



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ESTUDOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA PARA
DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS PARA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA,
VISANDO A REDUÇÃO DE Fe_2O_3 EM ROCHA RICA EM
FELDSPATOS EXTRAÍDA EM PEDRA LAVRADA-PB**

DEFSSON DOUGLAS DE ARAÚJO FERREIRA

Campina Grande – Paraíba
2022

DEFSSON DOUGLAS DE ARAÚJO FERREIRA

**ESTUDOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA PARA
DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS PARA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA,
VISANDO A REDUÇÃO DE Fe_2O_3 EM ROCHA RICA EM FELDSPATOS
EXTRAÍDA EM PEDRA LAVRADA-PB**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral, Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia, da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Exploração Petrolífera e Mineral.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Bertolino

Linha de Pesquisa: Beneficiamento Mineral

Campina Grande – Paraíba

2022

F383e Ferreira, Defsson Douglas de Araújo.

Estudos de caracterização química e mineralógica para definição de parâmetros para separação magnética, visando a redução de Fe_2O_3 em rocha rica em feldspatos extraída em Pedra Lavrada-PB / Defsson Douglas de Araújo Ferreira. – Campina Grande, 2022.

78 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Exploração Petrolífera e Mineral) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2022.

"Orientação: Prof. Dr. Luiz Carlos Bertolino; Coorientação: Prof^ª. Dr^ª. Elissandra Nascimento de Moura Lima".

Referências.

1. Feldspato. 2. Processamento. 3. Caracterização. 4. Grau de Liberação. 5. Separação Magnética. I. Bertolino, Luiz Carlos. II. Lima, Elissandra Nascimento de Moura. III. Título.

CDU 553.613(043)

DEFSSON DOUGLAS DE ARAÚJO FERREIRA

**ESTUDOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA PARA
DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS PARA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA,
VISANDO A REDUÇÃO DE Fe_2O_3 EM ROCHA RICA EM FELDSPATOS
EXTRAÍDA EM PEDRA LAVRADA-PB**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral, Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia, da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Exploração Petrolífera e Mineral.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Luiz Carlos Bertolino
Orientador

Prof. Dr^a Ailma Roberia Souto de Medeiros
Examinadora

Prof. Dr^a Ligia Mara Gonzaga
Examinadora

Campina Grande – Paraíba
2022.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EXP. PETROLIFERA E MINERACAO
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

Defesa N° 45

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM EXPLORAÇÃO PETROLÍFERA E MINERAL

DATA DA DEFESA: 16/12/2022

CANDIDATO: **Defsson Douglas de Araújo Ferreira.**

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Bertolino. (CPF: 049.369.048.48)

BANCA EXAMINADORA: (nomes completos, CPF)

Examinador: Prof. Dr. Luiz Carlos Bertolino. (CPF: 049.369.048.48) (Presidente)

Examinadora: Profa. Dra. Ailma Robéria Souto de Medeiros (CPF: 072.488.414.98)

Examinadora: Profa. Dra. Lígia Mara Gonzaga (CPF: 049.705.064.18)

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESTUDOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA PARA DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS PARA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA, VISANDO A REDUÇÃO DE Fe₂O₃ EM ROCHAS RICAS EM FELDSPATOS EXTRAÍDAS EM PEDRA LAVRADA-PB

LOCAL: Plataforma Google Meet

HORA DE INÍCIO: 13:30h

Em sessão pública, após exposição de cerca de 50 minutos, o candidato foi arguido oralmente pelos membros da banca tendo como resultado:

(x) APROVADO [X] com louvor

() APROVADO COM RESTRIÇÕES – as exigências que constam na folha de modificações em anexo devem ser atendidas em prazo fixado pela banca (não superior a 90 dias)

() NÃO APROVADO

FOLHA DE MODIFICAÇÃO DE ATA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Modificações sugeridas na dissertação de Mestrado do candidato Defsson Douglas de Araújo Ferreira.

Dissertação Nº 45, realizada no dia 16 de dezembro de 2022

As modificações sugeridas foram as seguintes:

Foram sugeridas modificações ao discente e serão enviadas também por escrito, via email. Tais sugestões serão consideradas para a elaboração do texto final da dissertação.

O prazo para o cumprimento das exigências é de até 60 dias, sendo responsável o professor: Luiz Carlos Bertolino.

Dentro do prazo determinado pela banca, o orientador deverá apresentar certidão neste processo, atestando o cumprimento das exigências por parte do aluno;

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é abaixo assinada pelos membros da banca e pelo candidato:

Campina Grande, 16 de dezembro de 2022.

CARLOS ALBERTO BEZERRA DOS SANTOS

Secretário

LUIZ CARLOS BERTOLINO, DR. CETEM

Orientador e presidente da comissão

LÍGIA MARA GONZAGA, DRA. IFRN

Examinadora externa

AILMA ROBÉRIA SOUTO DE MEDEIROS, DRA. IFPB

Examinadora Externa

DEFSSON DOUGLAS DE ARAÚJO FERREIRA

Candidato

2 - APROVAÇÃO

2.1. Segue a presente Ata de Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato **Defsson Douglas de Araújo Ferreira**, assinada eletronicamente pela Comissão Examinadora acima identificada.

2.2. No caso de examinadores externos que não possuam credenciamento de usuário externo ativo no SEI, para igual assinatura eletrônica, os examinadores internos signatários certificam que os examinadores externos acima identificados participaram da defesa da tese e tomaram conhecimento do teor deste documento.



Documento assinado eletronicamente por **Ailma Roberia Souto de Medeiros, Usuário Externo**, em 16/12/2022, às 15:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **CARLOS ALBERTO BEZERRA DOS SANTOS, ASSISTENTE EM ADMINISTRACAO**, em 16/12/2022, às 15:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ligia Mara Gonzaga, Usuário Externo**, em 16/12/2022, às 16:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Carlos Bertolino, Usuário Externo**, em 16/12/2022, às 16:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Defsson Douglas de Araújo Ferreira, Usuário Externo**, em 18/12/2022, às 08:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **2993266** e o código CRC **F0F79E02**.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Francisca Nascimento de Araújo
Ferreira e João Batista Ferreira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela concretização deste ciclo, por me ajudar a superar a todos os obstáculos encontrados durante essa caminhada, e por todas as bênçãos ao longo da minha vida pessoal e profissional.

Aos meus pais, Francisca e João Batista, e irmãos, Erika e João Vitor, por todo incentivo, em todos momentos. A minha namorada Áquila Gisely por tornar minha jornada mais leve e alegre.

A Vinícius Rewel, um amigo de todas as horas, suas contribuições foram essenciais no desenvolvimento dos experimentos.

Ao meu orientador, Professor Dr. Luiz Carlos Bertolino, pela oportunidade em me orientar neste projeto, pelo conhecimento compartilhado.

Ao Centro de Tecnologia Mineral (CETEM/RJ) por me recepcionar da melhor forma para realização dos experimentos necessários ao desenvolvimento do estudo.

Aos professores da Universidade Federal de Campina Grande pelos ensinamentos e experiências que contribuíram no meu processo de formação profissional.

“O rejeito de hoje é o minério de amanhã.”

