CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS – CAMPUS ARAXÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS
MESTRADO PROFISSIONAL

LUÍS ALBERTO SILVA

CARACTERIZAÇÃO DE UM KAMAFUGITO DA REGIÃO NOROESTE DE MINAS GERAIS

ARAXÁ – MINAS GERAIS
2024

LUÍS ALBERTO SILVA

CARACTERIZAÇÃO DE UM KAMAFUGITO DA REGIÃO NOROESTE DE MINAS GERAIS

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, Campus Araxá, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

Área de Concentração: Engenharia de Minas

Linha de Pesquisa: Processamento de Minérios e Rejeitos

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

Orientadora: Profª. Drª. Michelly dos Santos Oliveira

Coorientadores: Prof. Dr. Natal Junio Pires e Me. André Luis Pimenta de Faria

ARAXÁ – MINAS GERAIS

2024

Silva, Luís Alberto
S586c Caracterização de um kamafugito da região noroeste de minas gerais / Luís Alberto Silva. – 2024.
125 f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Michelly dos Santos Oliveira.
Coorientadores: Prof. Dr. Natal Junio Pires.
Prof. Me. André Luis Pimenta de Faria.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Araxá, 2024.
Bibliografia.

1. Minas e Mineração – Teses. 2. Minérios – Teses. 3. Rochas Vulcânicas – Teses. 4. Kamafugito – Teses. I. Oliveira, Michelly dos Santos . II Pires, Natal Junio. III. Faria, André Luis Pimenta de. IV. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. V. Título.

CDU 622.2

Ficha elaborada pela Biblioteca – *Campus* Araxá – CEFET-MG
Bibliotecária: Gleisa Mara Alves CRB-6/1713

Aos meus pais, Dulce (*in memorian*) e Alberto

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a diversas pessoas e instituições que desempenharam papéis fundamentais ao longo desta jornada acadêmica.

À Deus, pela saúde para poder trilhar mais essa etapa da minha vida profissional. Aos meus pais Dulce (*in memorian*) e Alberto. À minha mãe por ser a luz que guia meus passos, mesmo na sua ausência física. Ao meu pai por ser exemplo de determinação, coragem e, consequentemente, fonte de inspiração, incentivando-me a superar obstáculos e persistir nos momentos desafiadores. Aos meus irmãos Mychelle e Dierly por eu saber que posso contar com vocês em qualquer momento da minha vida.

À professora Débora Sousa e ao geólogo Christopher Rocha pelo aceite da banca e pelas contribuições enriquecedoras. Ao Luiz Brandão pelo aceite de utilização dos dados da presente pesquisa e pela disponibilização das amostras.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET/MG) por disponibilizar um curso de alta qualidade e de forma gratuita. É com imenso orgulho que retorno a essa instituição para conduzir esta pesquisa, revisitando as raízes onde concluí minha graduação. Quero estender meu sincero agradecimento à Michelly e ao Natal, que não apenas desempenharam o papel de orientadores, mas também se destacaram como mentores exemplares. É com grande orgulho que os enxergo como pessoas de destaque e reconhecimento tanto do ponto de vista humano quanto profissional.

Ao Centro de Inovação e Tecnologia (CIT SENAI) e ao Instituto SENAI de Inovação em Processamento Mineral (ISIPM) por possibilitarem a realização da pesquisa em suas instalações, com especial reconhecimento ao André Luis, não apenas por proporcionar essa oportunidade, mas também por aceitar meu pedido de coorientação. Aos amigos Christopher, Angélica, Fernanda, Edileny, Marco Aurélio, Carolina Maia, Vitória e Blenda pelas discussões técnicas enriquecedoras e pelos momentos descontraídos, que tornaram esta jornada ainda mais gratificante. À toda equipe operacional, especialmente ao Vander, Izael e ao Reginaldo Fraga, grato por comprarem minhas ideias e serem as mentes mais brilhantes desta planta piloto.

Por fim, agradeço ao pessoal de Belo Horizonte, especialmente ao José Diovano e à Marina Guedes. A parceria, companheirismo, amor e compreensão que compartilhamos em todos os momentos foram essenciais para tornar esta jornada mais leve e significativa. Agradeço sinceramente pela presença constante de vocês e pelo apoio inestimável em todo esse percurso.

RESUMO

Os kamafugitos são rochas vulcânicas raras, reconhecidas por sua composição mineralógica diversificada, o que atrai significativo interesse científico e econômico. Essas rochas contêm minerais valiosos, como terras raras, fósforo e potássio, essenciais para a indústria de alta tecnologia e a agricultura. A complexidade inerente aos depósitos de kamafugito demanda uma investigação detalhada para elucidar suas principais propriedades e potencial de exploração. Nesse contexto, a caracterização mineralógica e tecnológica envolve a identificação, quantificação e avaliação das propriedades do minério, fornecendo informações fundamentais para o aproveitamento otimizado dos recursos minerais e permitindo a visualização de condições que melhorem os processos de beneficiamento. Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo caracterizar um kamafugito da província ígnea do Alto Paranaíba localizado na região Noroeste de Minas Gerais. A metodologia incluiu testes para determinar parâmetros físicos (densidade real, *work index*, distribuição granulométrica e umidade), químicos e mineralógicos do litotipo avaliado. Os resultados preliminares apontaram que a amostra é majoritariamente grossa, com uma fração significativa passando por peneiras maiores (57,75% maior que 6,3 mm). A umidade da amostra ultrapassou 10%, e a densidade real variou entre 2,71 g/cm³ e 2,54 g/cm³ para diferentes frações granulométricas. A composição química dos óxidos majoritários mostra predominância de SiO_2, Fe_2O_3, MgO e CaO, com outros óxidos como TiO_2, Al_2O_3, K_2O e P_2O_5 também presentes. Estes resultados foram consistentes com a análise mineralógica, que identificou a predominância de diopsídio, calcita e magnetita na amostra, além de perovskita, titanita, biotita e montmorillonita. Além disso, a análise de elementos terras raras (ETRs) mostrou uma maior concentração de ETRs leves. O litotipo apresenta uma granulação diversificada, com predominância de uma matriz afanítica constituída por cristais extremamente pequenos. Dentro dessa matriz, são encontrados grãos faneríticos de granulometria fina. A textura predominante é porfirítica, marcada pela presença de fenocristais imersos em uma matriz de granulação fina. A análise de distribuição elementar indica que a perovskita é o principal portador de titânio, enquanto o ferro se encontra nos óxidos de ferro, o fósforo é predominantemente carreado pela apatita e os elementos de terras raras (ETRs) estão concentrados na monazita. Os dados de associação mineral revelaram uma distribuição heterogênea das superfícies livres dos minerais, sem uma tendência clara de aumento ou redução desse parâmetro com a diminuição do tamanho das partículas. A análise de liberação mineral mostrou similaridade entre os métodos de composição de partículas e superfície exposta. A liberação foi maior nos minerais de ganga, especialmente nas granulometrias finas, enquanto os minerais de ferro apresentaram liberação intermediária e os de titânio obtiveram melhores índices em granulometrias grossas. Os minerais com fósforo tiveram os menores índices de liberação, sugerindo que aprimoramentos na cominuição são necessários para uma liberação mais eficaz nas etapas de concentração.

Palavras-chave: Kamafugito. Caracterização de minérios. Minérios complexos.

ABSTRACT

Kamafugites are rare volcanic rocks, recognized for their diverse mineralogical composition, which draws significant scientific and economic interest. These rocks contain valuable minerals such as rare earth elements, phosphorus, and potassium, essential for high-tech industries and agriculture. The inherent complexity of kamafugite deposits requires detailed investigation to elucidate their main properties and exploration potential. In this context, mineralogical and technological characterization involves identifying, quantifying, and assessing ore properties, providing fundamental information for optimized resource utilization and enabling conditions that enhance beneficiation processes. Given this, the present study aimed to characterize a kamafugite from the Alto Paranaíba igneous province located in the Northwest region of Minas Gerais. The methodology included tests to determine physical (true density, work index, particle size distribution, and moisture), chemical, and mineralogical parameters of the evaluated lithotype. Preliminary results indicated that the sample is predominantly coarse, with a significant portion passing through larger sieves (57.75% above 6.3 mm). The sample's moisture content exceeded 10%, and the true density ranged from 2.71 g/cm³ to 2.54 g/cm³ for different particle size fractions. The chemical composition of major oxides shows a predominance of SiO_2, Fe_2O_3, MgO, and CaO, with other oxides such as TiO_2, Al_2O_3, K_2O, and P_2O_5 also present. These results were consistent with mineralogical analysis, which identified the predominance of diopside, calcite, and magnetite in the sample, along with perovskite, titanite, biotite, and montmorillonite. Additionally, rare earth element (REE) analysis showed a higher concentration of light REEs. The lithotype exhibits a diverse grain size distribution, with a predominance of an aphanitic matrix composed of extremely small crystals. Within this matrix, fine-grained phaneritic grains are present. The predominant texture is porphyritic, marked by the presence of phenocrysts embedded in a fine-grained matrix. Elemental distribution analysis indicates that perovskite is the primary titanium carrier, while iron is mainly in iron oxides, phosphorus is primarily carried by apatite, and rare earth elements (REEs) are concentrated in monazite. Mineral association data revealed a heterogeneous distribution of free mineral surfaces, with no clear trend of increase or decrease as particle size decreases. The mineral liberation analysis showed similarity between particle composition and exposed surface methods. Liberation was highest for gangue minerals, especially in finer particle sizes, while iron minerals showed intermediate liberation, and titanium minerals exhibited higher liberation in coarser sizes. Phosphorus-containing minerals had the lowest liberation indices, suggesting that improvements in comminution are necessary for more effective liberation in concentration stages.

Keywords: Kamafugite. Ore characterization. Complex ores.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fotografia das rochas (a) katungito (b) mafurito (c) ugandito. 16
Figura 2 – Região da localização do estudo. 17
Figura 3 – Coluna estratigráfica do grupo Bambuí. 19
Figura 4 – Coluna estratigráfica dos grupos Areado e Mata da Corda. 22
Figura 5 – Fluxograma explicativo das etapas da caracterização: mineralógica e tecnológica. 23
Figura 6 – Percentual do mineral de interesse na partícula em seis cenários distintos. 36
Figura 7 – Desenho esquemático do depósito kamafugítico. 44
Figura 8 – Preparação de amostra em Stacker. 45
Figura 9 – Fragmentos de rocha do KF. 46
Figura 10 – Curva de distribuição granulométrica da amostra KF tal qual (amarela) e britada (vermelho). 53
Figura 11 – Curva de distribuição granulométrica do KF obtida no granulômetro a *laser*. 54
Figura 12 – Curva de distribuição granulométrica do KF obtida no *cyclosizer*. 55
Figura 13 – Curvas de distribuição granulométrica do KF em diferentes tempos de moagem. 58
Figura 14 – Composição química de óxidos majoritários e LOI da amostra cabeça do KF. . 59
Figura 15 – Comparação da composição química dos óxidos majoritários do KF em relação a outros kamafugitos (a) MC: Grupo Mata da Corda-MG (b) SAB: Santo Antônio da Barra-GO e MP: Morro Preto-GO (c) de outras regiões (África, Itália). 61
Figura 16 – Composição química de óxidos majoritários e LOI da amostra cabeça e do KF britado por fração. 63
Figura 17 – Composição química de ETRs da amostra cabeça do KF. 66
Figura 18 – Padrão de ETRs normalizado pelo condrito de Boynton (1984). 66
Figura 19 – Comparação da composição química dos ETRs do KF em relação a outros kamafugitos. MC: Grupo Mata da Corda-MG, SAB: Santo Antônio da Barra-GO e MP: Morro Preto-GO. 67
Figura 20 – Comparação entre o padrão de ETRs do KF normalizado (KFN) pelo condrito de Boynton (1984) em relação aos dados máximos e mínimos de ETRs normalizados pelo condrito de Boynton (1984) de kamafugitos brasileiros. 68
Figura 21 – Composição química dos ETRs da amostra cabeça e do KF britado por fração. 69
Figura 22 – Composição química de carbono e enxofre da amostra cabeça referente ao KF. 71
Figura 23 – Padrão de difratograma da amostra KF com os picos identificados. 74

Figura 24 – Fotomicrografias obtidas em lupa com 1x (luz natural). 75
Figura 25 – 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 (2021)..... 77
Figura 26 – Imagens de MEV-EDS (a) Região com os minerais analisados (b) Pontos de espectro EDS (c) análise química do espectro 25 (d) análise química do espectro 26 (e) análise química do espectro 27 (f) análise química do espectro 28 (g) análise química do espectro 29 (h) mapa químico por EDS. 84
Figura 27 – Imagens de MEV-EDS (a) Região com os minerais analisados (b) Pontos de espectro EDS (c) análise química do espectro 21 (d) análise química do espectro 22 (e) análise química do espectro 23 (f) análise química do espectro 24 (g) mapa químico por EDS. 85
Figura 28 – Proporção dos minerais nas frações +200#, +270# e +400# no litotipo KF (% peso). 88
Figura 29 – Distribuição do titânio (à esquerda) e do fósforo (à direita) nas frações +200#, +270# e +400# da amostra KF. 90
Figura 30 – Distribuição do ferro (à esquerda) e do cério, lantânio e neodímio (à direita) nas frações +200#, +270# e +400# da amostra KF. 91
Figura 31 – Associação dos minerais em partículas livres (azul claro) e associados a outras fases na amostra KF. 95
Figura 32 – Diagrama acumulado de liberação mineral por composição de partícula obtido para as frações +200#, +270# e +400# do KF referente aos grupos dos minerais de ferro, fósforo, titânio e ganga. 96
Figura 33 – Diagrama de porcentagem de grãos liberados da classe >90% por composição de partícula para as frações +200#, +270# e +400# do KF referente aos grupos dos minerais de ferro, fósforo, titânio e ganga. 97
Figura 34 – Diagrama acumulado de liberação mineral por superfície livre obtido para as frações +200#, +270# e +400# do KF referente aos grupos dos minerais de ferro, fósforo, titânio e ganga. 99
Figura 35 – Diagrama de porcentagem de grãos liberados da classe > 90% por superfície livre para as frações +200#, +270# e +400# do KF referente aos grupos dos minerais de ferro, fósforo, titânio e ganga. 100

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Grupos, formações e características litológicas..... 18
Quadro 2 – Resumo dos principais métodos de caracterização química de minérios. 29
Quadro 3 – Elementos que podem ser detectados por ICP-OES..... 31
Quadro 4 – Minerais presentes no KF. 73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais métodos utilizados para análise granulométrica..... 24
Tabela 2 – Parâmetros operacionais do ensaio de granulometria por difração a *laser.*..... 47
Tabela 3 – Parâmetros operacionais do ensaio de granulometria por *cyclosizer.* 47
Tabela 4 – Distribuição da carga de bolas para o ensaio de WI..... 48
Tabela 5 – Distribuição da carga de bolas para a determinação da curva de moagem..... 48
Tabela 6 – Distribuição granulométrica da amostra KF tal qual por peneiramento a úmido. 53
Tabela 7 – Distribuição granulométrica da amostra britada de KF por peneiramento a úmido. 54
Tabela 8 – Diâmetros e superfície específica obtidas por análise via granulômetro a *laser*. 54
Tabela 9 – Distribuição granulométrica da amostra KF por *cyclosizer*. 55
Tabela 10 – Umidade base úmida e base seca do KF. 56
Tabela 11 – Densidade real média da amostra tal qual e da fração -400# do KF. 56
Tabela 12 – Resultado de WI da amostra KF. 56
Tabela 13 – Distribuição granulométrica do KF em diferentes tempos de moagem. 57
Tabela 14 – Resultados da análise química da amostra cabeça do KF referente aos óxidos majoritários e ao LOI (em %). 59
Tabela 15 – Resultados da análise química da amostra cabeça e do KF britado por fração referente aos óxidos majoritários e ao LOI (em %). 64
Tabela 16 – Resultados da análise química da amostra cabeça do KF (a) ETRs (em ppm) (b) padrão de ETRs normalizados pelo condrito de Boynton (1984). 65
Tabela 17 – Resultados da análise química da amostra cabeça e do KF britado por fração referente aos ETRs (em ppm)..... 70
Tabela 18 – Resultados da análise química de C e S da amostra cabeça referente ao KF (em %). 71
Tabela 19 – Resultados obtidos através do cálculo da Norma CIPW para o KF (em %)..... 72
Tabela 20 – Distribuição do titânio, fosforo, ferro e do cério, lantânio e neodímio na fração +200# da amostra KF. 92
Tabela 21 – Distribuição do titânio, fosforo, ferro e do cério, lantânio e neodímio na fração +270# da amostra KF. 92
Tabela 22 – Distribuição do titânio, fosforo, ferro e do cério, lantânio e neodímio na fração +400# da amostra KF. 93
Tabela 23 – Análise das características do KF e seu potencial como remineralizador de solo segundo a Instrução Normativa nº 05 do MAPA. 103

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO 13
1.1. – JUSTIFICATIVA 14
1.2. – OBJETIVOS 14
1.2.1. – Objetivo geral 14
1.2.2. – Objetivos específicos 14
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 15
2.1. – Kamafugitos 15
2.1.1. – Geologia 17
2.2. – Caracterização de minérios 22
2.2.1. – Caracterização mineralógica 23
2.2.2. – Caracterização tecnológica 39
3 – METODOLOGIA 44
3.1. – Preparação da amostra 44
3.2. – Caracterização física 46
3.2.1. – Distribuição granulométrica 46
3.2.2. – Umidade e densidade real 47
3.2.3. – Work Index 47
3.2.4. – Determinação da curva de moagem 48
3.3. – Caracterização química 48
3.3.1. – Determinação de óxidos majoritários pela técnica de espectroscopia de raios X por dispersão de comprimento de onda (WD-FRX) 48
3.3.2. – Determinação de terras raras pela técnica de espectrometria de massa por plasma acoplado indutivamente (ICP-MS) 49
3.3.3. – Determinação de Carbono e/ou Enxofre Totais por Infravermelho – LECO. 49
3.4. – Caracterização mineralógica 49
3.4.1. – Norma CIPW 49
3.4.2. – Difratometria de raios X 49
3.4.3. – Microscopia óptica 50
3.4.4. – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) 50
3.4.5. – Liberação e associação mineral (MEV/AMICS) 51
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO 52
4.1. – Caracterização física 52

4.1.1. – Distribuição granulométrica 52
4.1.2. – Umidade e densidade real 55
4.1.3. – Work Index 56
4.1.4. – Determinação da curva de moagem 57
4.2. – Caracterização química 58
4.2.1. – Determinação de óxidos majoritários pela técnica de espectroscopia de raios X por dispersão de comprimento de onda (WD-FRX) 58
4.2.2. – Determinação de terras raras pela técnica de espectrometria de massa por plasma acoplado indutivamente (ICP-MS) 65
4.2.3. – Determinação de Carbono e/ou Enxofre Totais por Infravermelho – LECO. 71
4.3. – Caracterização mineralógica 72
4.3.1. – Norma CIPW 72
4.3.2. – Difração de raios X 72
4.3.3. – Microscopia óptica 75
4.3.4. – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) 83
4.3.5. – Liberação e associação mineral (MEV/AMICS) 87
4.4. – Considerações sobre o processamento do kamafugito 101
4.4.1. – Liberação dos minerais de interesse 101
4.4.2. – Operações de concentração 102
5 – CONCLUSÕES 104
6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 106
REFERÊNCIAS 107

1 – INTRODUÇÃO

O estado de Minas Gerais considera a mineração uma atividade de grande relevância pública devido aos significativos benefícios econômicos que ela traz, sendo essencial para a balança comercial do país (Araujo; Fernandes, 2016). Este setor desempenha um papel crucial na economia nacional, melhorando o bem-estar e a qualidade de vida das gerações presentes e futuras. Para que os empreendimentos minerários contribuam para o desenvolvimento de uma sociedade justa, é essencial que as atividades inerentes aos seus processos produtivos sejam conduzidas de maneira responsável e sustentável (Farias; Coelho, 2002).

O subsolo brasileiro é rico em depósitos minerais valiosos, produzindo atualmente cerca de 70 tipos de substâncias: 21 metálicas, 45 não-metálicas e quatro energéticas (Medina *et al*., 2007). Dentre os vários tipos de depósitos minerais, os kamafugitos se destacam como um conjunto raro de rochas encontradas em apenas quatro locais no mundo (Ferreira, 2021), com o Brasil concentrando suas ocorrências principalmente nos estados de Goiás e Minas Gerais.

A crescente complexidade dos minérios, tanto em termos físicos quanto químicos, tem demandado estudos de caracterização das propriedades de seus minerais constituintes antes do desenvolvimento de processos de concentração. Além disso, uma caracterização contínua ou monitoramento dos produtos em cada etapa do processo de concentração torna-se indispensável, não apenas devido às características intrínsecas dos minérios, mas também para otimizar a produção com menor custo e impacto ambiental reduzido (Salum; Peres, 2002). Aliada a essa perspectiva, o sucesso no beneficiamento de minérios é alcançado mediante o entendimento de suas propriedades físicas e químicas, o que possibilita antecipar o produto esperado em cada etapa do processo (Rocha *et al*., 2019).

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. Além disso, esse trabalho pode promover a implementação de práticas de mineração mais eficientes e sustentáveis, reduzindo os impactos ambientais e maximizando o aproveitamento dos recursos minerais disponíveis.

1.1. – JUSTIFICATIVA

As rochas alcalinas, apesar de serem uma pequena fração, representando não mais que 1% das rochas ígneas expostas na Terra, são um foco de intenso interesse para os pesquisadores. Esta atenção se deve principalmente à sua composição única e ao potencial para abrigar minerais peculiares e raros, dentre essas características destaca-se a capacidade destas rochas de concentrar elementos químicos que são considerados incompatíveis nos magmas comuns. Esses elementos incluem terras raras (ETRs), nióbio, tântalo, zircônio, e outros metais de alto valor econômico e tecnológico. Devido a isso, as rochas alcalinas são frequentemente associadas a depósitos de minerais que são essenciais para diversas aplicações industriais, desde a fabricação de supercondutores até componentes eletrônicos e catalisadores. Muitas dessas rochas desempenham um papel crucial na economia agrícola, fornecendo insumos essenciais como fósforo (P) e potássio (K). Além de seu impacto na agricultura, algumas rochas alcalinas são vitais para a indústria de alta tecnologia, graças à presença de elementos como ETRs e metais raros (Martins, 2016).

1.2. – OBJETIVOS

1.2.1. – Objetivo geral

Determinar as principais características físicas, químicas e mineralógicas de um depósito kamafugítico pertencente à Província Ígnea do Alto Paranaíba, visando o desenvolvimento de rotas para seu beneficiamento e viabilização econômica.

1.2.2. – Objetivos específicos

a) Determinar os principais parâmetros físicos do material a partir de ensaios de análise granulométrica por peneiramento, granulômetro a laser, *cyclosizer*, *work index*, curva de moagem, densidade real e umidade;
b) Identificar os constituintes químicos da amostra global utilizando técnicas analíticas diversificadas;
c) Identificar a composição mineralógica da amostra por difração de raios X;
d) Avaliar a morfologia da amostra por microscopia óptica;
e) Identificar as associações mineralógicas principais e conduzir estudos de liberação utilizando um sistema automatizado de análise de imagens;
f) Sugerir processos de concentração baseados nos minerais de maior relevância identificados.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica da presente dissertação foi dividida em dois subcapítulos. No primeiro deles foi apresentado um levantamento bibliográfico das rochas kamafugíticas e o contexto geológico o qual essas rochas são encontradas. O segundo capítulo trouxe uma extensa revisão sobre os conceitos de caracterização, perpassando por tópicos importantes da caracterização mineralógica (caracterização física, composição química, fases mineralógicas e grau de liberação) e caracterização tecnológica de minérios (principais métodos de concentração mineral e equipamentos utilizados).

2.1. – Kamafugitos

"O termo kamafugito é um acrônimo das principais rochas que compõem a série: **ka**tungito, **maf**urito e **ug**andito (Silva, 2008, p. 83)". São tipos de rochas vulcânicas caracterizadas por sua composição máfica a ultramáfica, apresentando subsaturação em SiO_2 (variando de 44,9% a 36,6%). As fases félsicas incluem feldspatóides como kalsilita e leucita, enquanto as componentes máficas são representadas por minerais como melilita, clinopiroxênio, olivina, perovskita, titanomagnetita e, ocasionalmente, flogopita (Melo, 2012).

Os katungitos são rochas cinza claras a preto-esverdeadas, afaníticas a fanerítica finas, porfiríticas ou não (Figura 1a). Os uganditos são rochas com granulação desigual, variando de fina a média (0,1 a 2,5 mm), caracterizadas por uma composição mineral semelhante à dos mafuritos, mas com uma presença significativa de leucita e, praticamente, ausência de olivina (Figura 1c) (Borges, 2013).

O mafurito é uma rocha ultrabásica composta por fenocristais de olivina e pequenas quantidades de piroxênio em uma matriz de diopsídio e kalsilita com pequenas quantidades de perovskita, olivina e biotita. É uma rocha kamafugítica considerada uma kalsilitita de olivina-piroxênio (Figura 1b) (Le Maitre, 2005).

Figura 1 – Fotografia das rochas (a) katungito (b) mafurito (c) ugandito.

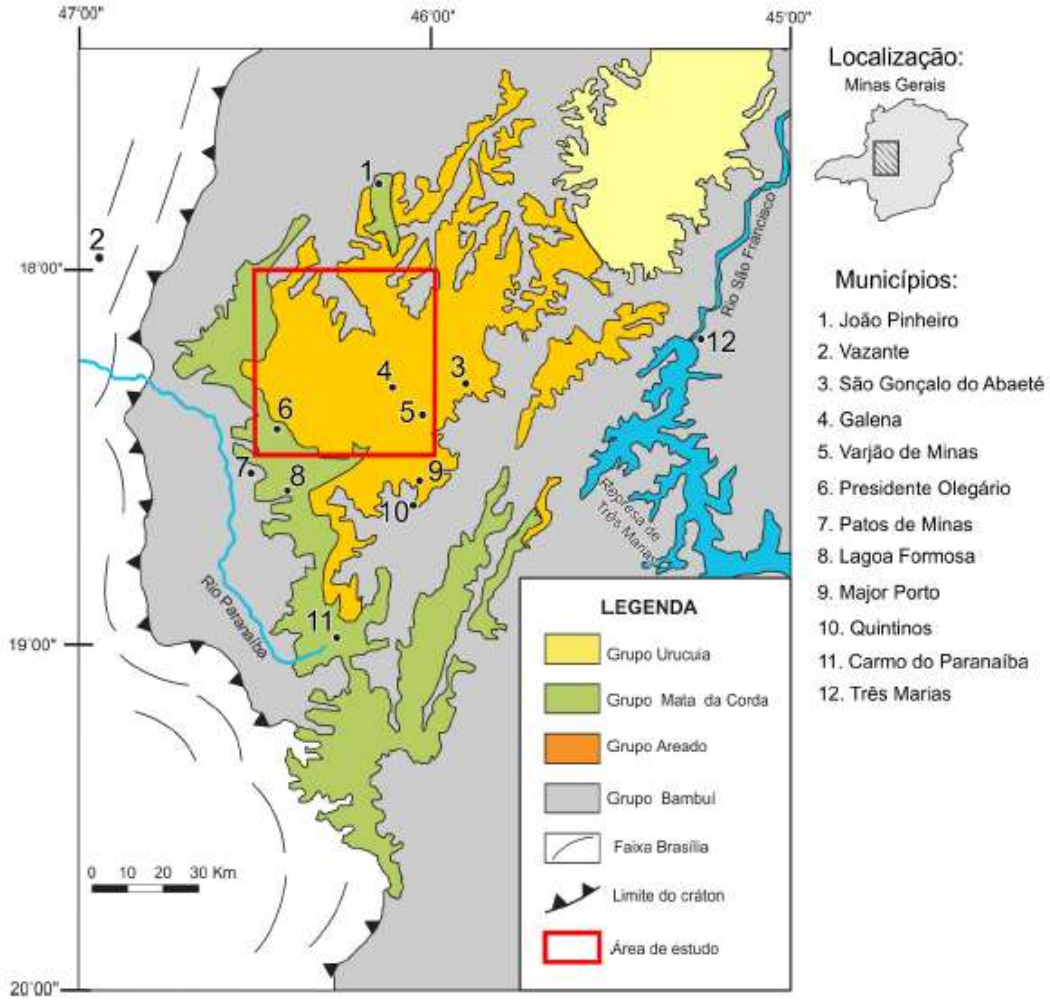
(a)
Fonte: Moura (2021, p. 120)

(b)
Fonte: Melo (2012, p. 43)

(c)
Fonte: Melo (2012, p. 42)

No mundo, esse tipo de rocha pode ser encontrado em locais como Uganda, Itália, Brasil e China (Ferreira *et al*., 2020). Os kamafugitos do Brasil são localizados na Província Ígnea do Alto Paranaíba, situada no centro-oeste de Minas Gerais, e na Província Alcalina de Goiás, localizada no sul do estado de Goiás (Figueiredo *et al*., 2018). No presente trabalho, o enfoque será dado no primeiro caso, uma vez a amostra do estudo será da região da Província Ígnea do Alto Paranaíba (Figura 2).

Figura 2 – Região da localização do estudo.



Fonte: Fragoso (2011, p. 31)

2.1.1. – Geologia

A região abrangida pela Folha Presidente Olegário está situada no Cráton do São Francisco, adjacente à sua fronteira com a Faixa Brasília (Fragoso, 2011). Nesta área, destacam-se principalmente as rochas marinhas carbonáticas e pelíticas do Neoproterozoico, pertencentes ao Grupo Bambuí. Além disso, uma porção da camada cretácea da bacia é composta por arenitos, rochas vulcânicas e vulcanoclásticas dos grupos Areado e Mata da Corda, respectivamente (Moreira, 2019).

O Quadro 1 destaca os grupos e suas respectivas formações, além das características específicas de cada um deles (Fernandes, 2019).

Quadro 1 – Grupos, formações e características litológicas.

Grupo	Formação	Características litológicas
Bambuí	Jequitaí	paraconglomerados contendo seixos de quartzitos, calcários, dolomitos, chert, gnaisses, micaxistos, granitos e rochas vulcânicas
	Sete Lagoas	rochas carbonáticas intercaladas com camadas margosas e pelíticas
	Serra de Santa Helena	Folhelhos e siltitos
	Lagoa do Jacaré	presença alternada de calcários oolíticos e pisolíticos, intercalados com camadas de siltitos e margas
	Três Marias	siltitos, arenitos e arcóseos
	Serra da Saudade	Ritmitos, carbonatos e arenitos
Areado	Abaeté	Conglomerados clasto-suportados e matriz-suportados
	Quiricó	Pelitos, folhelhos e siltitos
	Três Barras	Arenitos
Mata da Corda	Patos	Rochas máficas e ultramáficas
	Capacete	Argilitos, arenitos e conglomerados

Fonte: Adaptado de Fernandes (2019, p. 19)

a) Grupo Bambuí

O Grupo Bambuí é composto por seis formações, organizadas da base para o topo como: Jequitaí, Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Três Marias e Serra da Saudade (Figura 3) (Dardenne, 1978).

As características específicas de cada uma dessas formações foram descritas por Baptista *et al*., (2010):

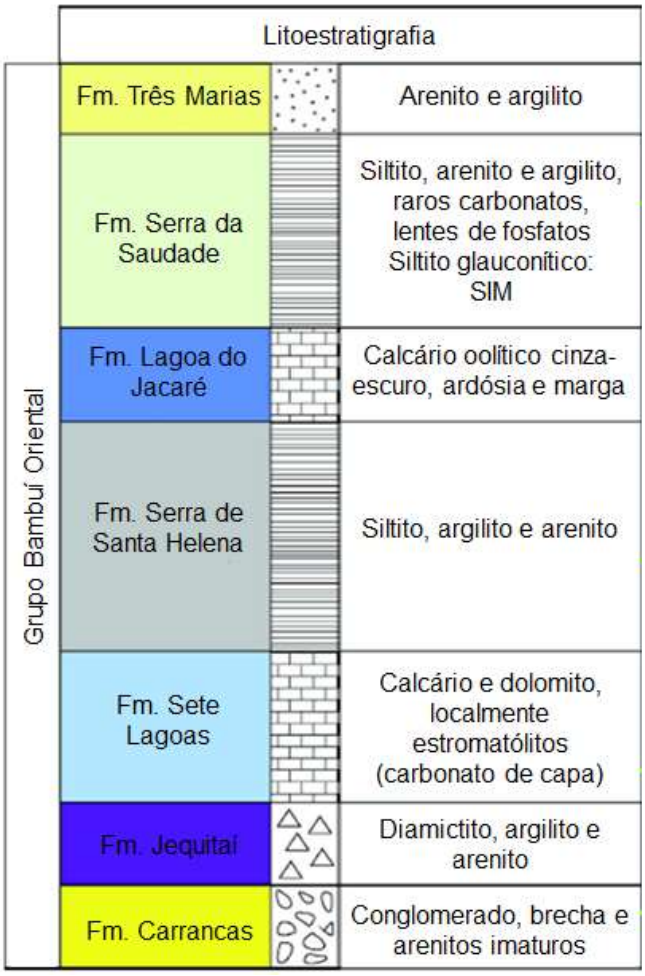
- Formação Jequitaí: inicialmente chamada Carrancas, representa a base do Grupo Bambuí. É composta por paraconglomerados contendo seixos de quartzitos, calcários, dolomitos, chert, gnaisses, micaxistos, granitos e rochas vulcânicas. Esta formação está ligada a um evento de glaciação global no Neoproterozoico, com unidades correlatas identificadas em diversas regiões e estados;
- Formação Sete Lagoas: apresenta rochas carbonáticas dispostas em lentes de diferentes tamanhos, intercaladas com camadas margosas e pelíticas. Essa

sequência contínua é observada nas regiões cratônicas de Januária, Itacarambi, Montalvânia e Serra do Ramalho, recebendo o nome de Formação Januária;

- Formação Serra de Santa Helena: é crucial para a estratigrafia do Grupo Bambuí, uma vez que consiste em folhelhos e siltitos acinzentados que atuam como divisores entre os depósitos carbonáticos das formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré;
- Formação Lagoa do Jacaré: caracteriza-se pela presença alternada de calcários oolíticos e pisolíticos de coloração cinza-escura, intercalados com camadas de siltitos e margas;
- Formação Três Marias: finaliza a sequência com a presença de siltitos, arenitos e arcóseos em tons de cinza a verde-escuros.

A Formação Serra da Saudade é caracterizada pela presença de cinco litofácies: (1) Ritmito pelito-arenoso; (2) Carbonatos retrabalhados; (3) Ritmito areno-pelítico verde (verdete); (4) Arenito fino com *hummocky*; (5) Ritmito fosfático (Lima; Uhlein; Britto, 2007).

Figura 3 – Coluna estratigráfica do grupo Bambuí.



Fonte: Adaptado de Uhlein *et al*. (2017)

b) Grupo Areado

O Grupo Areado é principalmente composto por arenitos finos a médios de coloração vermelha e bem selecionados. Essas rochas frequentemente exibem estratificações cruzadas tabulares, acanaladas e tangenciais, que podem se estender até vários metros de comprimento. Também podem ocorrer na forma de corpos ligeiramente mais argilosos, exibindo estratificações plano-paralelas (Reis, 2011).

O Grupo Areado representa a sedimentação Eocretácica da bacia e ocorre de forma contínua na Sub-Bacia Abaeté e descontínua da Sub-Bacia Urucuia. Este Grupo é subdividido em três formações: Formação Abaeté, Formação Quiricó e Formação Três Barras (Figura 4). A Formação Abaeté registra processos sedimentares em ambiente fluvial. Na parte sul da Sub-Bacia, a presença de conglomerados sustentados pela matriz, contendo clastos de metassiltitos do embasamento, sugere deposição por leques aluviais. Em outras regiões da Sub-Bacia, predominam conglomerados clasto-suportados com seixos de quartzito, indicativos de um ambiente fluvial entrelaçado de alta energia (Matta, 2019).

A Formação Quiricó é composta principalmente por sedimentos pelíticos, caracterizados por folhelhos e siltitos de tonalidades que variam entre o verde, o rosa, o ocre, o violáceo e o avermelhado. Esses sedimentos se entrelaçam entre si, exibindo uma rápida alternância de cores. Além disso, há a presença secundária de camadas de arenitos de granulometria fina, média e grossa, sendo mais comuns na porção superior da sequência sedimentar (Campos; Dardenne, 1997).

A Formação Três Barras constitui a unidade de maior expressão em área na Folha de Presidente Olegário apresentando uma espessura máxima de cerca de 150 metros e pode ser subdividida em porções inferior e superior. A porção inferior consiste em uma mistura de arenito com contribuições menores de material pelítico. Dentro das frações arenosas, há observações de estratificações plano-paralelas e cruzadas, apresentando formas tabulares, acanaladas, tangenciais e sigmoidais. Em algumas áreas, são encontradas marcas onduladas e estruturas convolutas. Os arenitos geralmente exibem uma seleção pobre, variando de fino a muito grosso, raramente apresentando conglomerados. As frações finas associadas consistem em pelitos vermelhos predominantemente maciços, ocasionalmente arenosos, com ritmito areno-pelítico e argilito, exibindo uma variedade de cores (Fragoso *et al*., 2011).

A porção superior da Formação Três Barras é predominantemente visível nas escarpas das chapadas, nas regiões leste e oeste da folha, onde se sobrepõe diretamente ao Grupo Bambuí. Este trecho é caracterizado por um espesso conjunto de arenito que exibe uma

bimodalidade distinta, resultante de alternâncias entre lâminas de areia grossa e areia média a fina. Esses arenitos mostram estratificações plano-paralelas e cruzadas, incluindo formas tabulares, acanaladas e tangenciais, todas com conjuntos métricos. Além disso, ocasionalmente, dentro do arenito, são observadas camadas raras de argilito vermelho com fissuras de contração (Fragoso *et al*., 2011).

c) Grupo Mata da Corda

As camadas deste Grupo estão situadas diretamente sobre as rochas sedimentares do Grupo Areado ou sobre os metassedimentos do Grupo Bambuí. Este conjunto é caracterizado por rochas vulcânicas alcalinas, que se manifestam em forma de depósitos piroclásticos, bem como em derrames, condutos vulcânicos e diques (Baptista, 2004). Os kamafugitos da Mata da Corda (lavas máficas alcalinas ricas em K) fazem parte da Província Ígnea do Alto Paranaíba, que também inclui intrusões de afinidade kimberlítica, rochas lamproíticas e carbonatitos (Sgarbi *et al*., 1998). Os kamafugitos da Mata da Corda são encontrados na região oeste do estado de Minas Gerais, situados sobre uma sequência sedimentar não vulcânica da Bacia do São Francisco, com idade cretácea. Este conjunto de rochas inclui mafuritos, uganditos e, em menor frequência, katungitos (Sgarbi; Gaspar; Valença, 2000).

