

Caracterização física e química de um kamafugito do noroeste mineiro

Luís Alberto Silva¹ Christopher Rocha de Rezende² Carolina Maia Coelho² André Luis Pimenta de Faria² Luiz Werner Brandao³ Natal Junio Pires¹ Michelly dos Santos Oliveira^{1*} 

Resumo

Os kamafugitos, embora raros, são rochas com potencial de aproveitamento de elementos importantes, mesmo sendo pouco estudados. Nesse sentido, este trabalho realizou a caracterização física e química de um kamafugito do noroeste mineiro. Os parâmetros físicos (umidade, densidade real, índice de trabalho e curva de moagem) e químicos (óxidos majoritários através de WD-XRF, elementos traço via ICP-MS, carbono e enxofre em LECO) foram determinados. Os resultados do estudo indicam que a amostra de kamafugito apresenta uma densidade e composição química comparáveis a outros kamafugitos da mesma área, especialmente em relação aos elementos terras raras leves. A análise granulométrica identificou predominância de partículas grossas e um *work index* similar ao de minérios como zinco, tungstênio e hematita, caracterizando o material como de dureza média, característica que permite otimizar a moagem, assegurando boa liberação mineral, produtividade e custos controlados. A composição química do kamafugito inclui principalmente SiO₂ (35,5%), Fe₂O₃ (16,5%), MgO (12,8%) e CaO (10,7%). O presente estudo contribui para a escassa literatura sobre kamafugitos e poderá auxiliar no desenvolvimento de rotas eficazes de processamento mineral, favorecendo a viabilidade econômica do depósito.

Palavras-chave: Caracterização de minérios; Kamafugitos; Rochas vulcânicas.

Physical and chemical characterization of a kamafugite from northwest Minas Gerais

Abstract

Kamafugites, although rare, are rocks with significant potential for the extraction of important elements, despite being understudied. In this context, the work performed the physical and chemical characterization of a kamafugite from northwest Minas Gerais. The physical parameters (moisture content, real density, work index, and grinding curve) and chemical parameters, including major oxides by WD-XRF, trace elements by ICP-MS, carbon, and sulfur by LECO were determined. The results indicate that the analyzed sample has density and chemical composition similar to other kamafugites from the same region, especially regarding light rare earth elements. Granulometric analysis revealed a predominance of coarse particles, and a work index similar to ores such as zinc, tungsten, and hematite, classifying the material as medium hardness, a characteristic that enables optimized grinding, ensuring good mineral liberation, productivity, and controlled costs. The chemical composition of kamafugite includes mainly SiO₂ (35.5%), Fe₂O₃ (16.5%), MgO (12.8%), and CaO (10.7%). These findings contribute to the scarce literature on kamafugites, and may assist in developing effective mineral processing routes, enhancing the economic viability of the deposit.

Keywords: Ore characterization; Kamafugites; Volcanic rocks.

¹Departamento de Minas e Construção Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET-MG, 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



1 Introdução

Com a maior complexidade dos minérios, tanto em suas características físicas quanto químicas, é necessário realizar estudos aprofundados sobre suas propriedades antes de iniciar os processos de concentração. Além disso, é fundamental monitorar continuamente os produtos em cada fase do processo para otimizar a produção, reduzir custos e minimizar o impacto ambiental [1]. Compreender as propriedades físicas e químicas dos minérios é crucial para garantir o sucesso no beneficiamento e prever os resultados em cada etapa do processo [2].

É sabido que o Brasil apresenta um potencial mineral expressivo. De acordo com Medina et al. [3], o subsolo brasileiro possui uma abundância de depósitos minerais valiosos, produzindo atualmente cerca de 70 tipos de substâncias: 21 metálicas, 45 não-metálicas e quatro energéticas. Segundo Ferreira [4], entre os vários tipos de depósitos, os kamafugitos são especialmente relevantes, sendo um grupo raro de rochas encontradas em apenas quatro lugares no mundo, com suas ocorrências no Brasil concentradas principalmente em Goiás e Minas Gerais.

O termo kamafugito refere-se a um grupo de rochas que inclui katungito, mafurito e ugandito [5]. Essas rochas vulcânicas são notáveis por sua composição máfica a ultramáfica, com uma concentração de SiO_2 que varia entre 44,9% e 36,6%. Nas fases félsicas, podem ser encontrados feldspatóides como kalsilita e leucita, enquanto os minerais máficos presentes incluem melilita, clinopiroxênio, olivina, perovskita, titanomagnetita e, em alguns casos, flogopita [6]. No estudo realizado por Rosa [7], os minerais mais abundantes encontrados em uma amostra de kamafugito foram carbonatos, piroxênio, olivina, ilmenita e magnetita. Por outro lado, Lopes [8] analisou outra amostra de kamafugito e destacou a presença predominante de minerais de titânio, como rutilo e anatásio, além de minerais de ferro, incluindo goethita, hematita e magnetita, e também minerais como gibbsita, caulinita e mica.