Defsson Douglas de Araújo Ferreira

RESUMO

A demanda por feldspatos de elevada pureza, sobretudo para utilização na fabricação de porcelanatos e louças brancas, acarreta um desafio para o processamento do minério. Pela necessidade de teores de óxido de ferro (Fe_2O_3) baixos, inferiores a 0,15%, as operações capazes de fornecer um produto com alta pureza são mais complexas e onerosas. Para tanto, torna-se necessário empregar a caracterização química e mineralógica para conhecimento do minério e planejamento das operações da planta de beneficiamento. Foi estudada uma amostra de rocha rica em feldspatos coletada em uma extração no município de Pedra Lavrada/PB, visando a identificação da composição química, mineral e espectro de liberação por meio das técnicas de DRX, FRX e MEV, com intuito de fornecer subsídios para utilização da separação magnética a seco para purificação do feldspato. Alíquotas foram submetidas a etapas de preparação, classificação granulométrica e separação magnética. Os difratogramas de raios X indicam que a rocha apresenta altas concentrações de feldspatos (albita, ortoclásio e microclínio), quartzo e um conteúdo significativo de magnetita e hornblenda, sendo estes os principais minerais portadores de ferro a serem concentrados para adequação química do minério. O teor médio de óxido de ferro na rocha é 1,25%, sendo as maiores concentrações presentes nas frações granulométricas de $-0,6+0,3\text{mm}$ e $-0,3+0,15\text{mm}$, com percentuais de 1,621% e 1,924%, nessa ordem. As imagens da microscopia eletrônica de varredura demonstraram uma maior liberação física das fases minerais magnéticas abaixo de 0,3mm, devendo as operações de fragmentação serem projetadas visando este padrão granulométrico para eficiência nas operações de concentração mineral. Os ensaios de separação magnética promoveram recuperações mássicas e metalúrgicas variadas em função da granulometria de alimentação e da velocidade de operação dos rolos. Os resultados mais expressivos foram obtidos nas amostras submetidas a separação magnética a seco, cujo intervalo granulométrico utilizado foi $-0,3+0,15\text{mm}$ e baixa velocidade de operação dos rolos, gerando uma fração não magnética contendo 0,147% de Fe_2O_3 (redução de 76,81% do ferro em relação a alimentação), estando este índice dentro dos padrões químicos exigidos para aplicação na composição de porcelanatos. As demais condições operacionais dos ensaios magnéticos produziram frações não magnéticas com teores de Fe_2O_3 oscilando entre 0,285% e 0,3%, levemente superiores aos limites da indústria de porcelanato, contudo, adequados a produção de cerâmicas ou vidros menos nobres.

Palavras-chave: processamento mineral; feldspato; caracterização; grau de liberação; separação magnética.

ABSTRACT

The demand for high purity feldspars, especially for use in the manufacture of porcelain tiles and whiteware, poses a challenge for the processing of the ore. Due to the need for very low levels of iron oxide (Fe_2O_3), below 0.15%, operations capable of providing a product with high purity are more complex and costly. Therefore, it is necessary to employ chemical and mineralogical characterization to understand the ore and plan the operations of the beneficiation plant. A rock sample rich in feldspars collected from a pregnant woman in the municipality of Pedra Lavrada/PB was studied, aiming to identify the chemical composition, mineral and release spectrum through XRD, XRF and SEM techniques, with the intention of providing benefits for use of dry magnetic separation for feldspar purification. Aliquots were left to preparation, granulometric classification and magnetic separation steps. X-ray diffractograms indicate that the rock has high concentrations of feldspars (albite, orthoclase and microcline), quartz and a significant content of magnetite and hornblende, these being the main iron-bearing minerals to be concentrated for fuel chemistry. The average content of iron oxide in the rock is 1.25%, with the highest concentrations present in the granulometric fractions of $-0.6+0.3\text{mm}$ and $-0.3+0.15\text{mm}$, with percentages of 1.621% and 1.924% , in that order. Scanning electron microscopy images show a greater physical release of magnetic mineral phases below 0.3mm, developing fragmentation operations being designed seeking this granulometric standard for efficiency in mineral concentration operations. Magnetic separation tests promote mass and metallurgical recoveries based on the feed granulometry and the operating speed of the rolls. The most expressive results were obtained in the samples observed under dry magnetic separation, whose granulometric range used was $-0.3+0.15\text{mm}$ and low operating speed of the rollers, generating a non-magnetic display containing 0.147% of Fe_2O_3 (reduction of 76.81% of iron in relation to food), following this index within the standards of chemical products required for application in the composition of porcelain tiles. The other operational conditions of the magnetic tests produce non-magnetic fractions with Fe_2O_3 contents oscillating between 0.285% and 0.3%, slightly higher than the limits of the porcelain tile industry, however, suitable for the production of less noble ceramics or glasses.

Key words: processing; feldspar; characterization; degree of liberation; magnetic separation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Operação de Perfuração em lavra de feldspato.	14
Figura 2 - Britador de Mandíbulas utilizado no primeiro estágio de britagem.	15
Figura 3 - Moinho de martelos.....	15
Figura 4 - Separadores magnéticos utilizados na Elisabeth Mineração.....	16
Figura 5 - Fluxograma de processamento mineral da Elisabeth Mineração.	16
Figura 6 - Mapa Geológico.	17
Figura 7 – Esquema de deformação e ruptura de um cristal sujeito à tensão e deformação.	19
Figura 8 - Concentração de esforços numa fenda.	19
Figura 9 -Mecanismos de fragmentação das rochas, com indicação dos produtos gerados.	20
Figura 10 - Principais britadores utilizados: (a) Britador de mandíbulas; (b) britador cônico;	22
Figura 11 - Esquema básico da difração de raios-X.	26
Figura 12 - Esquema básico representando o princípio do MEV.	27
Figura 13 -Volume de interação gerados na microscopia eletrônica de varredura.	28
Figura 14 - a) Imagem de MEV obtida por detector de elétrons secundários para cristais de magnetita, com EDS acoplado; b) imagem de MEV evidenciando um cristal de magnetita.....	29
Figura 15 – Separador magnético de ímãs permanentes.....	31
Figura 16 - Separador magnético a úmido de alta intensidade.	31
Figura 17 - Mapa de localização do município de Pedra Lavrada/PB.....	33
Figura 18 - Fragmentos de rocha coletados nas frentes de lavra da empresa Elisabeth Mineração.....	34
Figura 19 - Britador de mandíbulas utilizado nos ensaios.	35
Figura 20 - Processo de preparação de amostras: (a) Produto obtido após a britagem; (b) pilha cônica; (c) pilha cônica; (d) pilha piramidal.	35
Figura 21 -Classificação granulométrica por peneiramento a úmido.	36
Figura 22 – Separador magnético de rolos, ímãs permanentes de terras raras.	37
Figura 23 - Quarteador rotativo empregado na preparação das amostras para caracterização.....	38

Figura 24 - (a) Moinho planetário; (b) tipos de jarros.	39
Figura 25 - (a) Amostras antes da moagem; (b) produto após moagem durante três minutos.	39
Figura 26 - (a) amostras na porta amostra; (b) amostras dispostas na torre.	40
Figura 27 - Equipamento utilizado na aquisição dos difratogramas.	41
Figura 28 - Metalizador utilizado para recobrimento das amostras para MEV.	41
Figura 29 - (a) Amostras antes da metalização com prata; (b) amostras com recobrimento.	42
Figura 30 - Lupa binocular utilizada nas análises de frações mais grossas.	42
Figura 31 – Picnômetro a gás hélio, modelo ACCUPYC II 1340.	43
Figura 32 - Fluxograma ilustrando a metodologia empregada no estudo.	43
Figura 33 - Curva de distribuição granulométrica da massa passante.	45
Figura 34 - Variação no teor de Fe_2O_3 em função da granulometria.	46
Figura 35 - Variação no teor de Fe_2O_3 nas frações magnéticas obtidas.	47
Figura 36 - Variação no teor de Fe_2O_3 nas frações não magnéticas obtidas.	48
Figura 37 - Difratograma de raios X da fração -2,0+1,8mm.	49
Figura 38 - Difratograma de raios X da fração -1,18+1,0mm.	49
Figura 39 - Difratograma de raios X da fração -1,0+0,85mm.	50
Figura 40 - Difratograma de raios X da fração -0,85+0,71mm.	50
Figura 41 - Difratograma de raios X da fração -0,71+0,6mm.	51
Figura 42 - Difratograma de raios X da fração -0,6+0,3mm.	51
Figura 43 - Difratograma de raios X da fração -0,3+0,15mm.	52
Figura 44 – Difratograma de raios X com destaque dos picos de hornblenda na amostra F6.	53
Figura 45 - Difratograma de raios X com destaque do pico de magnetita na amostra F6.	53
Figura 46 - Difratograma de raios X com destaque dos picos de hornblenda na amostra F7.	54
Figura 47 - Difratograma de raios X com destaque do pico de magnetita na amostra F7.	54
Figura 48 - Sobreposição dos difratogramas de raios X das frações magnéticas.	55
Figura 49 - Sobreposição dos difratogramas de raios X das frações não magnéticas, com destaque para a região de ocorrência do pico de magnetita.	56
Figura 50 - Sobreposição dos difratogramas de raios X das frações não magnéticas.	57