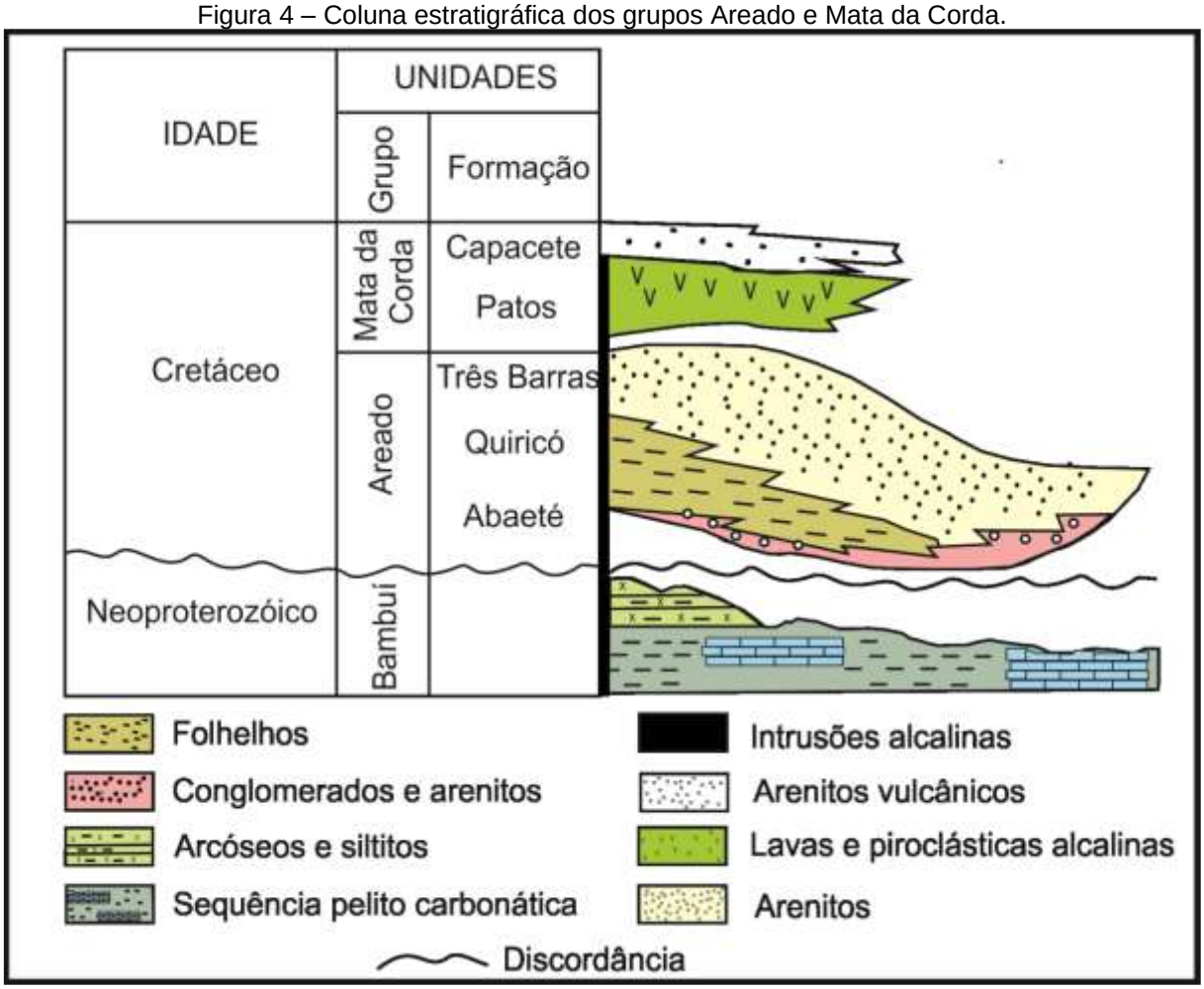
O grupo Mata da Corda foi subdividido em duas formações: (1) Formação Patos e (2) Formação Capacete (Motta; Baruqui; Santos, 2004) (Figura 4).

A Formação Patos é predominantemente constituída por rochas vulcânicas e subvulcânicas, com ocorrências menos frequentes de vulcanoclásticas, como auto-brechas (resultantes do rápido resfriamento do topo de uma lava) ou depósitos de conduto. Estas rochas compartilham características macroscópicas muito similares, tornando difícil distingui-las em campo. Uma inspeção visual revela que são de textura afanítica, geralmente porfirítica, com granulação fina, porfirítica ou não. Quando recém-expostas, exibem uma coloração cinza escuro, mas em presença significativa de leucita (pseudomorfos) aparecem pequenas áreas esbranquiçadas. Com o processo de alteração, adquirem tonalidades esverdeadas e amareladas, atravessadas por veios de material argiloso branco. Os fenocristais são gradualmente substituídos por material argiloso de cor laranja (Sgarbi *et al*., 2001).

A Formação Capacete é caracterizada pela deposição de sedimentos epiclásticos distais provenientes de atividades vulcânicas, com uma significativa presença de areias transportadas pelo vento. Composta principalmente por arenitos cineríticos, ocasionalmente conglomeráticos, apresenta cimento carbonático. Esses depósitos, em sua maioria, podem

ser interpretados como resultado da formação de leques aluviais nas encostas dos numerosos edifícios vulcânicos presentes na área (Borges, 2013).

Figura 4 – Coluna estratigráfica dos grupos Areado e Mata da Corda.



Fonte: Melo (2012, p. 15)

2.2. – Caracterização de minérios

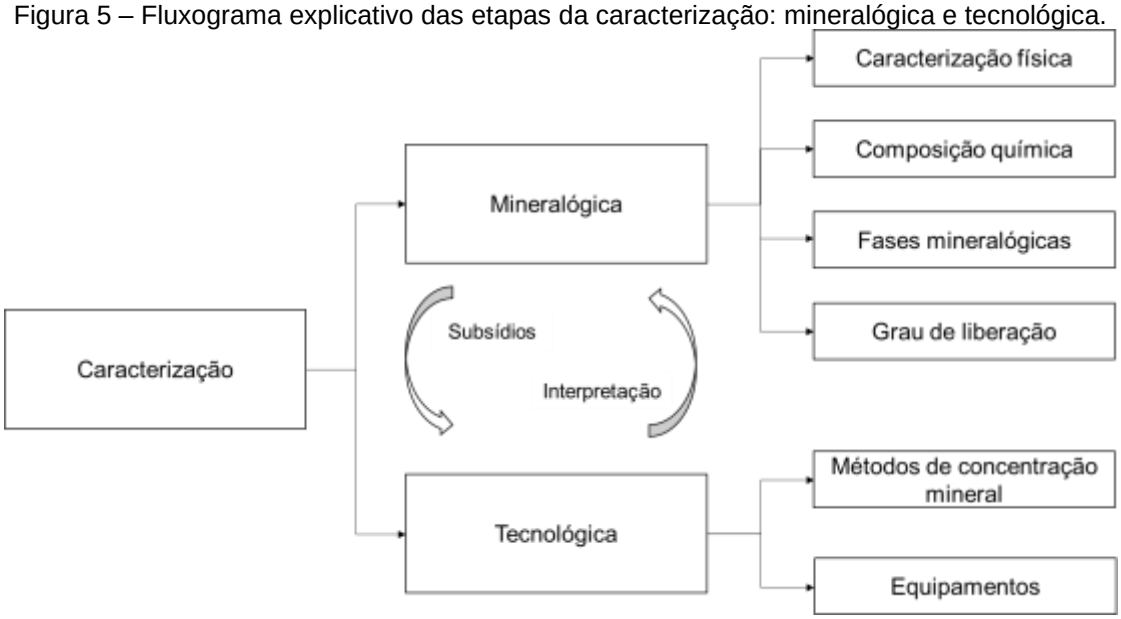
Os minérios geralmente apresentam características e peculiaridades distintas, e, por isso, os processos tecnológicos que são eficazes para um determinado minério podem não ser necessariamente eficientes para minérios semelhantes. Isso ocorre devido às variações e alterações que podem ocorrer, incluindo mudanças na composição mineralógica devido à distribuição aleatória do mineral-minério no depósito, variações na granulometria do mineral de interesse e nas proporções entre os minerais de ganga (Bertolino; Santos; Santos, 2018).

Nesse sentido, a caracterização de minérios é uma ferramenta diagnóstica essencial na área de processamento mineral, devido à sua capacidade de fornecer informações sobre o minério e seu comportamento durante os processos de concentração (Rocha, 2008). A

caracterização pode ser dividida em duas vertentes: a mineralógica e a tecnológica (Figura 5).

A caracterização mineralógica fornece a base para indicar o processamento mineral aplicável à amostra, bem como para facilitar a compreensão do comportamento dos minerais-minério em relação ao processo. Na outra ponta da caracterização, encontra-se o complemento tecnológico, ou seja, a utilização dos métodos e equipamentos para separação do minério em frações: concentrado e rejeito. É importante ressaltar que, embora as caracterizações tratem de aspectos diferentes, elas interagem entre si fornecendo os subsídios para proposição dos métodos de concentração e do encadeamento dos mesmos, assim como também são utilizadas para a interpretação dos resultados obtidos pelos processos (Santos, 2018).

Figura 5 – Fluxograma explicativo das etapas da caracterização: mineralógica e tecnológica.



Fonte: Adaptado de Santos (2018, p. 14)

Os itens subsequentes detalham cada um dos tópicos apresentados na Figura 5.

2.2.1. – Caracterização mineralógica

A análise mineralógica do minério é crucial, pois não apenas identifica e quantifica as associações minerais, mas também distingue os minerais valiosos dos minerais indesejados (ganga). Além disso, determina o tamanho de partícula necessário para a liberação eficaz dos minerais de interesse dos minerais de ganga, fornecendo dados essenciais para a definição das estratégias de processamento (Souza, 2014).

a) Caracterização física

A caracterização física desempenha um papel crucial na análise de minérios ao oferecer informações sobre sua composição e propriedades. Utilizando técnicas como granulometria, densidade e *Work Index*, é possível obter um entendimento mais profundo das características do material, permitindo a proposição de estratégias de processamento que assegurem a eficiência e a qualidade dos produtos finais.

Análise granulométrica

A análise granulométrica de partículas sólidas abrange a determinação do tamanho das mesmas, além da quantidade de vezes em que ocorrem em uma determinada classe ou faixa de tamanho. No processamento mineral, é utilizada na determinação do grau de liberação dos minerais-minério comparado aos minerais de ganga nas diversas faixas de tamanho, para a determinação de eficiência de peneiramento industrial e das curvas de partição de classificadores, além do controle das especificações de tamanho do produto final (Lima; Luz, 2001).

Há diversas metodologias empregadas na determinação do tamanho de partículas e na distribuição granulométrica (destinadas à faixa de tamanhos específicos) (Campos; Oliveira, 2018). A Tabela 1 apresenta os principais métodos de análise granulométrica e suas respectivas faixas de aplicação (Brandão *et al.,* 2012).

Tabela 1 – Principais métodos utilizados para análise granulométrica

Método	Faixa de aplicação (µm)
Difração a *laser*	0,1 – 2.000
Centrifugação	40 – 5
Peneiramento	100.000 – 37

Fonte: Adaptado de Brandão *et al*., (2012, p. 49)

A difração a *laser* consiste numa técnica em que mede os ângulos de difração do raio *laser*, que são relacionados ao diâmetro da partícula. Nessa metodologia, as partículas grossas espalham o raio a menores ângulos e vice-versa. É utilizado o *laser* (fonte de luz de comprimento de onda fixo) e detectores para espalhamento da luz, que emitem mensagens para um computador que calcula e fornece os resultados (França; Couto, 2007).

A centrifugação é um processo de dimensionamento de partículas por meio de uma corrente ascendente de fluido, geralmente água ou ar. O processo é o inverso da sedimentação por gravidade (Wills; Finch, 2015). O cicloclassificador (*cyclosizer*), equipamento que utiliza esse princípio, é constituído por cinco ciclones pequenos em série para separar o material inferior a 38 micrômetros (Santos, 2018). Uma alíquota entre 10 e 20

gramas de material é empolpada e alimentada cuidadosamente através do conjunto de ciclones a partir de um recipiente, sendo que o produto de cada *vortex finder* corresponde à alimentação do ciclone seguinte. As dimensões limites de separação para o cicloclassificador, nos ciclones de 1 a 5, são: 44, 33, 23, 15 e 11 µm, respectivamente (Gonzaga *et al*., 2021).

Uma das técnicas mais utilizadas para a realização da análise granulométrica é o peneiramento, realizado através de peneiradores vibratórios (de bancada ou suspensos), empregando dispositivos de vibração através de uma frequência controlada (Birro, 2017). Esse tipo de análise pode ser apresentado através de tabelas ou gráficos de quantidade (passante ou retida na peneira) versus tamanho da partícula (Santos, 2018). Os principais modelos de distribuição que descrevem satisfatoriamente a maioria dos sistemas particulados são os de Gates-Gaudin-Shumann (GGS), Rosin-Rammler-Bennet (RRB), Sigmoide e Log-normal. Para a determinação do melhor modelo e dos parâmetros de cada um deles, pode ser utilizada, em alguns casos, a linearização das equações com posterior ajuste linear ou o ajuste de curva utilizando o método dos mínimos quadrados (Coelho, 2017).

Além disso, no peneiramento laboratorial, a massa de material a ser ensaiada, o tempo de peneiramento e a maneira na qual o teste será conduzido devem ser levadas em consideração (Sales, 2020). A massa a ser utilizada vai depender do tipo de amostra, do teor do mineral-minério e da granulometria. Para os materiais grossos são utilizadas amostras de 10,0 kg ou mais e nos casos dos minérios finamente moídos, a quantidade de amostra utilizada varia entre 200 a 600 g (Sampaio; Silva, 2007b). A quantidade máxima de material retida em cada peneira foi proposta por Gaudin e está expressa na Equação (1) (Santos, 2018):

$$\frac{m_{máx} = n\ \times (d_i + d_s) \times A \times \rho}{2} \qquad (1)$$

Onde: $m_{máx}$ = massa de material que pode ficar retida em uma peneira finalizado o peneiramento (em gramas); d_i = abertura da peneira em análise (em cm); d_s = abertura da peneira imediatamente superior (em cm); A = área da peneira (em cm²); ρ = Massa específica do minério (em g/cm³); n = número de camadas de partículas (1 a 3).

O tempo de peneiramento depende da natureza e granulometria do minério, precisão e finalidade do ensaio. A granulometria do material e o tempo de peneiramento são grandezas inversamente proporcionais (Sampaio; Silva, 2007b). Na prática, o tempo de peneiramento geralmente é de 10 minutos para aberturas maiores e até 30 minutos para aberturas menores (Costa, 2015).

O peneiramento pode ser realizado a seco, a úmido ou de forma combinada. O procedimento a seco é realizado com o material *in natura*, enquanto no procedimento a úmido, o material recebe água ou é alimentado na forma de polpa (Iizuka, 2006). Na metodologia a seco, o material disposto sobre a tela da peneira entra em contato com a abertura da mesma por diversas vezes, de forma que cada partícula busca uma fenda disponível para passar. É um procedimento indicado para materiais com maior granulometria (Sampaio; Silva, 2007b). O peneiramento a úmido é promissor para materiais em forma de suspensão ou que tendem a se agregar (Wedd; Ward-Smith; Rawle, 2019).

Umidade

O teor de umidade pode ser expresso tanto em base úmida quanto em base seca. A umidade base úmida é a relação entre a massa de água e a massa total do material (Möhler, 2010). A umidade base seca é a relação entre a quantidade de água presente no sólido e a massa de sólidos (seca), conceito referência no Tratamento de Minérios (Chaves *et al.*, 2012).

A umidade base úmida ($U_{bu(\%)}$) é determinada pela Equação (2) (Oliveira; Souza, 2012):

$$U_{bu\ (\%)} = \left(\frac{m_u - m_s}{m_u}\right) \times 100 \qquad (2)$$

Onde:

m_u é a massa da amostra úmida (em gramas);

m_s é a massa da amostra seca (em gramas).

A umidade base seca ($U_{bs(\%)}$) é determinada pela Equação (3) (Bergerman, 2020):

$$U_{bs\ (\%)} = \left(\frac{m_u - m_s}{m_s}\right) \times 100 \qquad (3)$$

Onde:

m_u é a massa da amostra úmida (em gramas);

m_s é a massa da amostra seca (em gramas).

Densidade

A densidade pode ser real ou aparente e são definidas como a relação entre a massa de um material (como uma amostra de minério, por exemplo) e seu volume. A diferença entre essas duas propriedades está no fato de que a densidade aparente leva em conta não apenas o volume das partículas individuais, mas também o volume total ocupado pelo conjunto de partículas, incluindo os espaços vazios entre elas. Esses vazios são formados pela acomodação natural das partículas em um determinado espaço, como um recipiente, uma pilha ou silos (Sales, 2020).

Essa propriedade é uma característica utilizada para ajudar na sua identificação e também na concentração de minerais através de processos gravíticos. Nesses processos, a diferença de densidade entre os minerais é o fator principal, embora a forma e o tamanho das partículas também sejam importantes. A densidade real ou relativa de um minério é utilizada para determinar a densidade das polpas desses minérios. Por outro lado, a densidade aparente é empregada para calcular o volume de minério ou de produtos resultantes de processos (como alimentação, rejeitos e concentrados) que serão armazenados em silos, transportados por vagões de trem ou caminhões (Sampaio; Silva, 2007a).

Uma das formas de medir a densidade real ou relativa é através da picnometria (Gonçalves, 2021), utilizando picnômetros ou gás hélio. O hélio é comumente usado como gás de análise devido às suas características de leveza, inércia e por ser monoatômico. Sua baixa massa permite que os átomos de hélio tenham uma velocidade quadrática média maior em comparação com átomos de gases mais pesados sob as mesmas condições. Essa alta velocidade proporciona ao hélio um elevado poder de difusão, possibilitando que ele penetre em poros e microestruturas que outros gases não conseguiriam acessar (Oliveira Júnior *et al*., 2010).

A determinação da densidade aparente em base seca envolve medir o volume de uma amostra de minério e, em seguida, pesá-la. Em laboratórios e unidades piloto, essa medição de volume pode ser feita utilizando uma proveta, balde graduado ou outros recipientes graduados. Para essas medições, é essencial uma balança precisa para pesar a amostra, embora nem sempre esteja disponível no campo, assim como os equipamentos necessários para medir os volumes das amostras (Sampaio; Silva, 2007a).

Ensaios de *Work Index* (WI)

O índice de trabalho (WI) representa a quantidade total de energia, em kWh por tonelada curta (907 kg), necessária para reduzir o minério de um tamanho inicial indefinido até o ponto em que 80% dele passe por uma peneira de 100 µm (Figueira; Almeida; Luz, 2004). O WI corresponde à resistência do minério à moagem e, com esse parâmetro, torna-se possível calcular a energia (kWh/t) necessária para moer o minério a uma determinada granulometria (São José *et al*., 2014).

A teoria de Bond afirma que a energia específica necessária (W) pode ser calculada através da Equação (4), que é a expressão matemática da lei de Bond (Menéndez-Aguado; Dzioba; Coello-Valazquez, 2005; Sampaio; Delboni Júnior, 2018):

$$W = 10 \times W_i \times \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \qquad (4)$$

Onde:

W é a energia específica necessária para moer o minério (KWh/t);

W_i é o índice de trabalho de Bond (originalmente expresso em kWh/t);

P_{80} e F_{80} são os tamanhos de malha com passagem de 80% (expressos em µm) no produto e na alimentação, respectivamente.

b) Composição química

É crucial conhecer a composição química de um minério. Entretanto, determinar quais elementos devem ser analisados em uma caracterização mineralógica depende da complexidade mineral e química do minério em questão, bem como dos objetivos de sua utilização. Além das técnicas clássicas de análise química, como gravimetria, volumetria e colorimetria, as técnicas instrumentais mais amplamente utilizadas incluem fluorescência de raios X (FRX), espectrometrias de emissão (óptica e de massa) com plasma acoplado indutivamente (ICP) (Reis, 2005) e análise de carbono e enxofre no infravermelho sendo essas quatro últimas abordadas nos tópicos subsequentes.

O Quadro 2 apresenta um resumo dos principais métodos de caracterização química de minérios.

Quadro 2 – Resumo dos principais métodos de caracterização química de minérios.

Técnica	Abertura	Meio de análise	Propriedade analisada
FRX	Não	Sólido prensado em pastilhas	Emissão de raios X específicos do elemento
ICP	Sim (ácida, fusão+ácida)	Solução da dissolução do minério	Emissão de energia pelos átomos a altas temperaturas
Carbono e Enxofre	Não	Sólido	Detecta carbono e enxofre através de detetores de infravermelho não-dispersivo

Fonte: Adaptado de Santos (2018, p. 180)

Fluorescência de raios X

A fluorescência de raios X permite determinar a composição química e detectar metais em baixas concentrações (poluentes). Comparada às técnicas de absorção atômica e emissão com fonte de plasma, apresenta alta precisão, sensibilidade e exatidão. Os procedimentos de preparação de amostras são simples e não requerem tratamentos químicos prévios. Provavelmente, é a técnica analítica instrumental mais versátil, capaz de lidar com uma ampla variedade de formas, tamanhos e estados físicos das amostras. Devido a essa versatilidade, a fluorescência de raios X é muito utilizada para a análise de materiais particulados e sólidos em suspensão (Scapin, 2003).

Além disso, é uma técnica analítica não destrutiva, cuja metodologia se baseia na produção e detecção de raios X característicos emitidos pelos elementos da amostra quando expostos a elétrons, íons, Raios X ou raios gama com energias apropriadas. Atualmente, existem três variantes analíticas da FRX: (i) a dispersão por comprimento de onda (WD-FRX); (ii) a análise por dispersão de energia (ED-FRX); e (iii) a reflexão total (T-FRX), representa um avanço da ED-FRX (Araújo, 2018).

A técnica de WD-FRX é utilizada para a determinação qualitativa e quantitativa dos elementos principais, secundários e traços constituintes em diversos tipos de materiais. As vantagens dessa técnica incluem análises químicas multielementares, alta sensibilidade, metodologias rápidas e não destrutivas (Scapin, 2003).

Para análises químicas em que os limites de detecção, precisão e exatidão não precisam ser tão rigorosos, ou quando o custo inicial é um fator decisivo, o EDXRF pode oferecer a melhor relação custo/benefício (Santos *et al*., 2013). Além disso, nesta técnica há baixa necessidade de vidrarias, a geração de resíduos é mínima ou inexistente, tornando-a ideal para análises de rotina (Pataca; Bortoleto; Bueno, 2005).

A análise de fluorescência de raios X por reflexão total (TXRF) e a EDXRF compartilham os mesmos fundamentos. A principal diferença entre elas reside no ângulo de incidência dos raios X em relação à superfície da amostra. Quando um feixe de radiação atinge uma superfície plana de um material, pode ocorrer refração ou reflexão. A ocorrência de um desses processos depende da energia da radiação incidente, da densidade eletrônica do material e do ângulo de incidência da radiação. Essa técnica permite a análise de elementos traços em amostras sólidas e líquidas, e, devido à menor distância entre a amostra e o detector, oferece maior eficiência na detecção dos raios X. As principais diferenças entre EDXRF e TXRF estão na geometria (ângulo crítico) e na espessura da amostra analisada (Asfora, 2010).

Analisador de carbono e enxofre no infravermelho (LECO)

O analisador de carbono e enxofre que utiliza a tecnologia de infravermelho opera através da detecção da energia absorvida por uma amostra em determinados comprimentos de onda dentro do espectro infravermelho. A intensidade dessa absorção é diretamente relacionada à quantidade de carbono e enxofre presentes na amostra. Este tipo de equipamento é empregado para quantificar com precisão os teores de carbono e enxofre, utilizando feixes de luz infravermelha para determinar a absorção energética, o que facilita o cálculo das concentrações desses elementos. Entre as principais vantagens do analisador por infravermelho estão a sua alta precisão, custo acessível e simplicidade operacional. Além disso, ele é capaz de avaliar concentrações de carbono e enxofre em uma vasta gama de materiais, como metais, cerâmicas e polímeros (Acil Weber, 2024).

Espectrometrias de emissão (óptica e de massa) com plasma acoplado indutivamente

A espectrometria de massa atômica (ICP-MS) se baseia na detecção, identificação e quantificação de íons atômicos dos elementos. Essa técnica destaca-se por sua capacidade de realizar análises multielementares de forma rápida e simples, tanto na caracterização química dos elementos em amostras quanto na determinação quantitativa de sua composição. Com limites de detecção frequentemente inferiores aos dos equipamentos de absorção atômica, é possível analisar amostras com concentrações na ordem de 0,1 ppb (partes por bilhão) (Santos, 2018).

Na espectrometria de emissão óptica (ICP-OES), uma fonte de alta energia é empregada para transformar as espécies de interesse presentes na amostra em átomos e íons que passam por transições eletrônicas. Isso resulta na geração de um espectro de emissão composto por fótons de luz com frequências específicas e, consequentemente, diferentes energias. Esse feixe de radiação é então direcionado para um policromador, onde

ocorre a separação dos comprimentos de onda discretos. Estes são focalizados no plano focal e quantificados por um sistema de detecção (Krug *et al*., 2001).

Dentre as vantagens do ICP-OES para análise elementar estão: (i) pode ser usado para medir quase todos os elementos da tabela periódica (Quadro 3) com limites de detecção na faixa de microgramas por litro a miligramas por litro, (ii) a técnica possui uma ampla faixa dinâmica de concentração, e (iii) é capaz de realizar análise quantitativa multielementar em um período de um minuto. Portanto, podemos concluir que XRF e ICP-OES são bastante complementares, com a análise por XRF sendo mais rápida e menos trabalhosa para compostos majoritários e minoritários, enquanto o ICP-OES é extremamente sensível e, portanto, altamente apropriado para análise de elementos traço (De La Guardia; Armenta, 2011).

O Quadro 3 apresenta a lista de elementos que podem ser detectados por ICP-OES.

Quadro 3 – Elementos que podem ser detectados por ICP-OES.

Metais alcalinos e metais alcalinos terrosos	Terras raras (ETRs)	Metais de transição	Outros
Li, Na, K, Rb, Cs, Be, Mg, Ca, Sr, Ba	Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Th, U	Sc, V, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Y, Nb, Zr, Mo, Ru, Th, Pd, Ag, Cd, La, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg	B, C, N, Al, Si, P, S, Cl, Ga, Ge, As, Se, Br, In, Sn, Sb, Te, I, Tl, Pb, Bi

Fonte: Huo *et al*. (2016, p. 18)

c) Fases mineralógicas

Para a caracterização das fases mineralógicas, é comum trabalhar em uma escala microscópica, embora observações em uma escala mesoscópica (usando amostras de mão) sejam muito úteis para identificar a maioria dos minerais importantes. Os métodos mais utilizados para identificação dos minerais nessa escala incluem microscopias ópticas (lupa, microscópio estereoscópico, microscópio petrográfico de luz transmitida e de luz refletida) e eletrônica, além da difração de raios X (Neumann; Schneider; Alcover Neto, 2010).

Além das técnicas já mencionadas, o método proposto por Cross, Iddings, Pirsson e Washington (CIPW) consiste em determinar um conjunto de minerais normativos a partir da composição química total de uma rocha (Buckle *et al*., 2023).

No presente trabalho, o enfoque foi dado apenas nas técnicas empregadas no estudo, a saber: norma CIPW, difração de raios X, microscopia óptica e microscopia eletrônica.

Norma CIPW

A composição Modal de uma rocha ígnea refere-se aos minerais efetivamente presentes na rocha, representando sua mineralogia real. Já a composição Normativa, ou Norma, relaciona-se a uma mineralogia teórica, obtida através de cálculos baseados em sua composição química (Lopes, 2012). Consiste de uma estimativa das fases minerais ideais de uma rocha formadas a partir da cristalização de magmas (Silva, 2018). Essa metodologia é uma ferramenta essencial para a análise de rochas ígneas, especialmente aquelas com granulação fina a muito fina (Almeida, 2006).

Difração de raios X

A difração de raios X é uma técnica amplamente utilizada em diversos campos do conhecimento devido à sua versatilidade. Uma das aplicações mais comuns é a identificação de fases cristalinas por meio da comparação com bancos de dados (Shimizu, 2012). As substâncias amorfas já não podem ser caracterizadas ou, em casos especiais, o são com grande dificuldade (Ortiz, 2014).

Existem duas técnicas de difração de raios X: o método do pó e o método monocristalino, sendo o primeiro deles o mais comumente aplicado (Santos, 2002). O método de difração de pó é amplamente utilizado para a identificação mineral. Nesse método, a amostra analisada deve ser homogênea e seguir pré-requisitos específicos, como orientação aleatória e um número mínimo de cristalitos. Além disso, ela deve ser pulverizada até se tornar um pó fino, porém sem redução excessiva da granulometria para evitar a diminuição da sua cristalinidade (Carvalho, 2017).

Os dados obtidos de cada pico difratométrico incluem a intensidade, a posição angular ou distância interplanar e o perfil. Cada composto cristalino exibe um padrão difratométrico específico, o que possibilita sua identificação por meio das posições angulares e das intensidades relativas dos picos difratados (Gobbo, 2009). O processo de interpretação dos padrões de difração obtidos envolve a comparação desses padrões com um banco de dados contendo informações sobre os padrões de difração de minerais puros. O banco de dados mais amplamente utilizado é o do *International Center for Diffraction Data* (ICDD), que reúne e organiza essas informações. Geralmente, essa comparação é realizada com o auxílio de *softwares* especializados, já que o processo pode se tornar bastante complexo, especialmente em casos com múltiplas fases presentes ou com uma grande diversidade de fases. O uso de *softwares* facilita a identificação precisa das fases presentes nos materiais analisados (Ribeiro, 2016).

Considerando que a intensidade relativa de conjuntos de picos distintos que representam as fases minerais está correlacionada com a proporção dessas fases em uma amostra, diversos métodos quantitativos de análise de fases foram desenvolvidos por meio da difração de raios X. Entre esses métodos, têm-se o método de adição, o método do padrão interno, curvas de calibração e o método de Rietveld (Antoniassi, 2010), sendo esse último utilizado no presente trabalho.

A análise quantitativa de fases usando o método de Rietveld oferece vantagens distintas em comparação com abordagens tradicionais. Por um lado, todas as reflexões do perfil são explicitamente consideradas, independentemente de possíveis sobreposições. Além disso, a caracterização da radiação de fundo é mais precisa, pois uma função contínua é ajustada para todo o perfil. Ademais, é possível refinar os efeitos de orientação preferencial e perfil de pico para todas as fases presentes na amostra (Mota, 2008).

Microscopia óptica

Para a caracterização mineralógica dos minérios/rochas, a microscopia óptica é uma ferramenta importante. Os minerais são identificados basicamente pelas suas propriedades ópticas. Essas propriedades diferem de mineral para mineral porque sua estrutura cristalina é diferente, além dos constituintes químicos do mineral. Entretanto, devido à alta quantidade de minerais existentes, às vezes fica difícil identificar todos eles usando apenas o microscópio óptico, porque há casos em que as propriedades ópticas de um mineral se assemelham muito a outro (Das *et al*., 2008).

As microscopias óptica de luz transmitida (MOLT), usadas para minerais transparentes, e de luz refletida (MOLR), para minerais opacos, são provavelmente os métodos de identificação de minerais mais tradicionais. Ambos se baseiam na interação da luz, geralmente na forma de luz branca do espectro visível, com os minerais, sendo altamente precisos e flexíveis para análises qualitativas (Neumann; Schneider; Alcover Neto, 2010). Na MOLR, propriedades como brilho, cor, traço e luminescência, que estão associadas à interação da luz com os minerais, são empregadas como critérios de identificação mineralógica (Gonçalves; Peres, 2015).

A identificação dos minerais requer uma preparação adequada da amostra que, normalmente, envolve dois métodos distintos (Ortiz, 2014):

i. Lâminas delgadas: neste método, a amostra é preparada e fixada em uma lâmina de vidro, sendo então desbastada até atingir uma espessura de aproximadamente 30μm. Isso permite que as características diagnósticas dos minerais sejam observadas por meio da

transmissão da luz. Essa técnica é utilizada principalmente para analisar minerais translúcidos ou transparentes, como silicatos, carbonatos e outros.

ii. Seções polidas: nesse procedimento, a amostra é embutida em resina e, após uma série de etapas de polimento com abrasivos de diferentes granulometrias, resulta em uma superfície plana e polida. A luz incide sobre essa superfície e é refletida para a ocular do microscópio. O diagnóstico dos minerais é realizado com base nas características da luz refletida, como intensidade e cor. Esse método é aplicado principalmente a minerais opacos ou não translúcidos à luz, como os metálicos em geral.

Na microscopia óptica, a quantificação da assembleia mineralógica é realizada estimando-se em percentual a área ocupada por cada mineral identificado no campo visual em análise, utilizando métodos como contagem por ponto, linha e áreas. O campo visual geralmente possui referências que auxiliam na quantificação, mas a interpretação das análises requer uma sólida experiência por parte do mineralogista (Gonçalves, 2015).

Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica fundamental e pioneira para a determinação química de superfícies em diversos tipos de materiais (mapeamento), além de permitir a análise morfológica de superfícies de materiais sólidos e particulados (Silva, 2002). Essa técnica possibilita obter uma imagem ampliada e tridimensional da amostra através da interação de um feixe de elétrons com o material, alcançando ampliações de até 300.000 vezes e resoluções de até 1 nm (Ribeiro, 2016). Ao incidir sobre a amostra, o feixe de elétrons excita um volume específico do material, gerando a emissão de raios X característicos e diversos tipos de elétrons (retroespalhados e secundários). Esses sinais podem ser captados por detectores estrategicamente posicionados dentro da câmara de amostras (Antoniassi, 2010).

Os elétrons retroespalhados têm origem no feixe primário que incide sobre a amostra. Esses elétrons penetram na amostra e muitos deles são desviados elasticamente pelos átomos, sendo então emitidos de volta ao vácuo no interior do MEV. Parte desses elétrons é captada por detectores de estado sólido, que são utilizados para criar uma das imagens do MEV, conhecida como imagem de elétrons retroespalhados (IER) ou *backscattered electrons* (BSE). Esse tipo de imagem é muito útil nas observações no MEV devido aos três tipos de contrastes que oferece entre as fases observadas: 1) contraste de densidade ou massa específica, onde as fases mais densas aparecem mais claras e as menos densas mais escuras; 2) contraste de relevo ou topográfico, onde as áreas elevadas aparecem mais claras

e os vales mais escuros; 3) contraste de número atômico ou composicional, onde as fases ricas em elementos com números atômicos maiores aparecem mais claras e as fases com elementos de números atômicos menores parecem mais escuras (Brandão *et al*., 2012).

Os elétrons secundários são partículas de baixa energia que se originam quando o feixe de elétrons (feixe incidente) interage com a amostra. Esses elétrons secundários fornecem dados topográficos sobre a superfície, resultando em imagens detalhadas com uma profundidade de campo excelente (Oliveira, 2023).

Quando o MEV está equipado com espectroscopia de energia dispersiva (EDS), é possível determinar a composição elementar, qualitativa e semi-quantitativa das amostras a partir do espectro de energia de raios X característicos emitidos pela interação entre o feixe de elétrons e a matéria sólida (Ramos, 2021). Esse processo pode ser complementado pelo conhecimento prévio da amostra, como dados obtidos por microscopia óptica e/ou difração de raios X, facilitando significativamente a identificação da mineralogia da amostra (Neumann; Schneider; Alcover Neto, 2010).

Grau de liberação

A liberação pode ser entendida como a condição em que as espécies minerais presentes em um determinado minério estão separadas umas das outras. Nesse contexto, partículas monominerais são consideradas livres, enquanto partículas poliminerais, compostas por mais de uma espécie mineral, são classificadas como mistas (Ferreira, 2013).

O grau de liberação pode ser definido como o percentual de determinada espécie mineral que ocorre como partículas livres em relação ao total de partículas, mistas e livres. A Equação (5) apresenta a fórmula utilizada para determinar o grau de liberação das amostras (Gaudin, 1939).

$$GL = \left(\frac{\sum P_l}{\sum P_l + \sum P_m} \right) \times 100 \qquad (5)$$

Onde:

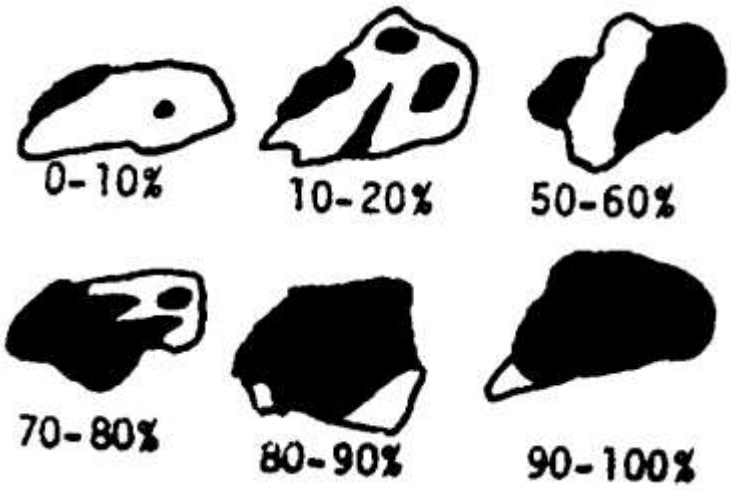
GL corresponde ao grau de liberação (%);

P_l é o número de partículas consideradas livres;

P_m é o número de partículas classificadas como mistas.

Uma análise em seção polida através de microscópio óptico já é o suficiente para avaliar se a maioria das partículas minerais está livre ou mista (Petruk, 2000). A Figura 6 ilustra a distribuição percentual dos minerais de interesse presentes nas partículas em seis cenários distintos.

Figura 6 – Percentual do mineral de interesse na partícula em seis cenários distintos.



Fonte: Petruk (2000, p. 13)

A liberação do mineral é considerada um dos principais requisitos tanto para a mineralogia aplicada como para a caracterização de minérios. A caracterização requer uma análise mais detalhada e minuciosa do grau de liberação, pois as informações são utilizadas para cálculos de dimensionamento de equipamentos e definição de rotas de processo, onde erros de engenharia não são toleráveis devido ao alto investimento de capital envolvido. Por outro lado, a mineralogia de processo se aplica a concentradores já em operação, fornecendo dados essenciais para que a equipe operacional e os engenheiros de processo possam tomar decisões visando aumentar a recuperação metálica, aumentar a produção e garantir que as metas de qualidade do concentrado sejam atingidas (Mantilla, 2013).

O grau de liberação é um fator que afeta diretamente a viabilidade técnica e econômica do aproveitamento de um bem mineral, pois está relacionado à granulometria. Os grãos apresentam diferentes graus de liberação em diversas faixas granulométricas, as quais dependem dos processos de cominuição. Essa etapa exige alta demanda de energia, resultando em custos elevados (Luz, 2018). Nesse cenário, a cominuição visa principalmente separar fisicamente os minerais valiosos dos minerais de ganga. Para aumentar a eficiência do processo de cominuição, é preferível que a liberação dos minerais ocorra em partículas de tamanho mais grosso possível (França, 2019). Essa última premissa está relacionada às dificuldades de se concentrar e recuperar partículas mais finas (Ferreira; Lima, 2016).

Há diversos métodos para determinar o grau de liberação. Entre os mais comuns estão o método de Gaudin e a separação em meio denso. Além disso, a análise de imagens tem se tornado cada vez mais popular graças aos avanços na rapidez e precisão das análises de dados (Braga, 2018).

Método de Gaudin

A avaliação do grau de liberação através da contagem sistemática das partículas minerais ao microscópio envolve a análise de uma quantidade específica de partículas de cada faixa granulométrica estreita do material fragmentado. Nesse processo, as partículas são identificadas individualmente, registrando-se o número de partículas livres de uma determinada espécie e avaliando a quantidade de partículas mistas. Embora esse método permita uma análise detalhada das partículas mistas, o que é essencial para prever seu comportamento durante o processo, é bastante trabalhoso devido à necessidade de contar um grande volume de partículas (Ferreira, 2013).

Este método pode ser aplicado a diferentes minerais, desde que o mineral a ser analisado possua uma distinção visual clara em relação aos outros minerais. No entanto, uma das principais desvantagens do método de Gaudin é a sua alta dependência do operador, pois resultados mais precisos são alcançados através de uma prática e interpretação adequadas por parte do mesmo (Braga *et al*., 2019).

Líquido denso

Medir o espectro de liberação é um desafio, caso contrário, essa prática seria comum em todas as plantas de processamento de minérios. Existem métodos diretos e indiretos para determinar o grau de liberação. Uma das técnicas tradicionalmente adotadas, devido à sua simplicidade, é o fracionamento em líquidos densos. Contudo, essa abordagem não é eficaz para minérios onde as fases de interesse e a ganga têm densidades muito próximas (Barbosa *et al*., 2014).

Análises de imagens

Nos dias atuais, a determinação do grau de liberação é conduzida por meio de equipamentos de última geração, os quais têm a capacidade de realizar essa avaliação a partir de fotomicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (Santos, 2018). Os sistemas automatizados de análise de imagens integrados ao microscópio eletrônico de varredura, como *TESCAN Integrated Mineral Analyzer* (TIMA), *Mineral Liberation Analyzer* (MLA) e *Qualitative Evaluation Minerals by Scanning Microscope* (QEMSCAN®), são na

verdade ferramentas para a aplicação da técnica quantitativa de mineralogia eletrônica (Pires *et al*., 2019).

O TIMA possui capacidades específicas para aplicações geológicas devido à sua integração especializada de *hardware* e *software* e ao seu alto nível de automação. A velocidade, automação e operação autônoma permitem ao pesquisador coletar dados detalhados que não foram possíveis de obter através da operação humana interativa de um sistema MEV/ED-FRX. Além dos detectores de elétrons retroespalhados (BSD), elétrons secundários (SE) e EDS, o sistema TIMA também pode ser acompanhado por detector de catodoluminescência (CL) para aquisição simultânea de dados CL durante as medições. Um sistema integrado de espectroscopia Raman também está disponível como opção (Hrstka *et al*., 2018).