Embora representem menos de 1% das rochas ígneas expostas na Terra, as rochas alcalinas despertam grande interesse entre os pesquisadores. Essa importância se deve à sua composição singular e ao potencial para conter minerais raros e particulares. Uma característica dessas rochas é a capacidade de concentrar elementos químicos geralmente incompatíveis em magmas comuns, como terras raras (ETRs), nióbio, tântalo, zircônio e outros metais de alto valor econômico e tecnológico. Por isso, as rochas alcalinas são frequentemente associadas a depósitos de minerais essenciais para várias aplicações industriais, desde supercondutores até componentes eletrônicos e catalisadores. Essas rochas também têm um papel importante na economia agrícola, fornecendo elementos essenciais como fósforo e potássio. Além disso, as rochas alcalinas são vitais para a indústria de alta tecnologia devido à presença de ETRs e metais raros [9].

Sabe-se que o Brasil é um importante produtor de commodities minerais, mas enfrenta alta dependência de

importação de minerais estratégicos, como potássio e fosfato, essenciais para fertilizantes e a indústria química. O Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM 2030) e o Plano Nacional de Fertilizantes 2022-2050 (PNF) têm como objetivo reduzir essa vulnerabilidade, incentivando investimentos e facilitando o licenciamento ambiental para novos projetos minerários. Aliado a esse contexto, a exploração de kamafugitos, que abrigam minerais estratégicos como ETRs utilizados em alta tecnologia, torna-se crucial para diversificar a base mineral e ampliar a autossuficiência do país, fortalecendo sua competitividade no cenário global [10].

Diante do exposto, as rochas kamafugíticas apresentam desafios específicos no beneficiamento devido à sua composição mineralógica complexa e à presença de minerais de baixo teor. Essa diversidade mineral dificulta a separação eficiente dos componentes de interesse e requer técnicas avançadas de caracterização para definir rotas de processamento adequadas.

Além disso, a textura heterogênea e a presença de minerais finamente disseminados aumentam a dificuldade na obtenção de concentrados com alta pureza.

Dada a complexidade dos depósitos kamafugíticos, é fundamental realizar uma caracterização detalhada e aprofundada de suas principais propriedades, permitindo um conhecimento mais abrangente do depósito e auxiliando na definição de possíveis rotas de processamento mineral. O objetivo deste trabalho foi realizar a caracterização física e química de um kamafugito pertencente a um depósito na região noroeste de Minas Gerais, visando ao desenvolvimento futuro de rotas para seu beneficiamento e viabilização econômica.

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 kamafugito fresco (KF). O litotipo passou por secagem à temperatura ambiente, britagem do material em #6 (3,36 mm), homogeneização e quarteamento de alíquotas para os ensaios de caracterização subsequentes. A caracterização física do KF consistiu na determinação das seguintes características do material: umidade, densidade real, distribuição granulométrica, determinação do índice de trabalho ou *Work Index* (WI) e da curva de moagem.

A umidade foi mensurada secando-se 1 kg de amostra em uma estufa mantida a 100° C durante 24 horas. Após esse período, o material foi pesado e o processo de secagem foi considerado concluído quando não houve mais alteração no peso. A densidade real foi medida, em triplicata, para a amostra cabeça pulverizada e para a fração abaixo de 0,038 mm, utilizando um estereopícnômetro a gás (hélio), modelo SPY-3 da Quantachrome Corporation.

Os ensaios para determinar a distribuição granulométrica do KF foram realizados utilizando três métodos complementares, garantindo a análise de frações grossas e finas:

- Peneiramento vibratório a úmido: o material tal qual e o produto britado foram peneirados usando uma série de peneiras Tyler, variando de 1/4" (6,3 mm) até 400# (0,038 mm), em um peneirador vibratório suspenso da marca Denver. A fração menor que 400# (0,038 mm) do material tal qual foi encaminhada para análises adicionais em granulômetro a *laser*.
- Análise granulométrica por granulômetro a *laser*: a fração <400# (-0,038 mm) foi analisada em um granulômetro a *laser*, modelo CILAS 920. O procedimento foi realizado sem dispersante, com fator de forma igual a 1 e com 60 segundos de ultrassonificação.