Figura 51 - Imagens da fração F1 (-2,0+1,2mm). (a), (b), (c) indicam partículas do mineral magnetita formando partículas mistas com outros minerais, como o quartzo. (d) representa uma partícula mista com minerais portadores de ferro.....	58
Figura 52 - Espectro de EDS para a região delimitada da partícula mineral representada na Figura 54(a), confirmando a composição química da magnetita.	59
Figura 53 - Espectro de EDS para a região delimitada da partícula mineral representada na Figura 54(c), confirmando a composição química da magnetita	59
Figura 54 - Imagens da fração F2 (-1,18+1,0mm). (a) e (c) indicam partículas mistas, onde os tons mais claros representam minerais portadores de ferro do mineral. (b) representa um cristal de magnética não liberado e, (d) cristal de torianita.	60
Figura 55 - Espectro de EDS para a região delimitada na Figura 57(b).	61
Figura 56 - Espectro de EDS indicando a composição química da partícula representada na Figura 55(d), com destaque para a presença do elemento químico Tório (Th).	61
Figura 57 - Imagens da fração F3 (-1,0+0,85mm). (a) partículas de magnetita não liberada; (b) partícula de mineral portador de ferro parcialmente liberado.	62
Figura 58 - Imagens da fração F4 (-0,85+0,71mm). (a), (b) partículas de magnetita não liberadas em relação aos demais minerais.	62
Figura 59 - Imagens da fração F5 (-0,71+0,6mm). (a) partícula de magnetita parcialmente liberada; (b) partícula de mineral portador de ferro parcialmente liberado.	63
Figura 60 - Grãos de magnetita fisicamente liberados em -0,6+0,3mm.	63
Figura 61 - Imagens de MEV da fração F7 (-0,3+0,15mm). (a) e (d) evidenciam maiores quantidades de partículas minerais indicando a liberação física das partículas. (b) e (c) destacam um cristal de magnetita fisicamente liberado.....	64
Figura 62 - Espectro do EDS para região definida na Figura 61(b).	65
Figura 63 - Imagens de MEV da fração MAG.1. (a) partículas magnéticas. (b) partícula de magnetita parcialmente liberada.....	65
Figura 64 - Imagens de MEV da fração MAG.2. (a) partículas magnéticas. (b) partícula de magnetita parcialmente liberada.....	66
Figura 65 - Imagens de MEV da fração MAG.3. (a) partículas magnéticas liberadas. (b) partícula de magnetita totalmente liberada.	66
Figura 66 - Imagens de MEV da fração MAG.4. (a) partículas magnéticas liberadas e parcialmente liberadas. (b) partícula de magnetita libera	66

Figura 67 - Imagens de MEV da fração N.MAG1. (a) conjunto de partículas não magnéticas. (b) partícula não magnéticas, destaque (em vermelho) para partícula contendo grão de magnetita.	67
Figura 68 - Imagens de MEV da fração N.MAG2. (a) conjunto de partículas não magnéticas. (b) partícula não magnéticas, destaque (em vermelho) para partículas não magnéticas contendo grãos de magnetita de baixa granulometria.	67
Figura 69 - Imagens de MEV da fração N.MAG3. (a) conjunto de partículas não magnéticas com destaque (em vermelho) para partícula mista contendo grão de magnetita. (b) partícula não magnéticas.	68
Figura 70 - Imagens de MEV da fração N.MAG4. (a) conjunto de partículas não magnéticas. (b) partícula não magnéticas e destaque (em vermelho) para partícula contendo Fe ₂ O ₃	68
Figura 71 - Densidades das frações granulométricas.	69
Figura 72 - Densidades das frações magnéticas.	70
Figura 73 - Densidades das frações não magnéticas.	70
Figura 74 - Esquema de representação da eficiência da separação magnética.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades fundamentais dos feldspatos.....	5
Tabela 2 - Características químicas e físicas dos feldspatos alcalinos.	7
Tabela 3 - Série dos feldspatos sódico-cálcicos.	8
Tabela 4 - Características químicas e físicas dos feldspatos sódico-cálcicos.....	8
Tabela 5 - Indicação dos percentuais de feldspato utilizado por produto.....	10
Tabela 6 - Reserva e produção mundial (feldspato).	11
Tabela 7 - Composição química para feldspatos processados.....	12
Tabela 8 - Especificações para uso industrial dos feldspatos processados.....	13
Tabela 9 - Classificação dos estágios de britagem.	21
Tabela 10 - Indicação das amostras submetidas a ensaios de separação magnética a seco.	37
Tabela 11 - Resultados da análise por FRX por granulometria (% em peso).....	46
Tabela 12 - Resultados da análise por FRX para as frações magnéticas separadas a seco (% em peso).	47
Tabela 13 - Resultados da análise por FRX para as frações não magnéticas separadas a seco (% em peso).	48
Tabela 14 - Balanço de massa e metalúrgico para Fe ₂ O ₃ (% em peso).	71

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E UNIDADES

a – percentagem de material na alimentação menor que a abertura considerada

Ab – Albita

An – Anortita

ATBIAV – Associação Brasileira das Indústrias do Vidro

cm – centímetro

d – densidade aparente do material

DRX – Difração de Raios X

DTA – Análise Térmica Diferencial

F – Granulometria da alimentação no qual 80% passa numa determinada peneira de referência

FRX – Fluorescência de Raios X

g – gramas

IFPB – Instituto Federal da Paraíba

kg quilogramas

kV – quilovolts

M – Massa

mA – miliamperes

min – minutos

mm – milímetro

p – passante

PPB – Província Pegmatítica da Borborema

UFPG – Universidade Federal de Campina Grande-PB

V – Volume

WI – Índice de trabalho

μm – micrômetros

ρ – massa específica do minério

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 FELDSPATOS.....	5
2.1.1 Mineralogia básica dos Feldspatos	6
2.1.2 Feldspatos Alcalinos.....	6
2.1.3 Feldspato Sódico-Cálcico.....	7
2.2 USOS E APLICAÇÕES DOS FELDSPATOS	9
2.2.4 Especificações Comerciais para utilização dos Feldspatos	12
2.3 LAVRA E BENEFICIAMENTO DE FELDSPATO	14
2.4 GEOLOGIA REGIONAL	17
2.5 ASPECTOS FUNDAMENAIIS DA COMINUIÇÃO.....	18
2.5.1 Britagem	20
2.6 TÉCNICAS DE AMOSTRAGEM.....	22
2.6.1 Homogeinização e Quarteamento.....	23
2.7 CARACTERIZAÇÃO DE MINÉRIOS	24
2.7.1 Fluorescência de raios X.....	25
2.7.2 Difração de raios X	26
2.7.3 Microscopia Eletrônica de Varredura	27
2.7.4 Separação Magnética.....	30
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	33
3.1 Britagem de amostras primárias.....	34
3.2 Classificação granulométrica	36
3.3 Separação magnética	36
3.4 Preparação de amostras para caracterização tecnológica	38
3.5 Difração de Raios X	40
3.6 Microscopia Eletrônica de Varredura	41
3.7 Microscopia em Lupa Binocular	42
3.8 Densidade aparente.....	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1. Análise granulométrica	45
4.3 Difração de raios X.....	49
4.3.1 Amostras: Frações granulométricas.....	49

4.3.2 Amostras: Frações magnéticas e não magnéticas	55
4.5 DENSIDADE ABSOLUTA.....	69
4.6 BALANÇO DE MASSA.....	71
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
6. REFERÊNCIAS.....	77

Capítulo I
INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

Feldspatos são largamente utilizados na indústria de vidros e cerâmica branca, e também como carga mineral em tintas, borrachas e plásticos. Na indústria de cerâmica branca os teores elevados de K_2O e Na_2O conferem propriedades fundentes e o Al_2O_3 atua como estabilizante, impedindo excesso de fluidez do esmalte fundido, assim além de baixar o custo de produção, reduzem a absorção de água e aumentam a resistência mecânica (Zanon *et al.*, 2002, Sampaio *et al.*, 2008).