O sistema QEMSCAN® oferece uma ampla gama de análises que possibilitam a avaliação da composição mineralógica ou a identificação de minerais de interesse. Dentre os modelos de análises disponíveis, destacam-se (Gonçalves, 2015):

a) *Bulk Mineral Analysis* (BMA): é conhecido por sua rapidez na medição, sendo perfeito para obter a quantificação mineralógica das fases. Também oferece uma estimativa do tamanho dos cristais e partículas, assim como dados granulométricos. No entanto, não gera mapas de partículas, o que significa que não possibilita análises de liberação.

b) *Particle Mineral Analysis* (PMA): esse método de análise produz mapas detalhados de partículas. Esses mapas são extremamente úteis para fornecer informações sobre liberação, características texturais, quantificação mineralógica e granulometria.

c) *Specific Mineral Search* (SMS) e *Trace Mineral Search* (TMS): esses métodos focalizam apenas em partículas que contêm os minerais de interesse, não analisando toda a amostra. A TMS pressupõe que a partícula contém uma proporção menor do mineral de interesse (geralmente utilizado para rejeitos), enquanto a SMS é empregada quando a concentração da fase de interesse é maior (apesar de ser uma análise mais demorada em comparação com o método TMS).

d) FieldImage: permite obter informações sobre textura.

O MLA oferece uma vantagem significativa em termos estatísticos, pois permite a análise de milhares de partículas. No entanto, sua principal dificuldade reside em distinguir entre fases minerais com números atômicos médios e composições químicas semelhantes (Carioca; Brandão, 2018). O MLA utiliza imagens de elétrons retroespalhados para identificar

as partículas com base na variação de tons de cinza. Além disso, pode classificá-las de acordo com sua composição, determinada por pelo menos um espectrômetro de raios X por dispersão de energia (EDS) (Rodrigues, 2016).

O *Advanced Mineral Identification and Characterization System* (AMICS) (Bruker, 2024) é uma técnica avançada de análise mineralógica automatizada que combina a espectroscopia de raios X por energia dispersiva (EDS) com microscopia eletrônica de varredura (MEV) para identificar e quantificar minerais em amostras geológicas. O sistema utiliza um *software* sofisticado que processa imagens e dados espectrais para diferenciar minerais com base em suas assinaturas químicas e morfológicas. Isso permite uma análise detalhada e precisa da composição mineral de uma amostra, facilitando a exploração mineral e a pesquisa geológica por meio da geração de mapas mineralógicos e relatórios quantitativos automatizados.

2.2.2. – Caracterização tecnológica

A caracterização tecnológica pressupõe “um estudo dos recursos minerais, tendo em vista as tecnologias usuais de seu processamento” (Sant’Agostino; Kahn, 1997, p. 3). Ainda segundo os autores, a análise tecnológica voltada ao beneficiamento do minério se concentra na avaliação dos parâmetros fundamentais do depósito mineral, em relação às diferentes opções tecnológicas de processamento de minérios.

O uso de métodos e técnicas de concentração dos minerais desejados é essencial para ajustar os minérios às condições requeridas para a comercialização dos produtos. Nessa etapa, as informações derivadas da caracterização mineralógica (incluindo fases minerais, quantificação das fases, grau de liberação e caracterização física) formam a base para sugerir maneiras de concentrar o minério (Santos, 2018).

a) Métodos de concentração mineral e equipamentos

A avaliação dos principais métodos de concentração empregados na indústria mineral é conhecida como fracionamento mineral. Atualmente, três métodos de concentração são amplamente utilizados para fins de concentração industrial: concentração gravítica, separação magnética e flotação (Santos, 2018).

Concentração gravítica

A concentração gravítica pode ser definida como um processo no qual partículas de diferentes densidades, tamanhos e formas são separadas uma das outras por ação da força de gravidade ou por forças centrífugas (Lins, 2018). Dentre os principais equipamentos

utilizados destacam-se as espirais, os jigues e as mesas oscilatórias, os quais têm sido concebidos para separar minerais com diferença de massa específica de partículas (Valy, 2017).

As principais características dos equipamentos foram descritas por Ferreira (2011):

a) Espirais concentradoras: possuem um formato helicoidal com seção semicircular, sendo sustentados por uma coluna central. O concentrado é coletado em pontos específicos ao longo da calha e direcionado para dentro da coluna central, enquanto o rejeito continua a seguir o fluxo até o final da calha. A separação das partículas é realizada por meio das forças gravitacional, centrífuga, de arraste e de atrito.

b) Jigues: operam por meio da passagem de correntes verticais pulsantes em um leito de partículas. Na maioria das vezes, a pulsação é gerada pelo uso de água ou ar comprimido, acionado por um pistão ou diafragma. As partículas maiores e mais densas atravessam o leito de esferas sobre o crivo (uma superfície perfurada) e se acumulam no fundo do equipamento, enquanto as menores e menos densas são direcionadas para o "*overflow*".

c) Mesa oscilatória: comumente utilizada em laboratório para testes preliminares de concentração, possui uma superfície inclinada com pequenas saliências (rifles) dispostas paralelamente ao longo de seu comprimento. A operação é realizada por meio de movimentos assimétricos na direção longitudinal. O fluxo de partículas é facilitado pela adição de água ao sistema. As partículas menos densas tendem a se mover mais facilmente ao longo da direção longitudinal, enquanto as mais densas tendem a se deslocar lateralmente.

Separação magnética

A separação magnética é uma técnica bem estabelecida no processamento de minérios, utilizada para concentrar e/ou purificar diversas substâncias minerais. É amplamente aplicada na concentração de minerais ferrosos. Este método pode ser usado para concentrar minerais, dependendo da resposta específica de cada espécie mineral ao campo magnético, sendo útil tanto no beneficiamento de minérios quanto na remoção de sucata (Sampaio *et al*., 2018).

Essa operação unitária funciona principalmente com base na interação entre um campo magnético e um dipolo magnético. Quando uma partícula é exposta a um campo magnético, ela se magnetiza, formando polos magnéticos em suas extremidades e alinhando-se com as linhas do campo magnético. Assim, a partícula se transforma em um dipolo magnético, e a força desse dipolo (momento de dipolo) varia conforme as propriedades específicas de cada partícula (Silva, 2012).

A propriedade de um material que determina a sua resposta a um campo magnético é a susceptibilidade magnética. Com base nessa propriedade, os minerais ou materiais são classificados em paramagnéticos (fracamente atraídos pelo campo magnético), minerais diamagnéticos (repelidos pelo campo magnético) e minerais ferromagnéticos (fortemente atraídos pelo campo magnético) (Sampaio; França; Luz, 2007). O uso de equipamentos de concentração magnética depende diretamente da susceptibilidade magnética das partículas. Assim, partículas ferromagnéticas são concentradas em equipamentos de baixa a média intensidade, enquanto as partículas paramagnéticas são concentradas em dispositivos com alta intensidade de campo magnético (Sales, 2012).

Dentre os principais tipos de separadores magnéticos que operam a úmido destacam-se:

a) *Wet High Intensity Magnetic Separator* (WHIMS): é um dispositivo que utiliza um eletroímã para gerar um campo magnético de alta intensidade. Este tipo de equipamento é comumente usado para separar minerais fracamente magnéticos presentes em partículas finas dentro de uma polpa, com uma concentração de sólidos entre 30% e 40%. Conhecido também como separador magnético tipo carrossel, ele é composto por um rotor que gira ao redor de um eixo central entre os polos magnéticos, uma bobina eletromagnética, e caixas para alimentação da polpa e coleta dos produtos. O rotor possui matrizes ranhuradas que são magnetizadas durante o funcionamento, criando um gradiente magnético em cada ranhura, o que facilita a separação dos minerais (Menezes, 2020).

b) *Wet Rare Earth Drum* (WDRE): o concentrador magnético de terras raras tipo tambor é um equipamento que opera em campos magnéticos variando de baixo (~800 gauss) a médio (~6.000 gauss). Sua principal função é atuar como uma etapa preliminar, impedindo que partículas ferromagnéticas ou suas associações sigam para a fase de concentração magnética de alta intensidade. Ele recupera a massa magnética, como a magnetita e suas associações com outros minerais, presente na alimentação (Roberto, 2010).

c) *Low Intensity Magnetic Separator* (LIMS): os separadores magnéticos de baixa intensidade (LIMS) são utilizados para recuperar minérios ferromagnéticos na produção de pré-concentrados ou concentrados. Graças ao seu sistema magnético, é possível alcançar um altíssimo carregamento com excelente seletividade e máxima recuperação, reduzindo assim a quantidade de unidades necessárias. Com menos máquinas, os custos de manutenção, capital e operação são significativamente menores (Pimenta, 2014).

Com relação ao procedimento a seco, os principais tipos de equipamentos são:

a) Correias cruzadas: o sistema consiste em um alimentador de correias plano de baixa velocidade, sobre o qual estão dispostos até oito transportadores de correia perpendiculares. Cada um desses transportadores envolve um ímã permanente ou eletroímã, ambos de intensidades crescentes. O material a ser separado é depositado na correia plana. À medida que passa sob as correias perpendiculares, as partículas magnéticas são atraídas e levantadas, aderindo às correias perpendiculares. Elas são transportadas até saírem da influência do campo magnético, momento em que são descarregadas (Chaves; Chaves Filho, 2013).

b) Rolo induzido: no separador de rolos induzidos, as partículas são alimentadas de forma seca no topo do dispositivo, sendo centralizadas por um alimentador vibratório. Conforme atravessam o espaço entre o eletroímã e o polo, são desviadas de sua rota normal pelo campo magnético, separando-se em frações magnéticas e não magnéticas. As partículas magnéticas são atraídas pelo rotor e recolhidas como o primeiro produto magnético. As partículas que não são atraídas pelo primeiro rotor seguem para o segundo rotor do separador, e assim sucessivamente, com cada rotor subsequente operando com uma intensidade de campo magnético maior (Maia, 2011).

Dentre os principais tipos de separadores magnéticos de laboratório destacam-se:

a) RAPID: esse equipamento processa pequenas quantidades de material na forma de polpa, em decorrência do tamanho de suas matrizes. O valor do campo magnético varia com a intensidade da corrente elétrica e com a grade utilizada no processo de separação, podendo atingir até 2,1 T (21.000 G). É um equipamento prático e versátil que proporciona resultados qualitativos confiáveis, a baixo custo (Sampaio *et al*., 2018).

b) Tubo Davis: consiste em um eletroímã que gera a intensidade do campo magnético, um tubo de separação de vidro e um mecanismo de agitação motorizado. O tubo é colocado entre os pólos do ímã em um ângulo de aproximadamente 45 graus. O tubo se move para frente e para trás enquanto gira simultaneamente. Quaisquer partículas magnéticas presentes na amostra dentro do tubo são coletadas na zona de intenso magnetismo. Todas as partículas não magnéticas são descarregadas do tubo (Valderrama *et al*., 2014).

Flotação

A aplicação na separação de minerais é o emprego mais convencional da flotação (Massi *et al*., 2008). Este processo possibilita o aproveitamento de minérios complexos e/ou de baixo teor de forma econômica e com rendimentos satisfatórios (Oliveira; Aquino, 2005). A superfície de minerais selecionados se torna hidrofóbica (repelentes à água) por meio do

condicionamento com reagentes seletivos (Metso, 2012). Os minerais que foram hidrofobizados e dispersos no meio aquoso são capturados por bolhas de ar e levados à superfície, onde são removidos na camada de espumas por transbordamento ou por meios mecânicos. Já os minerais hidrofílicos permanecem na fase aquosa, seguindo o fluxo da água (Chaves; Leal Filho; Braga, 2018).

Os reagentes são utilizados para proporcionar as condições ideais necessárias para que ocorra uma alta seletividade e um processo de flotação eficiente. A classificação dos reagentes é baseada em critérios de composição química (composto orgânico/inorgânico, ácido, base, sal) ou de acordo com a sua funcionalidade (coletores, espumantes, modificadores), assegurando um maior controle da molhabilidade dos minerais e do Eh, a aglomeração, a dispersão de partículas e também a estabilidade das bolhas (Varela; Brum, 2007).

Geralmente, várias condições operacionais, como a dosagem de reagentes, a granulometria da alimentação, a aeração e o pH, são inicialmente avaliadas em testes de bancada. Em seguida, os resultados obtidos são validados através de testes em escala piloto, onde são experimentadas diferentes configurações das etapas *rougher*, *cleaner* e *scavenger* (Pimentel *et al*., 2014).

Dentre os principais equipamentos utilizados no processo de flotação mineral destacam-se as células mecânicas e as colunas de flotação.

Nas células mecânicas de flotação, a colisão entre bolhas e partículas depende da suspensão adequada destas no meio aquoso. Essa suspensão é gerada pela ação mecânica do rotor (ou impelidor) sobre o meio, que cria continuamente um fluxo ascendente de polpa dentro da célula. Esse fluxo contraria a tendência natural das partículas de se sedimentarem devido à gravidade. As linhas de fluxo resultantes da ação do impelidor convergem em uma área da célula conhecida como zona de coleta, onde ocorrem as interações entre partículas e bolhas, como colisão e adesão (Lima; Leal Filho; Barbosa, 2006).

Nas colunas de flotação, a alimentação de polpa previamente condicionada com reagentes é feita no terço superior. A polpa segue uma trajetória descendente, em contracorrente com o fluxo ascendente de ar, alimentado na parte inferior através de um *sparger*. Na zona de coleta ou recuperação, as partículas hidrofóbicas aderem a bolhas de ar e sobem até atingir a zona de limpeza, onde a água de lavagem auxilia no processo de eliminar partículas contaminantes, arrastadas pelo fluxo ascendente (Peres *et al*., 2012).

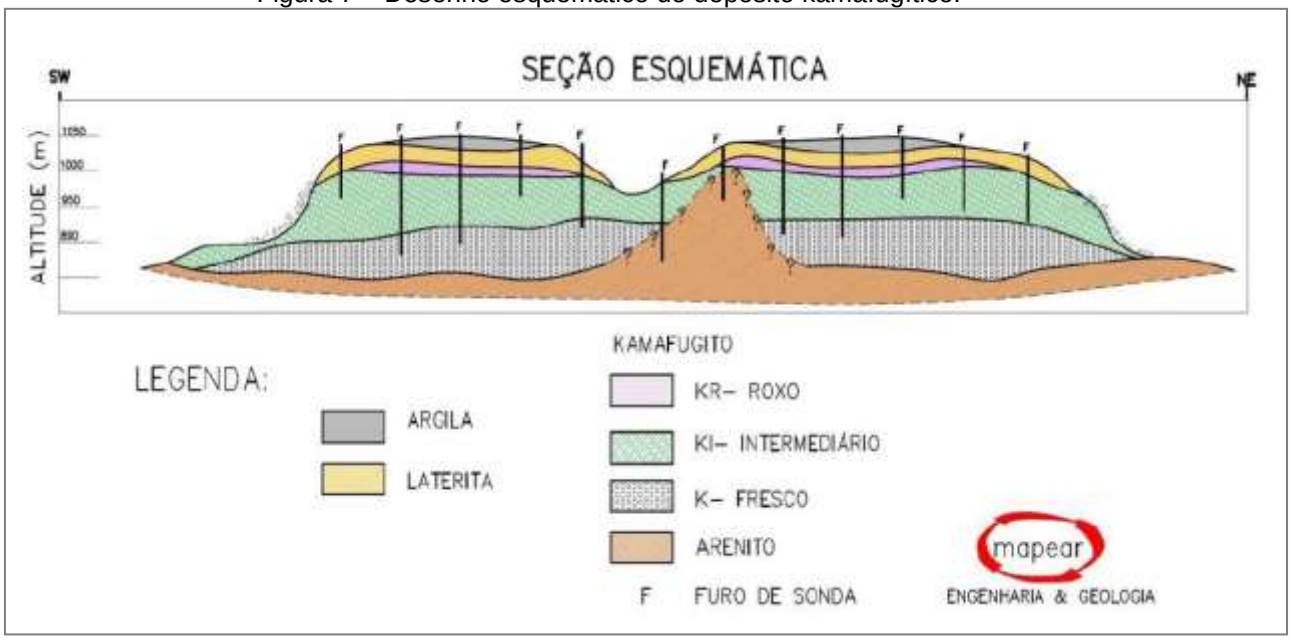
3 – METODOLOGIA

Neste capítulo foram abordados os materiais e métodos empregados para o desenvolvimento deste estudo. Os ensaios de caracterização bem como os testes experimentais foram realizados no Centro de Inovação e Tecnologia do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (CIT SENAI), especificamente no Instituto SENAI de Inovação em Processamento Mineral (ISIPM) e no Instituto SENAI de Inovação em Metalurgia e Ligas Especiais (ISIMLE). A pesquisa foi dividida em duas etapas principais: a preparação da amostra e a caracterização mineralógica do material.

3.1. – Preparação da amostra

O depósito de origem kamafugítica está situado na região noroeste do estado de Minas Gerais. A Figura 7 apresenta um perfil esquemático onde foi possível verificar o posicionamento estratigráfico das amostras. Como observado, o depósito foi seccionado em litotipos diversificados, os quais foram classificados em função do seu grau de intemperismo e coloração. Esta dissertação se dedicou a analisar exclusivamente o kamafugito fresco (KF), selecionado por ser uma das variedades mais abundantes no depósito.

Figura 7 – Desenho esquemático do depósito kamafugítico.



Fonte: CIT SENAI (2018)

A amostra representativa desse depósito foi coletada e entregue ao ISIPM por empresa parceira no projeto totalizando duas toneladas de material. O KF foi distribuído em um espaço preparado e aberto para evitar alterações mineralógicas e estruturais e foi seco à temperatura ambiente. Após a secagem, o litotipo foi homogeneizado em uma pilha alongada do tipo Chevron utilizando equipamento do tipo Stacker desenvolvido e construído pela empresa Brastorno (PT-4104), sendo retomado por duas vezes (Figura 8). Em seguida, essa pilha foi amostrada em seções transversais, retirando-se alíquotas de 10 kg e 20 kg representativas para o estudo de caracterização física, química e mineralógica. Dessas alíquotas, ainda foram retiradas frações representativas para análises pontuais, que passaram por adequações granulométricas e/ou pulverização, conforme necessário.

A etapa de adequação granulométrica envolveu a britagem do KF em 6# (3,36 mm) utilizando um britador de mandíbulas, seguida pela classificação do material britado em uma peneira vibratória referente à essa especificação. O material que ficou retido na malha foi reinserido no britador até que 100% passasse pela abertura desejada. Após a conclusão dessa fase inicial, todo o material passante foi homogeneizado e dividido em alíquotas de cerca de 1,0 kg para a realização dos testes de caracterização mencionados nos tópicos seguintes.

Figura 8 – Preparação de amostra em Stacker.

Figura 9 – Fragmentos de rocha do KF.

3.2. – Caracterização física

3.2.1. – Distribuição granulométrica

Os ensaios para a determinação da distribuição granulométrica do KF foram executados no Laboratório de Medição de Partículas do ISIPM utilizando três metodologias complementares de forma a ter informações tanto das frações mais grossas quanto das frações mais finas, a saber:

− Peneiramento vibratório a úmido do KF tal qual e do produto britado em 6# (3,36 mm) (PT-4101): 10 kg de material tal qual foram peneirados utilizando a série de peneiras Tyler de 1/4" (6,3 mm), 4# (4,75 mm), 6# (3,36 mm), 8# (2,36 mm), 10# (1,70 mm), 16# (1,00 mm), 20# (0,85 mm), 28# (0,60 mm), 35# (0,42 mm), 48# (0,30 mm), 65# (0,212 mm), 100# (0,15 mm), 150# (0,106 mm), 200# (0,075 mm), 270# (0,053 mm), 325# (0,045 mm), 400# (0,038 mm) em um peneirador vibratório suspenso da marca Denver, pertencente ao Laboratório de Preparação de Amostras do ISIPM. A fração <400# (0,038 mm) seguiu para outras duas metodologias (granulômetro a *laser* e *cyclosizer*). Para o produto britado em 6# (3,36 mm), foi utilizado o mesmo peneirador vibratório suspenso com uma amostra de 1,0 kg, alterando-se a série de peneiras com aberturas variando entre 6# (3,36 mm) até 400# (0,038 mm).

- Análise granulométrica por granulômetro a *laser* (PT-4201): a amostra <400# (-0,038 mm) foi analisada por granulômetro a *laser*, modelo *Compagnie Industrielle des Lasers* (CILAS), modelo 920, pertencente ao Laboratório de Controle de Processos e Caracterização Física do ISIPM. As condições operacionais utilizadas estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros operacionais do ensaio de granulometria por difração a *laser.*

Parâmetro	
Ultrassonificação (s)	60
Fator de forma	1
Uso de dispersante	Não
Cor do *laser*	Vermelho
Diâmetro médio (µm)	Franhoufer

- Análise granulométrica em *cyclosizer* (PT-4204): a amostra <400# (-0,038 mm) foi submetida ao ensaio em *cyclosizer*, da marca Warman, modelo M4, pertencente ao Laboratório de Controle de Processos e Caracterização Física do ISIPM. As condições operacionais utilizadas estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros operacionais do ensaio de granulometria por *cyclosizer.*

Parâmetro	
Temperatura da água (°C)	23°C
Vazão de operação (mm)	180
Massa de material (g)	39,9
Tempo de elutriação (min)	10
Duração da análise (min)	15

3.2.2. – Umidade e densidade real

A determinação da densidade real foi realizada no Laboratório de Controle de Processos e Caracterização Física do ISIPM, em triplicata, para a amostra cabeça e para a fração -400# (0,038 mm). Para isso, utilizou-se um estereopicnômetro a gás (hélio) da Quantachrome Corporation, modelo SPY-3, seguindo o procedimento técnico PT-4202.

A determinação da umidade foi realizada no Laboratório de Preparação de Amostras do ISIPM através da secagem de 1,0 kg de amostra em estufa sob uma temperatura controlada de 100º C por um período de 24 h (PT-4203). Após o tempo determinado, a amostra foi pesada e a secagem foi dada por finalizada quando não houve mais variação da massa. O cálculo das umidades foi feito utilizando-se as Equações (2) e (3) referenciadas no item 2.2.1.

3.2.3. – Work Index

O ensaio de *Work Index* (WI) foi realizado conforme procedimento descrito por Barbato e Sampaio (2007).

De forma simplificada, o teste padrão para determinar o WI em moinho de bolas, conforme proposto por Bond, envolveu ciclos de moagem e peneiramento em bateladas. Nesse processo, a fração retida na peneira foi moída repetidamente até que se atingiu 250% do volume da nova alimentação do ciclo correspondente.

A amostra de minério testada foi preparada através de sucessivas etapas de britagem, minimizando a geração de finos, até que toda a amostra estivesse passante pela peneira de 6# (3,36 mm).

O ensaio foi realizado com moinho de bolas de 12 polegadas de comprimento e diâmetro e com distribuição de carga de bolas conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Distribuição da carga de bolas para o ensaio de WI.

Diâmetro de bolas (mm)	Número de bolas
36,5	43
30,2	67
25,4	10
19,1	71
15,9	94

3.2.4. – Determinação da curva de moagem

O KF foi submetido a testes de cominuição para determinar a curva de moagem (PT-4709). A moagem foi realizada em um moinho de bolas com 8 polegadas de comprimento e diâmetro, utilizando 1,0 kg de material britado em 6# (3,36 mm). O moinho operou a 71,4% da velocidade crítica e com um enchimento de 36%, 40% de sólidos em volume, em tempos de moagem variados (0, 5, 10 e 15 minutos) e com distribuição de carga de bolas conforme especificado na Tabela 5. Os produtos resultantes da moagem foram analisados granulometricamente por peneiramento vibratório úmido, utilizando peneiras da série Tyler de 150# (0,106 mm), 200# (0,075 mm), 270# (0,053 mm), 325# (0,045 mm) e 400# (0,038 mm).

Tabela 5 – Distribuição da carga de bolas para a determinação da curva de moagem.

Diâmetro de bolas (mm)	Peso da carga (kg)	Distribuição de bolas (%)
30	3,2	29,09
25	4,2	38,18
20	2,3	20,91
15	1,3	11,82

3.3. – Caracterização química

A caracterização química do KF foi feita pela empresa SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA utilizando-se técnicas analíticas diversificadas, conforme detalhado nos itens subsequentes. A amostra cabeça foi analisada pelos itens 3.3.1. a 3.3.3.

3.3.1. – Determinação de óxidos majoritários pela técnica de espectroscopia de raios X por dispersão de comprimento de onda (WD-FRX)

a) Perda ao fogo por calcinação (PPC) da amostra a 1000ºC ou em inglês *Loss on ignition* (LOI);

b) Fusão com tetraborato de lítio e quantificação por WDX dos seguintes óxidos:

Al_2O_3 (%)	BaO (%)	CaO (%)	Co (%)	V_2O_5 (%)	Na_2O (%)	Nb_2O_5 (%)	P_2O_5 (%)	TiO_2 (%)
0,1-100	0,01-65	0,01-70	0,005-1	0,01-15	0,1-12	0,05-15	0,01-45	0,01-100

Cr_2O_3 (%)	Cu (%)	Fe_2O_3 (%)	K_2O (%)	MgO (%)	MnO (%)	NiO (%)	SiO_2 (%)
0,01-50	0,01-1	0,01-103	0,01-25	0,1-100	0,01-75	0,01-8	0,1-99

3.3.2. – Determinação de terras raras pela técnica de espectrometria de massa por plasma acoplado indutivamente (ICP-MS)

a) Fusão com metaborato de lítio e quantificação por ICP-MS dos seguintes elementos:

Ce (ppm)	Dy (ppm)	Er (ppm)	Eu (ppm)	Yb (ppm)	Gd (ppm)	Ho (ppm)	La (ppm)	Lu (ppm)
0,1-10000	0,05-1000	0,05-1000	0,05-1000	0,1-1000	0,05-1000	0,05-1000	0,1-10000	0,05-1000

Nd (ppm)	Pr (ppm)	Sm (ppm)	Tb (ppm)	Th (ppm)	Tm (ppm)	U (ppm)	Y (ppm)
0,1-10000	0,05-1000	0,1-1000	0,05-1000	0,1-10000	0,05-1000	0,05-10000	0,05-10000

3.3.3. – Determinação de Carbono e/ou Enxofre Totais por Infravermelho – LECO

C (%)	S (%)
0,01-15	0,01-35

3.4. – Caracterização mineralógica

3.4.1. – Norma CIPW

O cálculo da norma CIPW foi realizado com auxílio do *software* GCDkit, versão 6.2, utilizando os dados de composição química por WD-FRX.

3.4.2. – Difratometria de raios X

A análise de difratometria de raios X (DRX) foi realizada no Laboratório de Difração de Raios X do ISIMLE e teve como objetivo identificar e determinar os teores das fases minerais cristalinas presentes no minério. Para realizar as análises por DRX, utilizou-se a técnica do pó com o equipamento difratômetro de raios X da empresa Rigaku, modelo SmartLab 9 kW,

o qual conta com um tubo de raios X que emite radiação CuKα (λ=1,5418Å) e utiliza o sistema θ-2θ. As condições analíticas foram:

− Voltagem de leitura: 40,0 kV;

− Corrente de leitura: 30,0 mA;

− Faixa de análise: 5º a 80º (2θ);

− Passo: 0,02º (2θ);

− Tempo de Leitura: 0,6 segundo/passo.

A interpretação dos dados foi realizada com o auxílio do *software* Match! (*Crystal Impact*) versão 3.7.1.132, e os teores dos minerais foram semiquantificados pelo método de Rietveld. O banco de dados gratuito utilizado para a identificação dos minerais foi o *Crystallography Open Database* (COD) (COD, 2024).

3.4.3. – Microscopia óptica

A partir da análise de lâminas delgadas polidas, obtidas de fragmentos de rochas do KF coletados no depósito (Figura 9), foi realizada a caracterização mineralógica por meio de estudos petrográficos com microscópios ópticos (PT-4309 e PT-4310) e uma lupa trinocular estereomicroscópica (PT-4312). Esses estudos permitiram identificar os principais constituintes minerais da rocha, analisar as relações texturais e detectar evidências de processos geológicos aos quais as rochas possam ter sido submetidas. Além disso, um dos principais objetivos dessa fase foi verificar as associações minerais de interesse e selecionar áreas potenciais para uma investigação mais detalhada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os equipamentos utilizados incluíram microscópios ópticos da marca Leica, modelos DMEP e DMLP, e uma lupa trinocular estereomicroscópica da marca Leica, modelo Mz 75, ambos equipados com sistema de obtenção de imagens acoplado e pertencentes ao Laboratório de Caracterização Petrográfica, Mineralógica e de Laminação do ISIPM.

3.4.4. – Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Através do uso de microscopia óptica foram escolhidas áreas específicas nas lâminas delgadas para identificar e caracterizar melhor os minerais de interesse que não foram detectados por este método. Para essa análise, foi empregado o microscópio eletrônico de

varredura da marca Jeol, modelo JSM-7100F-LV, pertencente ao Laboratório de Microscopia e Nanoscopia do ISIMLE, que está equipado com um sistema Field Emission Gun (FEG) e detecção por energia dispersiva (EDS). A distância de trabalho utilizada foi entre 11 mm e 12 mm e a tensão de aceleração de 10 kV.

3.4.5. – Liberação e associação mineral (MEV/AMICS)

De posse do conhecimento microquímico das fases minerais bem como das suas relações texturais, o estudo de liberação e associações minerais do KF foi conduzido a fim de gerar dados essenciais para nortear os estudos de concentração. Este levantamento foi feito de maneira automatizada no microscópio eletrônico de varredura da marca Hitachi, modelo FlexSEM 1000II com sistema de detecção por energia dispersiva (EDS) e *software Advanced Mineral Identification and Characterization System* (AMICS) da Bruker. Para a realização desta análise foram confeccionadas seções polidas de grãos para o KF britado em 6# (3,36 mm) nas frações: -150#+200# (-0,106 mm+0,075 mm) -200#+270# (-0,075 mm+0,053 mm) e -270#+400# (-0,053 mm+0,038 mm). Essas três faixas foram analisadas pois os principais elementos de interesse se apresentaram nas frações mais finas, o que sugere que a liberação ocorrerá principalmente nas partículas de menor tamanho.

Os espectros de elétrons retroespalhados foram usados para discriminar as diferentes fases minerais, bem como as partículas da resina epóxi. As fases minerais foram caracterizadas por diferentes tons de cinza em função do número atômico médio. Cada partícula foi submetida ao mapeamento de raios X por EDS e ambos, espectro e imagem da partícula, foram armazenados em um arquivo.

Para a realização das análises, os seguintes passos foram utilizados:

· Construção da lista mineral e calibração do equipamento;

· Realização das análises pelo método modal (*particle mode* - PM); e

· Tratamento dos resultados.

Os resultados de análise de liberação mineral (ALM) apresentados nesta dissertação compreendem:

a) Mineralogia modal;

b) Distribuição elementar (elementos representativos);

c) Associações das fases minerais principais;

d) Liberação mineral, por composição de partícula e superfície livre, dos minerais de interesse.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e analisa detalhadamente os dados obtidos ao longo do estudo, buscando oferecer uma compreensão ampla e profunda dos resultados. Para assegurar a clareza e facilitar a leitura, o conteúdo foi segmentado em seções distintas. Cada seção explora um aspecto específico das caracterizações realizadas, organizando os resultados em categorias físicas, químicas e mineralógicas.

4.1. – Caracterização física

Na seção de caracterização física foram detalhados os resultados oriundos da distribuição granulométrica, umidade, densidade real, *work index* e determinação da curva de moagem.

4.1.1. – Distribuição granulométrica

A Figura 10 exibe as curvas de distribuição granulométrica do KF no estado bruto e após a britagem em 6# (3,36 mm), com os dados detalhados na Tabela 6 e na Tabela 7, respectivamente. A análise indica que a amostra no estado bruto é predominantemente grossa, com cerca de 40% do material passando pela peneira de 1/4" (6,3 mm), enquanto apenas cerca de 6% apresenta granulometria abaixo de 400# (0,038 mm). Após a britagem, a quantidade de material passante em 400# (0,038 mm) aumentou para aproximadamente 22%, um acréscimo de cerca de 16 pontos percentuais em relação ao material bruto. Comparando os resultados com a literatura, o produto britado apresentou uma granulometria mais grossa que o kamafugito estudado por Ferreira (2021), que teve 100% do material passante em 400# (0,038 mm), mas não tão expressiva quanto a observada por Lopes *et al*. (2022), que registraram 30% de passante nessa malha em um material também britado em 6# (3,36 mm).

Figura 10 – Curva de distribuição granulométrica da amostra KF tal qual (amarela) e britada (vermelho).

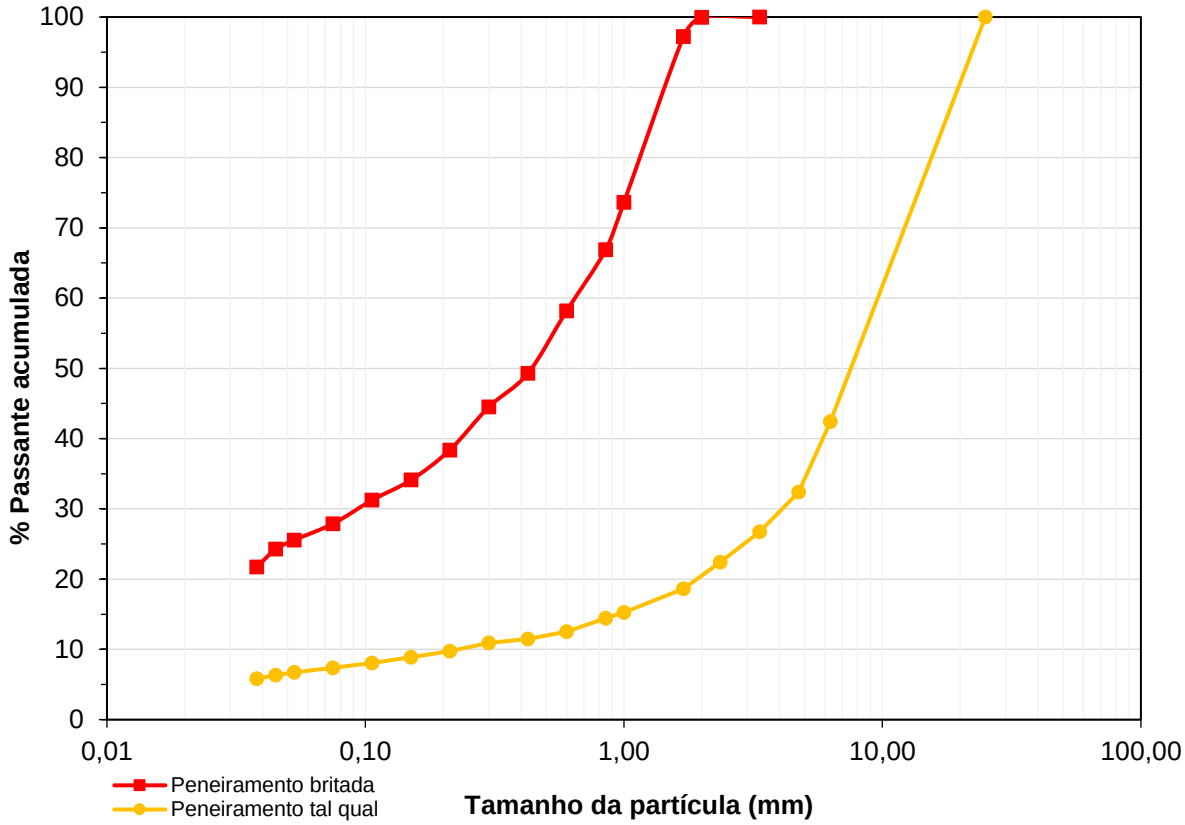


Tabela 6 – Distribuição granulométrica da amostra KF tal qual por peneiramento a úmido.

Peneira	Abertura (mm)	Massa retida (g)	% retida simples	% retida acumulada	% passante acumulada
1”	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
1/4”	6,30	5515,00	57,59	57,59	42,41
4	4,75	958,80	10,01	67,60	32,40
6	3,35	543,40	5,67	73,27	26,73
8	2,36	412,30	4,31	77,58	22,42
10	1,70	364,20	3,80	81,38	18,62
16	1,00	322,30	3,37	84,75	15,25
20	0,85	78,60	0,82	85,57	14,43
28	0,60	181,60	1,90	87,47	12,53
35	0,43	101,80	1,06	88,53	11,47
48	0,30	49,80	0,52	89,05	10,95
65	0,21	117,80	1,23	90,28	9,72
100	0,15	80,40	0,84	91,12	8,88
150	0,11	78,50	0,82	91,94	8,06
200	0,08	64,10	0,67	92,61	7,39
270	0,053	62,20	0,65	93,26	6,74
325	0,045	38,90	0,41	93,66	6,34
400	0,038	46,90	0,49	94,15	5,85
-400	-0,038	560,00	5,85	100,00	0
Total calculado		9576,6	100,00		

Tabela 7 – Distribuição granulométrica da amostra britada de KF por peneiramento a úmido.

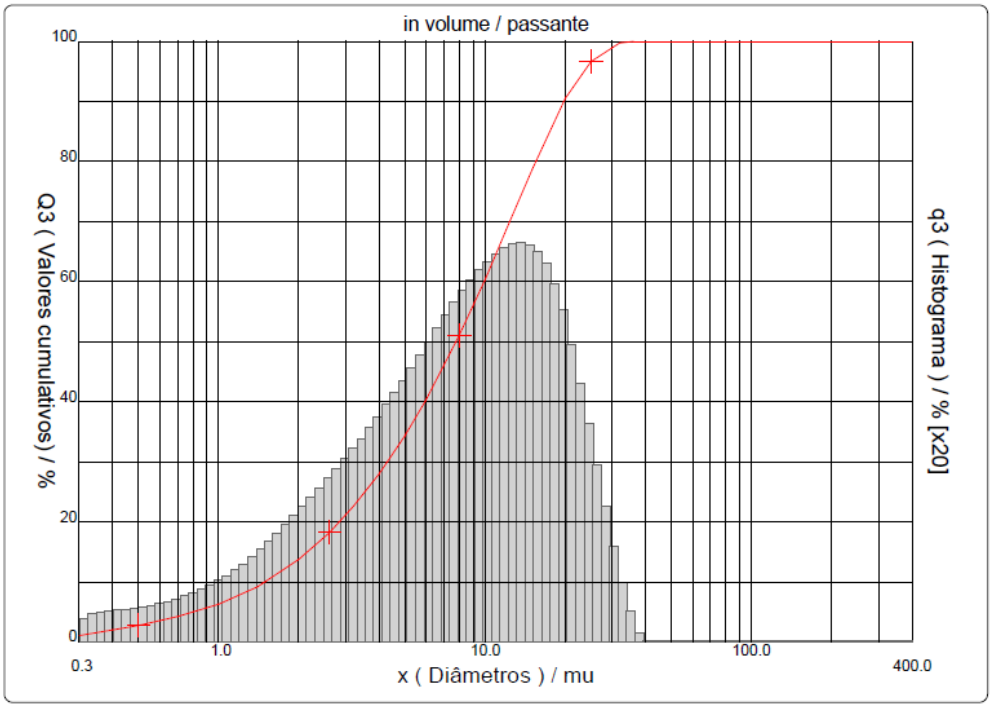
Peneira	Abertura (mm)	Massa retida (g)	% retida simples	% retida acumulada	% passante acumulada
6	3,35	0,00	0,00	0,00	100,00
9	2,00	0,40	0,04	0,04	99,96
10	1,70	27,00	2,74	2,78	97,22
16	1,00	232,70	23,61	26,39	73,61
20	0,85	66,50	6,75	33,14	66,86
28	0,60	85,60	8,69	41,83	58,17
35	0,43	87,60	8,89	50,72	49,28
48	0,30	47,20	4,79	55,50	44,50
65	0,21	60,30	6,12	61,62	38,38
100	0,15	42,10	4,27	65,90	34,10
150	0,11	28,30	2,87	68,77	31,23
200	0,08	32,90	3,34	72,11	27,89
270	0,053	23,00	2,33	74,44	25,56
325	0,045	12,70	1,29	75,73	24,27
400	0,038	25,10	2,55	78,27	21,73
-400	-0,038	214,10	21,73	100,00	0
Total calculado		985,5	100,00	-	-

A Tabela 8 e a Figura 11 apresentam os resultados da distribuição granulométrica por granulômetro a *laser*. É importante ressaltar que o ensaio foi feito com a fração -400# da amostra tal qual.

