x (luz natural). Crbn: carbonato; Prv: perovskita; Cpx: clinopiroxênio; HFe: hidróxido de ferro; OxFe: óxido de ferro. Fonte: Adaptado de Warr [11].

óxidos de ferro. A textura porfírica é evidenciada pela presença de fenocristais de perovskita, com formas euédricas e tamanhos intermediários, juntamente com piroxênios, que incluem o maior grão da amostra e outros menores. Áreas alteradas e veios de calcita sugerem processos geológicos de alteração. Além disso, há a presença de hidróxido de ferro (coloração marrom), que envolve os fenocristais de piroxênio. Já a Figura 3b destaca um grão relicto com núcleo de piroxênio, cuja alteração para carbonato e hidróxido de ferro reforça a presença de processos de alteração posteriores à gênese da rocha.

Na Figura 3c, observam-se três fenocristais de piroxênio com contornos bem definidos, enquanto áreas marrons indicam a presença de hidróxido de ferro envolvendo

os fenocristais e preenchendo fraturas. Semelhante ao visto na Figura 3a, grãos opacos associados a óxidos de ferro também estão presentes. A perovskita (de coloração marrom), localizada no centro da lâmina, distingue-se por seu relevo mais acentuado em relação aos hidróxidos de ferro. Por fim, a Figura 3d exibe uma matriz fanerítica fina com óxidos de ferro disseminados e fenocristais de perovskita e piroxênio, predominantemente euédricos e subédricos. A Figura 3e ilustra um grão de piroxênio significativamente alterado, evidenciando hidróxido de ferro ao longo das bordas e um núcleo com características distintas. Já a Figura 3f mostra uma matriz de textura majoritariamente afanítica, onde pequenos grãos faneríticos de óxido de ferro (opacos), além