O uso de feldspatos na cerâmica branca cresceu muito com o advento dos pisos porcelanatos, que, segundo Luz *et al.* (2008), consomem até 20% deste material em sua massa. Na fabricação de vidros, a alumina confere resistência a impactos e choques térmicos, e os álcalis também atuam como fundentes. Rochas alcalinas beneficiadas podem ser também utilizadas como fonte de Al_2O_3 para cimentos ou fonte de K e outros elementos menores como remineralizadores de solos no processo conhecido como rochagem (Luz *et al.*, 2008).

Recentemente, diversas indústrias cerâmicas vêm gradativamente substituindo o uso de feldspatos provenientes de pegmatitos, por compostos feitos a partir do beneficiamento de rochas alcalinas como, nefelina-sienitos, ou mesmo granitos alcalinos com baixo teor de Fe, chamadas genericamente de “rochas feldspáticas”. A vantagem destas rochas reside no fato de possibilitarem a produção de grande volume de material com qualidades químicas e mineralógicas uniformes e constantes após beneficiamento.

Nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte, ocorrem diversos complexos intrusivos com potencial para extração mineral e posterior processamento mineral visando a obtenção de produtos de elevada pureza.

A identificação de litotipos passíveis de aproveitamento, e a definição das melhores rotas de tratamento, visa estimular esta indústria no estado da Paraíba, visando a produção de concentrados com menor teor de contaminantes, de modo a atender aplicações ditas mais nobres, como a indústria de porcelanatos.

No estado da Paraíba, as atividades mineiras que ocorrem nos municípios de Pedra Lavrada, Picuí e Nova Palmeira, concentram-se principalmente na extração e beneficiamento de minerais de pegmatitos, que vêm sendo exploradas na região desde a década de 1940. Na execução da extração por garimpos, e nos processos de beneficiamento, são gerados resíduos em grande quantidade, e geralmente tem destino final inadequado, apresentando um enorme desperdício de material e degradação

ambiental. Como é de regra, esses resíduos poderiam ter outros destinos, como aplicações especiais nas diversas indústrias de transformação (Luz; Lins, 2008).

A Elizabeth Mineração, cujas operações de lavra e processamento estão localizadas no município de Pedra Lavrada-PB, estado da Paraíba foi selecionada para esta pesquisa em razão do alto volume de produção, e, além disso, devido a sua unidade de beneficiamento representar o processo empregado para o beneficiamento dessas rochas para produção de concentrados ricos em feldspatos.

Este trabalho objetiva definir, inicialmente, por caracterização química e mineralógica, os minerais portadores de ferro na rocha estudada, extraída e beneficiada pela empresa Elizabeth Mineração no município de Pedra Lavrada-PB. Em seguida, aplicar a separação magnética, a seco, em escala laboratorial, para investigar a eficiência desta operação para purificação da rocha pela redução do teor de óxido de ferro (Fe_2O_3).

1.1 OBJETIVOS

1.1.2 OBJETIVO GERAL

Este estudo tem como objetivo principal realizar caracterização química e mineralógica de uma rocha rica em feldspato extraída e processada pela Elizabeth Mineração, no município de Pedra Lavrada/PB, e a definição de parâmetros operacionais ótimos para separação magnética a seco visando a produção de feldspatos com baixa concentração de Fe_2O_3 e capacidade de atender aplicações mais nobres na indústria cerâmica.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos deste trabalho:

1. Realizar a caracterização química e mineralógica do minério que alimenta a planta de processamento mineral;
2. Investigar em quais faixas granulométricas concentram os maiores conteúdos de minerais portadores de ferro e suas distribuições em relação aos demais minerais;
3. Estudar o espectro de liberação para determinar as faixas granulométricas que devem ser geradas pelas operações de cominuição para sucesso da separação magnética a seco;
4. Investigar a separação magnética em escala laboratorial para definir parâmetros de controle para esta operação.

Capítulo II
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FELDSPATOS

Segundo Coelho (2009), o feldspato corresponde a um grupo de minerais classificados como silicatos de alumínio, com composição química variada da concentração de potássio, sódio, cálcio, e eventualmente bário. Os feldspatos sódicos e potássicos em grande aplicação na indústria cerâmica e de vidro.

O feldspato é representado principalmente por dois grupos de minerais, são eles os álcolis-feldspato e os plagioclásios. Os álcalis-feldspato são principalmente o ortoclásio e a microclínia cuja fórmula química é a mesma ($KAlSi_3O_8$). As propriedades fundamentais dos feldspatos estão apresentadas na Tabela 1.

Os plagioclásios formam uma solução rica em sódio, $Na(AlSi_3O_8)$, até a anortita rica em cálcio $Ca(Al_2Si_2O_8)$.

Tabela 1 - Propriedades fundamentais dos feldspatos.

Propriedade	Descrição
Aspecto óptico	Translúcido u transparente
Cor	Branco a róseo
Brilho	Vítreo e não metálico
Dureza	6,0
Densidade	2,56 a 2,83
Hábito	prismático ou compacto

Fonte: Coelho (2009).

2.1.1 Mineralogia básica dos Feldspatos

Ainda conforme Coelho (2009), a associação dos produtores de feldspato da comunidade Européia-Eurofel, cita que os principais depósitos em exploração no mundo são depósitos do tipo nefelina-sienito. Esses são rochas constituídas por feldspatóides, principalmente nefelina.

De uma maneira geral, pode-se dizer que as composições químicas dos feldspatos permitem classifica-los em:

- Ortoclásio / Microclina (KAlSi_3O_8);
- Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$);
- Anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$).

O grupo do feldspato é subdividido em dois subgrupos em função das diferenças dos tipos de álcalis predominantes e estrutura cristalina (DEER; HOWIER; ZUSSMAN, 1966). São eles:

1. Feldspatos alcalinos ou álcali-feldspatos: feldspato potássico (KAlSi_3O) e a albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$);

2. Plagioclásios ou feldspatos sódico-cálcicos: entre anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) e albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$).

2.1.2 Feldspatos Alcalinos

A Tabela 2 apresenta as propriedades características químicas, físicas, estruturais, dos feldspatos alcalinos. O subgrupo dos feldspatos alcalinos ($\text{KAlSi}_3\text{O}_8 - \text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) incluem os minerais: ortoclásio, microclínio, sanidina e anortoclásio. As suas estruturas correspondem às temperaturas mais baixas de cristalização, denomina-se ortoclásio. Já os feldspatos potássicos, e de elevadas temperaturas de cristalização denomina-se sanidinas, e os feldspatos potássicos de mais baixa temperatura, denomina-se microclínio (DEER; HOWIER; ZUSSMAN, 1966).

Tabela 2 - Características químicas e físicas dos feldspatos alcalinos.