Tabela 8 – Diâmetros e superfície específica obtidas por análise via granulômetro a *laser*.

d_{10} (µm)	d_{50} (µm)	d_{90} (µm)	$d_{médio\ Fraunhofer}$ (µm)	Superfície específica (cm²/g)
1,49	7,77	19,79	9,47	7.326,27

Figura 11 – Curva de distribuição granulométrica do KF obtida no granulômetro a *laser*.



A Figura 12 mostra a curva de distribuição granulométrica do KF obtida no *cyclosizer*, cujos dados estão especificados na Tabela 9. A análise revela que a amostra apresenta cerca de 80% e 55% do material passante nos ciclones de 0,03829 mm e 0,01076 mm, respectivamente.

Figura 12 – Curva de distribuição granulométrica do KF obtida no *cyclosizer*.

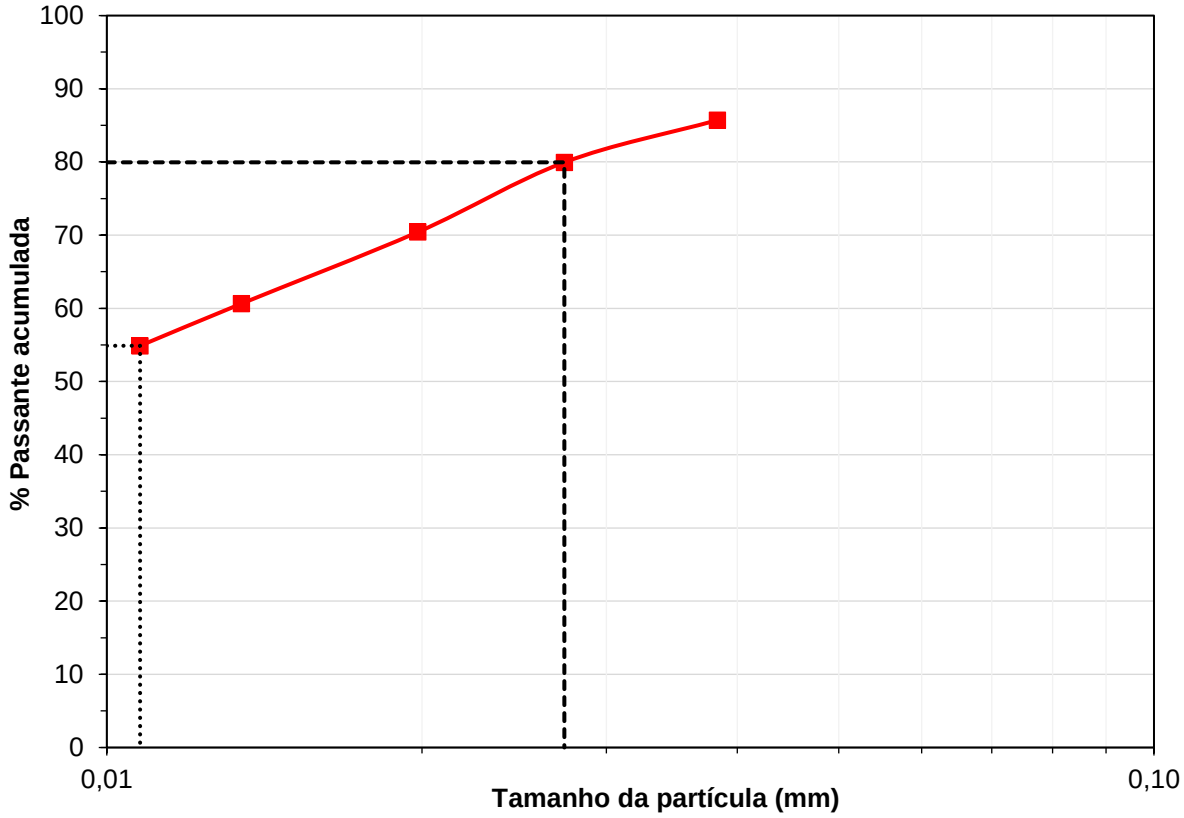


Tabela 9 – Distribuição granulométrica da amostra KF por *cyclosizer*.

Ciclone	Diâmetro padrão (µm)	Diâmetro corrigido (µm)	Massa retida (g)	% retida simples	% retida acumulada	% passante acumulada
C1	42,70	38,29	5,70	14,29	14,29	85,71
C2	30,50	27,35	2,30	5,76	20,05	79,95
C3	22,10	19,82	3,80	9,52	29,57	70,43
C4	15,00	13,45	3,90	9,77	39,35	60,65
C5	12,00	10,76	2,30	5,76	45,11	54,89
Overflow C5	-12,00	-10,76	21,90	54,89	100,00	0,00
Total calculado			39,90	100,00		

4.1.2. – Umidade e densidade real

A Tabela 10 mostra os dados de umidade em base úmida e seca do KF. Os níveis de umidade ultrapassaram 10%, sendo cerca de 1 ponto percentual maior para a base seca. Lage (2018) destaca a importância do controle da umidade do minério, pois ela impacta diretamente nos custos de produção. Processos de beneficiamento geralmente utilizam água,

o que aumenta a umidade do minério. A falta de controle ou a ineficiência na secagem podem elevar o custo do produto, comprometer a estabilidade das pilhas de estocagem e encarecer o transporte, além de outros problemas.

Tabela 10 – Umidade base úmida e base seca do KF.

Umidade	(%)
Base úmida	10,20
Base seca	11,34

A Tabela 11 mostra os resultados de densidade real para a amostra tal qual e para a fração -400# do KF. As densidades reais das duas amostras são próximas, com a fração -400# (0,038 mm) sendo cerca de 0,2 p.p. menor. Ainda assim, os valores obtidos estão próximos da densidade de 2,5 g/cm³ do kamafugito do trabalho de Ávila Neto *et al*. (2017) e superiores à de 2,24 g/cm³ encontradas no trabalho de Rosa (2015). Uma possível explicação para o menor valor de densidade na fração -400# quando comparado à amostra cabeça é a maior presença de óxido de alumínio na fração mais fina, o que contribui diretamente para essa redução.

Tabela 11 – Densidade real média da amostra tal qual e da fração -400# do KF.

Código	Fração	Densidade real 1 (g/cm³)	Densidade real 2 (g/cm³)	Densidade real 3 (g/cm³)	Densidade real média (g/cm³)
236-001	Cabeça	2,69	2,72	2,73	2,71±0,02
236-022	-400#	2,49	2,56	2,57	2,54±0,05

4.1.3. – Work Index

A Tabela 12 apresenta os resultados do ensaio para determinação do *Work Index* (tanto em tonelada curta quanto em tonelada métrica). O estudo revela que o kamafugito analisado se enquadra na categoria de dureza média em termos de consumo energético para moagem. Essa classificação baseia-se nos critérios de Nappier-Munn *et al*. (1999), que define minérios com um *Work Index* entre 9 e 14 kWh/t como de dureza média. Embora não tenham sido encontrados parâmetros específicos para o ensaio de *Work Index* de kamafugitos que permitam uma comparação direta com o litotipo estudado, os valores de WI obtidos são próximos aos valores médios relatados por Beraldo (1987) para hematita (11,1 kWh/st), minério de zinco (10,9 kWh/st) e minério de tungstênio (11 kWh/st).

Tabela 12 – Resultado de WI da amostra KF.

Amostra	WI de Bond (kWh/st)	WI de Bond (kWh/t)
KF	10,97	12,09

4.1.4. – Determinação da curva de moagem

A Figura 13 apresenta a curva de moagem do KF obtida nos intervalos de tempo de 0, 5, 10 e 15 minutos, cujos dados estão detalhados na Tabela 13. Esta análise foi realizada com o objetivo de compreender o comportamento do material durante o processo de moagem, considerando possíveis etapas futuras de processamento. Não foram encontradas, até o momento, pesquisas na literatura que pudessem ser utilizadas para comparação com os dados de moagem do kamafugito obtidos neste estudo.

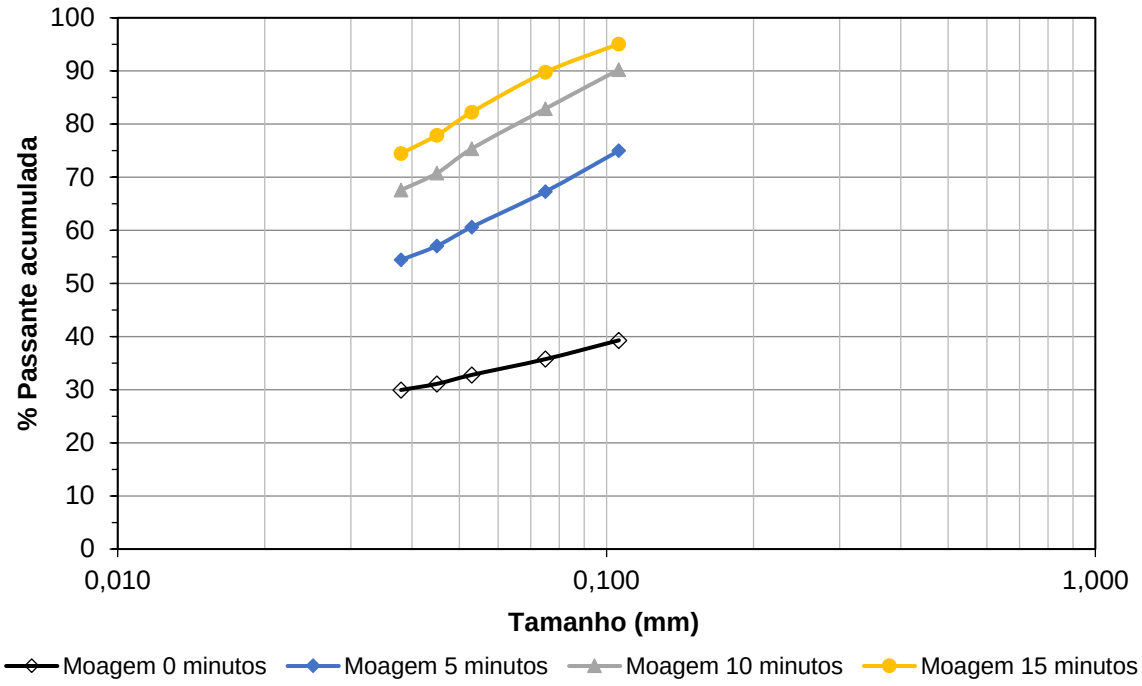
Os resultados mostraram que há uma relação diretamente proporcional entre o tempo de moagem e o percentual passante, conforme esperado. Com 10 minutos de moagem, aproximadamente 90% das partículas atingem tamanhos menores que 0,1 mm. Estendendo a moagem para 15 minutos, essa proporção aumenta para quase 95% das partículas abaixo de 0,1 mm. Em contraste, um tempo de 5 minutos resulta em cerca de 75% das partículas com menos de 0,1 mm, o que pode atender a certas aplicações, mas apresenta menor eficiência de liberação em comparação aos tempos de 10 minutos e 15 minutos.

Embora prolongar o tempo de moagem geralmente aumente a liberação dos minerais, é importante equilibrar esse tempo para evitar custos operacionais elevados e a produção excessiva de finos, que podem comprometer as etapas subsequentes do processamento. Com base nos resultados obtidos, há indícios de que o período de 10 minutos de moagem emerge como a opção mais eficaz entre os tempos avaliados. Mesmo que a moagem por 15 minutos apresente um pequeno ganho na liberação, essa diferença não parece justificar o tempo adicional e os custos operacionais mais altos, especialmente considerando que os resultados foram muito semelhantes nos dois casos.

Tabela 13 – Distribuição granulométrica do KF em diferentes tempos de moagem.

		0 min	5 min	10 min	15 min
Peneira	Abertura (mm)	% passante acumulada	% passante acumulada	% passante acumulada	% passante acumulada
150	0,11	39,29	74,97	90,24	95,08
200	0,08	35,75	67,29	82,89	89,77
270	0,053	32,78	60,62	75,35	82,24
325	0,045	31,10	57,07	70,76	77,91
400	0,038	29,95	54,43	67,58	74,46
-400	-0,038	0,00	0,00	0,00	0,00

Figura 13 – Curvas de distribuição granulométrica do KF em diferentes tempos de moagem.



4.2. – Caracterização química

Na seção de caracterização química foram detalhados os resultados oriundos de fluorescência de raios X, espectrometria de massa por plasma acoplado indutivamente e determinação de carbono e/ou enxofre.

4.2.1. – Determinação de óxidos majoritários pela técnica de espectroscopia de raios X por dispersão de comprimento de onda (WD-FRX)

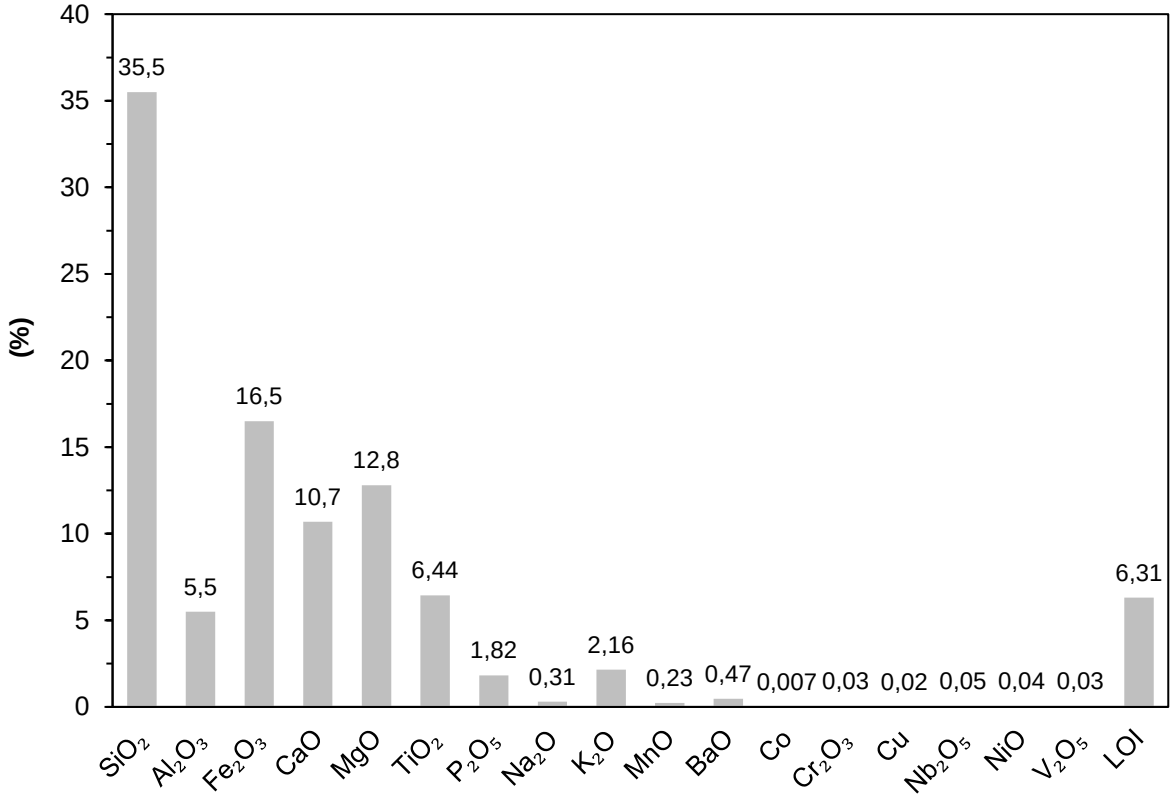
Os resultados da análise química dos óxidos majoritários do KF estão apresentados na Tabela 14 e na Figura 14. O material é composto predominantemente por SiO_2 (35,50%), seguido por óxidos com teores superiores a 10%, como Fe_2O_3 (16,50%), MgO (12,80%) e CaO (10,70%). Além disso, há a presença de outros óxidos em teores menos expressivos, tais como TiO_2 (6,44%), Al_2O_3 (5,50%), K_2O (2,16%) e P_2O_5 (1,82%). Nota-se também que a alta concentração de ferro, cálcio e magnésio em comparação a outros metais foi corroborada pela análise mineralógica do minério, que revelou a predominância de magnetita (Fe_3O_4), calcita ($CaCO_3$) e diopsídio ($CaMg(Si_2O_6)$), minerais que contêm esses elementos. Diante dos dados apresentados, os elementos de interesse mais expressivos foram ferro (Fe), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e titânio (Ti), seguidos de potássio (K) e fósforo (P).

Os resultados dessa análise química do KF estão próximos da faixa reportada por Felgate (2014), o qual menciona que os uganditos e mafuritos (kamafugitos) têm teores ligeiramente mais altos de SiO_2 (37-45% em peso), Al_2O_3 (~7% em peso), TiO_2 (~4-8% em peso) e CaO (11-15% em peso) e teores muito mais baixos de MgO (8-21% em peso). Esses dados também estão próximos da faixa estipulada por Melo (2012), a qual menciona que os uganditos e mafuritos são considerados rochas ultrabásicas (32,8-33,6% em peso de SiO_2), contendo altos teores de CaO (10,5-13,0%), Fe_2O_3 (12,9-16,8%) e TiO_2 (4,96-5,66%) e moderados valores de Al_2O_3 (3,2-7,44%), álcalis (1,4-6,98%) e P_2O_5 (1,11-2,72%).

Tabela 14 – Resultados da análise química da amostra cabeça do KF referente aos óxidos majoritários e ao LOI (em %).

SiO_2	35,50	MnO	0,23
Al_2O_3	5,50	BaO	0,47
Fe_2O_3	16,50	Co	0,007
CaO	10,70	Cr_2O_3	0,03
MgO	12,80	Cu	0,02
TiO_2	6,44	Nb_2O_5	<0,05
P_2O_5	1,82	NiO	0,04
Na_2O	0,31	V_2O_5	0,03
K_2O	2,16	LOI	6,31

Figura 14 – Composição química de óxidos majoritários e LOI da amostra cabeça do KF.



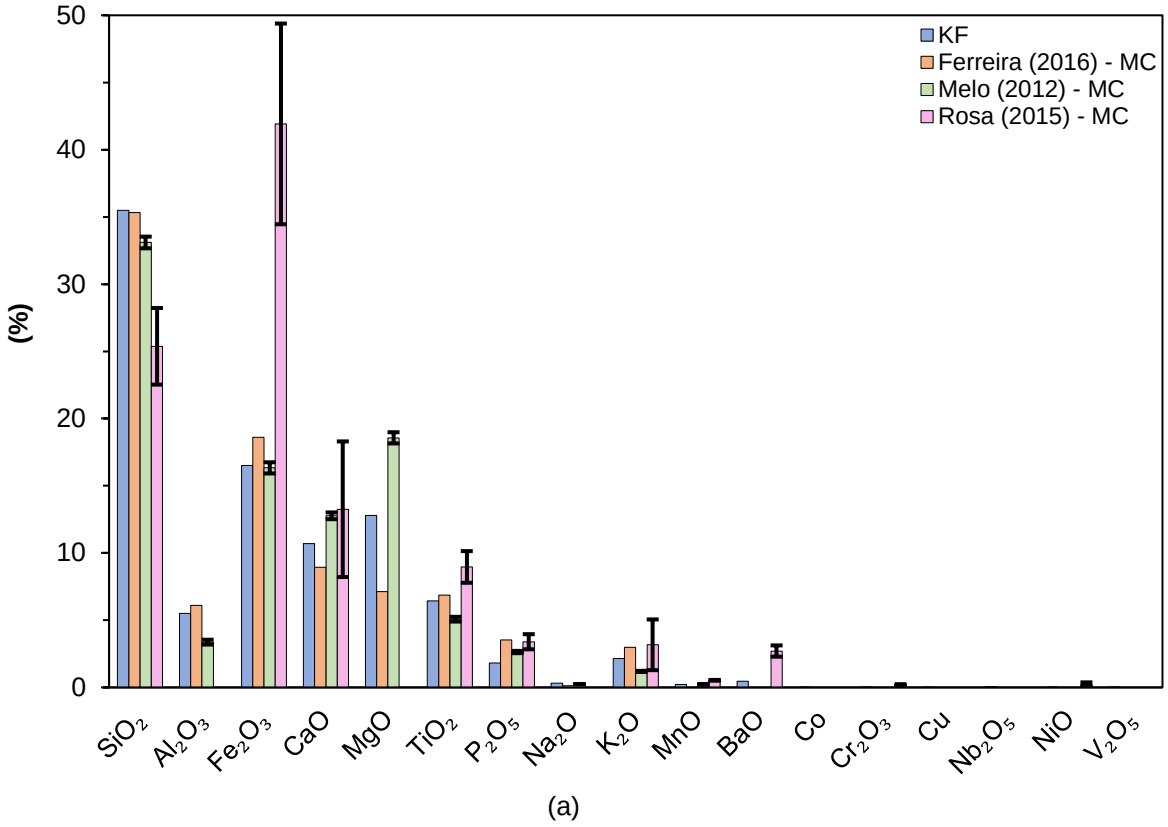
A Figura 15 apresenta um comparativo entre a composição química dos óxidos majoritários do KF em relação a outros kamafugitos da mesma região, de outro estado brasileiro e de outros países. É válido mencionar que para os estudos de Melo (2012) e Rosa

(2015) foi possível calcular o desvio dos dados pois foram analisadas amostras de kamafugitos diferentes. A Figura 15a apresenta o comparativo entre o KF e os kamafugitos dos estudos de Melo (2012), Ferreira (2016) e Rosa (2015), ambos pertencentes ao Grupo Mata da Corda. A amostra KF apresenta uma composição geral que é bastante semelhante às amostras dos outros estudos, com exceção notável para o óxido Fe_2O_3, principalmente quando comparada à média das amostras de kamafugito do estudo de Rosa (2015). É válido destacar que, no estudo dessa autora, a amostra com alto teor de Fe_2O_3 (51,68%) apresentou uma composição mineralógica caracterizada pela presença de piroxênios, carbonatos, apatita, magnetita e, possivelmente, ilmenomagnetita e perovskita. Dessa forma, há indícios de que o elevado teor de ferro pode ter sido atribuído à presença expressiva de magnetita e ilmenomagnetita, enquanto nas demais amostras foram identificadas apenas magnetita e olivina.

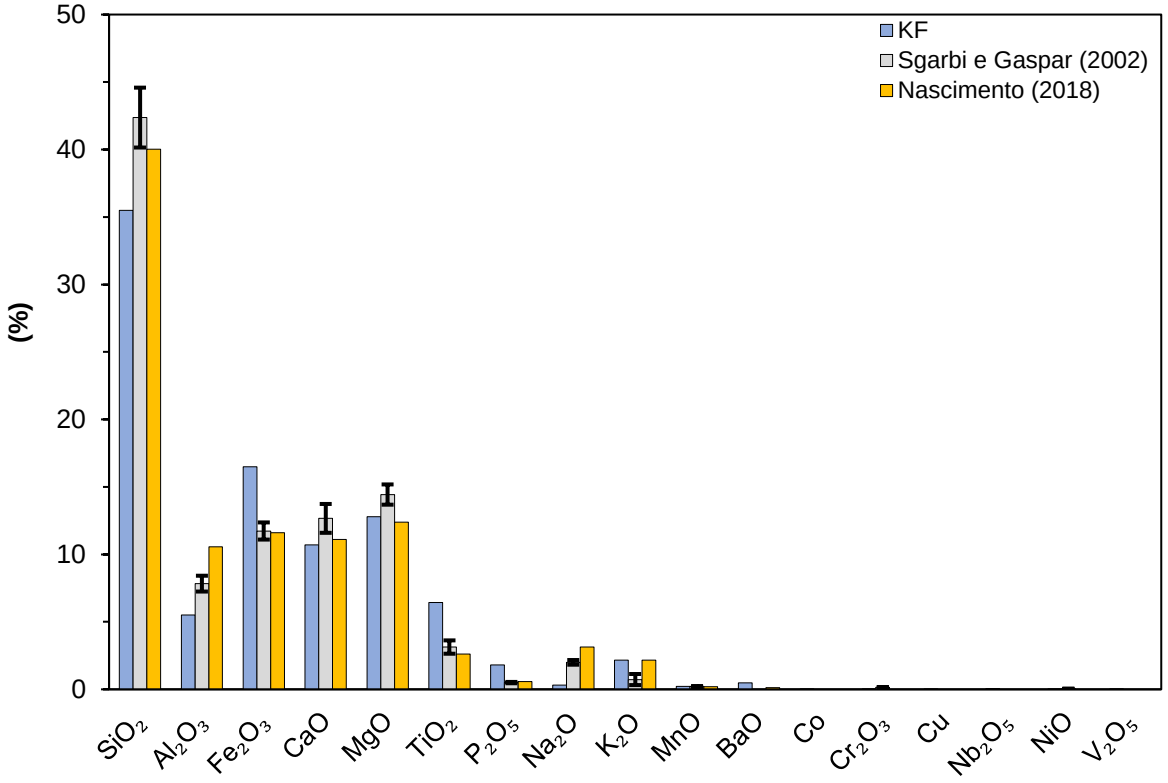
A Figura 15b apresenta o comparativo entre o KF e os kamafugitos dos estudos de Sgarbi e Gaspar (2002) e Nascimento (2018), ambos pertencentes ao estado de Goiás. É válido mencionar que para o estudo de Sgarbi e Gaspar (2002) foi possível calcular o desvio dos dados pois foram analisadas amostras de kamafugitos diferentes. Como já era esperado, a composição química do KF em relação a esses dois kamafugitos analisados diferem entre si. Observa-se que há uma composição química dominante de SiO_2 em todas as amostras, mas com variações significativas em Al_2O_3 e Fe_2O_3 entre elas. As diferenças nas composições químicas podem ser justificadas em função das diferentes origens geológicas das amostras, bem como os diferentes processos formativos a que foram submetidas.

A Figura 15c apresenta o comparativo entre o KF e os kamafugitos dos estudos de Buregyeya e Nwaubani (2022) e Stoppa, Woolley e Cundari (2002), pertencentes à África e à Itália, respectivamente. De maneira análoga à discutida para a Figura 15b, as variações nas concentrações dos óxidos indicam diferenças significativas na composição química dos kamafugitos das diferentes regiões. Essas diferenças podem ser atribuídas a fatores geológicos e processos de formação distintos. A amostra da África (Buregyeya; Nwaubani, 2022) apresenta maiores concentrações de SiO_2, K_2O e Al_2O_3, enquanto a amostra italiana (Stoppa; Woolley; Cundari, 2002) destaca-se pelo maior teor de SiO_2, Al_2O_3, CaO e K_2O. A amostra KF tem uma composição relativamente intermediária em relação às outras duas, com valores notáveis de Fe_2O_3 e MgO.

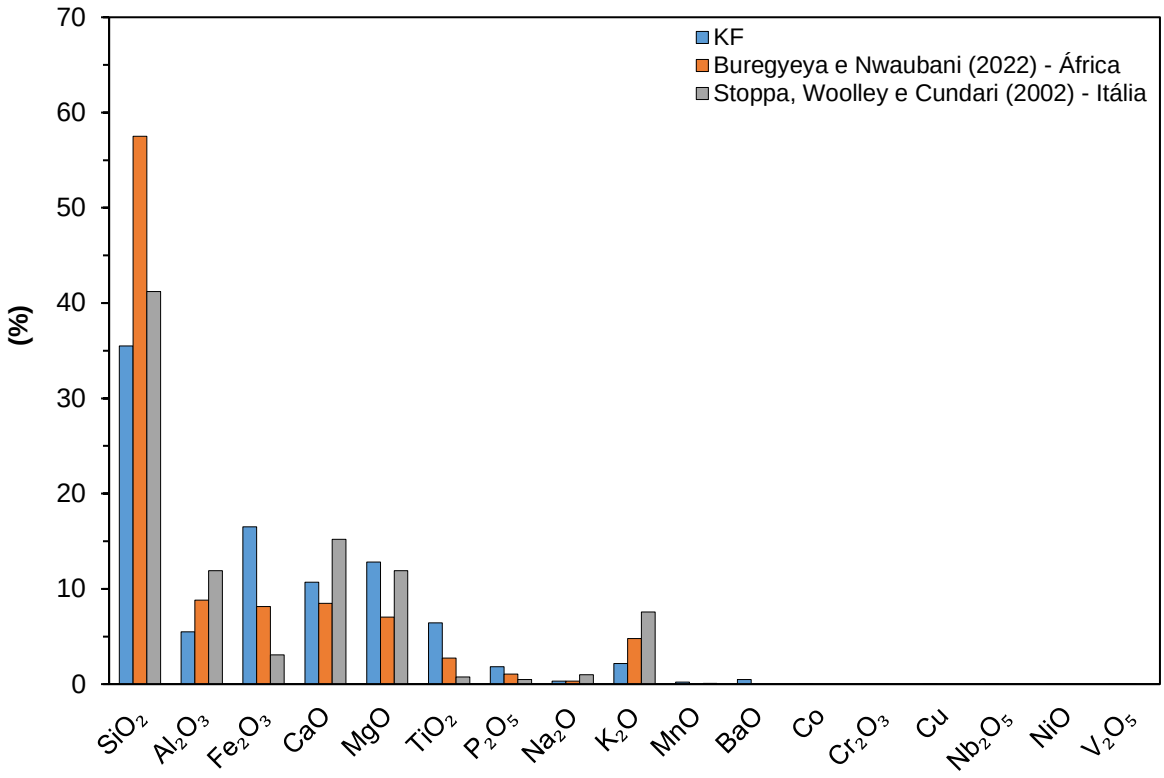
Figura 15 – Comparação da composição química dos óxidos majoritários do KF em relação a outros kamafugitos (a) MC: Grupo Mata da Corda-MG (b) SAB: Santo Antônio da Barra-GO e MP: Morro Preto-GO (c) de outras regiões (África, Itália).



(a)



(b)



(c)

Os resultados da análise química dos óxidos majoritários da amostra cabeça e das frações do KF britado em 6# (3,36 mm) estão apresentados na Tabela 15 e na Figura 16. O SiO_2 apresenta uma leve tendência de redução de sua concentração à medida que as partículas se tornam mais finas. Essa tendência pode sugerir que os silicatos estão associados predominantemente às frações mais grossas do minério. O Fe_2O_3, por outro lado, não apresenta variações consideráveis, mas observa-se uma leve tendência de aumento nas frações mais finas, o que pode indicar que os minerais portadores de ferro, como magnetita, estão mais distribuídos nas partículas menores. O P_2O_5 apresenta comportamento similar ao SiO_2, mas com um aumento considerável apenas na fração -400#. O TiO_2 apresenta uma homogeneidade em seu teor nas frações mais grossas, possivelmente associada à presença de minerais como a perovskita e titanita, mas com uma leve tendência de aumento à medida que a granulometria diminui, com exceção da fração -400#. A concentração desse elemento em partículas maiores pode indicar a necessidade de ajustes no circuito de cominuição para melhorar a liberação desses minerais e aumentar a eficiência na recuperação de titânio.

A análise dos teores de CaO e MgO mostrou uma distribuição uniforme entre as diferentes faixas granulométricas, indicando que os minerais que contêm esses elementos, como a calcita, estão distribuídos de maneira homogênea. Observou-se comportamento

semelhante para o K_2O, sugerindo que esses minerais não se concentram preferencialmente em uma faixa granulométrica específica.

Figura 16 – Composição química de óxidos majoritários e LOI da amostra cabeça e do KF britado por fração.

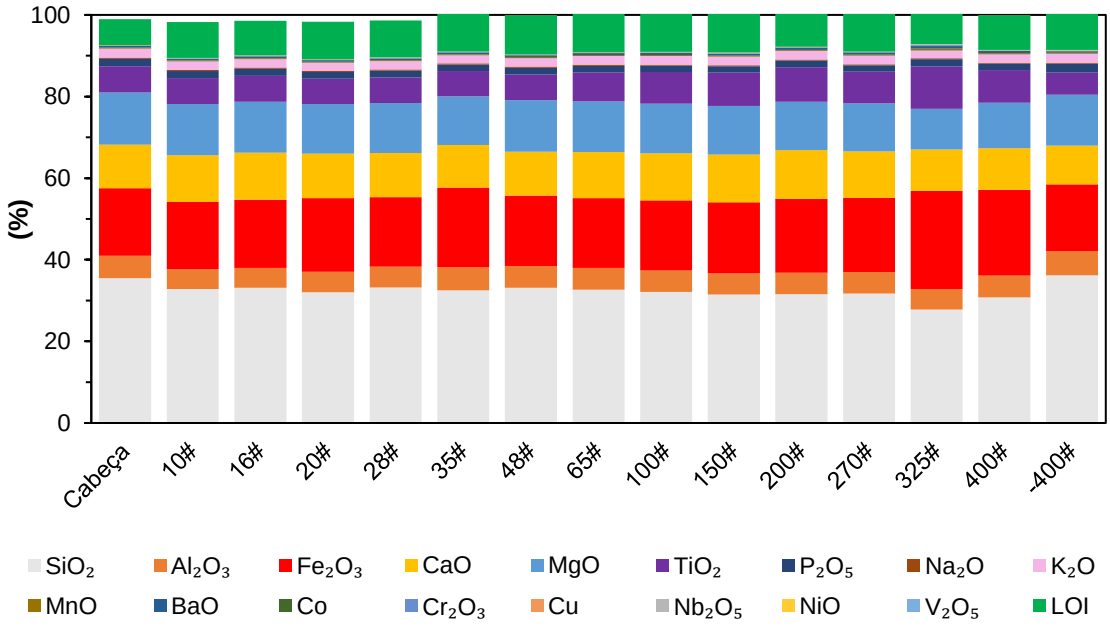


Tabela 15 – Resultados da análise química da amostra cabeça e do KF britado por fração referente aos óxidos majoritários e ao LOI (em %).

Código	Amostra	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	P_2O_5	Na_2O	K_2O	MnO	BaO	Co	Cr_2O_3	Cu	Nb_2O_5	NiO	V_2O_5	LOI
236-001	Cabeça	35,50	5,50	16,50	10,70	12,80	6,44	1,82	0,31	2,16	0,23	0,47	0,01	0,03	0,02	0,05	0,04	0,03	6,31
236-031	+10#	32,80	4,85	16,50	11,50	12,50	6,40	1,72	0,30	2,02	0,23	0,40	0,01	0,04	0,03	0,06	0,02	0,06	8,78
236-032	-10#+16#	33,10	4,93	16,70	11,50	12,50	6,32	1,73	0,31	2,06	0,24	0,45	0,01	0,03	0,04	0,06	0,03	0,06	8,49
236-033	-16#+20#	32,00	5,07	18,00	10,90	12,20	6,17	1,70	0,28	1,98	0,22	0,42	0,01	0,04	0,04	0,06	0,03	0,06	9,11
236-034	-20#+28#	33,20	5,10	17,00	10,90	12,20	6,25	1,66	0,29	2,04	0,24	0,45	0,01	0,06	0,07	0,06	0,04	0,06	8,99
236-035	-28#+35#	32,50	5,66	19,50	10,50	11,90	6,16	1,63	0,25	2,00	0,23	0,46	0,01	0,04	0,04	0,06	0,03	0,06	9,44
236-036	-35#+48#	33,10	5,39	17,20	10,80	12,60	6,33	1,64	0,26	2,10	0,25	0,43	0,01	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	9,64
236-037	-48#+65#	32,70	5,31	17,10	11,30	12,40	7,11	1,61	0,25	2,13	0,26	0,50	0,01	0,05	0,03	0,06	0,04	0,05	10,01
236-038	-65#+100#	32,10	5,28	17,20	11,50	12,20	7,72	1,57	0,25	2,11	0,27	0,52	0,01	0,06	0,04	0,07	0,04	0,05	9,35
236-039	-100#+150#	31,50	5,20	17,40	11,70	11,90	8,17	1,56	0,21	2,10	0,27	0,49	0,01	0,06	0,04	0,06	0,04	0,05	9,59
236-040	-150#+200#	31,60	5,24	18,10	11,90	11,90	8,48	1,58	0,23	2,14	0,28	0,52	0,01	0,06	0,04	0,07	0,04	0,05	9,05
236-041	-200#+270#	31,70	5,29	18,20	11,40	11,70	7,79	1,56	0,22	2,13	0,28	0,50	0,01	0,06	0,05	0,05	0,03	0,05	9,66
236-042	-270#+325#	27,80	5,04	24,10	10,10	9,97	10,30	1,82	0,22	1,95	0,44	0,64	0,02	0,17	0,06	0,08	0,05	0,07	8,29
236-043	-325#+400#	30,80	5,31	21,00	10,20	11,20	7,94	1,60	0,22	2,07	0,31	0,50	0,01	0,08	0,06	0,06	0,04	0,05	8,51
236-044	-400#	36,20	5,87	16,40	9,48	12,50	5,39	2,19	0,25	2,17	0,24	0,41	0,01	0,03	0,16	0,05	0,03	0,05	9,18

4.2.2. – Determinação de terras raras pela técnica de espectrometria de massa por plasma acoplado indutivamente (ICP-MS)

Os resultados da análise química do KF para os elementos terras raras (em ppm) e após a normalização para o condrito de Boynton (1984) podem ser verificados na Tabela 16 e estão ilustrados na Figura 17 e Figura 18, respectivamente. Observa-se que, de forma quantitativa, o litotipo contém uma maior predominância de ETRs leves, com uma concentração notável de cério (Ce) e lantânio (La). Por outro lado, os ETRs médios e pesados apresentaram concentrações menores. Essa constatação também foi observada por Melo (2012), a qual mencionou em seu trabalho que os kamafugitos Mata da Corda são enriquecidos em elementos terras raras leves, como lantânio (La), cério (Ce), praseodímio (Pr), neodímio (Nd) e samário (Sm). Esse mesmo padrão foi observado no trabalho de Sgarbi e Gaspar (2002), no qual os autores afirmaram que os kamafugitos e rochas aliadas de Santo Antônio da Barra, em Goiás, são tipicamente enriquecidos em ETRs leves e são hospedados pela perovskita.

Ao normalizar os dados do KF pelo condrito de Boynton (1984), a curva revelou uma diminuição contínua na razão KF/Condrito de Boynton, desde o La até o Lu. Isso sugere que a amostra possui uma concentração maior de ETRs leves em relação aos ETRs pesados, um comportamento típico em muitas rochas ígneas, previamente corroborado pelos dados químicos quantitativos. A inclinação mais suave observada no segmento dos ETRs pesados indica que a amostra não está significativamente enriquecida ou empobrecida nesses elementos em comparação ao condrito. Os valores dos ETRs pesados, que variaram de 7 a 40 vezes o condrito, permaneceram relativamente constantes, contrastando com a variação dos ETRs leves, que apresentaram um enriquecimento de 300 a 1000 vezes. Essa estabilidade reforça a ideia de que os processos geológicos que influenciaram a amostra não tiveram um impacto significativo na distribuição dos ETRs pesados.

Tabela 16 – Resultados da análise química da amostra cabeça do KF (a) ETRs (em ppm) (b) padrão de ETRs normalizados pelo condrito de Boynton (1984).

	(a)	(b)		(a)	(b)
La	259,90	838,39	Ho	1,30	18,11
Ce	505,30	625,37	Er	2,99	14,24
Pr	58,27	477,62	Tm	0,34	10,49
Nd	200,20	333,67	Yb	1,80	8,61
Sm	28,90	148,21	Lu	0,23	7,14
Eu	7,36	100,14	Y	30,82	18,11
Gd	17,43	67,30	Th	27,20	14,24
Tb	1,94	40,93	U	5,90	10,49
Dy	8,64	26,83			

Figura 17 – Composição química de ETRs da amostra cabeça do KF.