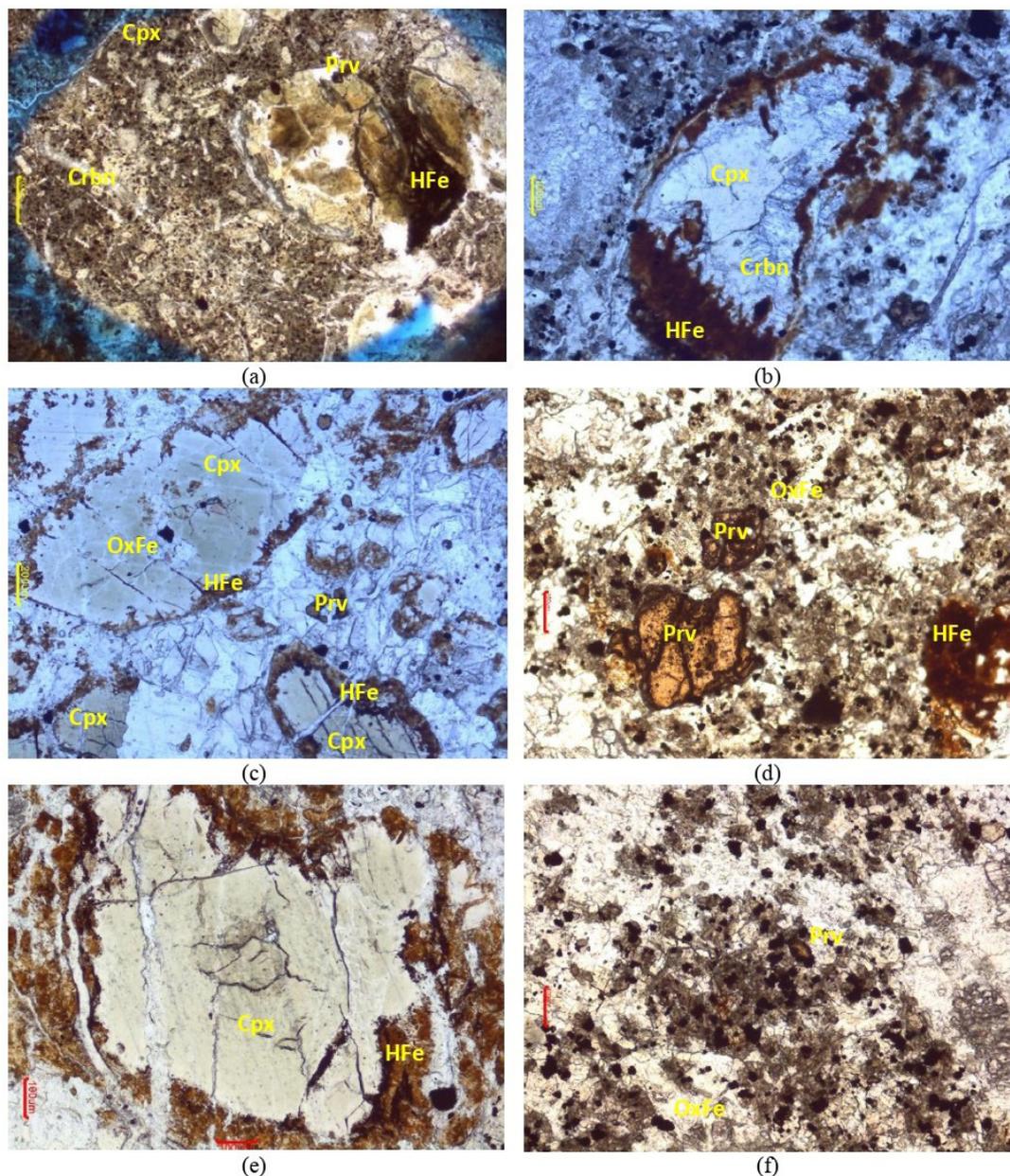


Figura 3. Fotomicrografias do KF sob o microscópio óptico. Crbn: carbonato; Prv: perovskita; Cpx: clinopiroxênio; HFe: hidróxido de ferro; OxFe: óxido de ferro. Fonte: Adaptado de Warr [11].

de grãos finos de mica e feldspatos alterados, encontram-se dispersos. Observa-se também a presença de fenocristais de perovskita e piroxênio, sendo que este último apresenta possíveis alterações para carbonatos e hidróxidos de ferro.

Todas essas observações corroboram os achados de Nascimento et al. [12], que descreveram o kamafugito como uma rocha ultramáfica, de cor cinza escura, porfírica, inequigranular, ultrapotássica, composta por fenocristais euédricos a subédricos de olivina, clinopiroxênio (diopsídio) e flogopita, em uma matriz afanítica com microcristais de clinopiroxênio, flogopita, apatita, feldspatóides e magnetita.

A análise das imagens de MEV revela aspectos texturais que confirmam as características descritas na seção de microscopia óptica e são típicas de rochas ígneas ultramáficas alcalinas (Figura 4). As imagens de elétrons retroespalhados destacam cristais grandes imersos em uma matriz de granulação fina, sugerindo uma textura porfírica. Essa diferença no tamanho dos grãos é comum em rochas alcalinas, formadas frequentemente em condições de baixa saturação de sílica. Nos cinco espectros analisados na Figura 4a, três (25, 26 e 29) indicam fortemente a presença de apatita, mineral rico em fósforo, conforme quantificado na literatura [13] e, por