	Ortoclásio	Microclínio	Sanidina
Fórmula Química	$KAlSi_3O_8$	$KAlSi_3O_8$	$(K, Na)(Si, Al)_4O_8$
Composição	16,92% K_2O 18,32% Al_2O_3 64,76% SiO_2	16,92% K_2O 18,32% Al_2O_3 64,76% SiO_2	12,88% K_2O 2,82% Na_2O 18,59% Al_2O_3 65,71% SiO_2
Cristalografia a/	Monoclínico/ Prismática	Triclínico/Pinacoidal	Monoclínico/ Prismática
Hábito	Prismático	Prismático	Prismático
Clivagem	Perfeita e Boa	Perfeita e Boa	Perfeita e Boa
Dureza	6,0 - 6,5	6,0 - 6,5	6,0 - 6,5
Densidade Relativa	2,56	2,56	2,56
Ocorrência	Rochas ígneas e metamórficas.	Pegmatitos graníticos. Rochas hidrotermais e metamórfica.	Rochas magmáticas félsicas
Usos	Indústria de cerâmica, abrasivos, britas, uso gemológico.	Indústria de cerâmica, vidreira, adubo potássico e uso gemológico.	Indústria de cerâmica, vidreira, adubo potássico e uso gemológico.

Fonte: (DEER, HOWIER, ZUSSMAN, 1966).

2.1.3 Feldspato Sódico-Cálcico

Os feldspatos classificados como sódico-cálcicos incluem variações da série da solução sólida de albita ($NaAlSi_3O_8$), anortita ($CaAl_2Si_2O_8$) incluindo albita, oligoclásio, andesina, labradorita, bytownita e anortita (LUZ; LINS, 2008).

Conforme representada na Tabela 3, a série é designada em termos das proporções dos componentes albítico (Ab) e anortítico (An) existentes em cada mineral, sendo a soma de Ab e An igual a 100%.

Tabela 3 - Série dos feldspatos sódico-cálcicos.

Mineral	Porcentagem de albita	Porcentagem de anortita
Albita	100 - 90	0 - 10
Oligoclásio	90 - 70	10 - 30
Andesina	70 - 50	30 - 50
Labradorita	50 - 30	50 - 70
Bytownita	30 - 10	70 - 90
Anortita	10 - 0	90 - 100

Fonte: LUZ; LINS (2008).

A Tabela 4, a seguir, indica as propriedades composições químicas e físicas, além do resumo das aplicações e formas de ocorrência da referida classe de feldspatos.

Tabela 4 - Características químicas e físicas dos feldspatos sódico-cálcicos.

	Albita	Oligoclásio	Andesina	Labradorita	Bytownita	Anortita
Composição	11,19%Na ₂ O 1,07% CaO 20,35% Al ₂ O ₃ 67,39% SiO ₂	9,34%Na ₂ O 4,23% CaO 20,05% Al ₂ O ₃ 58,38% SiO ₂	6,92%Na ₂ O 8,35% CaO 26,57% Al ₂ O ₃ 58,16% SiO ₂	4,56%Na ₂ O 12,38% CaO 30,01% Al ₂ O ₃ 53,05% SiO ₂	2,25%Na ₂ O 16,31% CaO 33,37% Al ₂ O ₃ 48,07% SiO ₂	0,56%Na ₂ O 19,20% CaO 35,84% Al ₂ O ₃ 44,40% SiO ₂
Cristalografia / Classe	Triclínico Pinacoide	Triclínico Pinacoide	Triclínico Pinacoide	Triclínico Pinacoide	Triclínico Pinacoide	Triclínico Pinacoide
Hábito	Prismático	Prismático	Tabular	Prismático	Tabular	Tabular
Clivagem	Perfeita e Boa	Perfeita e Boa	Perfeita	Perfeita, Boa e distinta	Perfeita	Perfeita e Boa
Dureza	6,0 - 6,5	6,0 - 6,5	6,0	6,0 - 6,5	6,0 - 6,5	6,0
Densidade	2,62	2,64 - 2,66	2,66 - 2,68	2,68 - 2,71	2,7 - 2,72	2,72 - 2,75
Usos	Indústria de vidro e porcelanato.	Indústria de vidro e porcelana.	Indústria de cerâmica.	Indústria cerâmica e	Indústria de vidro e porcelanato	Indústria de cerâmica.

Fonte: (DEER; HOWIER; ZUSSMAN, 1966).

2.2 USOS E APLICAÇÕES DOS FELDSPATOS

De acordo com Kauffman e Vandyk (1994, apud LUZ, LINS E COELHO, 2008), as indústrias de cerâmica e vidro correspondem aos principais campos de aplicação dos feldspatos. Tanto para vidro, quanto para cerâmica, o feldspato contribui como fonte de SiO_2 . Além dessas aplicações, o mineral também pode ser aplicado como carga funcional e extensor, nas indústrias de tinta, plástico e borracha. A seguir são descritas, ainda de acordo com os supracitados autores, como o feldspato é utilizado nas suas principais aplicações.

Indústria cerâmica – a quantidade de feldspato utilizada na indústria cerâmica varia de acordo com o tipo de produto. A porcelana de mesa demanda entre 17 e 20% do mineral, cerâmica de piso entre 55 a 60%, revestimento de parede de zero a 11%, porcelana elétrica entre 25 e 35%. Nessas aplicações, o feldspato tem a função de formar uma fase vítrea no corpo/objeto, que provoque uma vitrificação e transluzimento. A formulação de qualquer cerâmica tradicional é composta de dois elementos principais: o material plástico, geralmente argila e caulim, e o material de maior dureza, comumente o feldspato. O constituinte plástico permite que o corpo cerâmico seja moldado, enquanto os constituintes duros permitem a criação da forma desejada, após a etapa de queima da cerâmica. Ainda segundo esse mesmo autor, na indústria cerâmica as variedades de feldspato utilizadas são a albita, feldspato sódico e ortoclásio ou microclínio, além do feldspato potássico. A anortita, feldspato cálcico, é dificilmente usado, pois trata-se de um mineral muito refratário;

Indústria de vidros – na fabricação dos mais diversos tipos de vidro, o feldspato é usado como fonte de Al_2O_3 , Na_2O e/ou K_2O , e SiO_2 . Os álcalis (K_2O , Na_2O) contidos no feldspato substituem, parcialmente, o carbonato de sódio e têm a função de fundente. A alumina ajuda a trabalhabilidade do vidro fundido, aumenta a resistência do vidro à corrosão química, aumenta a sua dureza, durabilidade e inibe a desvitrificação.

De acordo com Coelho (2009), mais de 90% de todo o feldspato produzido no Brasil é consumido pelas indústrias de cerâmica, vidro e coloríficos. Na indústria cerâmica a utilização do feldspato visa a atuação desse mineral como fundente (diminuindo a temperatura de fusão), além de fornecer sílica. Na fabricação de vidros o feldspato é utilizado como fundente e fonte de alumina (Al_2O_3), álcalis (Na_2O e K_2O) e sílica (SiO_2).

O predito autor acrescenta que o feldspato é também usado como carga mineral nas indústrias de tintas, plásticos, borrachas e abrasivos leves, e como insumo na indústria de

eletrodos para soldas. A Tabela 5, indica a participação em percentual do feldspato em cada uma das principais aplicações desse mineral.

Tabela 5 - Indicação dos percentuais de feldspato utilizado por produto.

Produto	Percentual (%)
Azulejos	0-11
Vasilhame de vidro	8
Louça sanitária	10
Louça de mesa	17-20
Fibra de vidro	18
Porcelanato	55-60
Porcelana dental	60-80

Fonte: Adaptado de Luz et al., 2009 apud Potter, 2006.

2.2.1 Minerais e Materiais Alternativos

Segundo Coelho (2009), na indústria cerâmica, os principais substitutos do feldspato são a areia feldspática e a rocha nefelina-sienito, consideradas importantes fontes desse mineral ou alternativas a esse. No Brasil, diversas substâncias minerais estão sendo utilizadas como fundente, em substituição ao feldspato, como o granito tipo Jundiá e filito.