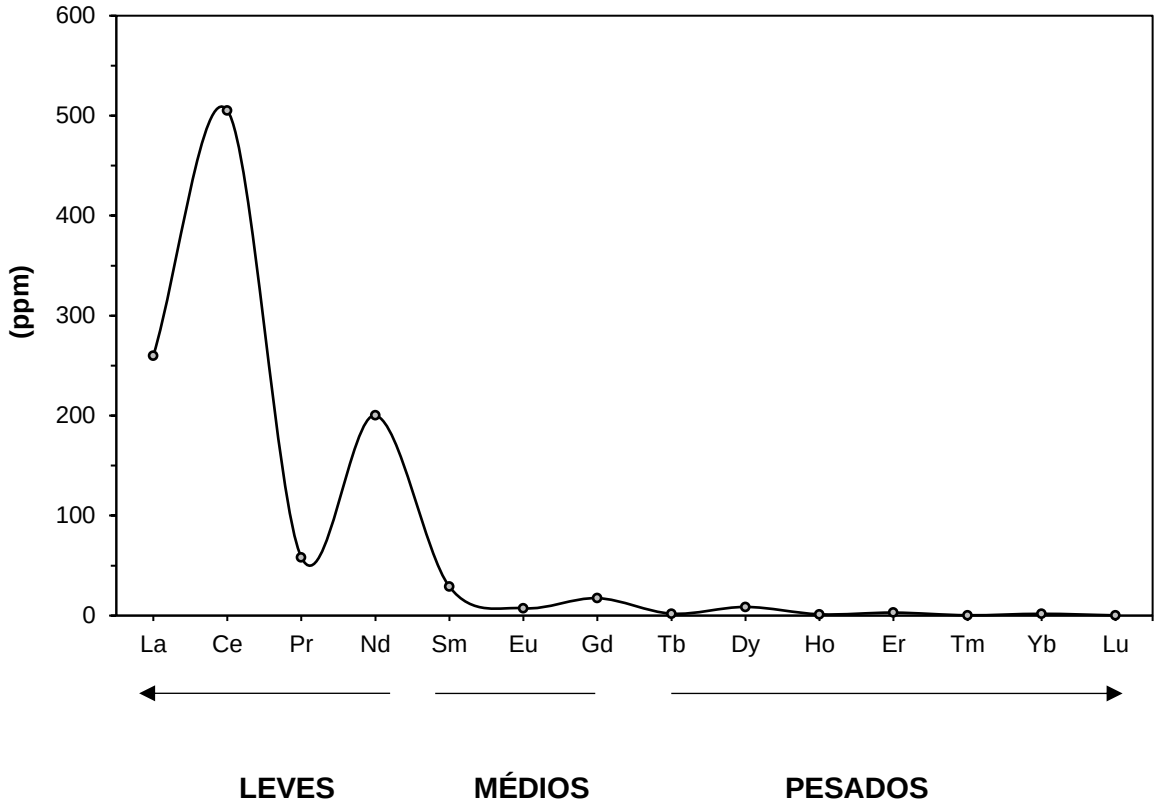
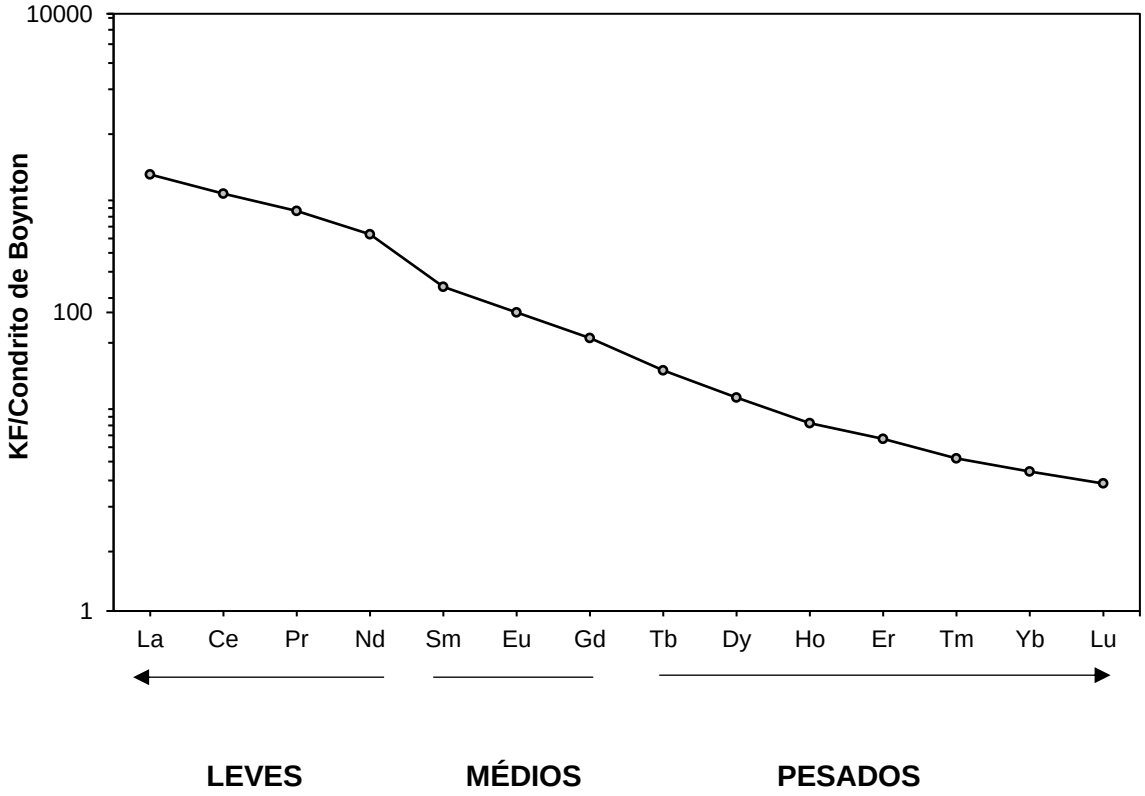
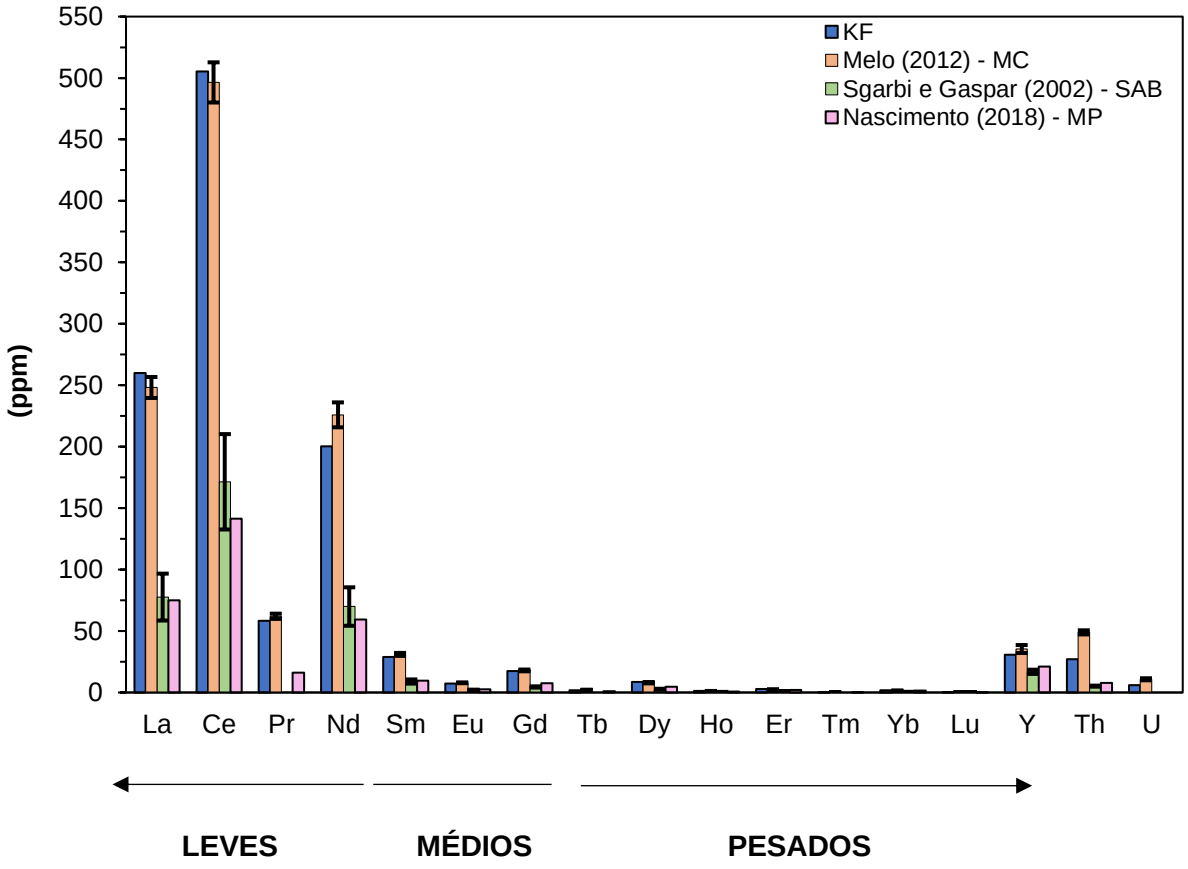


Figura 18 – Padrão de ETRs normalizado pelo condrito de Boynton (1984).



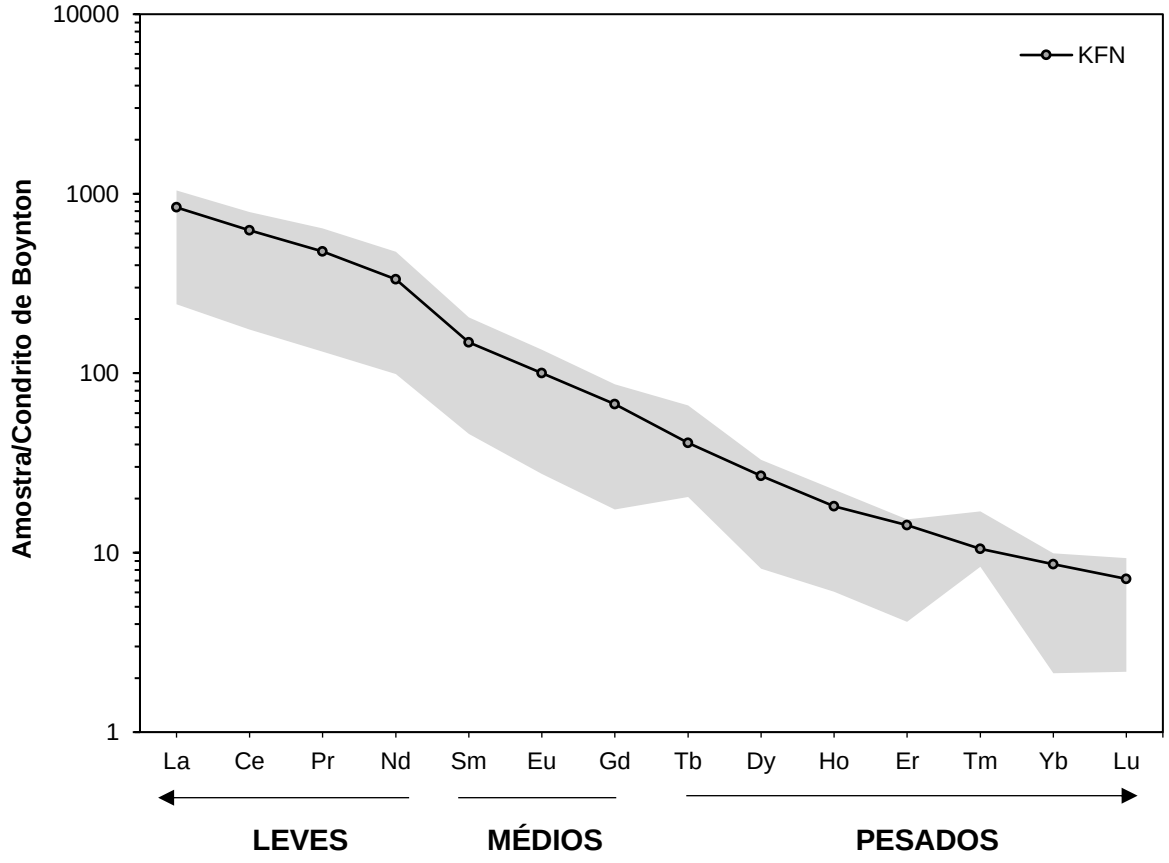
A Figura 19 apresenta um comparativo entre a composição química quantitativa dos elementos terras raras do KF em relação a outros kamafugitos da mesma região e de outro estado brasileiro. É possível notar que o KF apresentou resultados de ETRs bastante similares aos das amostras de mafurito do estudo de Melo (2012), o que era previsível, dado que o município de origem do KF é semelhante ao do estudo mencionado. A análise sugere que os elementos La, Ce, e Nd são predominantemente elevados nas amostras dos conjuntos KF e Melo (2012), indicando que esses conjuntos de dados representam amostras majoritariamente formadas por ETRs leves. Os outros elementos apresentaram concentrações baixas e menores variações, sugerindo que, embora estejam presentes, eles não dominaram a composição das amostras. Por outro lado, o KF mostrou teores mais elevados de ETRs para quase todos os elementos quando comparado aos kamafugitos de Santo Antônio da Barra e do Morro Preto, ambos localizados no mesmo estado. Esses dois kamafugitos do estado de Goiás apresentaram composições similares que são distintas das amostras KF e Melo (2012), possivelmente indicando diferentes condições de formação ou diferentes fontes de material.

Figura 19 – Comparação da composição química dos ETRs do KF em relação a outros kamafugitos. MC: Grupo Mata da Corda-MG, SAB: Santo Antônio da Barra-GO e MP: Morro Preto-GO.



A Figura 20 ilustra uma comparação entre o padrão de ETRs normalizado pelo condrito de Boynton (1984) do KF e os valores máximos e mínimos de ETRs normalizados pelo mesmo condrito para kamafugitos brasileiros. As análises indicam que o padrão de ETRs do KF, quando normalizado, mostra um enriquecimento nos ETRs leves em comparação aos ETRs pesados, evidenciado pela inclinação descendente da curva. Esse comportamento é consistente com o padrão observado em outros kamafugitos brasileiros, sugerindo que a amostra de KF está dentro da normalidade, sem mostrar enriquecimento ou empobrecimento anômalo, conforme representado pela linha preta posicionada entre a faixa cinza.

Figura 20 – Comparação entre o padrão de ETRs do KF normalizado (KFN) pelo condrito de Boynton (1984) em relação aos dados máximos e mínimos de ETRs normalizados pelo condrito de Boynton (1984) de kamafugitos brasileiros.



Os resultados da análise química dos ETRs da amostra cabeça e das frações do KF britado em 6# (3,36 mm) estão apresentados na Tabela 17 e na Figura 21. É possível notar que, independentemente da fração analisada, os ETRs leves (La, Ce, Pr, Nd, Sm) apresentam concentrações significativamente mais altas em comparação com os ETRs médios e pesados, sendo Ce, La e Nd os elementos que mais se destacam, nesta ordem. As frações intermediárias a finas (100# a 325#) demonstraram uma predominância mais significativa de ETRs, independentemente de serem leves ou pesados.

Figura 21 – Composição química dos ETRs da amostra cabeça e do KF britado por fração.

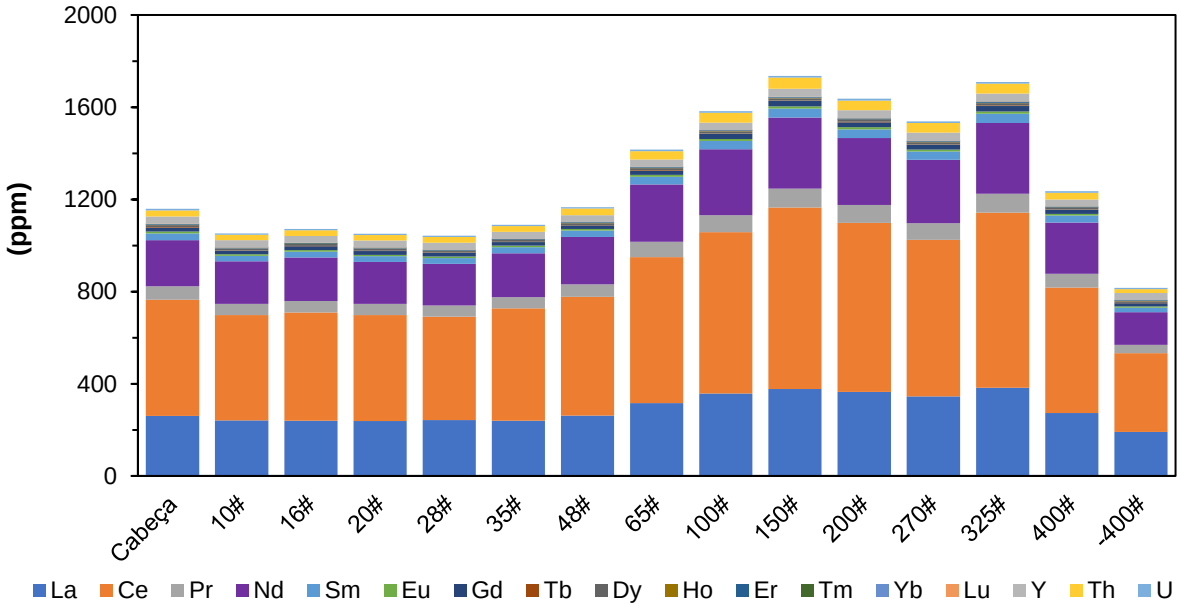


Tabela 17 – Resultados da análise química da amostra cabeça e do KF britado por fração referente aos ETRs (em ppm).

Código	Amostra	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Th	U
236-001	Cabeça	259,90	505,30	58,27	200,20	28,90	7,36	17,43	1,94	8,64	1,30	2,99	0,34	1,80	0,23	30,82	27,20	5,90
236-031	+10#	241,00	456,80	49,42	183,50	24,70	6,12	15,39	1,62	7,48	1,09	2,47	0,28	1,60	0,12	31,41	23,80	5,88
236-032	-10#+16#	240,30	468,80	50,24	188,90	25,00	6,34	16,56	1,74	7,99	1,12	2,66	0,31	1,60	0,12	29,56	24,90	5,96
236-033	-16#+20#	238,60	458,70	48,63	182,60	25,00	6,19	16,18	1,70	7,68	1,11	2,63	0,29	1,60	0,13	29,89	24,30	5,90
236-034	-20#+28#	242,40	448,70	48,27	181,20	25,10	6,02	15,43	1,59	7,20	1,10	2,50	0,29	1,60	0,14	30,45	24,50	5,73
236-035	-28#+35#	240,00	486,50	49,64	190,20	26,50	6,05	15,45	1,63	7,79	1,11	2,54	0,27	1,60	0,10	29,19	25,20	5,64
236-036	-35#+48#	261,70	515,70	54,43	205,10	27,70	6,34	16,27	1,63	7,68	1,08	2,58	0,27	1,40	0,10	29,74	29,20	5,62
236-037	-48#+65#	315,80	633,30	67,52	248,40	33,40	7,55	18,99	1,96	8,51	1,23	2,69	0,28	1,60	0,13	31,27	37,00	6,30
236-038	-65#+100#	357,10	700,50	74,13	286,30	35,70	8,58	21,53	2,14	9,12	1,22	2,84	0,30	1,70	0,14	31,90	43,10	6,55
236-039	-100#+150#	376,70	787,40	82,28	308,70	39,30	9,45	22,84	2,25	9,54	1,35	3,00	0,32	1,70	0,13	34,54	49,30	7,06
236-040	-150#+200#	365,20	733,30	76,95	290,90	37,70	8,91	21,14	2,25	9,63	1,23	2,94	0,30	1,70	0,10	33,99	43,00	6,99
236-041	-200#+270#	345,20	679,20	72,40	275,40	35,10	8,41	20,80	2,11	9,56	1,33	2,84	0,32	1,70	0,11	34,70	41,70	6,96
236-042	-270#+325#	383,20	759,80	81,18	306,70	40,80	9,68	23,71	2,47	10,45	1,43	3,36	0,35	1,80	0,13	34,13	42,70	7,33
236-043	-325#+400#	273,60	543,20	59,95	222,40	30,20	7,24	17,67	1,89	8,02	1,09	2,82	0,31	1,60	0,12	29,72	29,30	6,05
236-044	-400#	190,70	342,20	36,56	140,60	20,10	4,97	13,56	1,58	7,22	1,07	2,74	0,33	1,70	0,14	30,88	15,80	5,24

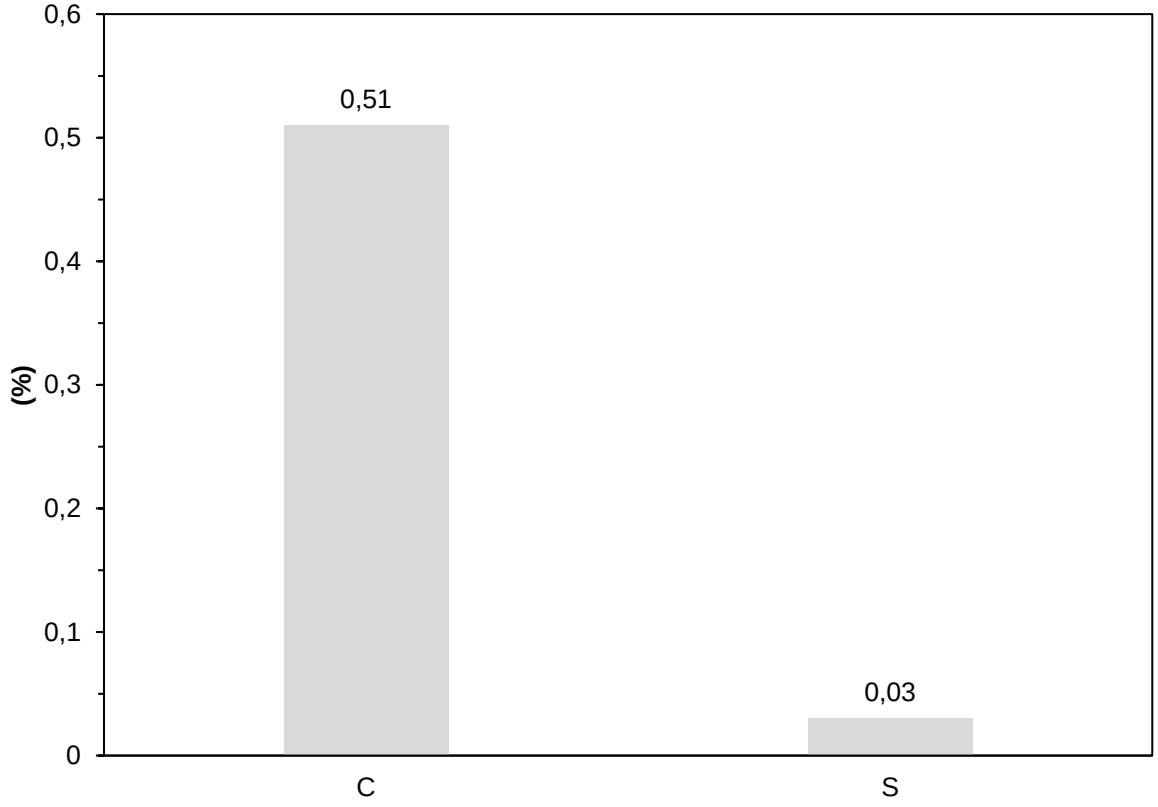
4.2.3. – Determinação de Carbono e/ou Enxofre Totais por Infravermelho – LECO

Os resultados da análise química para determinação de carbono (C) e enxofre (S) estão apresentados na Tabela 18 e na Figura 22. O material é composto por 0,51% de C e 0,03% de S. O enxofre está próximo ao valor de 0,04% reportado nos trabalhos de Nascimento (2018) e Stoppa, Woolley e Cundari (2002), os quais estudaram kamafugitos do estado de Goiás e da Itália, respectivamente.

Tabela 18 – Resultados da análise química de C e S da amostra cabeça referente ao KF (em %).

C	0,51	S	0,03

Figura 22 – Composição química de carbono e enxofre da amostra cabeça referente ao KF.



4.3. – Caracterização mineralógica

Na seção de caracterização mineralógica foram detalhados os resultados oriundos da norma CIPW, difração de raios X, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e liberação e associação mineral.

4.3.1. – Norma CIPW

Os resultados do cálculo da norma CIPW estão apresentados na Tabela 19. A conversão das análises químicas de rocha total em minerais normativos, com base na norma CIPW, mostra uma boa correlação com os dados petrográficos. O diopsídio, que representa 26,78% da composição normativa, se destaca como um dos minerais mais presentes, reforçando a natureza máfica da rocha kamafugítica. A ausência de quartzo é coerente com o perfil descrito na literatura sobre kamafugitos, que os caracteriza como rochas ígneas ultramáficas e alcalinas, marcadas por sub-saturação em sílica. Em rochas desse tipo, a quantidade de sílica livre é insuficiente para que o quartzo se forme, uma vez que minerais como olivina, piroxênios (diopsídio e hiperstênio) e feldspatoides consomem a sílica disponível no processo de cristalização.

Tabela 19 – 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

4.3.2. – Difração de raios X

Os resultados da análise de difração de raios X da amostra de KF estão apresentados no difratograma da Figura 23. Na fração total, foram identificadas as seguintes fases: diopsídio, calcita, apatita (fluorapatita), perovskita, titanita, mica (biotita), magnetita e montmorillonita. Conforme a quantificação pelo método de refinamento de Rietveld, os minerais predominantes na amostra global foram o diopsídio (24,8%) e a calcita (21,2%). Outros minerais apareceram em menores quantidades, como a apatita (12,9%), perovskita (9,4%), titanita (9,0%), magnetita (8,9%), mica (8,3%) e montmorillonita (5,6%), resultados que são consistentes com a análise química. É importante ressaltar que os resultados têm um caráter orientativo, pois não foi realizada a quantificação do material amorfo, o que pode levar a variações nas proporções mencionadas, especialmente considerando que o kamafugito é uma rocha ígnea vulcânica e que pode conter material amorfo (vidro vulcânico) em sua composição.

Dos quatro minerais mais representativos no KF, três coincidem com os relatados no estudo de kamafugito de Figueiredo *et al*. (2018): diopsídio, fluorapatita e perovskita. De acordo com Melo (2012) e Sgarbi, Gaspar e Valença (2000), os mafuritos são compostos por Mg-olivina, diopsídio, perovskita, titano-magnetita, flogopita e apatita. Os uganditos têm uma composição mineralógica similar aos mafuritos, diferenciando-se pela presença de pseudomorfos de leucita e uma menor quantidade de olivina. Portanto, com base nessas informações, há indícios de que a amostra de KF seja um mafurito.

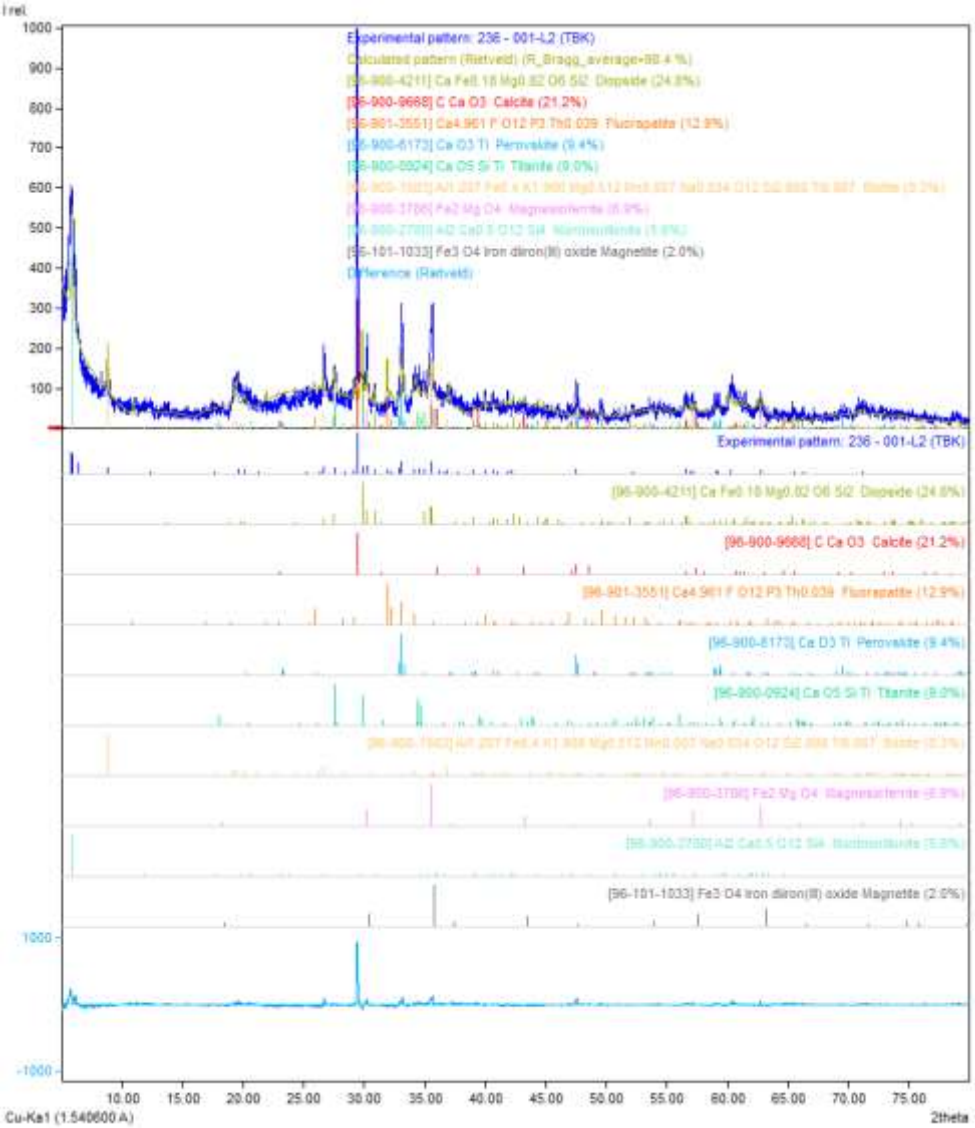
O Quadro 4 apresenta um resumo com as principais características dos minerais que constituem o KF.

Quadro 4 – Minerais presentes no KF.

Mineral	Fórmula	Características
Diopsídio	$CaMg(Si_2O_6)$	Mineral pertencente à classe dos silicatos e ao grupo dos inossilicatos e ao subgrupo dos piroxênios, composto basicamente por cálcio, magnésio e silício (UNESP, 2024a). Ele pode apresentar variações na sua composição devido à presença de outros elementos, como ferro, cromo e manganês. É um mineral mais raro, típico de alguns tipos de rochas ígneas alcalinas e de mármores (UFRGS, 2024a).
Calcita	$CaCO_3$	Mineral pertencente à classe dos carbonatos e ao grupo da calcita, composto basicamente por cálcio, carbono e oxigênio (UNESP, 2024b). Trata-se de um carbonato extremamente comum, muito importante como formador de rocha, ocorrendo em sedimentos e em rochas ígneas, metamórficas e sedimentares (UFRGS, 2024b).
Apatita	$Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$	Refere-se a um mineral e a um grupo de minerais classificados como fosfatos, constituídos principalmente por fosfato de cálcio, com possíveis quantidades significativas de flúor, cloro e hidróxido. As apatitas são minerais acessórios importantes em muitos tipos de rochas, incluindo ígneas, metamórficas e sedimentares. Como grupo, apresentam uma composição altamente variável devido à capacidade de suportar diversas substituições complexas em sua estrutura (USP, 2024a).
Perovskita	$CaTiO_3$	Óxido mais raro, é um minério de titânio. É encontrada como mineral acessório em rochas ígneas máficas, ultramáficas e alcalinas, como sienitos nefelínicos, piroxenitos, melilitolitos e lamprófiros. Nas rochas plutônicas alcalinas estão concentradas as variedades com ETRs (UFRGS 2024c).
Titanita	$CaTiOSiO_4$	A titanita é pertencente à classe dos silicatos e ao grupo do nesosilicatos (UNESP, 2024c). A titanita é um mineral acessório muito comum em diversos tipos de rochas ígneas. Em rochas ígneas plutônicas, é mais frequentemente encontrada em dioritos, sienitos, monzonitos, tonalitos e granodioritos, normalmente associada a um

		anfibólio esverdeado. Cristais grandes de titanita são encontrados em pegmatitos e também ocorrem em fendas tectônicas do tipo alpino. Em rochas vulcânicas, é mais comum em fonolitos. A titanita não ocorre em gabros e basaltos, pois o titânio nessas rochas se concentra na titanoaugita e na ilmenita, respectivamente. É também um mineral comum em ijolitos (UFRGS, 2024d).
Magnetita	Fe_3O_4	Mineral pertencente à classe dos óxidos e ao grupo do espinélio (UNESP, 2024d) e apresenta um forte magnetismo (USP, 2024b).
Mica (biotita)	$K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	Mineral pertencente à classe dos silicatos e ao grupo das micas (UNESP, 2024e). É um dos principais e mais comuns minerais formadores de rocha. Como muitos filossilicatos, apresenta uma grande variação composicional devido às diversas substituições que ocorrem em seus múltiplos sítios (USP, 2024c).
Montmorillonita	$(Na,Ca)_{0,3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2$	Mineral pertencente à classe dos silicatos e ao grupo dos argilominerais (UNESP, 2024f).

Figura 23 – Padrão de difratograma da amostra KF com os picos identificados.

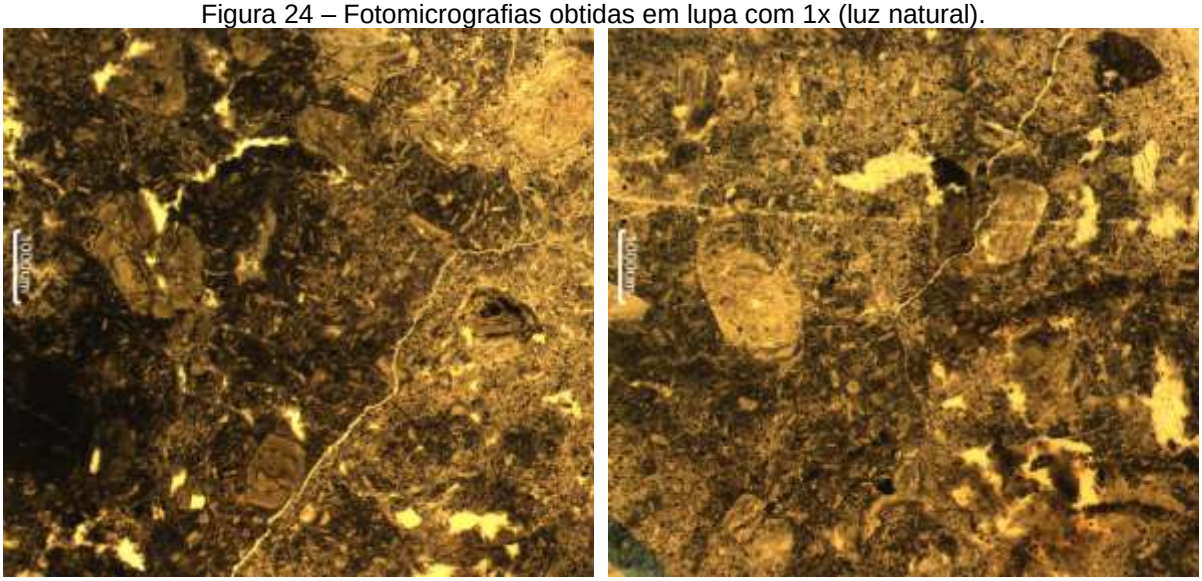


4.3.3. – Microscopia óptica

A Figura 24 apresenta uma imagem obtida em lupa. De forma geral, observa-se um material com granulação variada, onde predomina uma matriz afanítica composta por cristais muito finos. Dispersos nesta matriz, observam-se grãos faneríticos finos. A textura predominante é porfirítica, caracterizada por fenocristais dispostos em uma matriz fina. Os grãos pretos e opacos visíveis na imagem sugerem a presença de óxidos de ferro, comuns em kamafugitos. Além disso, é possível identificar fenocristais maiores, possivelmente de perovskita e piroxênio. As áreas de cor mais clara podem indicar a presença de minerais secundários, como calcita e argilas, resultantes de processos de alteração.

Essa definição está em consonância com Melo (2012), a qual menciona que os mafuritos apresentam fenocristais de olivina e piroxênio dispersos em uma matriz afanítica, apresentam textura inequigranular porfirítica com matriz fanerítica fina (< 1 mm), sendo os cristais idiomorfos a alotriomorfos. Complementando, Boulhosa, Melo e Fernandes (2019) estudaram kamafugitos da mesma região e observaram que as rochas analisadas apresentaram uma heterogeneidade granulométrica, caracterizada pela presença de fenocristais dispersos em uma matriz de granulação fina, o que coincide com as observações deste estudo. Ademais, os autores afirmam que os kamafugitos consistem de Mg-olivina, diopsídio, perovskita, minerais opacos, flogopita e apatita. Eles explicam que a olivina, perovskita e clinopiroxênio foram provavelmente os primeiros minerais a se cristalizarem, o que é atestado pela maior granulação e faces bem formadas, corroborando a observação de que os fenocristais podem ser desses minerais mencionados.

Figura 24 – Fotomicrografias obtidas em lupa com 1x (luz natural).



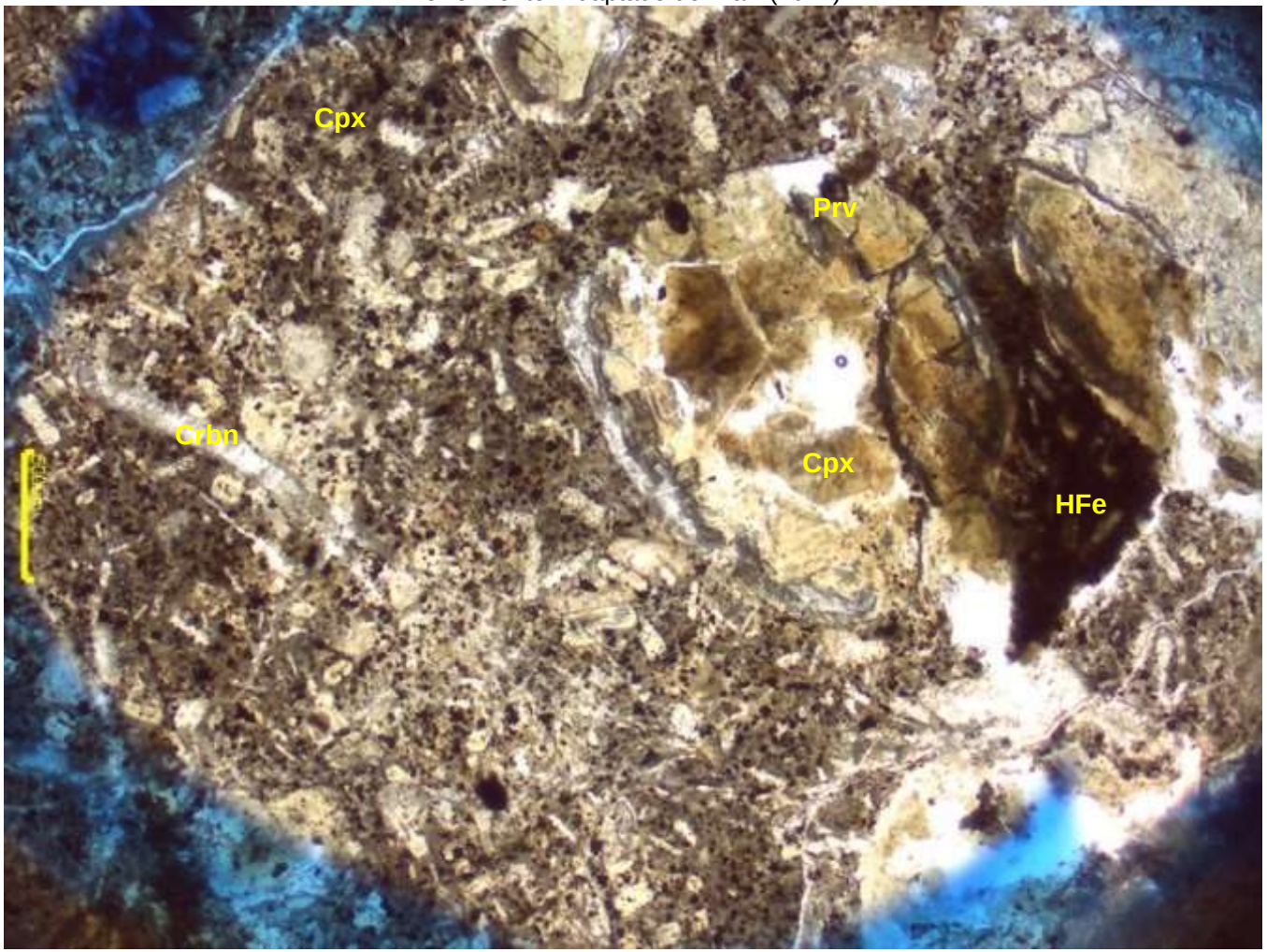
A Figura 25 apresenta imagens do KF obtidas em microscópio óptico. A Figura 25a destaca a complexidade textural e mineralógica do kamafugito, evidenciando uma matriz afanítica com fenocristais dispersos e a presença de óxidos de ferro (partículas pretas). A textura porfirítica é marcada por fenocristais de perovskita, que são euédricos e de tamanho intermediário, e por piroxênios, que incluem o maior grão observado e outros menores. As áreas alteradas, contendo veios de carbonato (calcita), refletem os processos geológicos complexos que moldaram esta rocha. Além disso, observa-se a presença de hidróxido de ferro (marrom) envolvendo o fenocristal de piroxênio, contribuindo para a riqueza textural da amostra. Esta textura de recobrimento pode impactar processos de concentração específicos de superfície para o diopsídio.