O ensaio de WI foi realizado conforme procedimento descrito por Barbato e Sampaio [11]. O KF passou por testes de cominuição para determinar a curva de moagem do litotipo. A operação foi realizada em um moinho de bolas com dimensões de 8"x 8" e utilizando 1 kg de material britado em 6# (3,36 mm). Os parâmetros do ensaio e a distribuição de carga de bolas foram semelhantes aos relatados por Silva [12].

A caracterização química do KF foi feita pela empresa SGS Geosol Laboratórios LTDA utilizando-se três técnicas analíticas: (1) determinação de óxidos majoritários por espectroscopia de raios X por dispersão de comprimento de onda (WD-XRF) através de fusão com tetraborato de lítio e perda ao fogo por calcinação da amostra a 1000°C, (2) determinação de terras raras por espectrometria de massa por plasma acoplado indutivamente (ICP-MS) através de fusão com metaborato de lítio e (3) determinação de carbono e/ou enxofre totais por infravermelho (LECO). A composição normativa foi obtida através de cálculos baseados em sua composição química. Essa análise consiste de uma estimativa das fases minerais ideais de uma rocha formadas a partir da cristalização de magmas [13], sendo essencial para a análise de rochas ígneas [14].

O cálculo da norma CIPW foi realizado com auxílio do *software* GCDkit.

3 Resultados e discussão

Os valores de umidade superaram os 10%, sendo cerca de 1 ponto percentual maior na base seca (11,34%). Lage [15] enfatiza a importância de controlar a umidade do minério, pois ela afeta diretamente os custos de produção. O uso de água nos processos de beneficiamento eleva a umidade do minério, e a falta de controle adequado ou secagem ineficiente pode aumentar os custos do produto, comprometer a estabilidade das pilhas de armazenamento e encarecer o transporte, entre outros problemas.

As densidades reais das duas amostras são comparáveis, sendo que a fração -400# (0,038 mm) apresenta uma diferença de aproximadamente 0,2 pontos percentuais a menos ($2,54 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$) quando comparada à amostra cabeça ($2,71 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$). É possível que o menor valor de densidade observado na fração -400# em relação à amostra cabeça esteja relacionado a uma maior concentração de óxido de alumínio nas partículas mais finas, influenciando nesse resultado. Ainda assim, os valores estão próximos da densidade do kamafugito do estudo de Ávila et al. [16] ($2,5 \text{ g/cm}^3$) e são superiores à densidade do kamafugito observada no trabalho de Rosa [7] ($2,24 \text{ g/cm}^3$).

A Figura 1 mostra as curvas de distribuição granulométrica do KF em diferentes perspectivas. No caso do peneiramento (Figura 1a), os resultados mostram que a amostra tal qual é majoritariamente grossa, com cerca de 40% do material passando por uma peneira de 1/4" (6,3 mm), enquanto apenas 6% possui granulometria inferior a 400# (0,038 mm). Entretanto, após a britagem, o percentual de material passante em 400# (0,038 mm) aumentou para cerca de 22%, sendo esse valor mais comparável à granulometria do kamafugito estudado por Lopes et al. [17], que apresentou 30% do material passante em 400# (0,038 mm). A análise por granulômetro a *laser* indicou que o KF possui um diâmetro médio de *Fraunhofer* (DMF) igual a $9,47 \mu\text{m}$. Além disso, a Figura 1b indicou, pela distribuição de frequência acumulada, que 50% das partículas apresentam tamanhos inferiores a $7,77 \mu\text{m}$. O DMF é um conceito utilizado em análises de granulometria a *laser* para representar o tamanho médio das partículas de uma amostra. O *software* do equipamento processa esses padrões para calcular o tamanho médio das partículas em termos de um diâmetro equivalente ao tamanho de uma esfera que produziria o mesmo efeito de difração.

Por fim, a Figura 1c mostra a curva granulométrica da moagem do KF nos tempos de 0, 5, 10 e 15 minutos. O objetivo foi entender o comportamento do material durante a moagem para etapas futuras de processamento. O aumento no tempo de moagem geralmente contribui para uma maior liberação dos minerais, mas é crucial equilibrar essa prática para evitar custos operacionais elevados e a produção excessiva de finos, que podem impactar negativamente o processamento mineral. Os resultados obtidos indicam que a moagem por 10 minutos parece ser a alternativa mais eficiente entre os tempos analisados. Embora a moagem por 15 minutos tenha mostrado um pequeno incremento na liberação, essa diferença pode não justificar o aumento de tempo e de custos, especialmente considerando a similaridade entre os resultados. No entanto, estudos adicionais de liberação são recomendados para validar essa hipótese.