Na indústria de vasilhame de vidros, os principais materiais substitutos de feldspato são: escória de alto forno, areia feldspática e nefelina-sienito. Já na indústria de vidro plano, está sendo usada a alumina calcinada e alumina hidratada. No caso de fibra têxtil, o substituto imediato vem sendo o caulim.

De acordo com o Sumário Mineral (2017), o feldspato pode ser substituído em várias de suas aplicações por agalmatolito, areia feldspática, argila, escória de alto-forno, filito, nefelina-sienito, pirofilita e talco.

2.2.2 Outros Fatores Relevantes

De acordo com o Sumário Mineral (2017), a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres – ANFACER, destaca o Brasil como um dos principais protagonistas no mercado mundial de revestimentos cerâmicos, ocupando a segunda posição em produção e consumo, atrás da China.

2.2.3 Reservas e Oferta Mundial e do Brasil – 2017

Conforme o Sumário Mineral 2017 as reservas de feldspatos são abundantes na Itália, Turquia e China. No Brasil, as reservas medidas, em 2017, eram da ordem de 145 milhões de toneladas, distribuídas entre os estados de Minas Gerais (28%), Santa Catarina (24%), São Paulo (21%), Rio Grande do Norte (15%), Paraná (7%), Bahia (3%), Espírito Santo (1%), Paraíba (1%), Ceará, Tocantins e Rio de Janeiro apresentam reservas pouco significantes no cenário nacional.

Conforme citado anteriormente, as reservas de feldspato no Brasil englobam, principalmente, depósitos de rochas pegmatíticas, que em função das suas características morfológicas, fornecem grandes volumes de feldspatos e demais bens minerais classificados como minerais industriais (quartzo, mica, entre outros).

Segundo Coelho (2009), os números referentes às reservas de feldspatos não são muito precisos, visto que a cubagem dos pegmatitos, principal fonte, é muito difícil devido às suas morfologias. No entanto, ocorreu um significativo aumento das reservas brasileiras de feldspatos, dos anos de 1970 aos dias atuais. O autor atribui esse crescimento ao aumento da demanda do bem mineral na indústria cerâmica, sobretudo a partir do ano de 2002.

De acordo com os dados levantados a partir do Sumário Mineral (2017), em 2016, no cenário mundial as maiores reservas medidas de feldspatos estão concentradas no Irã, Turquia, Brasil, Índia, além de outros países cujos dados numéricos não estão disponíveis para consulta. A Tabela 6 apresenta os dados de reservas, em 2016, e produção dos anos de 2015 e 2016.

Tabela 6 - Reserva e produção mundial (feldspato).

Discriminação Países	Reservas ⁽¹⁾ (10 ⁶ t)	Produção ⁽²⁾ (t)		
	2016 ^(p)	2015 ^(r)	2016 ^(p)	%
Brasil	145	456	296	1,3
Turquia	240	5.000	5.000	21,8
Itália	Nd	4.700	4.700	20,5
China	Nd	2.500	2.500	10,9
Índia	45	1.500	1.500	6,5
Tailândia	Nd	1.300	1.500	6,5
Irã	630	1.200	1.300	5,7
Espanha	Nd	600	600	2,6

Estados Unidos da América	Nd	520	600	2,6
Venezuela	Nd	500	500	2,2
Outros Países	Nd	4.564	4.480	19,4
Total	Abundantes	22.840	22.976	100

Fonte: ANM/SRD-AMB (dados Brasil), USGS - Mineral Commodity Summaries 2017 (demais países). (1) Reserva medida; (2) produção beneficiada; (p) preliminar; (r) revisado; (nd) dados não disponíveis.

2.2.4 Especificações Comerciais para utilização dos Feldspatos

De acordo com Kuzmickas *et al.*, (2013), o feldspato para ser de primeira qualidade, deve conter menos que 0,1% de Fe₂O₃. Segundo Moura (1981), os feldspatos devem possuir as seguintes especificações:

- Granulometria variando de 5 a 15 cm ou estar moído (< 28 malhas), de modo a viabilizar a preparação das massas cerâmicas;
- Baixos teores de Fe₂O₃, inferior a 0,2%, pouco quartzo (menos de 10%) e ponto de fusão de 1.200°C.

As Tabelas 7 e 8 resumem as características químicas, granulométricas e demais informações pertinentes aos feldspatos para as mais diversas aplicações.

Tabela 7 - Composição química para feldspatos processados.

Composições química (%)	
SiO ₂	64,9
Al ₂ O ₃	18,7
Fe ₂ O ₃	0,10
Na ₂ O	3,71
K ₂ O	10,8
CaO	0,10

Fonte: Adaptado de KUZMICKAS *et al.* (2013).

Tabela 8 - Especificações para uso industrial dos feldspatos processados.

Indústria	Composição química							Granulometria	PF	Observações		
Cerâmica	1º qualidade		$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \geq 13,0\%$ $\text{Al}_2\text{O}_3 > 18\%$ $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,1\%$ $\text{TiO}_2 < 0,2\%$ $\text{CaO e MgO} \leq 0,3\%$ $\text{SiO}_2 \leq 67\%$					Varia desde 100% passante na malha 30# (0,6mm) até 100% na malha 200# (0,074mm)	0,5% máx	O feldspato, tanto sódico como potássico é utilizado como fundente, devido a presença de álcalis nos setores de louça sanitária.		
	2º qualidade		$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \geq 10,0\%$ $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$ $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,51\%$ $\text{SiO}_2 \leq 71\%$					Varia desde 100% passante na malha 10# (2mm) até 100% na malha 200# (0,074mm)	1,0% máx			
Tintas	Potássico		$\text{SiO}_2 \leq 65,0\%$ $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 20\%$ $\text{Na}_2\text{O} < 10\%$ $\text{K}_2\text{O} > 9$ a 12,0% $\text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 0,20\%$					100% passante na #200 mesh (0,074mm)	1,0% máx	Os feldspatos são utilizados na formulação de esmaltes porcelanizado		
	Sódico		$\text{SiO}_2 \leq 65,0\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 20\%$; $\text{Na}_2\text{O} < 10\%$ $\text{K}_2\text{O} > 3,0\%$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,20\%$					100% passante na #200 mesh (0,074mm)	1,0% máx			
Abrasivo	SiO		63,6% a 66,3%					98% passante na # 200 mesh (0,074mm)	0,92% a 1,2% máx	Os feldspatos agregam-se á liga vitrificada que mantém os grãos abrasivos na forma do reboło.		
	Al ₂ O ₃		16,8% a 20,8%									
	Na ₂ O		1,0% a 4,6%									
	K ₂ O		8,4% a 13,6%									
			$\text{CaO} \leq 1,2\%$ $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,35\%$ $\text{MgO} \leq 1,2\%$									
	Potássico (%)	65 - 70	12 - 13	15 - 20	12 - 13	-						
	Sódico (%)	62 - 67	03 - 06	17 - 19	03 - 06	05 - 10		100% passante em #325 mesh (0,044mm)				
Vidreira ATBIAV	%	K ₂ O	Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	100% passante em #16 mesh (1,20mm)	1,0% máx	Os feldspatos são usados em todos tipos de vidros (embalagem, iluminação e vidros especiais). Sua função é fornecer alumina, e o sódio e potássio.		
	A	11-12,6	2,5 - 3,5	64,5 - 65,5	19 - 20,0	0,10	0,04					
	B	13,5	-		17,5	0,10	-				2% retido em #20 mesh (0,84mm)	1,0% máx
	C	12,0	-		15,0	0,30	-				10% a 80% retido em 140# mesh (0,105mm)	1,5% máx
	D	11,0	-		14,5	0,35	-					