A Figura 25b apresenta um relicto de grão cujo núcleo é de piroxênio, e esse fenocristal, que confere à rocha uma textura porfirítica, foi alterado para carbonato e hidróxido de ferro. A Figura 25c apresenta três fenocristais de piroxênio variando entre cerca de 200 µm a 1200 µm e formas bem definidas, euédricos. As áreas marrons visíveis na imagem são atribuídas a hidróxido de ferro, que envolve os fenocristais e preenche as fraturas. De maneira similar à observada na Figura 25a, as partículas pretas indicam a presença de óxidos de ferro finos, com aproximadamente 50 µm. Por fim, é possível observar a presença de perovskita (marrom) no meio da lâmina, caracterizada por seu relevo acentuado em comparação aos hidróxidos de ferro.

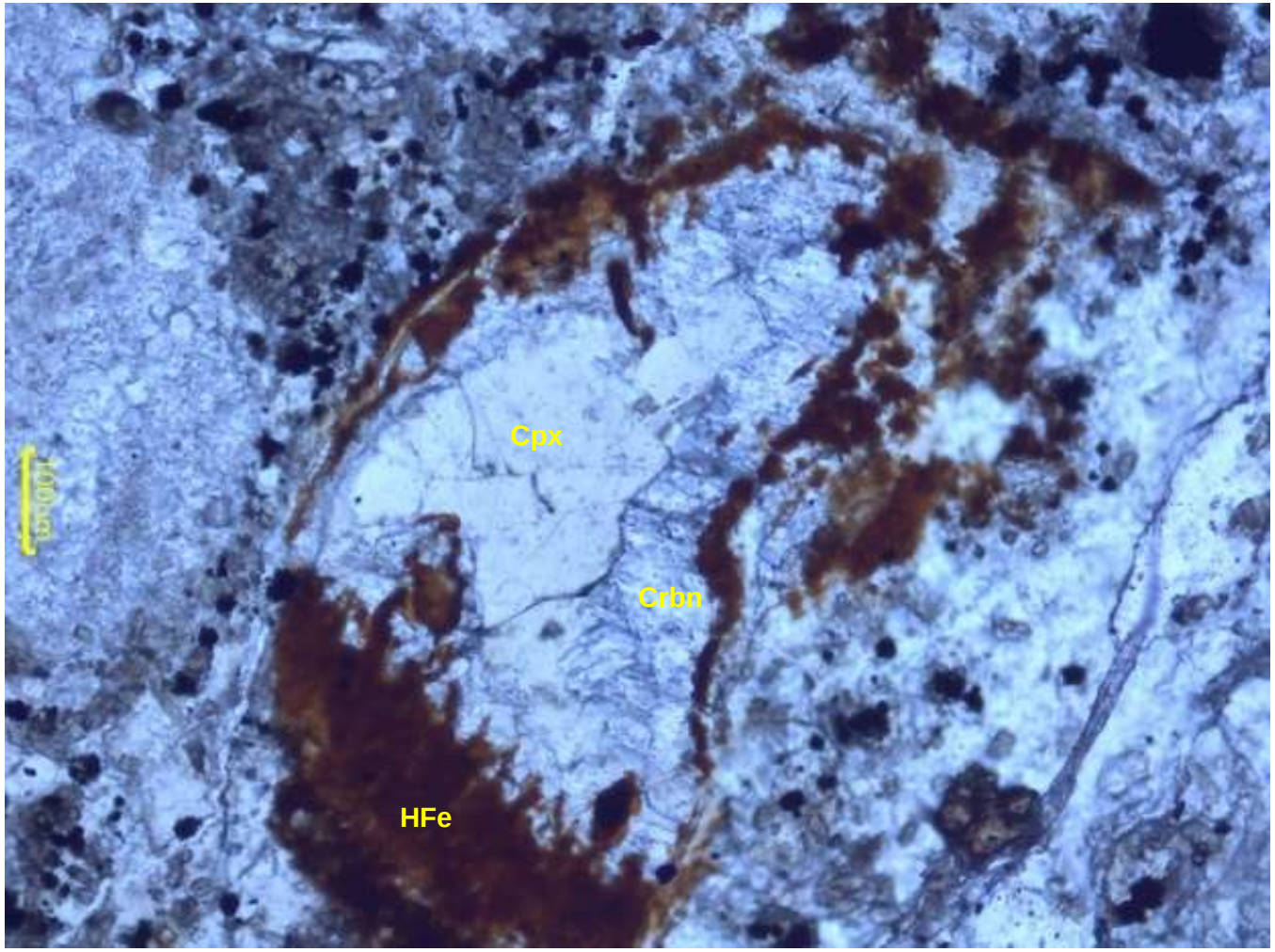
A Figura 25d apresenta uma matriz fanerítica fina com óxidos de ferro finos distribuídos e fenocristais de perovskita e piroxênio (euédricos ou subédricos). A Figura 25e representa um grão de piroxênio bastante alterado, com hidróxido de ferro nas bordas e com núcleo diferenciado. A Figura 25f apresenta uma matriz com granulação predominantemente afanítica, sobre a qual estão dispersos grãos faneríticos finos de óxido de ferro (pretos) e grãos finos de mica e feldspatos alterados. Além disso, observa-se a presença de fenocristais de perovskita e piroxênio, sendo que este último pode estar alterado para carbonatos e hidróxidos de ferro.

As observações estão em consonância com as características dos kamafugitos estudados por Nascimento *et al*. (2019), os quais mencionam que o kamafugito trata-se de uma rocha de coloração cinza escura, ultramáfica, porfirítica, holocristalina e inequigranular, de composição ultrapotássica, composta por fenocristais euédricos a subeuédricos de olivina, clinopiroxênio (diopsídio) e flogopita, inseridos em uma matriz afanítica contendo microcristais de clinopiroxênio, flogopita, apatita, feldspatóides e magnetita.

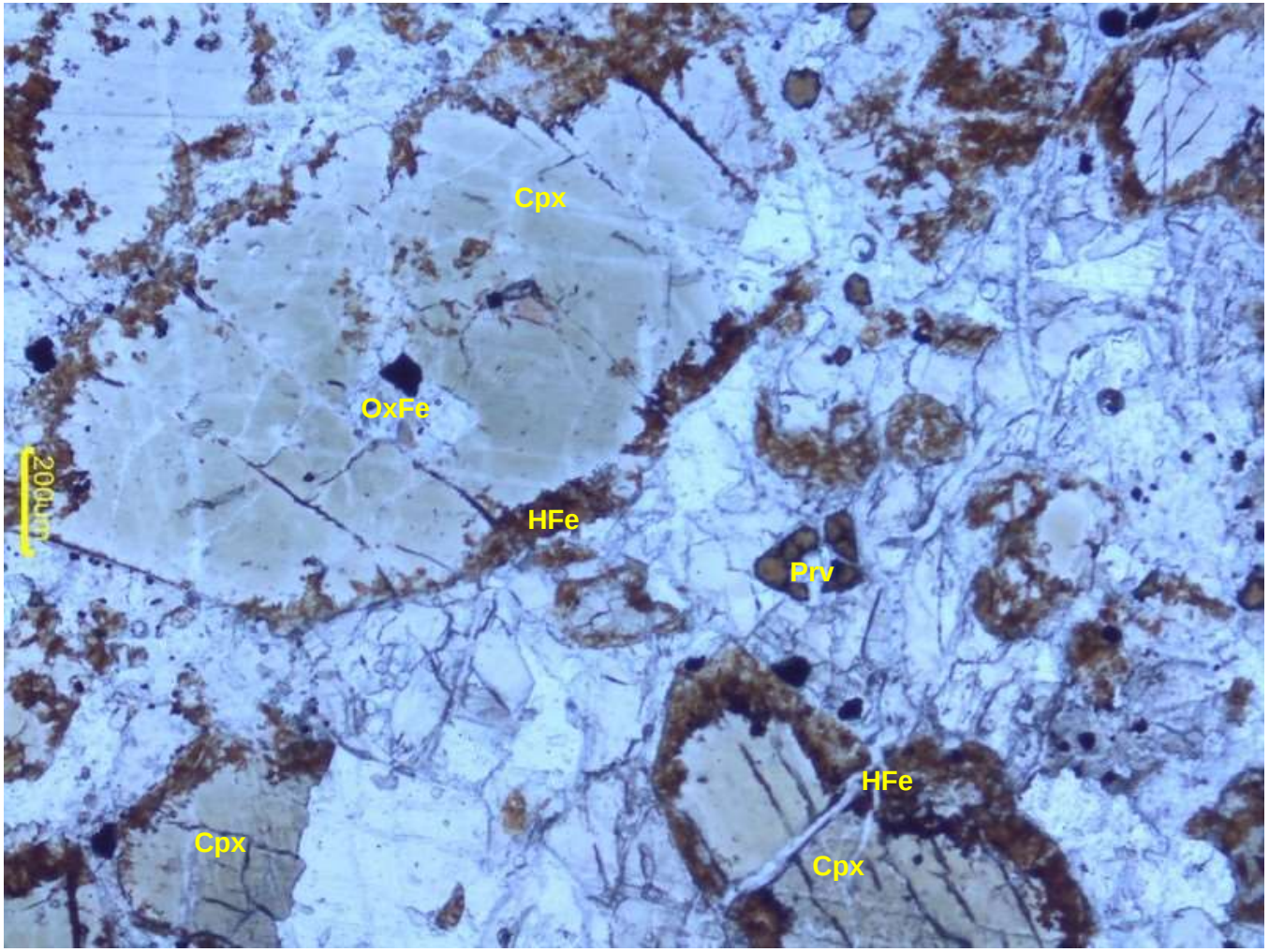
Figura 25 – Fotomicrografias do KF sob o microscópio óptico. Crbn: carbonato; Prv: perovskita; Cpx: clinopiroxênio; HFe: hidróxido de ferro; OxFe: óxido de ferro. Fonte: Adaptado de Warr (2021).



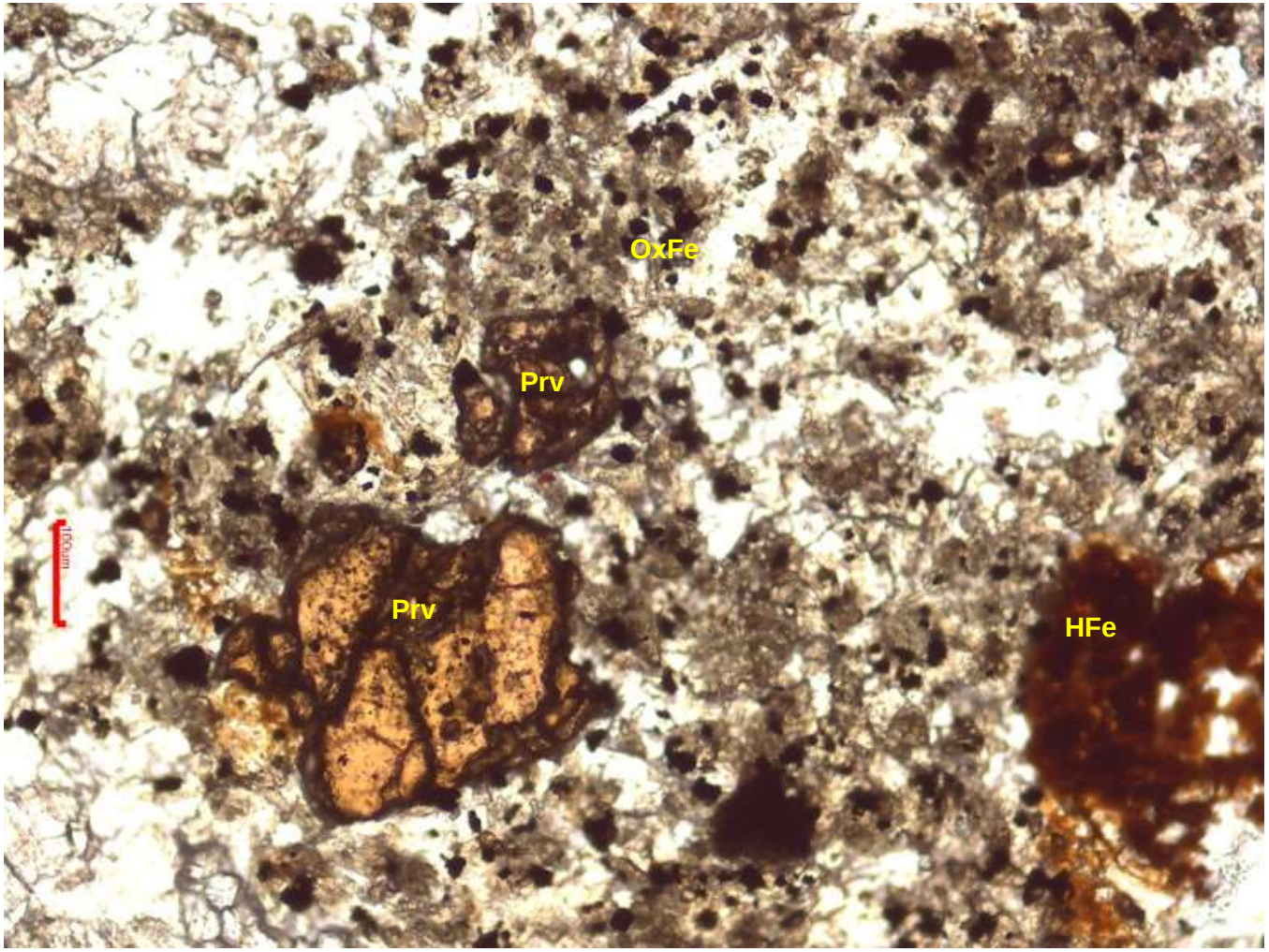
(a)



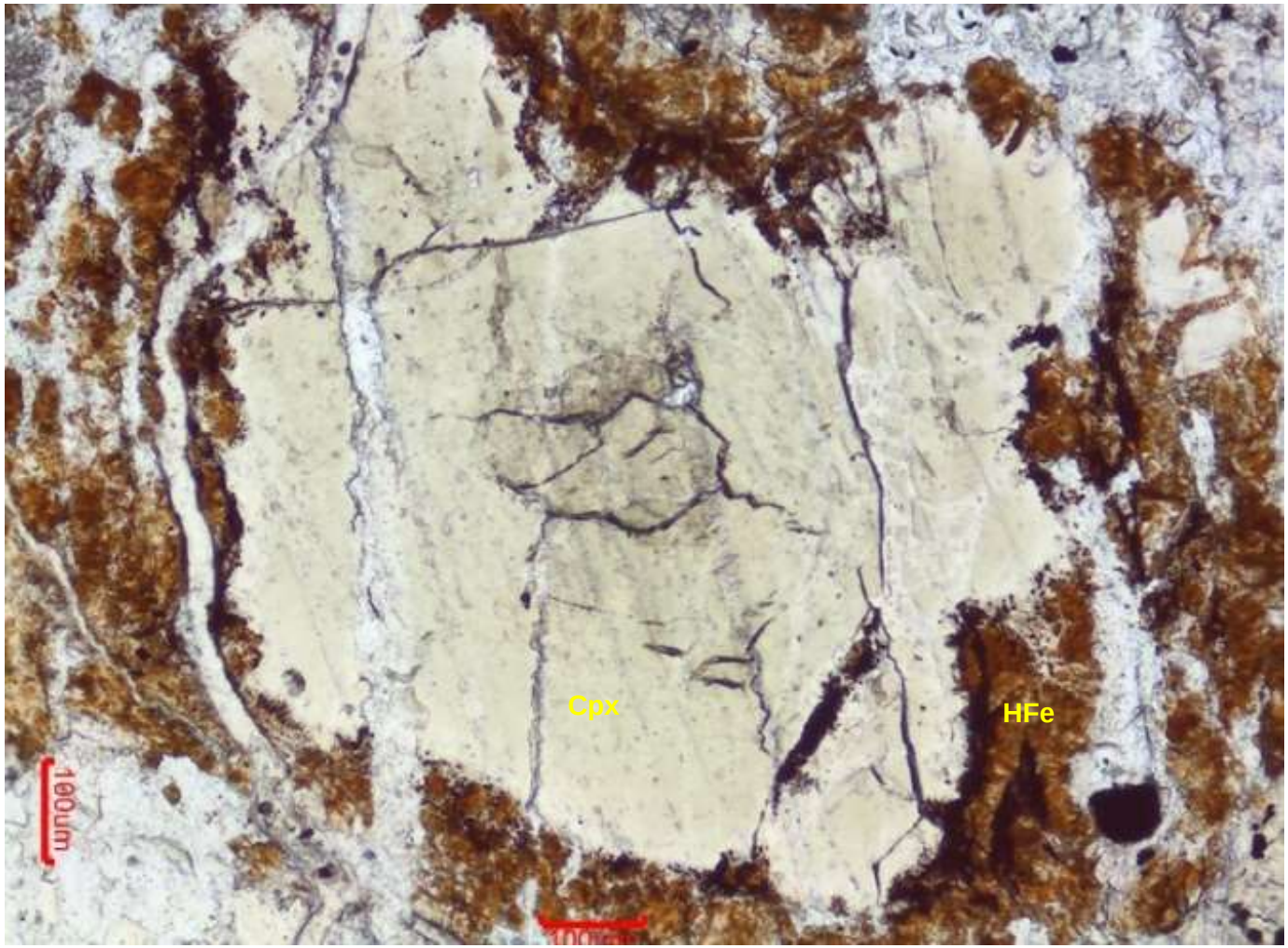
(b)



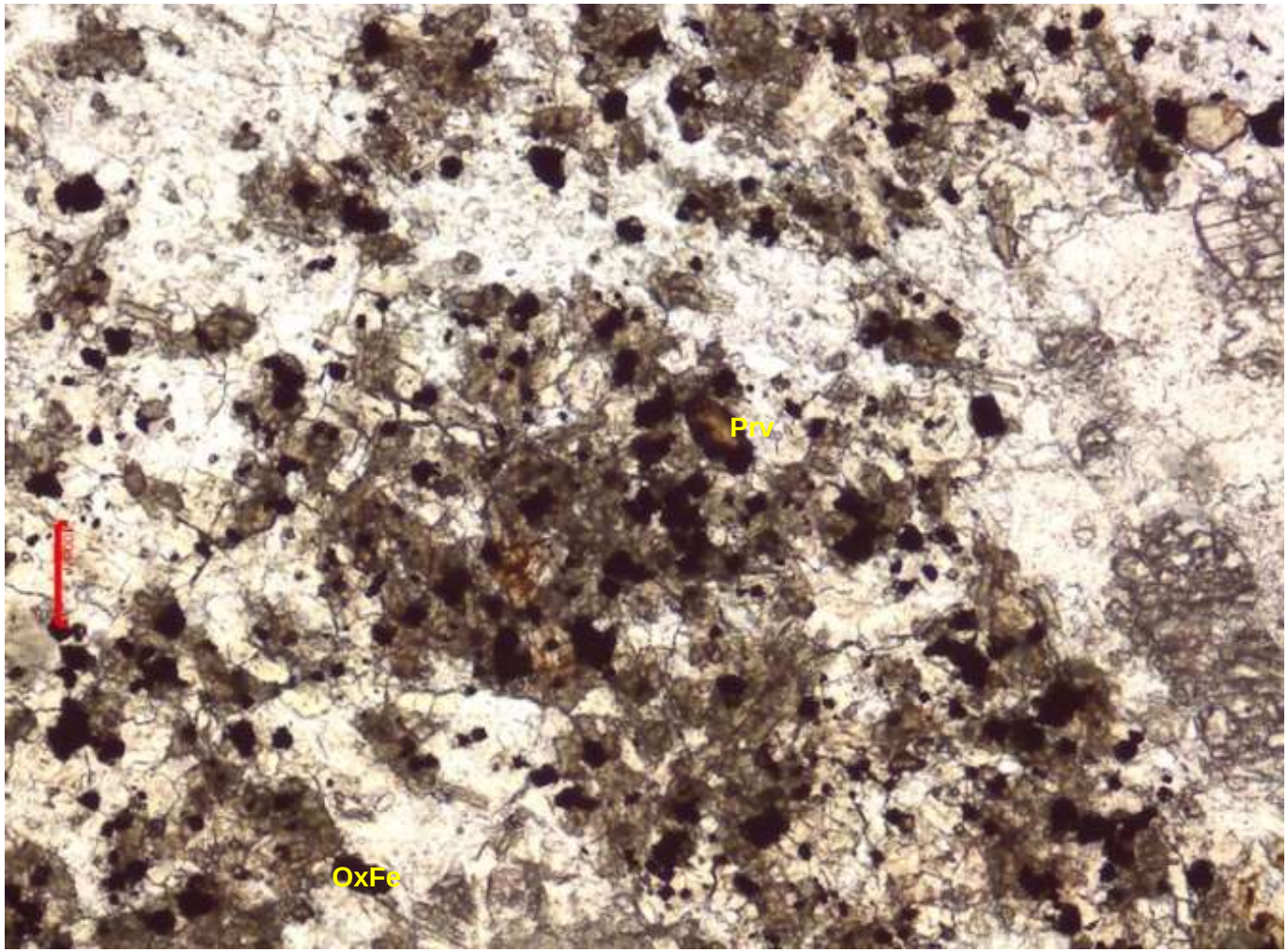
(c)



(d)



(e)



(f)

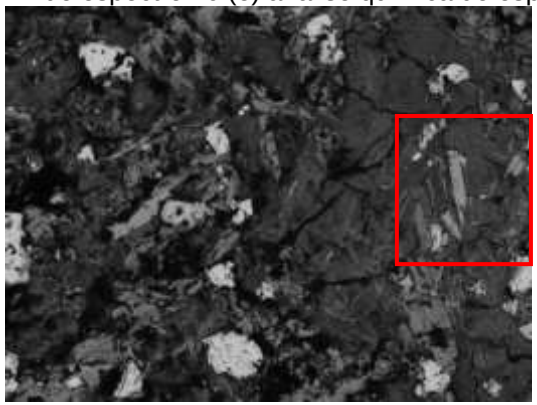
4.3.4. – Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Os resultados obtidos por microscopia eletrônica de varredura são apresentados entre a Figura 26 e a Figura 27. A combinação das imagens de MEV, da análise EDS e dos mapas de distribuição dos elementos químicos oferece uma visão detalhada da composição e distribuição elementar do KF. A análise EDS, quando associada às imagens de MEV, permite identificar e caracterizar as diferentes fases minerais presentes, oferecendo informações importantes para a caracterização mineralógica do material. Para complementar essa análise, o conjunto de mapeamentos elementares é especialmente útil na visualização da heterogeneidade química e estrutural da amostra.

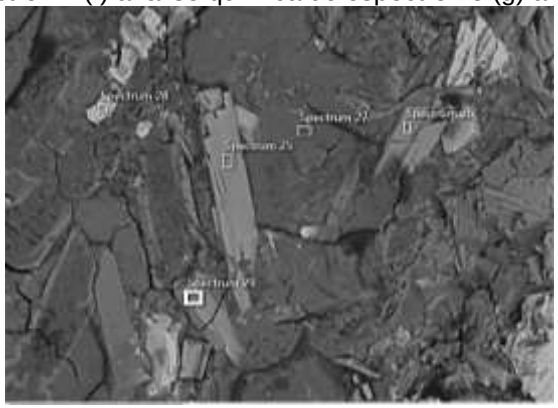
A morfologia dos minerais observada nas imagens obtidas por MEV evidencia características texturais que corroboram com aquelas descritas na discussão dos dados de microscopia óptica e são típicas de rochas ígneas ultramáficas alcalinas. As micrografias mostram a presença de grandes cristais imersos em uma matriz fina, indicando uma textura porfirítica. Essa variação no tamanho dos grãos é característica de rochas alcalinas, que frequentemente cristalizam em condições de subsaturação de sílica.

Dos cinco espectros analisados na Figura 26, três (25, 26 e 29) sugerem fortemente a presença de apatita, um mineral portador de fósforo, conforme observado na literatura (Webmineral, 2024a). A Figura 27 aponta para a presença de um mineral de titânio, com os espectros 21, 22, 23 e 24 indicando a possível presença de perovskita (Webmineral, 2024b), ambos em proporções consistentes com as mencionadas na literatura.

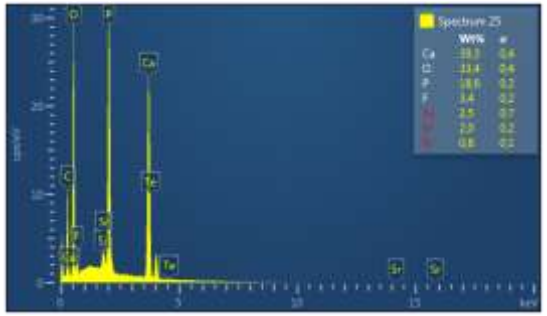
Figura 26 – Imagens de MEV-EDS (a) Região com os minerais analisados (b) Pontos de espectro EDS (c) análise química do espectro 25 (d) análise química do espectro 26 (e) análise química do espectro 27 (f) análise química do espectro 28 (g) análise química do espectro 29 (h) mapa químico por EDS.



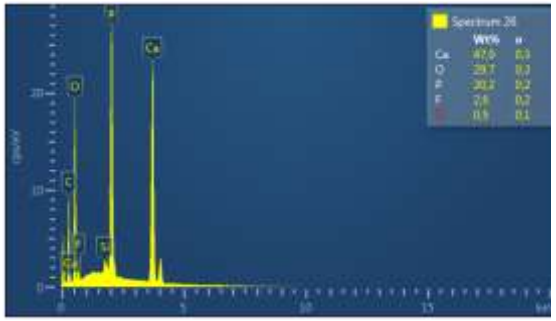
(a)



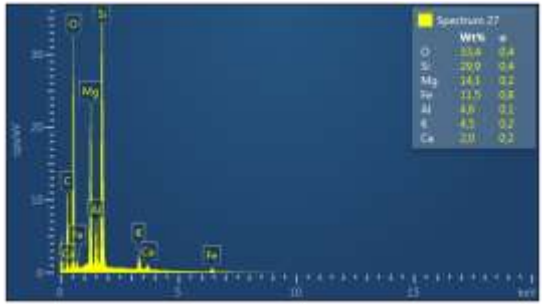
(b)



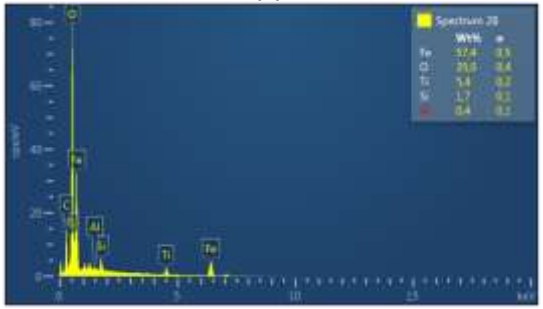
(c)



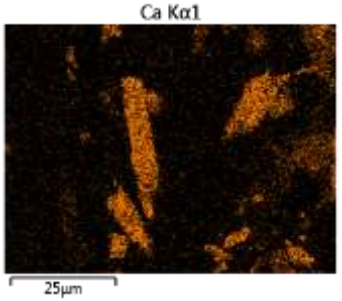
(d)

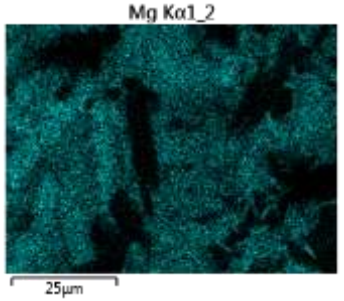


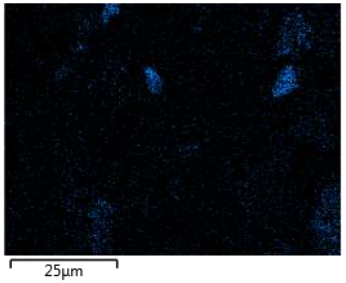
(e)

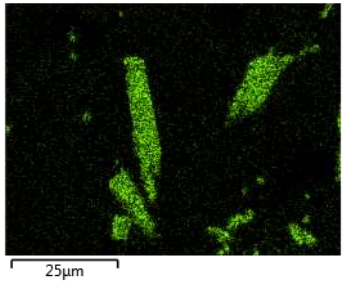


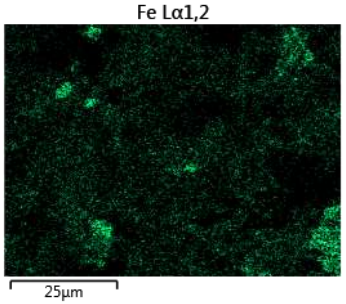
(f)

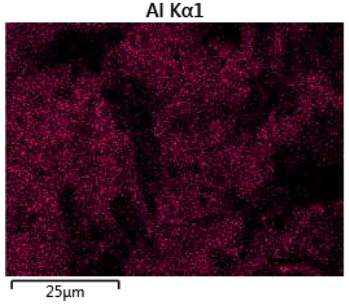


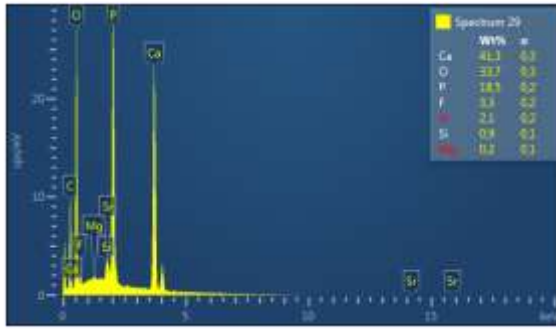




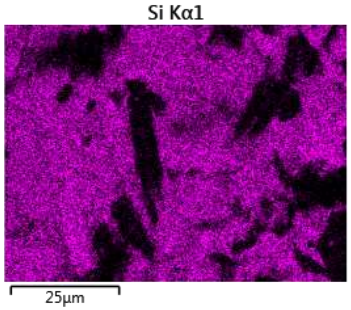


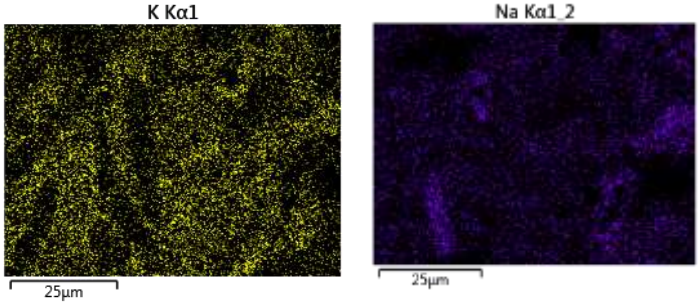






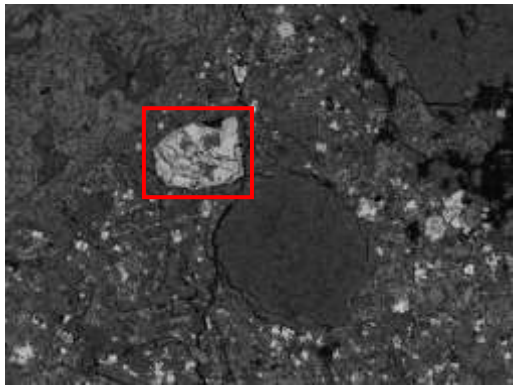
(g)



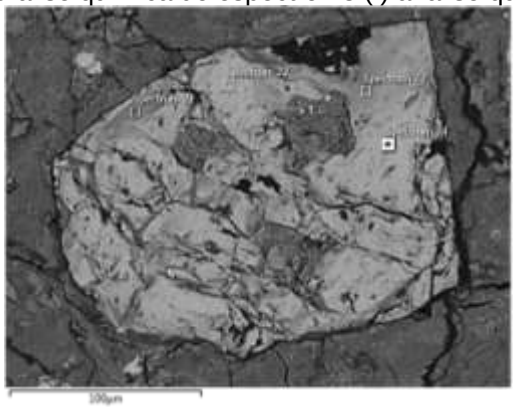


(h)

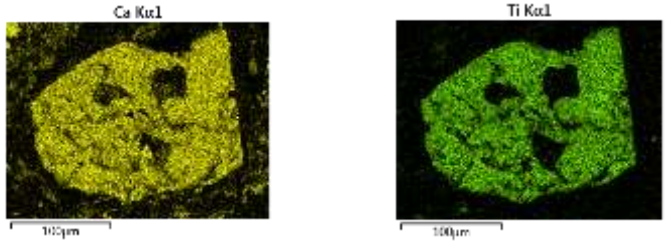
Figura 27 – Imagens de MEV-EDS (a) Região com os minerais analisados (b) Pontos de espectro EDS (c) análise química do espectro 21 (d) análise química do espectro 22 (e) análise química do espectro 23 (f) análise química do espectro 24 (g) mapa químico por EDS.

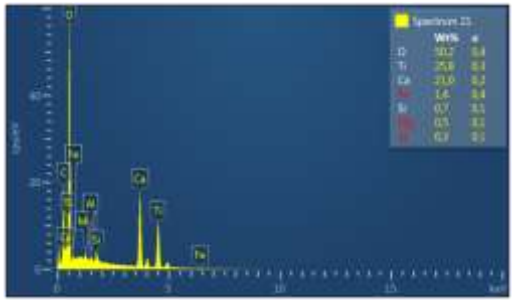


(a)

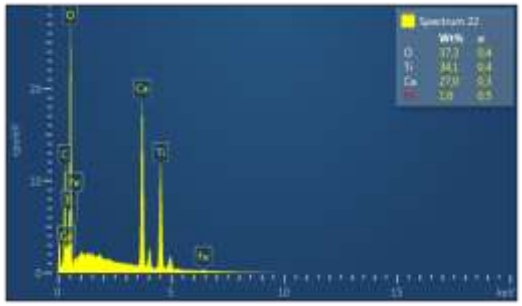


(b)

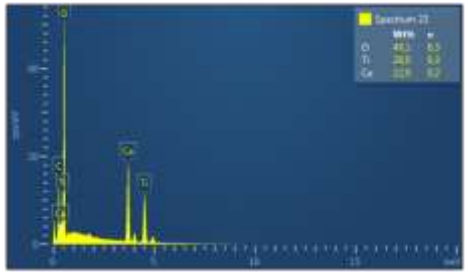




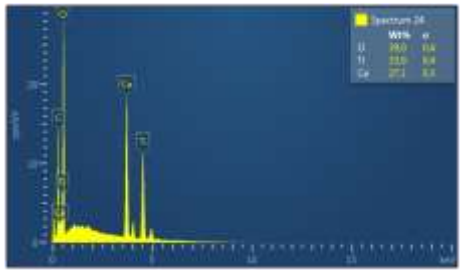
(c)



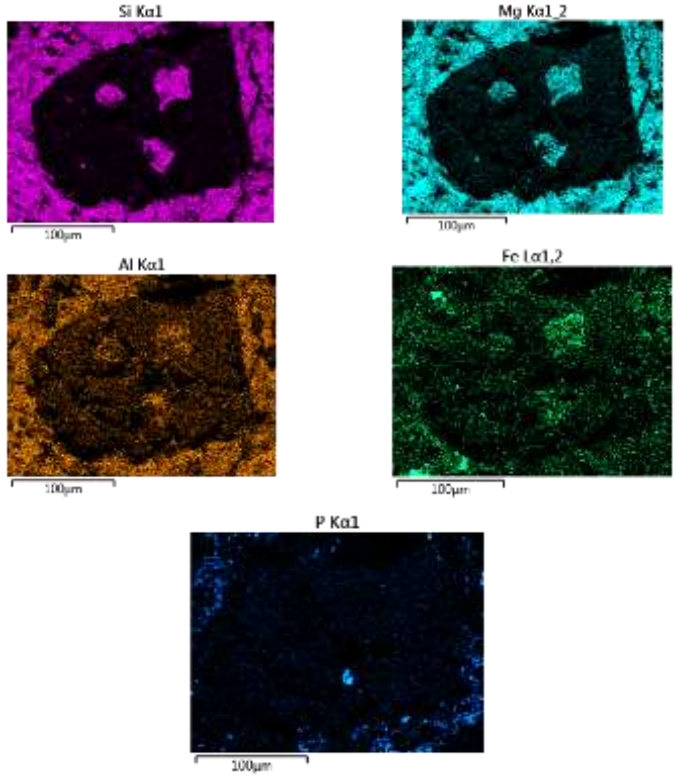
(d)



(e)



(f)



(g)

4.3.5. – Liberação e associação mineral (MEV/AMICS)

a) Mineralogia modal

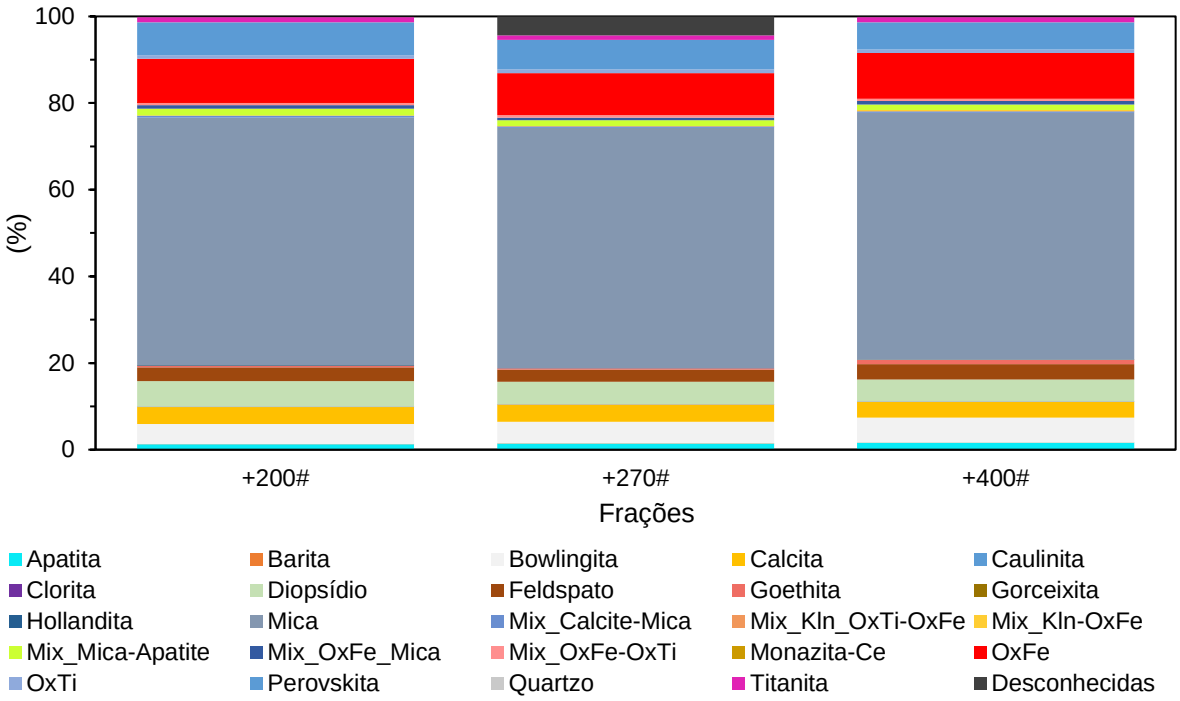
A Figura 28 apresenta a mineralogia modal do litotipo kamafugito fresco para as frações -150#+200# (-0,106 mm+0,075 mm) -200#+270# (-0,075 mm+0,053 mm) e -270#+400# (-0,053 mm+0,038 mm), destacando a distribuição percentual de diferentes minerais em cada fração granulométrica. No decorrer da discussão dos resultados, cada uma dessas frações analisadas foi descrita como +200#, +270# e +400# para facilitar a compreensão dos resultados.