O estudo indica que o kamafugito possui uma dureza média em termos de consumo energético para moagem (WI = 10,97 kWh/st). Esta classificação é baseada nos critérios de Nappier-Munn et al. [18], que categorizam minérios com um WI entre 9 e 14 kWh/t como de dureza média. Embora não existam parâmetros específicos disponíveis para a comparação direta do WI de kamafugitos, os valores

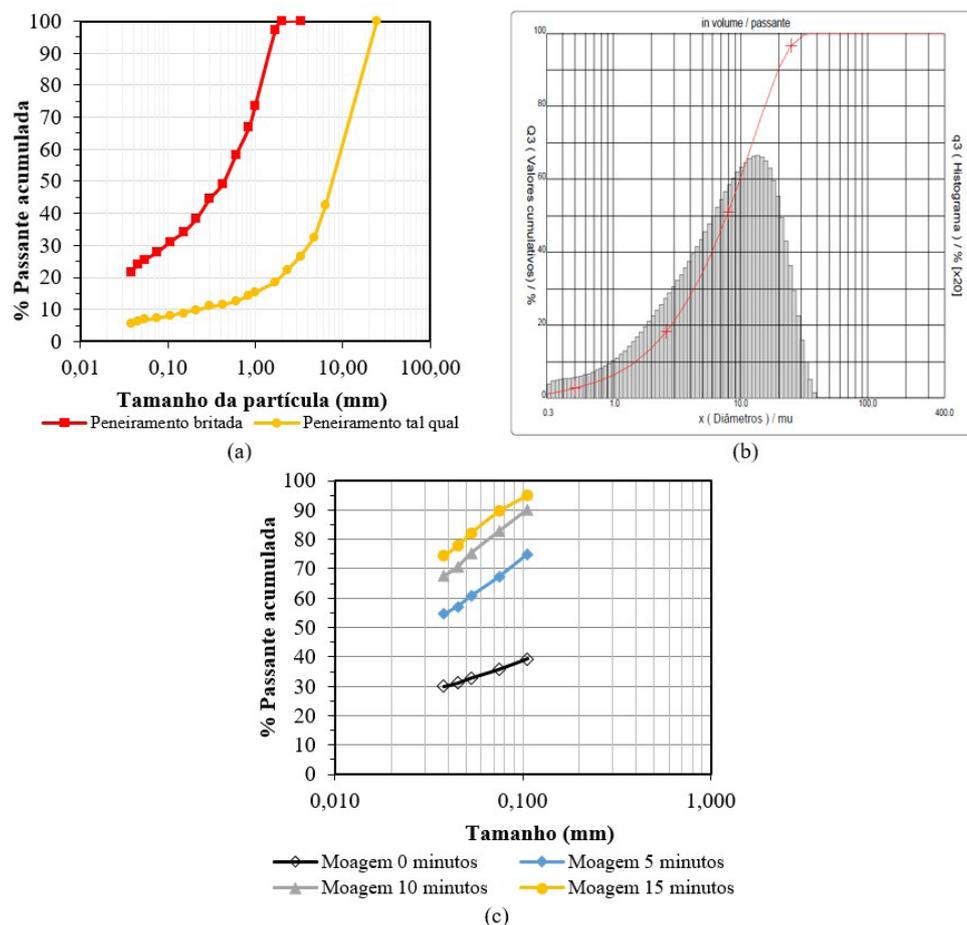


Figura 1. Distribuição granulométrica do KF (a) peneiramento a úmido; (b) granulômetro a *laser* e (c) em diferentes tempos de moagem.

obtidos são semelhantes aos valores médios relatados por Beraldo [19] para hematita (11,10 kWh/st), minério de zinco (10,90 kWh/st) e minério de tungstênio (11 kWh/st).

Para rochas de dureza média, é possível otimizar o processo para atingir boa liberação mineral sem comprometer a produtividade ou incorrer em custos operacionais elevados. Contudo, é essencial monitorar a granulometria obtida, pois mesmo em materiais de dureza média, ajustes inadequados podem levar à formação de partículas finas em excesso, prejudicando as etapas subsequentes do beneficiamento, como flotação ou separação magnética.

Para Florêncio et al. [20], o consumo de energia na etapa de cominuição tem um impacto crescente nos resultados financeiros das operações mineiras, especialmente devido ao aumento dos custos associados à moagem de minérios até granulometrias cada vez menores.