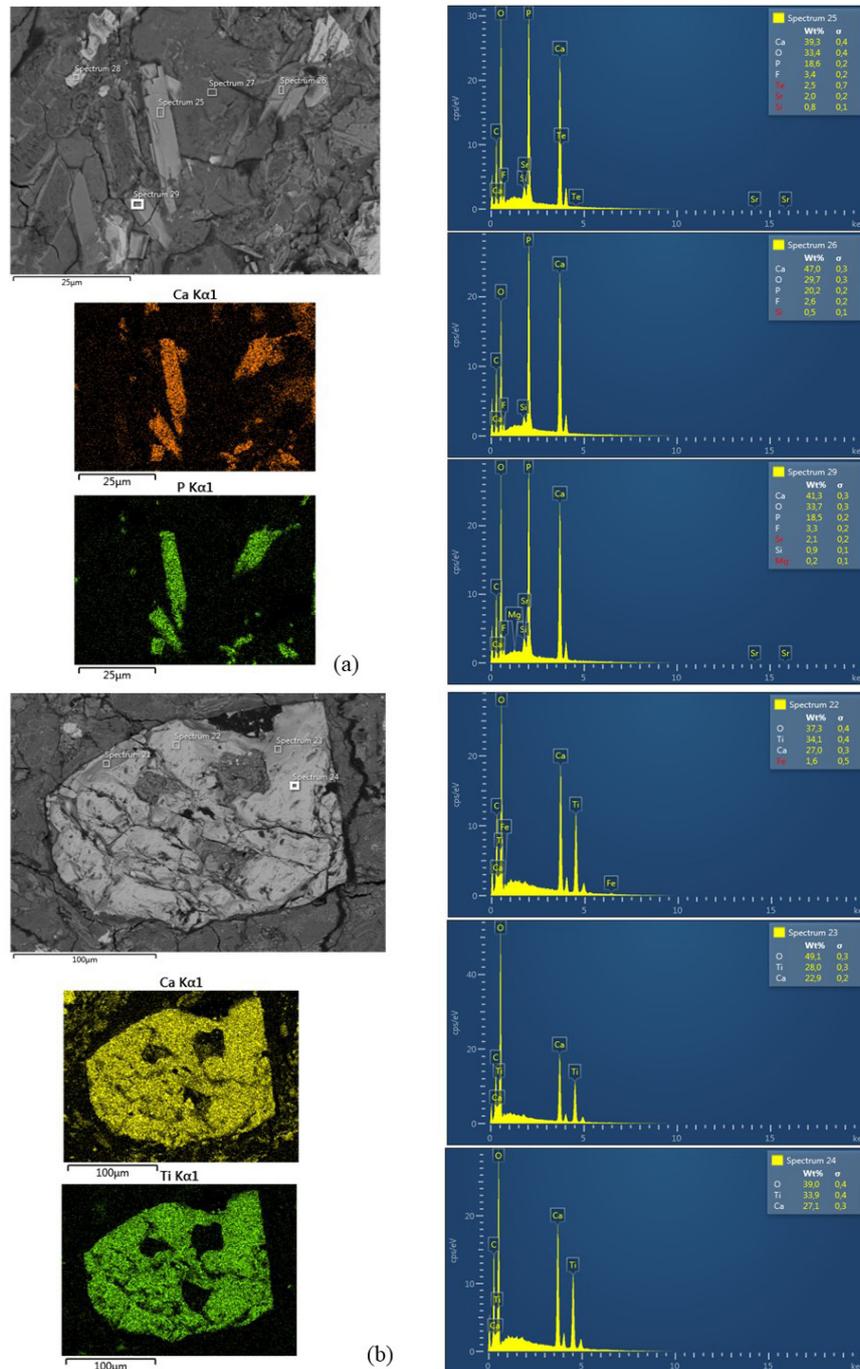


Figura 4. Imagens de MEV-EDS (a) apatita (b) perovskita.

apresentarem granulação muito fina, aproximadamente 25 µm, só foi observado e identificado graças à análise de MEV-EDS. Já a Figura 4b aponta para um mineral de titânio, com os espectros 21 a 24 sugerindo perovskita [14], ambos em quantidades coerentes com os dados disponíveis na literatura.