As frações granulométricas (+200#, +270# e +400#) mostraram uma composição mineralógica bastante uniforme, com variações mínimas nas proporções de minerais presentes, o que indica uma distribuição homogênea e ausência de segregação preferencial ao longo das frações analisadas. Os óxidos de ferro destacam-se como os componentes predominantes, provavelmente devido à alta concentração de magnetita, conforme confirmado pelos resultados obtidos através da análise de DRX, seguida pela presença de goethita. Em relação aos minerais contendo titânio, a perovskita apresentou-se em quantidades significativas, sendo reconhecida como o principal portador de Ti, conforme também foi corroborado pela análise de DRX. A titanita também está presente como um mineral portador de Ti, porém em proporções menos consideráveis, junto a outros óxidos de Ti. No que diz respeito aos minerais contendo fósforo, a apatita lidera como o principal mineral portador desse elemento, com a gorceixita aparecendo em proporções menos expressivas. Por fim, a mica aparece como o principal mineral portador de K, sendo a fase com maior predominância nas três frações avaliadas. Como minerais de ganga destaca-se a presença das micas em maior proporção, seguida de feldspatos e diopsídio.

Destaca-se a presença expressiva de bowlingita, que possivelmente consiste em um conjunto de finos cristais placoides ou fibrosos, possivelmente formados a partir da alteração dos minerais máficos. Desta forma, esta fase representaria a alteração das olivinas da rocha, o que justificaria a ausência deste mineral na amostra analisada. Além disso, a presença de bowlingita estaria de acordo com a presença de argila, montmorilonita (pertencente ao grupo das smectitas), observado na análise de DRX. Esse mineral apresenta características marcantes, como baixos teores de magnésio, ferro e titânio, além de uma quantidade moderada de alumínio e altos níveis de silício. Essa composição ressalta a complexidade mineralógica observada nas análises petrográficas. Embora a diferenciação precisa desse mix mineral não seja possível, é razoável inferir que fases minerais com composições

semelhantes devem exibir comportamentos análogos nos processos de concentração, sejam eles gravíticos, magnéticos ou por flotação.

Figura 28 – Proporção dos minerais nas frações +200#, +270# e +400# no litotipo KF (% peso).



b) Distribuição elementar

Os elementos químicos presentes nas amostras encontram-se distribuídos nas diferentes fases minerais (Tabela 20, Tabela 21 e Tabela 22), atuando tanto como componentes principais quanto como elementos traço. Compreender como esses elementos de interesse estão distribuídos é essencial para definir a melhor abordagem de concentração. As análises da Figura 29 indicam que não há variações expressivas nas fases que carregam Ti entre as diferentes frações do mesmo litotipo. O Ti se encontra predominantemente na perovskita, com participação significativa também em óxidos como OxTi, OxFe, titanita e misturas de OxTi e OxFe. A distribuição dessas fases ao longo das frações granulométricas é bastante uniforme, com apenas pequenas variações na proporção. Já o P está concentrado majoritariamente na apatita, seguido pela mistura de mica e apatita e monazita, sendo que a contribuição do primeiro mineral aumenta à medida em que a granulometria reduz.

As análises da Figura 30 indicam que não há variações expressivas nas fases que carregam Fe entre as diferentes frações do mesmo litotipo. O Fe se encontra predominantemente nos OxFe, com participação significativa também nas micas e na goethita. A distribuição dessas fases ao longo das frações granulométricas é bastante

uniforme, com apenas pequenas variações na proporção. O Ce, La e Nd encontra-se predominantemente na monazita nas três frações avaliadas.

Figura 29 – Distribuição do titânio (à esquerda) e do fósforo (à direita) nas frações +200#, +270# e +400# da amostra KF.

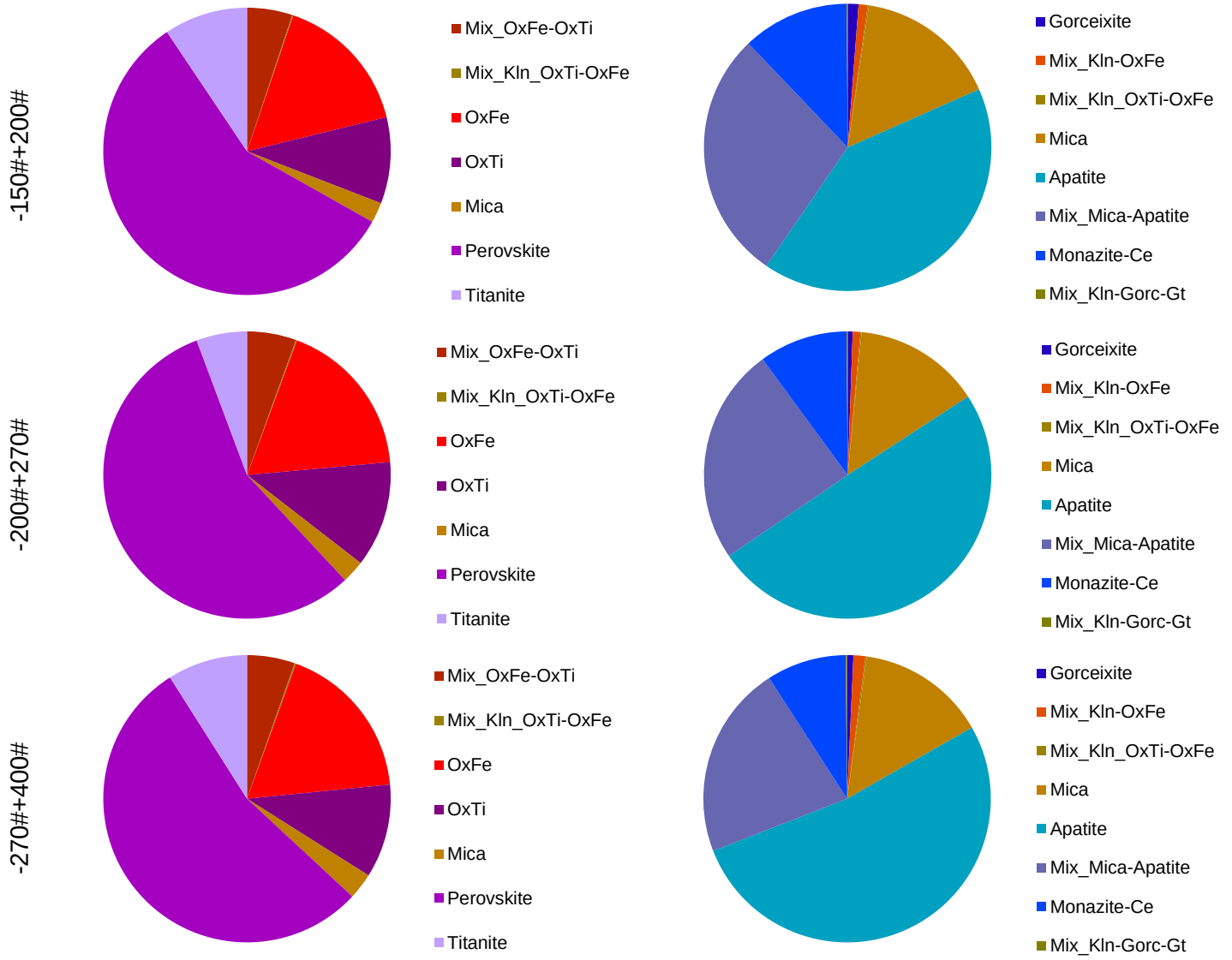


Figura 30 – Distribuição do ferro (à esquerda) e do cério, lantânio e neodímio (à direita) nas frações +200#, +270# e +400# da amostra KF.

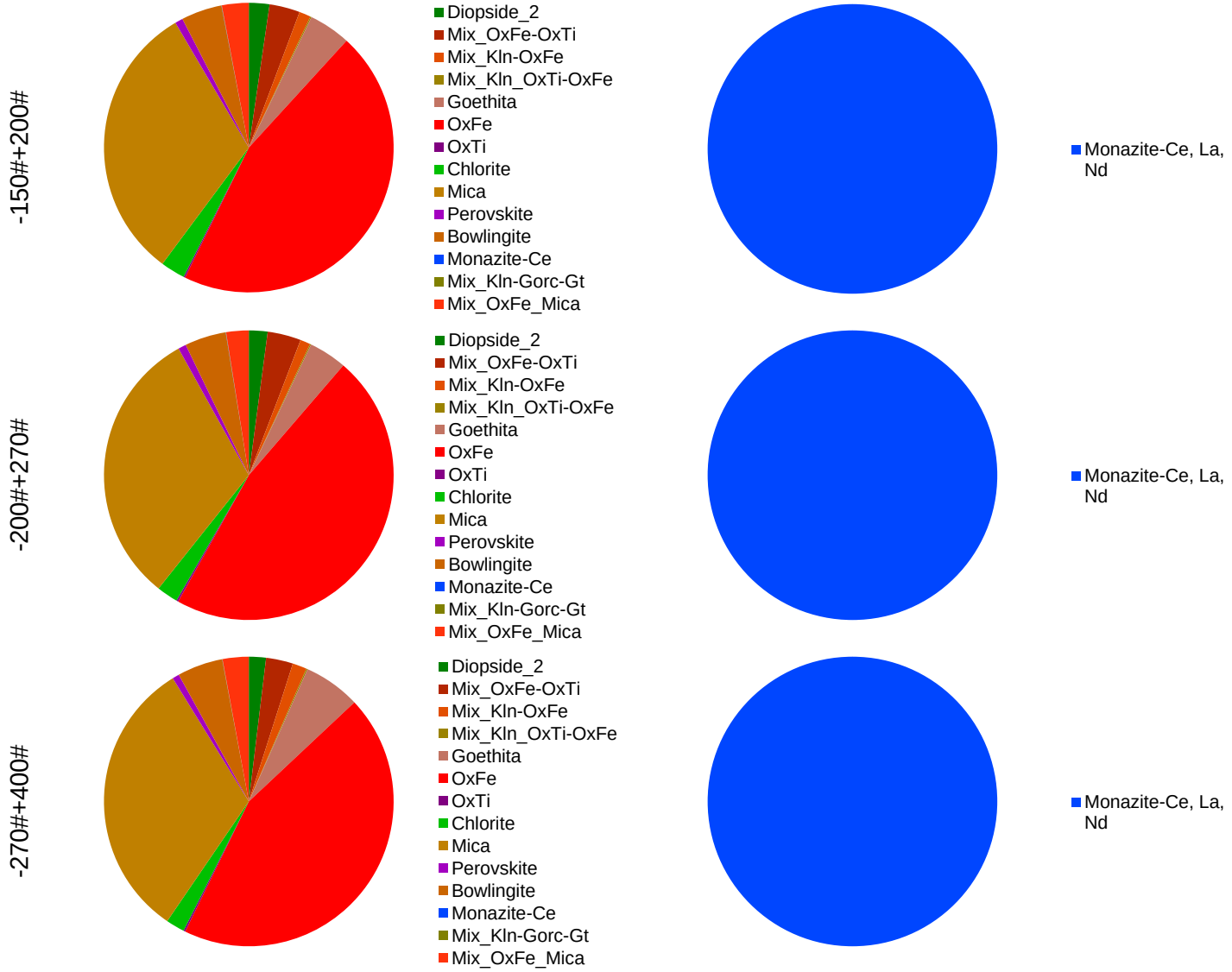


Tabela 20 – Distribuição do titânio, fosforo, ferro e do cério, lantânio e neodímio na fração +200# da amostra KF.

	Diopside_2	Mix_OxFe-OxTi	Mix_Kln-OxFe	Mix_Kln_OxTi-OxFe	Goethita	OxFe	OxTi	Chlorite	Mica	Perovskite	Bowlingite	Monazite-Ce	Mix_Kln-Gorc-Gt	Mix_OxFe_Mica
Fe	2,3	3,4	1,29	0,14	4,66	45,48	0,17	2,74	31,37	0,88	4,54	0,02	0,03	2,99
	Gorceixite	Mix_Kln-OxFe	Mix_Kln_OxTi-OxFe	Mica	Apatite	Mix_Mica-Apatite	Monazite-Ce	Mix_Kln-Gorc-Gt						
P	1,21	1,02	0,14	16,01	41,2	28,3	12,02	0,11						
	Mix_OxFe-OxTi	Mix_Kln_OxTi-OxFe	OxFe	OxTi	Mica	Perovskite	Titanite							
Ti	5,1	0,12	15,95	9,71	2,28	57,43	9,4							
	Monazite-Ce		Monazite-La		Monazite-Nd									
Ce	100	La	100	Nd	100									

Tabela 21 – Distribuição do titânio, fosforo, ferro e do cério, lantânio e neodímio na fração +270# da amostra KF.

	Diopside_2	Mix_OxFe-OxTi	Mix_Kln-OxFe	Mix_Kln_OxTi-OxFe	Goethita	OxFe	OxTi	Chlorite	Mica	Perovskite	Bowlingite	Monazite-Ce	Mix_Kln-Gorc-Gt	Mix_OxFe_Mica
Fe	2,09	3,73	1,13	0,13	4,23	46,81	0,21	2,38	31,23	0,89	4,61	0,02	0,03	2,51
	Gorceixite	Mix_Kln-OxFe	Mix_Kln_OxTi-OxFe	Mica	Apatite	Mix_Mica-Apatite	Monazite-Ce	Mix_Kln-Gorc-Gt						
P	0,56	0,87	0,12	14,26	49,66	24,45	9,96	0,12						
	Mix_OxFe-OxTi	Mix_Kln_OxTi-OxFe	OxFe	OxTi	Mica	Perovskite	Titanite							
Ti	5,53	0,13	17,91	11,93	2,56	56,26	5,7							
	Monazite-Ce		Monazite-La		Monazite-Nd									
Ce	100	La	100	Nd	100									

Tabela 22 – Distribuição do titânio, fosforo, ferro e do cério, lantânio e neodímio na fração +400# da amostra KF.

	Diopside_2	Mix_OxFe-OxTi	Mix_Kln-OxFe	Mix_Kln_OxTi-OxFe	Goethita	OxFe	OxTi	Chlorite	Mica	Perovskite	Bowlingite	Monazite-Ce	Mix_Kln-Gorc-Gt	Mix_OxFe_Mica
Fe	1,91	3,01	1,58	0,15	6,35	44,24	0,2	2,08	31,67	0,77	5,08	0,01	0,03	2,91
	Gorceixite	Mix_Kln-OxFe	Mix_Kln_OxTi-OxFe	Mica	Apatite	Mix_Mica-Apatite	Monazite-Ce	Mix_Kln-Gorc-Gt						
P	0,71	1,33	0,16	14,55	52,33	21,8	8,97	0,15						
	Mix_OxFe-OxTi	Mix_Kln_OxTi-OxFe	OxFe	OxTi	Mica	Perovskite	Titanite							
Ti	5,38	0,16	17,88	10,54	2,95	54,07	9							
	Monazite-Ce		Monazite-La		Monazite-Nd									
Ce	100	La	100	Nd	100									

c) Associação mineral

Os resultados da associação mineralógica podem ser visualizados na Figura 31. Os dados indicam que a distribuição das superfícies livres dos minerais foi bastante variada, sem seguir uma tendência clara de aumento ou diminuição conforme a redução do tamanho das partículas. Observou-se uma forte associação dos minerais com as micas, com exceção da gorceixita e das frações +200# e +270# de monazita.

Os óxidos de titânio exibiram uma superfície livre entre 45% e 60%, sendo majoritariamente associados às micas, seguidos pelos óxidos de ferro e pela perovskita. A perovskita, principal portadora de Ti, teve uma superfície livre entre 30% e 40%, com maior exposição nas frações mais finas, e mostrou-se predominantemente associada às micas, além de diopsídio, óxidos de ferro, óxidos de titânio e titanita.

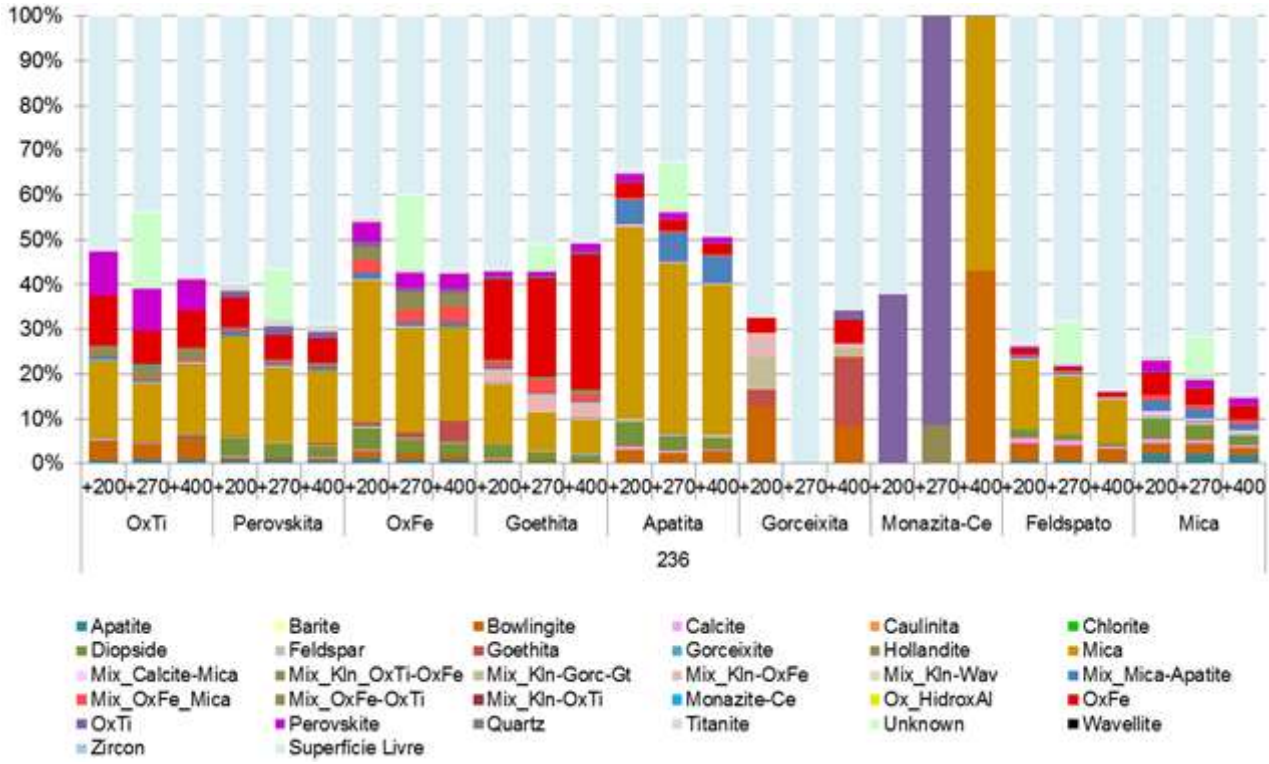
Os óxidos de ferro apresentaram superfícies livres entre 40% e 55%, com maior exposição nas frações mais finas, assim como a perovskita. A maior associação foi com micas, seguidas por perovskita e diopsídio, e em menor grau com misturas de óxidos de ferro e mica, além de óxidos de titânio.

A goethita, por sua vez, apresentou maior superfície livre nas frações mais grossas, associada principalmente a óxidos de ferro e micas. Já a apatita, com até 50% de superfície livre nas frações finas, foi fortemente associada às micas, além de misturas de mica e apatita, e em menor grau a diopsídio, bownligita, óxidos de ferro e perovskita.

A gorceixita e a monazita não se associaram às micas. A gorceixita apresentou 100% de superfície livre na fração +270#, com 60% nas outras frações, associada a bownligita, goethita e uma mistura de caulinita, gorceixita e goethita, além de óxidos de ferro. Para a monazita, a superfície livre foi observada apenas na fração +200# com 60%, e associou-se principalmente ao óxido de titânio e, em menor escala, à mica e bownligita nas frações mais finas.

Os feldspatos tiveram uma superfície livre variando entre 70% e 80%, com maior exposição nas frações finas, e se associaram principalmente às micas, com uma redução da associação à medida que o tamanho das partículas diminuiu. As micas mostraram associação significativa com diversos minerais, especialmente apatita, óxidos de ferro e diopsídio, com superfície livre entre 75% e 85%.

Figura 31 – Associação dos minerais em partículas livres (azul claro) e associados a outras fases na amostra KF.



d) Liberação mineral

O cálculo da liberação considera a proporção do mineral de interesse em partículas mistas e liberadas. Usualmente, os resultados são obtidos em classes de liberação. Para facilitar o entendimento da liberação das fases, elas foram agrupadas com base na distribuição elementar, a saber:

Grupo dos minerais de Ti: perovskita, titanita, e óxidos de titânio;

Grupo dos minerais de Fe: óxidos de Fe e goethita.

Grupo dos minerais de P: apatita, gorceixita, monazita.

Grupo dos minerais de ganga: mica, diopsídio, feldspatos.

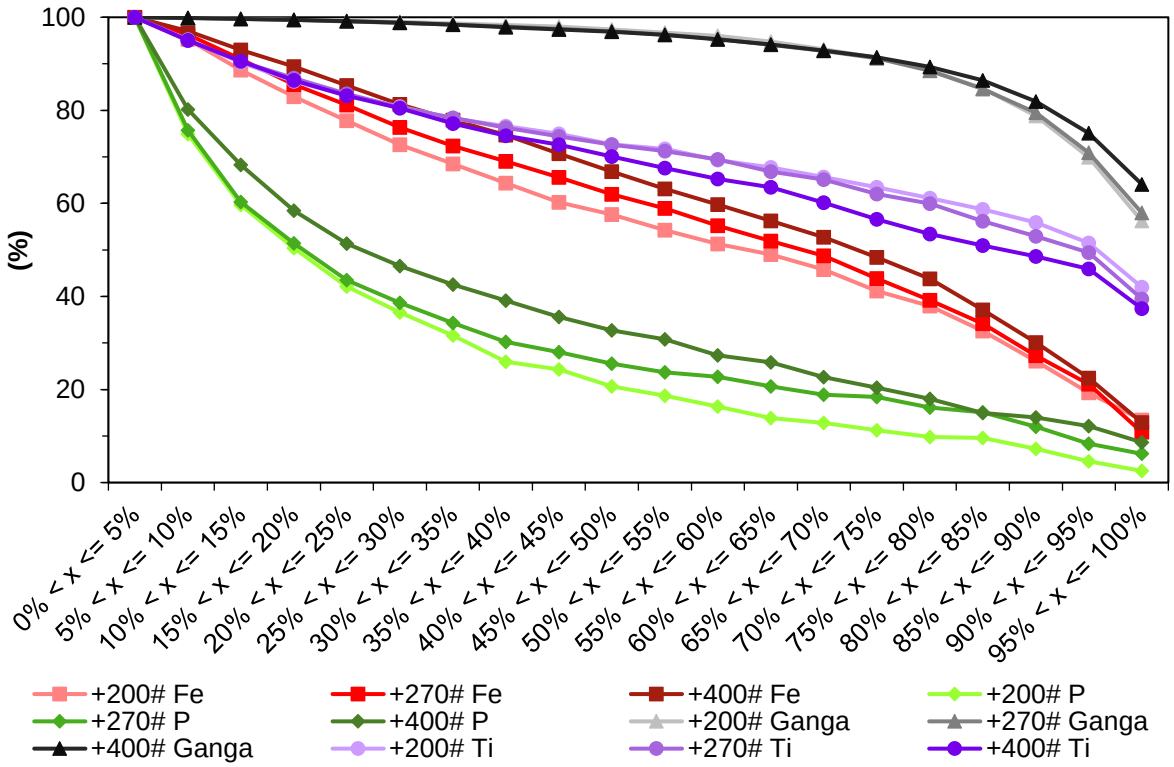
De acordo com Gaudin (1939), para que um mineral seja considerado liberado, é necessário que mais de 90% de sua superfície esteja exposta em uma classe granulométrica específica.

A análise da liberação de partículas por composição mineral avalia a porcentagem em massa da fase desejada presente em uma faixa específica de liberação. Por exemplo, se o critério estabelecido é de tolerância de 5%, podem existir partículas de classe liberadas entre

95-100%, ou seja, podem ser consideradas partículas livres as que são compostas por 95% em massa do mineral de interesse e 5% em massa de minerais de ganga. Já a liberação por superfície livre mede o percentual da área externa da partícula ocupada pelo mineral de interesse, sendo o restante coberto por ganga. Assim, uma classe de liberação de 70% por superfície indica que 70% da superfície externa é do mineral-minério, enquanto 30% é de ganga. Em termos práticos, a liberação por composição é relevante para métodos como separação gravitacional e magnética, enquanto a liberação por superfície livre é mais aplicável em processos como flotação e lixiviação (Carioca, 2014).

A Figura 32 apresenta o diagrama acumulado de liberação mineral por composição de partícula obtido para as frações +200#, +270# e +400# do KF referente aos grupos dos minerais de ferro, fósforo, titânio e ganga.

Figura 32 – Diagrama acumulado de liberação mineral por composição de partícula obtido para as frações +200#, +270# e +400# do KF referente aos grupos dos minerais de ferro, fósforo, titânio e ganga.

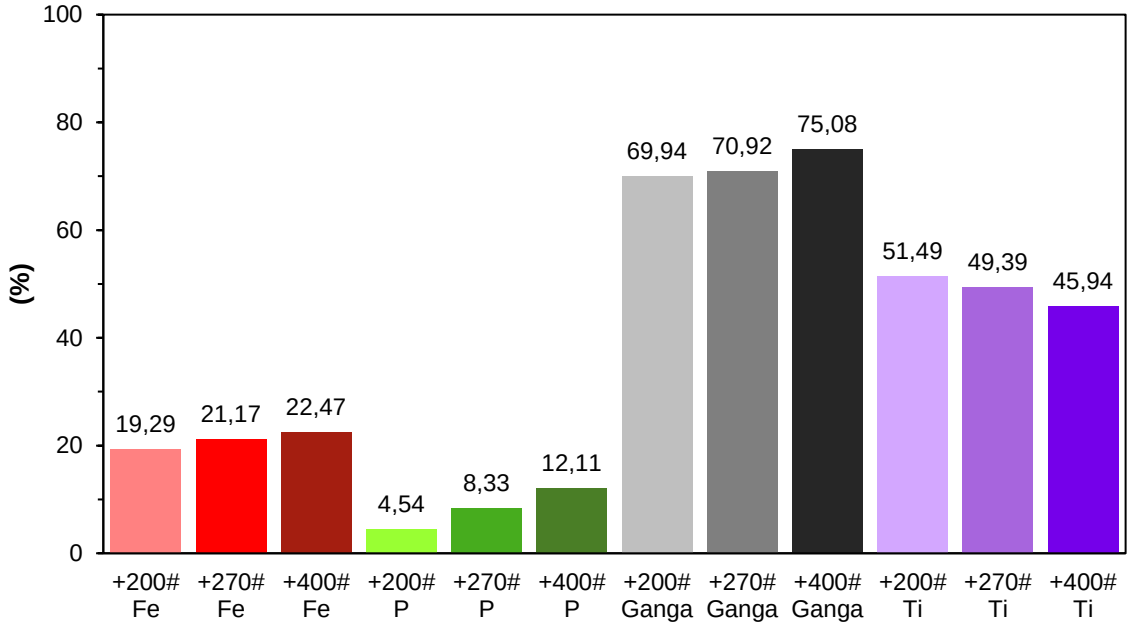


Os minerais de ganga demonstraram maior liberação, com destaque para a fração +400#, que apresentou o mais elevado nível de separação em relação às demais. Os minerais de titânio e ferro mostraram liberação em níveis moderados. Já o fósforo teve o menor grau de liberação entre os minerais avaliados, sendo a fração +200# a menos eficiente para esse elemento, padrão semelhante ao observado para o ferro.

Com base nas curvas apresentadas, os elementos de maior interesse (Fe e Ti) mostram tendências positivas de liberação. No entanto, nenhum dos elementos atinge 90% de liberação de forma consistente, sugerindo que o processo de moagem pode precisar ser ajustado para melhorar ainda mais a liberação, especialmente para o fósforo, que tem a menor taxa de liberação entre todos os elementos. A ganga, por outro lado, está amplamente liberada, o que facilita sua separação no processo de beneficiamento.

A Figura 33 apresenta o diagrama de porcentagem de grãos liberados da classe 90% < x ≤ 95% por composição de partícula para as frações +200#, +270# e +400# do KF referente aos grupos dos minerais de ferro, fósforo, titânio e ganga.

Figura 33 – Diagrama de porcentagem de grãos liberados da classe >90% por composição de partícula para as frações +200#, +270# e +400# do KF referente aos grupos dos minerais de ferro, fósforo, titânio e ganga.



De modo geral, observa-se que o aumento do grau de liberação dos minerais acompanha a redução da granulometria, um comportamento evidente nos minerais de ferro, fósforo e ganga. No entanto, o titânio apresenta uma tendência oposta, conforme a granulometria diminui, a liberação dos minerais que contêm esse elemento também diminui, algo que foge ao comportamento esperado. Uma explicação possível para esse comportamento está relacionada à maior complexidade do mineral de titânio em comparação ao de fósforo, conforme evidenciado na Figura 27. Rodrigues (2016) contribui para essa análise, indicando que as partículas mistas e complexas são constituídas por múltiplas fases minerais, com grãos muito menores do que a partícula completa. Durante a cominuição, essas

partículas tendem a formar novas partículas mistas, aumentando sua presença nas frações mais finas e, como consequência, diminuindo o grau de liberação total.

Observa-se que a ganga apresenta os maiores índices de liberação, com porcentagens superiores a 69% em todas as frações analisadas, atingindo o valor mais alto na fração +400# (75,08%). Esses valores indicam que os minerais de ganga estão mais efetivamente liberados em relação aos outros minerais, o que pode facilitar processos de separação em etapas subsequentes de beneficiamento.

Para os minerais de ferro, as porcentagens de liberação aumentam de acordo com a diminuição da fração granulométrica, variando de 19,29% na fração +200# a 22,47% na +400#. Esses dados indicam uma liberação intermediária para o ferro, que tende a melhorar em frações mais finas, mas ainda está bem abaixo dos níveis de liberação da ganga.

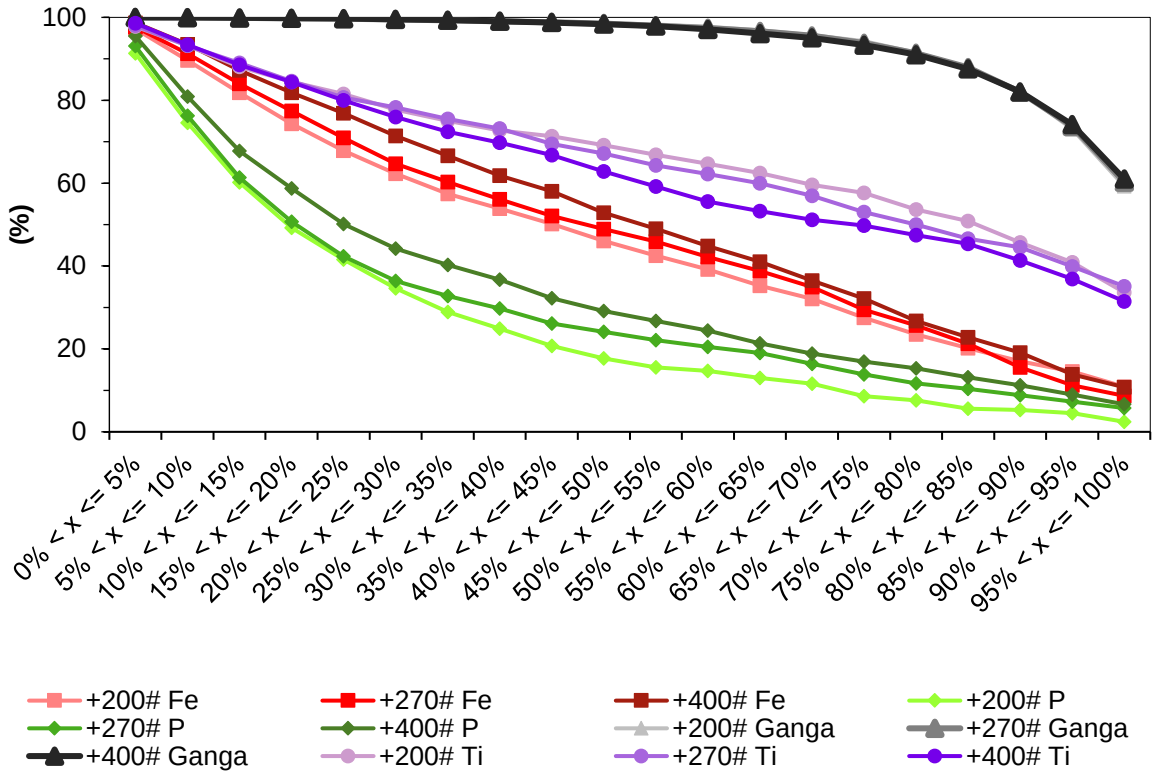
Os minerais de fósforo apresentam os menores índices de liberação, com valores variando de 4,54% na fração +200# a 12,11% na +400#. Isso reflete um grau de liberação significativamente inferior, especialmente nas frações mais grossas, o que sugere dificuldades para a separação do fósforo neste intervalo de liberação, sendo a fração +200# a mais problemática.

Para o titânio, os índices de liberação são mais elevados que os do ferro e fósforo, mas ainda inferiores aos da ganga, variando de 45,94% na fração +400# a 51,49% na +200#. Essa distribuição indica que o titânio possui uma liberação considerável, especialmente nas frações mais finas, embora não alcance os altos níveis observados para a ganga.

Com base nos gráficos apresentados, os elementos de maior interesse (Fe e Ti) mostram tendências positivas de liberação, principalmente em frações mais finas e nas malhas mais finas, especialmente a +400#. No entanto, nenhum dos elementos atinge 90% de liberação de forma consistente, sugerindo que o processo de moagem pode precisar ser ajustado para melhorar ainda mais a liberação, especialmente para o fósforo, que tem a menor taxa de liberação entre todos os elementos. A ganga, por outro lado, já apresenta uma liberação bem significativa, o que facilita sua separação no processo de beneficiamento.

A Figura 34 apresenta o diagrama acumulado de liberação mineral por superfície livre obtido para as frações +200#, +270# e +400# do KF referente aos grupos dos minerais de ferro, fósforo, titânio e ganga.

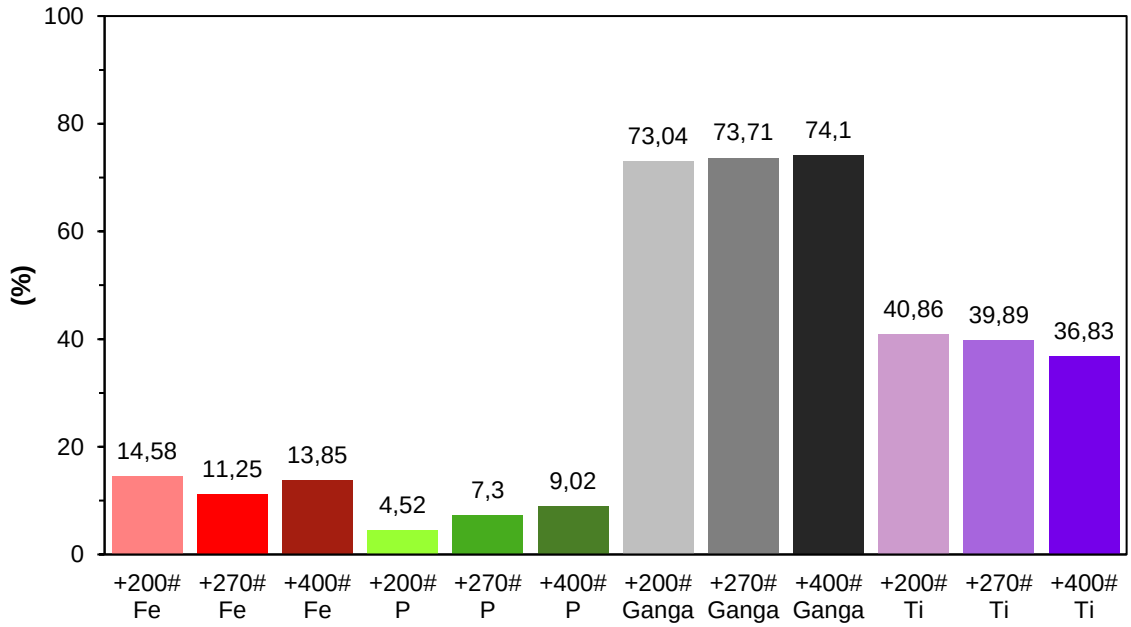
Figura 34 – Diagrama acumulado de liberação mineral por superfície livre obtido para as frações +200#, +270# e +400# do KF referente aos grupos dos minerais de ferro, fósforo, titânio e ganga.



Assim como identificado no diagrama de composição por partícula, os minerais de ganga demonstraram alta liberação mineral em todas as frações analisadas, com valores bastante próximos entre si. Os minerais de ferro e titânio alcançaram níveis intermediários de liberação, sendo que o ferro apresentou melhor liberação nas frações mais finas, enquanto o titânio mostrou-se mais liberado nas frações mais grossas. O fósforo, por sua vez, apresentou o menor nível de liberação, com destaque para a fração +200# como a de menor eficiência nesse aspecto. Ainda além, os minerais de ferro e titânio mostraram níveis consideráveis de liberação, mas sem alcançar de maneira consistente o índice de 90%. Isso sugere que o processo de moagem pode precisar de ajustes para aumentar ainda mais a liberação, como dito anteriormente, especialmente no caso do fósforo, que apresentou a menor taxa de liberação entre todos os elementos analisados, sendo o mais difícil de separar da matriz mineral.

A Figura 35 apresenta o diagrama de porcentagem de grãos liberados da classe 90% < x ≤ 95% por superfície livre para as frações +200#, +270# e +400# do KF referente aos grupos dos minerais de ferro, fósforo, titânio e ganga.

Figura 35 – Diagrama de porcentagem de grãos liberados da classe > 90% por superfície livre para as frações +200#, +270# e +400# do KF referente aos grupos dos minerais de ferro, fósforo, titânio e ganga.



A ganga se destaca como o grupo mineral com o maior grau de liberação em todas as frações granulométricas analisadas, com porcentagens próximas entre si e superiores a 70%. Esse comportamento indica uma elevada eficiência na liberação dos minerais de ganga, independentemente da granulometria, o que favorece o seu potencial de separação nos processos de beneficiamento.

No caso dos minerais de ferro, observa-se uma variação menor nas porcentagens de liberação entre as frações, com valores relativamente baixos em comparação à ganga. As porcentagens variam de 11,25% na fração +270# a 14,58% na fração +200#, sugerindo que o ferro apresenta liberação limitada e que as frações mais finas possuem um ligeiro aumento nesse grau de liberação.

O fósforo, por sua vez, demonstra os menores índices de liberação entre todos os minerais estudados, com uma variação entre 4,52% na fração +200# e 9,02% na fração +400#. Esses valores indicam uma dificuldade acentuada na liberação dos grãos de fósforo, especialmente nas frações mais grossas, o que representa um obstáculo para o seu processamento eficiente.

Para o titânio, os valores de liberação são superiores aos do ferro e fósforo, mas ainda bem abaixo dos da ganga. A liberação do titânio diminui gradualmente com o aumento da fração granulométrica, passando de 40,86% na fração +200# para 36,83% na fração +400#. Esse comportamento sugere que, ao contrário da ganga, o titânio apresenta uma tendência

de menor liberação em frações mais finas, o que pode impactar o desempenho nos processos de separação.

O gráfico revela que a ganga apresenta o mais alto grau de liberação nas frações analisadas, seguida pelo titânio, enquanto o ferro e o fósforo enfrentam maiores dificuldades de liberação, com o fósforo mostrando os menores percentuais, principalmente em granulometrias mais finas. Esses dados são essenciais para definir estratégias de beneficiamento que otimizem a recuperação dos minerais desejados. Assim, o ajuste na etapa de moagem deve ser considerado para elevar o grau de liberação e atingir o índice alvo de 90%.

4.4. – Considerações sobre o processamento do kamafugito

Diante dos resultados de caracterização é possível discutir estratégias para um melhor aproveitamento do minério de kamafugito, levando em conta aspectos importantes a serem destacados a seguir.

4.4.1. – Liberação dos minerais de interesse

Para o estudo de liberação dos minerais de interesse na amostra KF foi realizada uma análise detalhada das frações granulométricas -150#+200# (-0,106 mm+0,075 mm) -200#+270# (-0,075 mm+0,053 mm) e -270#+400# (-0,053 mm+0,038 mm) para observar o comportamento dos principais elementos de interesse, como ferro, fósforo, e titânio, em diferentes tamanhos de partícula. Os resultados indicam que a liberação desses minerais varia significativamente, sendo dependente do tamanho das partículas e da fase mineral onde os elementos se concentram.