A Figura 2a apresenta os resultados da análise química dos principais óxidos no KF. O litotipo é formado predominantemente por SiO_2 (35,50%), seguido de Fe_2O_3 (16,50%), MgO (12,80%) e CaO (10,70%). Outros óxidos presentes em menores quantidades incluem TiO_2 (6,44%), Al_2O_3 (5,50%), K_2O (2,16%) e P_2O_5 (1,82%). Esses resultados estão de acordo com os valores relatados por Felgate [22], que descreve os uganditos e mafuritos (kamafugitos) com teores de SiO_2 variando entre 37-45%, Al_2O_3 cerca de 7%,

TiO_2 entre 4-8% e CaO de 11-15%, enquanto os teores de MgO são mais baixos, variando de 8-21%.

Além disso, os dados se alinham com as faixas estipuladas por Melo [6], que classifica os uganditos e mafuritos como rochas ultrabásicas, contendo 32,8-33,6% de SiO_2 , altos teores de CaO (10,5-13,0%), Fe_2O_3 (12,9-16,8%) e TiO_2 (4,96-5,66%), além de valores moderados de Al_2O_3 (3,2-7,44%), álcalis (1,4-6,98%) e P_2O_5 (1,11-2,72%).

A Figura 2b apresenta os resultados da análise química dos ETRs normalizados pelo condrito de Boynton [21] no KF. De acordo com os dados, o litotipo é majoritariamente composto por ETRs leves.

Em contrapartida, os ETRs médios e pesados apresentam concentrações mais baixas. Tanto o tório (Th) quanto o urânio (U), juntamente com os ETRs médios e pesados, exibem concentrações menores quando comparados aos ETRs leves. Essa tendência foi confirmada também por Melo [6], que observou o enriquecimento de elementos terras raras leves, como lantânio (La), Ce, praseodímio (Pr), neodímio (Nd) e samário (Sm) nos kamafugitos Mata da Corda. O mesmo padrão foi relatado por Sgarbi e Gaspar [23], que identificaram o enriquecimento em ETRs leves nos kamafugitos e rochas associadas de Santo Antônio da Barra, Goiás, onde são hospedados pela perovskita.

Os resultados da análise química para a determinação de carbono (C) e enxofre (S) mostram que o KF apresenta 0,51% de carbono e 0,03% de enxofre. Esse valor de S é comparável ao encontrado nos estudos de Nascimento [24] e Stoppa et al. [25], que examinaram kamafugitos de Goiás e da Itália, respectivamente, onde reportaram uma concentração de enxofre em torno de 0,04%.

A Tabela 1 apresenta os resultados da mineralogia normativa. O diopsídio (26,78%) é o mineral predominante, evidenciando a natureza máfica da rocha kamafugítica. A ausência de quartzo está alinhada com a literatura, que caracteriza os kamafugitos como rochas ígneas ultramáficas e alcalinas, com sub-saturação em sílica, insuficiente para a formação de quartzo.

A Figura 3a apresenta um comparativo entre a composição de óxidos majoritários do KF em relação a outros kamafugitos da mesma região [6,7,26]. A composição geral do KF é similar às das outras amostras, exceto pelo Fe₂O₃, especialmente em comparação com a média das amostras de Rosa [7]. A Figura 3b apresenta a comparação entre o KF e os kamafugitos estudados por Sgarbi e Gaspar [23] e Nascimento [24], ambos do estado de Goiás. Como esperado, a composição química do KF difere das amostras analisadas, com todas apresentando predominância de SiO₂, mas variações significativas em Al₂O₃ e Fe₂O₃. Essas diferenças podem ser explicadas pelas diversas origens geológicas e processos formativos das amostras. A Figura 3c compara o KF com kamafugitos de outros países. As variações nas concentrações dos óxidos indicam diferenças significativas nas composições químicas dos kamafugitos das diferentes regiões, atribuídas a fatores geológicos e processos formativos distintos.

A amostra africana [27] possui maiores concentrações de SiO₂ e Al₂O₃, enquanto a amostra italiana [25] destaca-se pelos teores mais altos de MgO e K₂O. O KF tem uma composição intermediária em relação às outras duas, com valores notáveis de Fe₂O₃ e CaO.