4 Conclusão

O estudo aborda a mineralogia de um kamafugito do noroeste de Minas Gerais, evidenciando o potencial econômico do depósito em função de elementos como fósforo, titânio e ferro, principalmente presentes nos minerais apatita, perovskita

e magnetita. A identificação de uma textura porfirítica em uma matriz de granulação fina (afanítica a fanerítica fina) está em concordância com a característica desse tipo de rocha ígnea. As descobertas apresentadas oferecem uma referência sobre a mineralogia do kamafugito, favorecendo investigações futuras focadas em processos de beneficiamento desse recurso na região. Considerando sua complexidade, recomenda-se também o uso de técnicas automatizadas de caracterização mineralógica para um estudo mais detalhado da composição, proporcionando dados fundamentais para a criação de rotas de processamento mais otimizadas, que possam assegurar o uso sustentável e economicamente viável do depósito.

Referências

- 1 Pope N, Smith P. Minerais críticos e estratégicos do Brasil em um mundo em transformação. Rio de Janeiro: Instituto Igarapé; 2023. 51 p.
- 2 Ferreira PJWK. Kamafugito proveniente da região do Alto Paranaíba-MG como remineralizador de solo [tese]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia; 2021.
- 3 Strekeisen A. Kalsilite-bearing rocks (kamafugitic rocks) [acesso em 30 set. 2024]. Disponível em: <https://www.alexstrekeisen.it/english/vulc/mafurite.php#:~:text=Kamafugite%20is%20a%20term%20describing,enrichment%20and%20extremely%20high%20Ca>
- 4 Silva LA, Rezende CR, Coelho CM, Faria AL, Brandão LW, Pires NJ, et al. Caracterização física e química de um kamafugito do noroeste mineiro. *Tecnológica em Metalurgia, Materiais e Mineração*. 2025;22:e3140.
- 5 Rosa AF. Estudo de amostras da região de Presidente Olegário visando identificar minerais portadores de titânio [trabalho de conclusão de curso]. Araxá: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais; 2015.
- 6 Melo MG. A origem do fosfato nas rochas vulcânicas e vulcanoclásticas do grupo Mata da Corda nas regiões de Patos de Minas e Presidente Olegário, MG [dissertação]. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto; 2012.
- 7 Neumann R, Schneider CL, Alcover Neto A. Caracterização tecnológica de minérios. In: Luz ABD, Sampaio JA, França SCA, editors. *Tratamento de minérios*. Rio de Janeiro: CETEM; 2010. p. 85-139.
- 8 Figueiredo CA, Chaves AO, Sgarbi PBA, Fernandes MLS. O processo de analcimização de um kamafugito (Luz262) do centro-oeste mineiro. *Geonomos*. 2018;26(1):1-11.
- 9 Sgarbi PBA, Gaspar JC, Valença JG. Clinopyroxene from Brazilian kamafugites. *Lithos*. 2000;53(2):101-116.
- 10 Boulhosa GS, Melo MG, Fernandes AB. Estudo petrológico das rochas alcalinas da província Ígnea Alto do Paranaíba – MG. In: *Anais da VI Semana de Geologia do Espírito Santo*; 2019 Set 17-20; Vitória, Brasil. Vitória: SEGES; 2019. p. 23.
- 11 Warr LN. IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*. 2021;85(3):291-320.
- 12 Nascimento ELC, Barbosa IA, Brod JA, Matos HLS. Petrografia e mineralogia dos kamafugitos do complexo carbonatítico Morro Preto – GO. In: *Anais do XVI Simpósio de Geologia do Centro-Oeste*; 2019 Set 9-11; Cuiabá, Brasil. Cuiabá: Sociedade Brasileira de Geologia Núcleo Centro-Oeste; 2019. p. 18.
- 13 Webmineral [página da internet]. Apatite [acesso em 1 out. 2024]. Disponível em: <https://webmineral.com/data/Apatite.shtml>
- 14 Webmineral [página da internet]. Perovskite [acesso em 1 out. 2024]. Disponível em: <https://webmineral.com/data/Perovskite.shtml>

Recebido em: 18 Dez. 2024

Aceito em: 27 Abr. 2025

Editor responsável: André Carlos Silva 