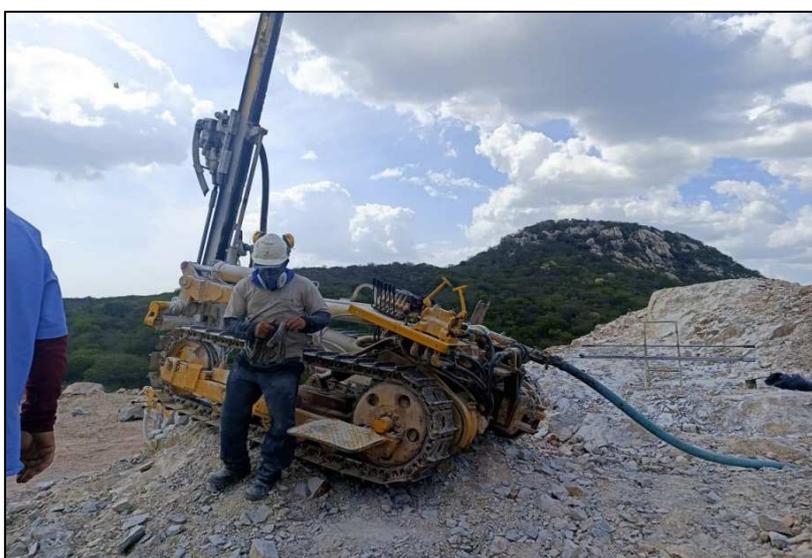
Fonte: Fonte: Silva *et al.*, (1996).

2.3 LAVRA E BENEFICIAMENTO DE FELDSPATO

Conforme Coelho (2009), a lavra de feldspato é realizada de forma mecanizada e geralmente a céu aberto. A etapa inicialmente empregada é a remoção da camada de solo que recobre o depósito mineral, nomeada como decapeamento, normalmente, com uma relação 1:1 de estéril/minério. Estando o corpo mineralizado exposto, este poderá ser desmontado através de explosivos a base de nitrato de amônia (ANFO), além dos encartuchados e bombeados, dispostos em furos de diâmetros variados em função das características mecânicas da formação.

A Figura 1 apresenta a operação de perfuração em uma lavra de rochas para obtenção de feldspatos.

Figura 1- Operação de Perfuração em lavra de feldspato.



Fonte: Autoria própria, 2022.

O minério desmontado é colocado por pás carregadeiras em caminhões e transportado à unidade de processamento mineral, instalada em locais próximos à extração, visando a redução dos custos com esta operação. O processamento é iniciado com emprego de britador de mandíbulas, operando sempre em circuito aberto, enquanto que o segundo estágio de britagem utiliza-se, em geral, britadores cônicos em circuito fechado com conjunto de peneiras. A Figura 2 apresenta o primeiro estágio de britagem utilizado na Elizabeth Mineração.

Figura 2 - Britador de Mandíbulas utilizado no primeiro estágio de britagem.



Fonte: Autoria própria, 2022.

O produto da britagem secundária é armazenado em um grande galpão, compondo uma pilha pulmão que alimenta o circuito de moagem, esta operação é realizada com emprego de moinhos de martelos, conforme Figura 3.

O produto da moagem é classificado por peneiras giratórias com abertura de 2mm. A fração inferior (passante) é transportada para secagem, visando a redução da umidade natural do minério, enquanto a fração de granulometria superior (retido) retorna ao moinho como carga circulante.

Figura 3 - Moinho de martelos.



Fonte: Autor, 2022.

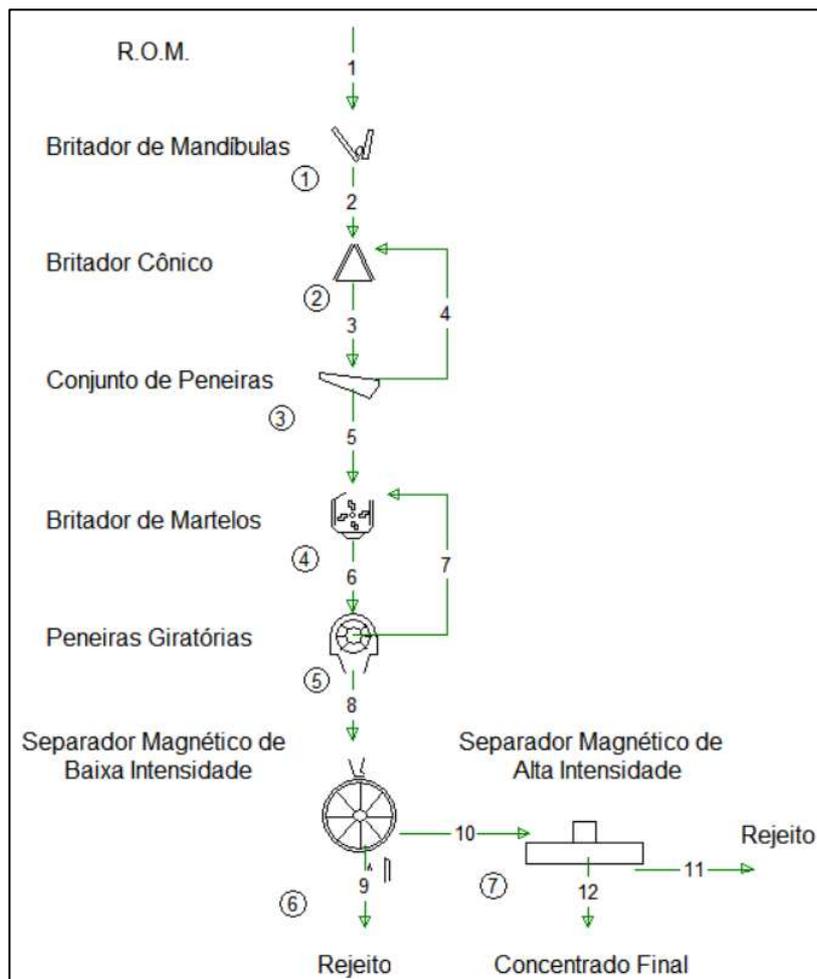
As etapas de separação magnéticas (Figura 4), empregadas para redução do conteúdo de minerais portadores de ferro, são realizadas em dois estágios, conforme fluxograma apresentado na Figura 5.

Figura 4 - Separadores magnéticos utilizados na Elisabeth Mineração.



Fonte: Autor, 2022.

Figura 5 - Fluxograma de processamento mineral da Elisabeth Mineração.



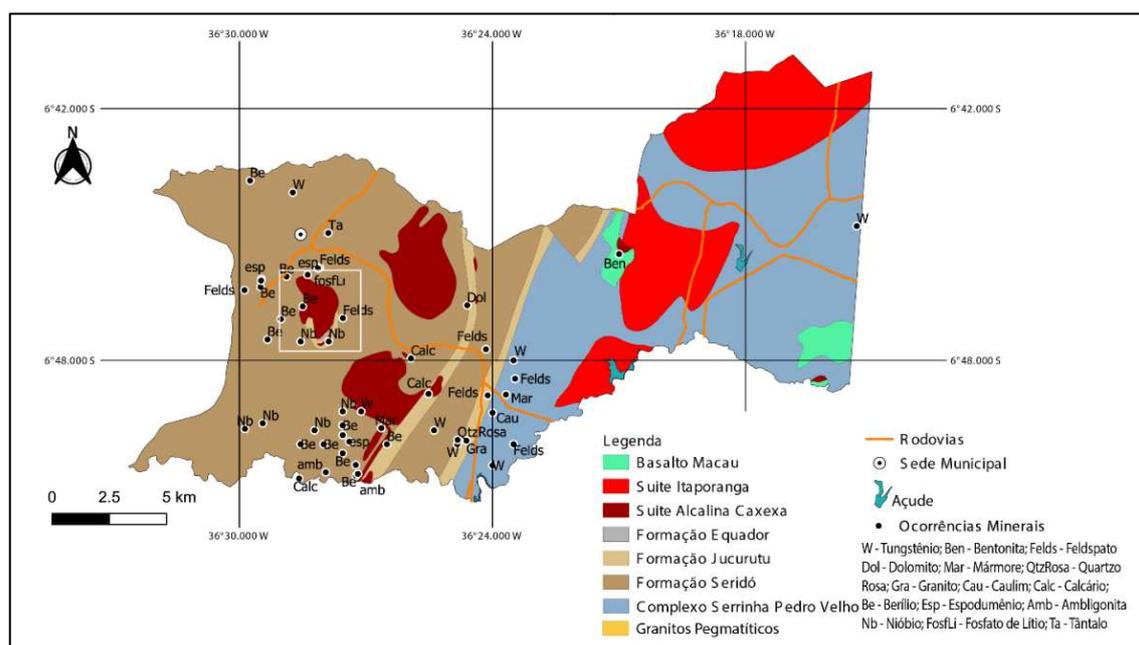
Fonte: Autor, 2022.