A Figura 3d ilustra a comparação da composição química dos ETRs do KF com outros kamafugitos da mesma região e de outro estado brasileiro. Observa-se que o KF apresentou resultados de ETR muito semelhantes aos das amostras estudadas por Melo [6], o que era esperado, pois ambos provêm de regiões geograficamente próximas. A análise revela que os elementos La, Ce e Nd são predominantes nas amostras KF e no estudo de Melo [6], sugerindo que essas amostras são majoritariamente compostas por ETRs leves. Os demais elementos apresentaram concentrações baixas e pouca variação, indicando que, embora presentes, não são predominantes na composição das amostras. Em contraste, o KF exibiu teores mais elevados de ETR para quase todos os elementos quando comparado aos kamafugitos de Santo Antônio da Barra e Morro Preto, ambos localizados no estado de Goiás. Esses dois kamafugitos mostraram composições semelhantes entre si, mas diferentes das amostras KF e do estudo de Melo [6], possivelmente refletindo diferentes condições de formação ou fontes de material distintas.

Com base nos principais óxidos identificados e na predominância de ETRs leves, operações como separação magnética, flotação e lixiviação são sugeridas para concentração dos elementos de interesse. A separação magnética se mostra adequada para minerais de ferro. A flotação pode ser viável para fósforo e potássio e a lixiviação pode ser aplicada na recuperação de ETR, com escolha de reagentes e condições de pH ajustadas à associação mineralógica.

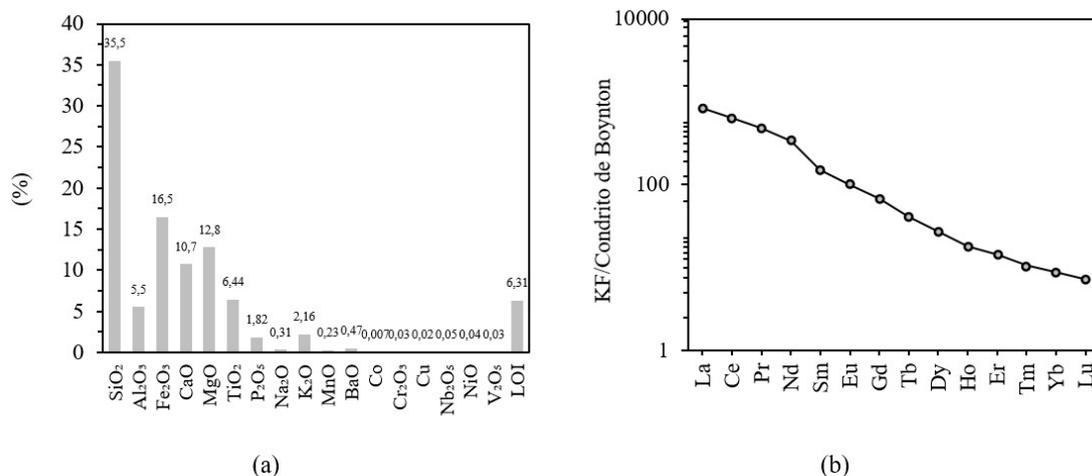


Figura 2. Composição química do KF (a) óxidos majoritários (b) ETRs normalizado pelo condrito de Boynton [21].

Tabela 1. Resultados obtidos através do cálculo da Norma CIPW para o KF (em %)

Amostra	Ortoclásio (Or)	Albita (Al)	Anortita (An)	Diopsídio (Di)	Hyperstênio (Hy)	Olivina (Ol)	Magnetita (Mt)	Ilmenita (Il)	Apatita (Ap)
KF	12,76	2,62	7,24	26,78	3,35	13,73	23,92	12,23	4,22