Os minerais de ferro mostraram uma liberação intermediária, com taxas que variaram de 11,25% a 22,47% nas frações analisadas, seguindo uma tendência de estarem mais liberados conforme a fração fica mais fina. O titânio apresentou maior liberação em relação ao ferro, especialmente nas frações mais grossas, onde se observou valores de até 51,49%. Esses dados sugerem que o titânio e o ferro não estão completamente liberados, o que demanda ajustes na moagem para potencializar essa liberação e maximizar o rendimento no processo de concentração.

O fósforo apresentou os menores índices de liberação, com valores entre 4,52% e 12,11%, refletindo uma forte associação com os minerais de ganga e dificuldades para sua separação nas frações mais grossas. Esse comportamento limita a recuperação de fósforo e

demanda um processo de cominuição mais acentuado para melhorar a liberação das frações. Contudo, isso deve ser ponderado com o aumento de custo e energia, pois partículas ultrafinas podem comprometer a eficiência dos processos de concentração subsequentes. Logo, embora a apatita apresente liberação em granulometrias muito finas (em torno de 25 µm), a utilização de processos integrados de concentração e remoagem pode representar uma alternativa viável para a implementação da rota.

4.4.2. – Operações de concentração

Para a concentração dos elementos de interesse presentes na amostra estudada, algumas rotas podem ser consideradas, com base nas características evidenciadas no presente trabalho. Uma rota viável para a concentração desses elementos inclui a separação magnética e a flotação, técnicas amplamente usadas para minerais de estrutura semelhante e com propriedades magnéticas e de superfície que permitem essa distinção.

Para concentrar o ferro e o titânio, encontrados principalmente em minerais como OxFe e perovskita, recomenda-se iniciar com a separação magnética. Esse processo utiliza separadores magnéticos de média e alta intensidade, especialmente eficientes para partículas entre 150 e 200 micrômetros, faixa em que esses minerais se liberam mais facilmente. Esse comportamento foi corroborado no gráfico de liberação por composição de partículas, que apresentou uma liberação de ferro de 19,29%, em contraste com a liberação por superfície livre que registrou 14,58%. Embora a perovskita seja diamagnética, uma parte dela se associa aos OxFe, enquanto a titanita, sendo paramagnética, também pode ser separada. Dessa forma, a separação magnética inicial remove eficazmente os minerais magnéticos e, ao mesmo tempo, recupera parte dos minerais de Ti, preparando o material para a próxima etapa de flotação. O trabalho de Lopes (2019) oferece uma contribuição relevante ao investigar a separação magnética na concentração de minérios kamafugíticos. O estudo revelou que a intensidade de 7.500 Gauss proporcionou uma concentração de anatásio de 19,8%, superando as concentrações obtidas nas intensidades de 2.000 e 12.000 Gauss.

Uma outra possibilidade a ser investigada seria a introdução de uma etapa de pré-concentração para eliminar os minerais de ganga antes do processo de moagem. Observou-se que a liberação dos minerais de ganga no gráfico de superfície livre ultrapassou 70% em todas as frações e apresentando comportamento similar entre elas. Assim, uma flotação reversa de silicatos poderia ser testada para verificar sua viabilidade. Esse procedimento permitiria reduzir a massa de material a ser moído ao mesmo tempo em que poderia aumentar a concentração dos elementos desejados no rejeito.

Para a recuperação do fósforo, presente em minerais de apatita, a flotação é a técnica mais adequada. Esse método explora as diferenças nas propriedades de superfície dos minerais, permitindo a concentração seletiva da apatita e de outros minerais de interesse, como a mica, que contém potássio. No contexto do estudo, a flotação é uma técnica adequada para concentrar minerais que não respondem bem à separação magnética, aproveitando-se de modificações químicas na superfície das partículas para separar minerais específicos de interesse econômico. Entretanto, é válido ressaltar que uma etapa de moagem deverá ser considerada para garantir que o fósforo esteja liberado previamente ao processo de flotação. Corroborando com essa hipótese, no estudo conduzido por Ávila Neto *et al*. (2017), foram realizados testes preliminares de flotação em kamafugito com o objetivo de aumentar a concentração de P_2O_5 presente no minério. A análise revelou um aumento na concentração de fósforo no concentrado, superando em 7,4 vezes o teor encontrado na amostra inicial, o que reflete um avanço significativo. No entanto, a recuperação em massa ficou aquém do esperado, registrando apenas 1,22%, o que representou uma limitação para os resultados.

Por outro lado, o KF apresentou um grande potencial como remineralizador de solo, uma vez que atendeu a várias das exigências e critérios estabelecidos na Instrução Normativa nº 05 do Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), especialmente no que diz respeito ao artigo 4 (Tabela 23) (Brasil, 2016). Os aspectos que ainda não estão totalmente em conformidade podem ser ajustados, principalmente no que se refere às características físicas, como a granulometria, que pode ser adaptada para atender às especificações exigidas. Além disso, em relação aos elementos potencialmente tóxicos, será necessário realizar uma análise química para verificar se os níveis presentes no KF estão dentro dos limites estabelecidos pela legislação. Corroborando essa hipótese, o estudo conduzido por Ferreira (2021) teve como objetivo principal avaliar a reatividade do kamafugito no solo e sua eficiência agronômica como remineralizador. O material estudado é oriundo de uma área próxima à região do KF, ambos situados na Província Ígnea do Alto Paranaíba. A pesquisa explorou o desempenho do kamafugito em duas granulometrias distintas, filler e pó, analisando suas propriedades e potencial aplicação como insumo para melhoria da fertilidade do solo.

Tabela 23 – Análise das características do KF e seu potencial como remineralizador de solo segundo a Instrução Normativa nº 05 do MAPA.

Parâmetro	KF	Observação
Especificação de natureza física	Não atende de imediato	Adequação granulométrica para atender ao Anexo I da IN n° 05
Soma de bases (CaO, MgO, K_2O) ≥ 9%	Atende	-
Teor de K_2O ≥ 1%	Atende	-
Teor de SiO_2 livre < 25%	Atende	-
Elementos potencialmente tóxicos (As, Cd, Hg, Pb)	Devem ser analisados	-

5 – CONCLUSÕES

- A partir dos resultados obtidos, conclui-se que o kamafugito da Província Ígnea do Alto Paranaíba apresenta uma composição mineralógica altamente complexa e variada. Essa diversidade mineral confere ao material um significativo potencial de aproveitamento econômico, devido à presença de elementos valiosos. No entanto, a complexidade inerente da rocha impõe desafios consideráveis na definição das melhores estratégias e métodos para recuperar esses elementos de maneira eficiente e sustentável;
- A caracterização física revelou que o material em seu estado natural possui granulometria grossa e resistência à moagem comparável à de minerais como hematita, minérios de zinco e tungstênio. Observou-se que a densidade do minério é semelhante à do quartzo e a de alguns minerais do grupo das micas, como a biotita e a muscovita, além de apresentar uma umidade elevada. Os resultados indicaram uma relação diretamente proporcional entre o tempo de moagem e o percentual de material passante com a moagem de 10 minutos resultando em 90% das partículas abaixo de 0,1 mm. Há indícios de que este tempo de moagem forneça um equilíbrio entre eficiência na liberação mineral e controle de custos operacionais. Ainda assim, investigações adicionais são necessárias para consolidar essa hipótese.
- A caracterização química da amostra cabeça indicou que os elementos mais abundantes são ferro, cálcio, magnésio e titânio, seguidos por potássio e fósforo. Ademais, o litotipo contém uma maior predominância de ETRs leves. Na análise granuloquímica, observou-se que o SiO_2 tende a reduzir sua concentração à medida que as partículas se tornam mais finas, enquanto o Fe_2O_3 mantém-se relativamente constante, com uma leve tendência de aumento nas frações mais finas. O P_2O_5 apresenta um comportamento semelhante ao Fe_2O_3, com um aumento considerável apenas na fração -400#. Já o TiO_2 demonstra uma leve concentração nas frações mais grossas, e o CaO, MgO e K_2O possuem uma distribuição mais uniforme ao longo das diferentes faixas granulométricas. As frações intermediárias a finas (100# a 325#) demonstraram uma predominância mais significativa de ETRs, independentemente de serem leves ou pesados.
- A caracterização mineralógica revelou um material com granulação variada, composto predominantemente por uma matriz afanítica de cristais muito finos. Nessa matriz, estão dispersos grãos faneríticos finos. A textura predominante é porfirítica, evidenciada pela presença de fenocristais em uma matriz de granulação fina. Os principais minerais identificados foram diopsídio, calcita, apatita (fluorapatita),

perovskita, titanita, mica (biotita), magnetita e montmorillonita, em concordância com a análise química e com dados da literatura. Estes dados indicam que a rocha pode ser classificada como um mafurito.

- Os resultados da associação mineral indicaram uma forte associação dos minerais com micas, exceto para a gorceixita e para as frações de monazita das malhas +200# e +270#. Os óxidos de titânio estão associados principalmente aos óxidos de ferro e à titanita, enquanto os óxidos de ferro apresentam associação com a perovskita e outros óxidos de titânio. A monazita, por sua vez, está predominantemente associada ao óxido de titânio. Já a apatita possui uma ligação forte com as micas, além de uma menor associação com diopsídio, bownligita, óxidos de ferro e perovskita.
- Os resultados de liberação mineral, avaliados tanto pela composição das partículas quanto pela superfície livre, revelam similaridade entre os métodos. Observou-se uma maior liberação dos minerais de ganga, especialmente nas granulometrias mais finas. Os minerais de ferro mostraram um nível de liberação intermediário, com a análise por superfície apresentando menor grau de liberação em comparação à de composição de partículas. Os minerais de titânio, por outro lado, apresentaram melhores índices de liberação nas granulometrias mais grossas, independentemente do método de avaliação. Já os minerais com fósforo tiveram os menores índices de liberação, com uma leve melhoria na fração mais fina. Esses dados sugerem a necessidade de aprimoramento na etapa de cominuição, visando uma liberação mais eficiente para as fases subsequentes de concentração;
- De qualquer modo, muitos kamafugitos já são amplamente utilizados como remineralizantes de solo devido ao seu potencial de enriquecimento mineral. Nesse contexto, o material apresenta uma oportunidade estratégica para a empresa. Além de servir como um recurso inicial que pode gerar receita e auxiliar na capitalização, sua exploração pode consolidar a posição da empresa no mercado enquanto novos produtos de maior valor agregado são desenvolvidos, promovendo um ciclo sustentável de crescimento e inovação.

6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar testes de concentração no minério em estudo, com foco na avaliação das operações unitárias de separação magnética e flotação;
- Realizar estudo de liberação para produtos moídos para determinar a granulometria ótima de cada fase de interesse e possibilitar a otimização de uma futura rota para geração de multiprodutos.

REFERÊNCIAS

ACIL WEBER. **Analisador de carbono e enxofre por infravermelho**. 2024. Disponível em: https://www.acilweber.com.br/analisador-de-carbono-e-enxofre-por-infra-vermelho.php. Acesso em: 02 set. 24.

ALMEIDA, R. N. **Caracterização litogeoquímica das rochas subvulcânicas da região de Potiraguá, sul do estado da Bahia**. 2006. 65 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2006.

ANTONIASSI, J. L. **A difração de raios-X com o método de Rietveld aplicada a bauxitas de Porto Trombetas, PA**. 2010. 111 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

ARAÚJO, A. J. S. **Metodologia para caracterização geoquímica de meteoritos de ferro utilizando a fluorescência de raios X portátil**. 2018. 79 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.

ARAUJO, E. R.; FERNANDES, F. R. C. Mineração no Brasil: crescimento econômico e conflitos ambientais. In: **Conflitos ambientais na indústria mineira e metalúrgica**... Rio de Janeiro: CETEM/CICP, 2016, p. 65-88.

ASFORA, V. K. **Fluorescência de raios X por dispersão de energia aplicada à caracterização de tijolos de sítios históricos de Pernambuco**. 2010. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

ÁVILA NETO, C. N. *et al*. **Relatório técnico**: ensaios de flotação e caracterização físico-química do kamafugito e dos produtos de flotação. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2017. 25 p.

BAPTISTA, M. C. **Estratigrafia e evolução geológica da região de Lagoa Formosa (MG)**. 2004. 104 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

BAPTISTA, M. C. *et al*. Aspectos gerais do meio físico. In: MACHADO, M. F.; SILVA, S. F. **Geodiversidade do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2010. cap. 2, p. 17-34.

BARBATO, C. N.; SAMPAIO, J. A. Determinação experimental do Índice de Trabalho (WI). In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios**: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. cap. 10, p. 179-189.

BARBOSA, D. H. B. M. *et al*. Caracterização granulométrica e automação do método de Gaudin através do ImageJ. **Enciclopédia Biosfera**, v. 10, n. 19, p. 166-176, 2014.

BERALDO, J. L. **Moagem de minérios em moinhos tubulares**. São Paulo: Edgard Blucher, 1987. 143 p.

BERGERMAN, M. G. **Beneficiamento mineral**: aplicações e conceitos básicos. 2020. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5698155/mod_resource/content/1/Aula%2003%20%20-%20BM%20-%20Conceitos%20b%C3%A1sicos.pdf. Acesso em: 19 jun. 24.

BERTOLINO, L. C.; SANTOS, W. H.; SANTOS, A. C. Caracterização mineralógica de minérios. In: LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. cap. 3. p. 69-103.

BIRRO, E. H. F. **Avaliação do desempenho de peneira industrial empregada na produção de agregados para construção civil:** um estudo de caso. 2017. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2017.

BORGES, L. A. D. **Geologia e mineralogia do diamante da região do Rio Borrachudo (Tiros, MG)**. 2013. 142 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

BOULHOSA, G. S.; MELO, M. G.; FERNANDES, A. B. Estudo petrológico das rochas alcalinas da Província Ígnea Alto do Paranaíba – MG. In: SEMANA DE GEOLOGIA DO ESPÍRITO SANTO, 6., 2019, Vitória. **Anais [...]**. Vitória: SEGEO, 2019. p. 23.

BOYNTON, W. V. Cosmochemistry of the rare earth elements; meteorite studies. In: Rare earth element geochemistry. **Elsevier Science Publishing Co.**, v. 2, p. 63-114, 1984.

BRAGA, A. M. **Desenvolvimento de *software* para determinação do grau de liberação de partículas minerais**. 2018. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2018.

BRAGA, A. M. *et al*. Determinação do grau de liberação de partículas minerais através de *softwares* de análise de imagens. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 28., 2019, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: ENTMME, 2019. p. 1-8.

BRANDÃO, P. R. G. *et al*. Caracterização mineralógica e tecnológica. In: VALADÃO, G. E. S.; ARAÚJO, A. C. **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2012. cap. 3, p. 27-60.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa Nº 5, de 10 de março de 2016**. Brasília, 2016. Disponível em: < https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-5-de-10-3-16-remineralizadores-e-substratos-para-plantas.pdf>. Acesso em 17 dez 2024.

BRUKER. **Sistema de Mineralogia Automatizado AMICS para SEM**. 2024. Disponível em: https://www.bruker.com/pt/products-and-solutions/elemental-analyzers/eds-wds-ebsd-SEM-Micro-XRF/software-amics-automated-mineralogy-system.html. Acesso em: 25 jul. 24.

BUCKLE, T. *et al*. WebNORM: a web application for calculating normative mineralogy. **Frontiers in Earth Science**, v. 11, p. 1232256, 2023.

BUREGYEYA, A.; NWAUBANI, S. Hydration and compressive strength of Portland cement blended with kamafugites and carbonatites: effect of physical properties. **East African Journal of Science, Technology and Innovation**, v. 3, n. 2, p. 1-15, 2022.

CAMPOS, A. A.; OLIVEIRA, B. P. **Análise comparativa de métodos para determinação de distribuição granulométrica em ferroligas**: peneiramento e análise de imagem. 2018. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade de Uberaba, Uberaba, 2018.

CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 27, n. 3, p. 269-282, 1997.

CARIOCA, A. C. **Caracterização microestrutural e mineralógica de minérios de ferro itabiríticos com graus diferentes de complexidade**. 2014. 163 p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

CARIOCA, A. C.; BRANDÃO, P. R. G. Caracterização mineralógica de minérios de ferro itabiríticos principalmente por Mineral Liberation Analyzer (MLA). **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 15, n. 4, p. 415-421, 2018.

CARVALHO, J. A. E. **Caracterização dos minerais micáceos presentes em minérios fosfáticos do Centro-Sudeste do Brasil**. 2017. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

CHAVES, A. P. *et al*. **Teoria e prática do tratamento de minérios**: bombeamento de polpa e classificação. 4. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 301 p.

CHAVES, A. P.; CHAVES FILHO, R. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios**: separação densitária. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 240 p.

CHAVES, A. P.; LEAL FILHO, L. S.; BRAGA, P. F. A. Flotação. In: LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. cap. 10, p. 405-459.

CIT SENAI. **Relatório técnico**: estudo da viabilidade de utilização de Ferro Liga de Titânio obtida através de concentrados de minerais de titânio provenientes do beneficiamento de kamafugito na produção de ligas especiais e recobrimentos de superfícies. Belo Horizonte: Instituto SENAI de Inovação em Processamento Mineral, 2018. 198 p.

COD. **Crystallography Open Database**. 2024. Disponível em: https://www.crystallography.net/cod/. Acesso em: 22 ago. 24.

COELHO, F. E. B. **Desenvolvimento e validação de um modelo de balanço populacional para a lixiviação de um concentrado ustulado de zinco em bancada e em escala piloto**. 2017. 238 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.

COSTA, E. N. **Peneiramento de partículas finas e ultrafinas com adição de dispersantes**. 2015. 77 f. Monografia (Especialização em Tratamento de Minérios) – Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2015.

DARDENNE, M. A. Síntese sobre a estratigrafia do grupo Bambuí no Brasil central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978, Recife. **Anais[...]**. Recife: SBG, 1978. v. 2, p. 597-610.

DAS, A. *et al*. **Importance of mineralogy in mineral processing**. In: Training Course on Mineral Processing and Nonferrous Extractive Metallurgy, 2008.

DE LA GUARDIA, M.; ARMENTA, S. Multianalyte determination versus one-at-a-time methodologies. In: **Comprehensive Analytical Chemistry**. 2011. cap. 6, p. 121-156.

FARIAS, C. E. G.; COELHO, J. M. **Mineração e meio ambiente no Brasil**. Relatório Preparado para o CGEE PNUD: Contrato 2002/001604. 2002. 42 p.

FELGATE, M. R. **Improved geochemical and geochronological constraints on magmatism in Rondonia and the Alto Paranaiba igneous province**. 2014. 275 f. Thesis (Doutorado em Ciências da Terra) – Universidade de Melbourne, Austrália, 2014.

FERNANDES, L. R. M. **Sistema de playa lake no Grupo Areado, Cretáceo Inferior em Galena, Minas Gerais**. 2019. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

FERREIRA, B. C. *et al.* Kamafugite from the Alto Paranaíba Province as a multi-nutrient fertilizer. **Journal of Agricultural Science**, v. 12, n. 10, p. 213, 2020.

FERREIRA, B. C. **Kamafugito proveniente da região do Alto Paranaíba – MG como remineralizador de solo**. 2021. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.

FERREIRA, D. H. O. **Principais etapas do tratamento de minérios itabiríticos do quadrilátero ferrífero**. 2011. 47 f. Monografia (Especialização em Recursos Minerais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

FERREIRA, K. C. **Estudo das rochas do Grupo Mata da Corda na região de Patos de Minas-MG e os desafios tecnológicos de tratamento mineral**. 2016. 38 f. Monografia (Especialização em Tratamento de Minérios) – Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2016.

FERREIRA, R. F. **Estudo de liberação das fases minerais em minérios de ferro**. 2013. 211 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

FERREIRA, R. F.; LIMA, R. M. F. Evolução do espectro de liberação na moagem de itabiritos em diferentes tamanhos e a resposta na flotação. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 13, n. 4, p. 302-309, 2016.

FIGUEIRA, H. V. O.; ALMEIDA, S. L. M.; LUZ, A. B. Cominuição. In: LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. (Ed.). **Tratamento de Minérios**. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. cap. 4. p. 113-182.

FIGUEIREDO, C. A. *et al*. O processo de analcimização de um kamafugito (Luz262) do centro-oeste mineiro. **Geonomos**, v. 26, n. 1, p. 1-11, 2018.

FRAGOSO, D. G. C. **Geologia da região de Presidente Olegário e evolução tectono-sedimentar do grupo Areado, eocretáceo da Bacia SanFranciscana, Minas Gerais**. 2011. 134 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

FRAGOSO, D. G. C. *et al*. Geologia dos grupos Bambuí, Areado e Mata da Corda na folha Presidente Olegário (1: 100.000), MG: registro deposicional do Neoproterozóico ao Neocretáceo da Bacia do São Francisco. **Geonomos**, v. 19, n. 1, p. 28-38, 2011.

FRANÇA, J. R. O. **Caracterização mineralógica e da fragmentação de tipologias de minério de ferro e sua liberação**. 2019. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

FRANÇA, S. C. A.; COUTO, H. J. B. Análise microgranulométrica – Malvern e Sedigraph. In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios**: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. cap. 5, p. 101-122.

GAUDIN, A. M. **Principles of mineral dressing**. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1939.

GOBBO, L. A. **Aplicação da difração de raios-X e método de Rietveld no estudo de cimento Portland**. 2009. 251 f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

GONÇALVES, P. C. **Manuseio de minério de ferro coesivo sob umidade natural**. 2021. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

GONÇALVES, T. A. R. **Técnicas de microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura automatizada (QEMSCAN®) e análise de imagens aplicadas a diferentes tipologias de minério de ferro**. 2015. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

GONÇALVES, T. A. R.; PERES, A. E. C. Técnicas de microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura automatizada (QEMSCAN) aplicadas a diferentes tipologias de minério de ferro. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 12, n. 4, p. 342-349, 2015.

GONZAGA, L. M. *et al*. Medidas de distribuição do tamanho de partícula combinado com os dados do peneiramento convencional. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 52259-52271, 2021.

HRSTKA, T. *et al*. Automated mineralogy and petrology-applications of TESCAN Integrated Mineral Analyzer (TIMA). **Journal of Geosciences**, v. 63, n. 1, p. 47-63, 2018.

HUO, X. *et al*. Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry. In: **Encyclopedia of Analytical Chemistry**. 2016. p. 1-25.

IIZUKA, E. K. **Análise de tensões em peneiras vibratórias através de modelagem numérica utilizando o método dos elementos finitos e experimentalmente por extensometria**. 2006. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

KRUG, F. J. *et al*. **Guia prático de perguntas e respostas sobre ICP-OES, ICP-MS e preparo de amostras**. São Carlos: Varian PPG-Q DQ/UFSCAR, 2001. 63 p.

LAGE, V. N. **Desenvolvimento de sistema de bancada para medição de umidade de minérios**. 2018. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

LE MAITRE, R. W. **Igneos rocks**: a classification and glossary of terms. 2. ed. Cambridge: University Press, 2005. 236 p.

LIMA, O. A.; LEAL FILHO. L. S.; BARBOSA, F. S. Caracterização hidrodinâmica de células mecânicas de flotação: capacidade de bombeamento de célula Denver de laboratório. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 59, n. 4, p. 415-419, 2006.

LIMA, O. N. B.; UHLEIN, A.; BRITTO, W. Estratigrafia do Grupo Bambuí na Serra da Saudade e geologia do depósito fosfático de Cedro do Abaeté, Minas Gerais. **Brazilian Journal of Geology**, v. 37, n. 4, p. 204-215, 2007.

LIMA, R. M. F.; LUZ, J. A. M. Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: lei de Stokes. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 54, n. 2, p. 155-159, 2001.

LINS, F. A. F. Concentração gravítica. In: LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. cap. 6. p. 275-300.

LOPES, B. W. M. **Avaliação do desempenho de uma rota de beneficiamento para a exploração do titânio proveniente do anatásio**. 2019. 46 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

LOPES, B. W. M. *et al*. Avaliação do desempenho da operação de moagem a seco e a úmido em minério titanífero. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 29., 2022, Armação dos Búzios. **Anais [...]**. Armação dos Búzios: ENTMME, 2022. p. 1-8.

LOPES, J. C. **Composições mineralógicas virtuais em rochas ígneas**: norma CIPW. Évora: Universidade de Évora, 2012. 30 p.

LUZ, P. H. T. **Determinação do grau de liberação da hematita de Pratinha, Minas Gerais**. 2018. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2018.

MAIA, E. S. **Pelotização e redução de concentrado magnetítico**. 2011. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

MANTILLA, E. R. **Avaliação da liberação mineral por análise de imagens digitais obtidas em microscópio ótico de luz refletida**. 2013. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

MARTINS, G. M. **Petrografia das rochas kamafugíticas de Rio Verde e Santo Antônio da Barra da Província Alcalina de Goiás**. 2016. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal de Espírito Santo, Alegre, 2016.

MASSI, L. *et al*. Fundamentos e aplicação da flotação como técnica de separação de misturas. **Revista Química Nova na Escola**, v. 28, p. 20-23, 2008.

MATTA, J. C. **Análise quantitativa e qualitativa de dados hidrogeológicos do sistema aquífero Urucuia (SAU) na Bahia**: subsídios para a elaboração do modelo conceitual hidrogeológico. 2019. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

MEDINA, A. I. M. *et al*. Geologia ambiental: contribuição para o desenvolvimento sustentável. In: FERNANDES, F. R. C. **Tendências tecnológicas Brasil 2015**: geociências e tecnologia mineral. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. cap. 3, p. 35-56.

MELO, M. G. **A origem do fosfato nas rochas vulcânicas e vulcanoclásticas do grupo Mata da Corda nas regiões de Patos de Minas e Presidente Olegário, MG**. 2012. 170 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

MENÉNDEZ-AGUADO, J. M.; DZIOBA, B. R.; COELLO-VALAZQUEZ, A. L. Determination of work index in a common laboratory mill. **Mining, Metallurgy & Exploration**, v. 22, p. 173-176, 2005.

MENEZES, K. B. **Separação magnética do rejeito da deslamagem da usina de beneficiamento da Serra do Sapo em Conceição do Mato Dentro, MG**. 2020. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

METSO. **Conceitos básicos em processamento de minerais**. 2. ed. Metso Corporation, 2012. 12:18 p.

MÖHLER, B. C. **Avaliação das características de secagem dos grãos de soja**. 2010. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

MOREIRA, G. C. **Análise geofísica das rochas ultrabásicas potássicas do Grupo Mata da Corda na região de Presidente Olegário, MG**. 2019. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

MOTA, E. V. **Análise quantitativa e refinamento de estruturas cristalinas pelo método de Rietveld para minerais presentes em solo argiloso e suas frações**. 2008. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2008.

MOTTA, P. E. F.; BARUQUI, A. M.; SANTOS, H. G. **Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos da região do Alto Paranaíba, Minas Gerais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 238 p.

MOURA, D. M. B. **Proposta metodológica para avaliação e definição de fontes superficiais de abastecimento público: uma análise comparativa entre duas bacias hidrográficas, visando a segurança hídrica de Iporá (GO)**. 2021. 247 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2021.

NAPPIER-MUNN, T. J. *et al*. **Mineral cominuition**: their operation and optmisation. Queensland: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 1999. 413 p.

NASCIMENTO, E. L. C. **Geologia, geoquímica e mineralogia do Complexo Carbonatítico Morro Preto – GO**. 2018. 199 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

NASCIMENTO, E. L. C. *et al*. Petrografia e mineralogia dos kamafugitos do complexo carbonatítico Morro Preto – GO. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO CENTRO-OESTE, 16., 2019, Cuiabá. **Anais [...]**. Cuiabá: SBG, 2019. p. 18.

NEUMANN, R.; SCHNEIDER, C.L.; ALCOVER NETO, A. Caracterização tecnológica de minérios: parte II. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 3. p. 85-137.

OLIVEIRA, F. T. **Modelo geometalúrgico para predição de apatita a partir de análises químicas de óxidos por fluorescência de raios-X**. 2023. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2023.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. M. *et al*. Projeto e construção de um picnômetro a ar para caracterização de insumos e produtos farmacêuticos. **Química Nova**, v. 33, p. 1384-1388, 2010.

OLIVEIRA, M. L. M.; AQUINO, J. A. Aspectos relevantes das colunas de flotação. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 21., 2005, Natal. **Anais [...]**. Natal: ENTMME, 2005. p. 243-250.

OLIVEIRA, M. S.; SOUZA, M. D. **Tratamento de minérios**. Araxá: [s.n.], 2012. 219 p.

ORTIZ, C. E. A. **Caracterização geometalúrgica e modelagem geoestatística da mina Brucutu- Quadrilátero Ferrífero (MG)**. 2014. 206 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

PATACA, L. C. M.; BORTOLETO, G. G.; BUENO, M. I. Determinação de arsênio em águas contaminadas usando fluorescência de raios-X por energia dispersiva. **Química Nova**, v. 28, p. 579-582, 2005.

PERES, A. E. C. *et al*. Métodos de concentração. In: VALADÃO, G. E. S.; ARAÚJO, A. C. **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2012. cap. 6, p. 105-6-139.

PETRUK, W. **Applied mineralogy in the mining industry**. 1st ed. Ottawa: Elsevier, 2000. 268 p.

PIMENTA, S. A. **Equipamentos de separação magnética**: uma revisão. 2014. 38 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

PIMENTEL, D. A. *et al*. Efeito da granulometria e da dosagem de amina na flotação de itabiritos. **HOLOS**, v. 4, p. 118-125, 2014.

PIRES, K. S. *et al*. Mineralogical characterization of iron ore tailings from the Quadrilatero Ferrifero, Brazil, by eletronic quantitative mineralogy. **Materials Research**, v. 22, p. e20190194, 2019.

PROCEDIMENTO TÉCNICO PT 4101. **Operação do peneirador vibratório a úmido**. 5 p.

PROCEDIMENTO TÉCNICO PT 4104. **Operação do Stacker**. 3 p.

PROCEDIMENTO TÉCNICO PT 4201. **Operação do granulômetro a *laser* CILAS 920**. 11 p.

PROCEDIMENTO TÉCNICO PT 4202. **Determinação de densidade real por estereopicnômetro a hélio**. 12 p.

PROCEDIMENTO TÉCNICO PT 4203. **Ensaio de determinação de Umidade**. 3 p.

PROCEDIMENTO TÉCNICO PT 4204. **Operação do *cyclosizer***. 7 p.

PROCEDIMENTO TÉCNICO PT 4310. **Operação do Microscópio Ótico Leica Modelo DMEP**. 8 p.

PROCEDIMENTO TÉCNICO PT 4309. **Operação do Microscópio Ótico Leica Modelo DMLP**. 8 p.

PROCEDIMENTO TÉCNICO PT 4312. **Operação do Estereomicroscópio Leica Modelo MZ75**. 5 p.

PROCEDIMENTO TÉCNICO PT 4709. **Teste de moabilidade**. 4 p.

RAMOS, G. S. **Caracterização mineralógica do processo de beneficiamento do minério de nióbio da mina Boa Vista, Catalão-GO, Brasil**. 2021. 117 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

REIS, E. L. **Caracterização de resíduos provenientes da planta de beneficiamento do minério de manganês sílico-carbonatado da RDM – Unidade Morro da Mina**. 2005. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

REIS, H. L. S. **Estratigrafia e tectônica da bacia do São Francisco na zona de emanações de gás natural do Baixo Indaiá (MG)**. 2011. 127 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

RIBEIRO, T. M. G. **Caracterização de minério de grafita de Almenara – MG**. 2016. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

ROBERTO, J. B. **Influência dos diversos tipos litológicos nas operações de concentração da instalação de beneficiamento de Brucutu**. 2010. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

ROCHA, G. M. *et al.* Caracterização física, química e mineralógica de uma amostra de minério de ferro de Brucutu. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 16, n. 1, p. 88-94, 2019.

ROCHA, J. M. P. **Definição da tipologia e caracterização mineralógica e microestrutural dos itabiritos anfibolíticos das Minas de Alegria da Samarco Mineração S.A. – Minas Gerais**. 2008. 460 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

RODRIGUES, R. S. **Grau de liberação de diferentes tipos de minério de ferro das minas de alegria (Mariana-MG) e sua influência nas etapas de cominuição e concentração**. 2016. 248 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

ROSA, A. F. **Estudo de amostras da região de Presidente Olegário visando identificar minerais portadores de titânio**. 2015. 123 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2015.

SALES, C. G. **Rotas de beneficiamento para recuperação de minerais portadores de ferro do *underflow* do espessador de lamas da usina de Brucutu**. 2012. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

SALES, C. G. **Peneiramento industrial**: metodologia para dimensionamento e simulação. 2020. 217 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2020.

SALUM, M. J. G.; PERES, A. E. C. Caracterização de minérios: uso do Magstream-Model 100, suas vantagens e limitações. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 55, p. 55-59, 2002.

SAMPAIO, J. A.; SILVA, F. A. G. Determinação das densidades de sólidos e de polpas. In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios**: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007a. cap. 2, p. 37-51.

SAMPAIO, J. A.; SILVA, F. A. N. G. Análise granulométrica por peneiramento. In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios**: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007b. cap. 3, p. 53-72.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; LUZ, A. B. Ensaios de separação magnética e eletrostática. In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de Minérios**: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. cap. 18, p. 321-348.

SAMPAIO, J. A.; DELBONI JÚNIOR, H. Cominuição. In: LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. cap.4, p. 107-131.

SAMPAIO, J. A. *et al*. Separação magnética e eletrostática. In: LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. cap.8, p. 341-379.

SANT'AGOSTINO, L. M.; KAHN, H. **Metodologia para caracterização tecnológica de matérias-primas minerais**. São Paulo: EPUSP, 1997. 29 p.

SANTOS, A. L. A. **Caracterização mineralógica e tecnológica de minério**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018. 232 p.

SANTOS, E. S. *et al*. Espectrometria de fluorescência de raios-X na determinação de espécies químicas. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 17, p. 3413-3432, 2013.

SANTOS, L. D. **Caracterização microestrutural de minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero – MG**. 2002. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

SÃO JOSÉ, F. *et al*. Influência de minerais sulfetados no WI de um minério de zinco predominantemente silicatado. In: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA METALÚRGICA, DE MATERIAIS E DE MINAS, 14., 2014, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ABM Week, 2014. p. 2991-3000.

SCAPIN, M. A. **Aplicação da difração e fluorescência de raios-X (WDXRF):** ensaios em argilominerais. 2003. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2003.

SGARBI, G. N. C. *et al*. Bacia Sanfranciscana: o registro Fanerozóico da Bacia do São Francisco. In: PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A. (eds.). **Bacia do São Francisco**: Geologia e Recursos Naturais. Belo Horizonte: SBG/MG, 2001. cap. 6, p. 93-138.

SGARBI, P. B. A. *et al*. Oxygen isotope thermometry of Brazilian potassic volcanic rocks of kamafugitic affinities. **Chemical Geology**, v. 146, n. 3-4, p. 115-126, 1998.

SGARBI, P. B. A.; GASPAR, J. C.; VALENÇA, J. G. Clinopyroxene from Brazilian kamafugites. **Lithos**, v. 53, n. 2, p. 101-116, 2000.

SGARBI, P. B. A.; GASPAR, J. C. Geochemistry of Santo Antônio da Barra Kamafugites, Goiás, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 14, n. 8, p. 889-901, 2002.

SHIMIZU, V. K. **Classificação e caracterização de tipos de minérios de cobre na mina do Sossego – região de Carajás**. 2012. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SILVA, M. B. **Separação magnética de ultrafinos hematíticos**. 2012. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

SILVA, R. L. P. **Petrologia e geoquímica do Batólito Rio Formoso, domínio Pernambuco-Alagoas**. 2018. 113 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

SILVA, R. M. C. **Utilização da técnica de fluorescência de raios X com microssonda (m-XRF) aplicada a amostras de interesse arqueológico**. 2002. 85 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SILVA, S. **Petrografia e química mineral das intrusões Indaiá I e Indaiá II, Oeste do Estado de Minas Gerais**. 2008. 113 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SOUZA, A. A. P. **Caracterização mineralógica de itabiritos da Serra do Sapo, MG**: aplicação da técnica *Mineral Liberation Analyser* – MLA. 2014. 121 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

STOPPA, F.; WOOLLEY, A. R.; CUNDARI, A. Extension of the melitite-carbonatite province in the Apennines of Italy: the kamafugite of Grotta del Cervo, Abruzzo. **Mineralogical Magazine**, v. 66, n. 4, p. 555-574, 2002.

UFRGS. **Diopsídio**. 2024a. Disponível em: https://www.ufrgs.br/minmicro/Diops%C3%ADdio.pdf. Acesso em: 17 jul. 24.

UFRGS. **Calcita**. 2024b. Disponível em: https://www.ufrgs.br/minmicro/Calcita.pdf. Acesso em: 17 jul. 24.

UFRGS. **Perovskita**. 2024c. Disponível em: https://www.ufrgs.br/minmicro/Perovskita.pdf. Acesso em: 17 jul. 24.

UFRGS. **Titanita**. 2024d. Disponível em: https://www.ufrgs.br/minmicro/Titanita.pdf. Acesso em: 17 jul. 24.

UHLEIN, G. J. *et al*. Early to late Ediacaran conglomeratic wedges from a complete foreland basin cycle in the southwest São Francisco Craton, Bambuí Group, Brazil. **Precambrian Research**, v. 299, p. 101-116, 2017.

UNESP. Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert. **Diopsídio**. 2024a. Disponível em: https://museuhe.com.br/mineral/diopsidio-diopside/. Acesso em: 17 jul. 24.

UNESP. Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert. **Calcita**. 2024b. Disponível em: https://museuhe.com.br/mineral/calcita-calcite/. Acesso em: 17 jul. 24.

UNESP. Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert. **Titanita**. 2024c. Disponível em: https://museuhe.com.br/mineral/titanita-titanite/. Acesso em: 17 jul. 24.

UNESP. Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert. **Magnetita**. 2024d. Disponível em: https://museuhe.com.br/mineral/magnetita-magnetite/. Acesso em: 17 jul. 24.

UNESP. Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert. **Mica**. 2024e. Disponível em: https://museuhe.com.br/mineral/mica-mica/. Acesso em: 17 jul. 24.

UNESP. Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert. **Montmorillonita**. 2024f. Disponível em: https://museuhe.com.br/mineral/montmorillonita-montmorillonite/. Acesso em: 17 jul. 24.

USP. **Apatita**. 2024a. Disponível em: https://didatico.igc.usp.br/minerais/fosfatos/apatita/. Acesso em: 17 jul. 24.

USP. **Magnetita**. 2024b. Disponível em: https://didatico.igc.usp.br/minerais/oxidos-hidroxidos/magnetita/. Acesso em: 17 jul. 24.

USP. **Biotita**. 2024c. Disponível em: https://didatico.igc.usp.br/minerais/silicatos/filossilicatos/biotita-2/. Acesso em: 17 jul. 24.

VALDERRAMA, L. *et al*. Concentración magnética aplicada a relaves de cobre. **HOLOS**, v. 6, p. 37-44, 2014.

VARELA, J. J.; BRUM, I. A. S. Reagentes e equipamentos aplicados ao processo de flotação no tratamento de minérios. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 22., 2007, Ouro Preto. **Anais [...]**. Ouro Preto: ENTMME, 2007. p. 423-430.

VALY, A. E. A. **Efeitos granulodensitários na jigagem**. 2017. 197 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

WEDD, M.; WARD-SMITH, S.; RAWLE, A. Particle size analysis. In: WORSFOLD, P.; POOLE, C.; TOWNSHEND, A.; MIRÓ, M. **Encyclopedia of Analytical Science**. (Third Edition). Oxford: Academic Press, 2019. p. 144-157.

WARR, L. N. IMA–CNMNC approved mineral symbols. **Mineralogical Magazine**, v. 85, n. 3, p. 291-320, 2021.

WEBMINERAL. **Apatite**. 2024a. Disponível em: https://webmineral.com/data/Apatite.shtml. Acesso em: 01 out. 2024.

WEBMINERAL. **Perovskite**. 2024b. Disponível em: https://webmineral.com/data/Perovskite.shtml. Acesso em: 01 out. 2024.

WILLS, B. A.; FINCH, J. A. **Wills' mineral processing technology**: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. Butterworth-Heinemann, 2015.