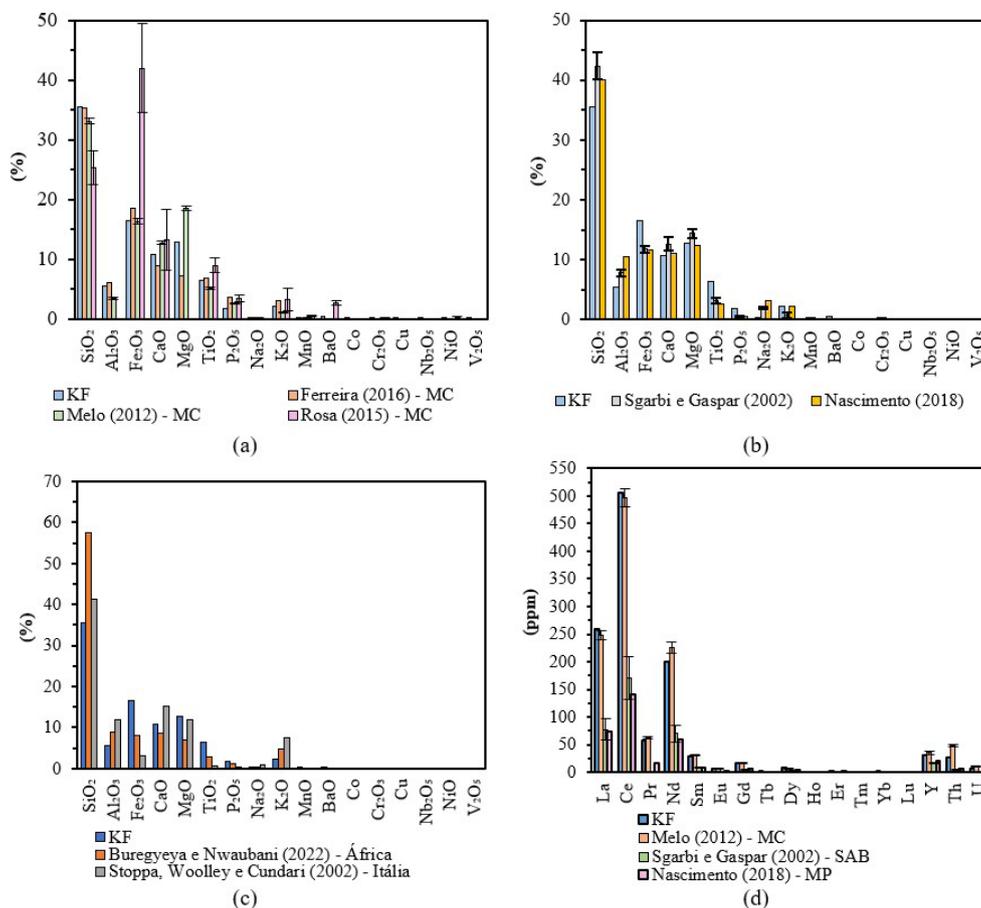


Figura 3. Comparação da composição química do KF em relação a outros kamafugitos (a) óxidos majoritários – MC: Grupo Mata da Corda-MG (b) óxidos majoritários – SAB: Santo Antônio da Barra-GO e MP: Morro Preto-GO (c) óxidos majoritários – outras regiões (África, Itália) e (d) ETRs – MC: Grupo Mata da Corda-MG, SAB: Santo Antônio da Barra-GO e MP: Morro Preto-GO.

4 Conclusão

O KF apresentou densidade e composição química similar a outros kamafugitos da mesma região, especialmente em relação aos ETRs leves. As diferenças nas composições químicas entre o KF e os kamafugitos de outras regiões sugerem variações geológicas e processos formativos distintos. A análise granulométrica revelou um litotipo com predominância de partículas grossas enquanto a dureza do material foi considerada média com um work index comparável a minérios de hematita e tungstênio. O kamafugito contém não apenas terras raras leves como lantânio (La) e cério (Ce), mas também óxidos de ferro (Fe₂O₃) e titânio (TiO₂), com potencial para uso na metalurgia, além de fósforo (P₂O₅) e potássio (K₂O), essenciais para a produção de fertilizantes na agricultura. O presente estudo não só contribui para

a escassa literatura existente sobre os kamafugitos, mas também aprofunda o entendimento sobre suas características. Ressalta-se a importância e necessidade de conduzir estudos mineralógicos complementares para aprimorar ainda mais as análises realizadas. Por fim, a junção desses resultados será essencial para desenvolver rotas de processamento mineral eficazes e avaliar a viabilidade econômica do depósito.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CIT SENAI pela disponibilização da infraestrutura para a execução do estudo, à empresa parceira pela concessão de autorização para a divulgação dos dados e ao CEFET-MG pelo apoio institucional.

Referências

- Salum MJG, Peres AEC. Caracterização de minérios: uso do Magstream-Model 100, suas vantagens e limitações. REM. Revista Escola de Minas. 2002;55:55-59.

- 2 Rocha GM, Gonçalves GMC, Ramos KDS, Cota TG, Lima RMF. Caracterização física, química e mineralógica de uma amostra de minério de ferro de Brucutu. *Tecnologica em Metalurgia, Materiais e Mineração*. 2019;16(1):88-94.
- 3 Medina AIM, Cássio JP, Silva RD, Cunha FGD, Jacques PD, Borges AF. Geologia ambiental: contribuição para o desenvolvimento sustentável. In: Fernandes FRC. *Tendências tecnológicas Brasil 2015: geociências e tecnologia mineral*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT; 2007. p. 35-56.
- 4 Ferreira PJWK. Kamafugito proveniente da região do Alto Paranaíba-MG como remineralizador de solo [tese]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia; 2021.
- 5 Silva S. Petrografia e química mineral das intrusões Indaiá I e Indaiá II, Oeste do Estado de Minas Gerais [dissertação]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2008.
- 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 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.
- 8 Lopes BWM. Avaliação do desempenho de uma rota de beneficiamento para a exploração do titânio proveniente do anatásio [trabalho de conclusão de curso]. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto; 2019.
- 9 Martins GM. Petrografia das rochas kamafugíticas de Rio Verde e Santo Antônio da Barra da Província Alcalina de Goiás [trabalho de conclusão de curso]. Alegre: Universidade Federal de Espírito Santo; 2016.
- 10 Castro FF, Peiter CC, Góes GS. Minerais estratégicos e críticos: uma visão internacional e da política mineral brasileira. Brasília: IPEA; 2022.
- 11 Barbato CN, Sampaio JA. Determinação experimental do Índice de Trabalho (WI). In: Sampaio JA, França SCA, Braga PFA. *Tratamento de minérios: práticas laboratoriais*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT; 2007. p. 179-189.
- 12 Silva LA. Caracterização de um kamafugito da região noroeste de Minas Gerais [dissertação]. Araxá: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais; 2024.
- 13 Almeida RN. Caracterização litogeoquímica das rochas subvulcânicas da região de Potiraguá, sul do estado da Bahia [dissertação]. Salvador: Universidade Federal da Bahia; 2006.
- 14 Silva RLP. Petrologia e geoquímica do Batólito Rio Formoso, domínio Pernambuco-Alagoas [dissertação]. Recife: Universidade Federal de Pernambuco; 2018.
- 15 Lage VN. Desenvolvimento de sistema de bancada para medição de umidade de minérios [dissertação]. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto; 2018.
- 16 Ávila CN No, Henrique HM, Oliveira KD, Oliveira MS, Alves JVS, Silva MM. Ensaio de flotação e caracterização físico-química do kamafugito e dos produtos de flotação. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia; 2017.
- 17 Lopes BWM, Faria ALP, Coelho CM, Teodoro MAM, Rezende CR, Paula ER, et al. Avaliação do desempenho da operação de moagem a seco e a úmido em minério titanífero. In: *Anais do XXIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa; 2022; Armação dos Búzios*. Armação dos Búzios: ENTMMME; 2022. p. 1-9.
- 18 Nappier-Munn TJ, Morrell S, Morrison RD, Kojovic T. Mineral comminution: their operation and optimisation. Queensland: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre; 1999.
- 19 Beraldo JL. Moagem de minérios em moinhos tubulares. São Paulo: Edgard Blucher; 1987.
- 20 Florêncio WJG, Rodrigues RT, Souza VCG. Estimando o Work Index (WI) a partir da potência de um moinho de laboratório pelo método de Rowland. *Revista Observatorio de La Economía Latinoamericana*. 2024;22(11):1-17.
- 21 Boynton WV. Cosmochemistry of the rare earth elements; meteorite studies. In: Henderson P. *Rare earth element geochemistry*. Elsevier Science Publishing Co; 1984. p. 63-114.
- 22 Felgate MR. Improved geochemical and geochronological constraints on magmatism in Rondonia and the Alto Paranaíba igneous province [thesis]. Austrália: Universidade de Melbourne; 2014.
- 23 Sgarbi PBA, Gaspar JC. Geochemistry of Santo Antônio da Barra Kamafugites, Goiás, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. 2002;14(8):889-901.
- 24 Nascimento ELC. Geologia, geoquímica e mineralogia do Complexo Carbonatítico Morro Preto – GO [tese]. Universidade de Brasília, Brasília; 2018.
- 25 Stoppa F, Woolley AR, Cundari A. Extension of the melitite-carbonatite province in the Apennines of Italy: the kamafugite of Grotta del Cervo, Abruzzo. *Mineralogical Magazine*. 2002;66(4):555-574.

- 26 Ferreira KC. Estudo das rochas do Grupo Mata da Corda na região de Patos de Minas-MG e os desafios tecnológicos de tratamento mineral [monografia]. Catalão: Universidade Federal de Goiás; 2016.
- 27 Buregyeya A, Nwaubani S. Hydration and compressive strength of Portland cement blended with kamaugites and carbonatites: effect of physical properties. East African Journal of Science, Technology and Innovation. 2022;3(2):1-15.

Recebido em: 07 Out. 2024

Aceito em: 04 Dez. 2024

Editor Responsável: André Carlos Silva 