2.4 GEOLOGIA REGIONAL

Geologicamente o município de Pedra Lavrada faz parte da Província Pegmatítica da Borborema, sendo localizada numa região privilegiada geograficamente. A geologia do município é formada por quase totalidade por rochas ígneas ou metamórficas, dessa forma, sua estrutura geológica tem predomínio o embasamento cristalino (Assis *et al.* 2011).

Segundo Antunes (2019), o arcabouço geológico do município de Pedra Lavrada é constituído predominantemente por rochas cristalinas de diversas naturezas, de idades paleoproterozóicas a neoproterozóicas, incluindo ortognaisses, xistos e granitoides. Na sua porção leste, em uma pequena área, destaca-se a presença de litologias de idades cenozóicas pertencentes à Formação Campos Novos, constituída de argilitos, arenitos e basaltos, com bentonitas associadas. A Figura 6 apresenta o mapa geológico do município de Pedra Lavrada/PB, onde a poligonal demarcada em branco indica a localização do depósito mineral.

Figura 6 - Mapa Geológico.



Fonte: Medeiros e Lisboa (2022).

Barros (2019), corrobora em seu trabalho de mapeamento geológico realizado em uma área ao sul de Pedra Lavrada, descrevendo as características petrográficas das unidades litológicas citadas acima. Assim, para o referido autor, os xistos apresentam foliação bem desenvolvida, descritos como biotita xisto a granada-biotita xisto de coloração cinza-escuro, de granulação fina a média, textura lepidoblástica, composto por

quartzo, muscovita, feldspato e biotita, por vezes com porfiroblastos de granada truncando a foliação.

Ademais, Barros (2019), destacou a presença de pegmatitos, classificando-os como alvos de aproveitamento econômico no município por serem portadores de diversos minerais industriais e gemas. Esses corpos intrudem, sob a forma de diques e sills, com maior frequência os xistos da Formação Seridó. Ainda segundo o autor, os pegmatitos exibem textura equigranular a inequigranular, variando de homogêneos a heterogêneos, com mineralogia definida por quartzo, feldspato e muscovita, tendo como minerais acessórios mais comuns schorlita, berilo, granada e tantalita.

2.5 ASPECTOS FUNDAMENAIIS DA COMINUIÇÃO

A operação de fragmentação (cominuição), dentro do beneficiamento mineral, reúne um conjunto de técnicas e/ou operações objetivam reduzir, por ação mecânica externa e algumas vezes internas, um sólido (mineral ou rocha) de determinado tamanho (granulometria) em fragmentos de dimensões inferiores (SAMPAIO *et al.*, 2018).

Ainda de acordo com Sampaio *et al.* (2018), a fragmentação de um sólido homogêneo (por exemplo, granito para brita) tem por finalidade permitir o manuseio deste sólido, bem como, adequar às granulometrias exigidas pelo mercado consumidor. Já em materiais heterogêneos, que constituem geralmente as rochas contendo um mineral de interesse econômico, as operações de cominuição visam liberar fisicamente os minerais de minério dos minerais de ganga, visando a eficiência nos processos subsequentes de concentração mineral ou metalúrgicos.

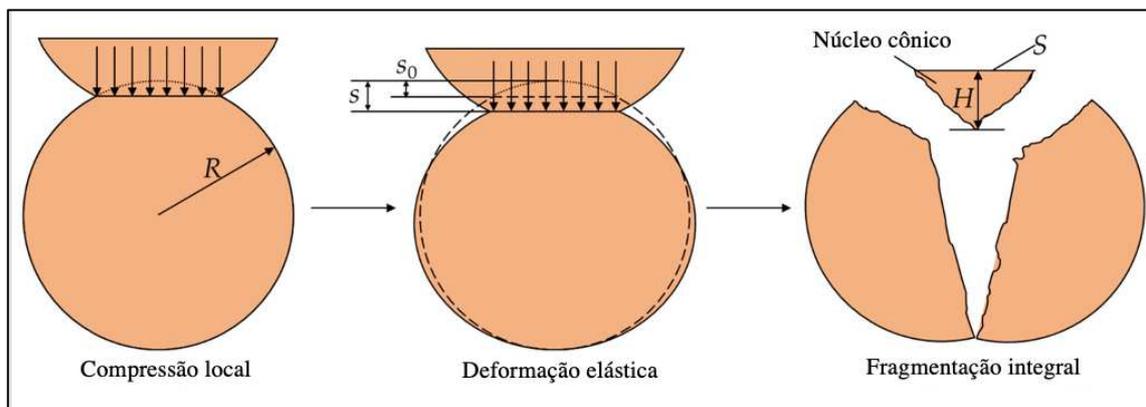
A operação de fragmentação compreende diversos estágios que se aplicam ao minério, desde a operação de desmonte de rochas com auxílio de explosivos (considerada como o primeiro estágio de fragmentação), até sua adequação ao processo industrial posterior. Os blocos provenientes da lavra são encaminhados à operação de britagem (fragmentação grosseira) que consiste em uma série de tipos de equipamentos dispostos de maneira estratégica e sequencial que permitem gerar um produto dentro das especificações da moagem.

As operações de moagem, fragmentação fina, tem por finalidade fornecer um produto dentro da granulometria necessária à liberação física dos minerais de interesse econômico com relação aos de ganga, ou seja, gerar uma distribuição de partículas com dimensões que atendam a concentração mineral, conforme Luz *et al.* (2018). A importância da operação de redução de tamanhos pode ser percebida quando consideramos que a maior parte da energia consumida, e, portanto, os custos operacionais,

no processamento mineral provém das operações de cominuição, especialmente a moagem.

Princípios de fragmentação: Um material mineral se rompe quando o limite de ruptura que lhe mantém coeso é ultrapassando, o que ocorre por forças geradas por cargas de tensão e de compressão, conforme Figura 7.

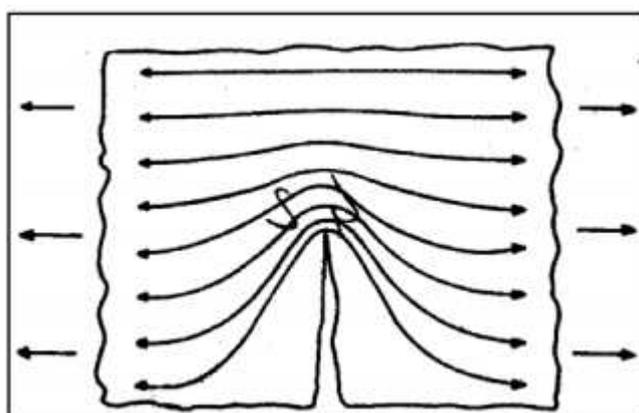
Figura 7 – Esquema de deformação e ruptura de um cristal sujeito à tensão e deformação.



Fonte: Adaptado de Niu *et al.* (2021).

No campo da ciência dos materiais, as falhas microscópicas denominam-se deslocamentos e em mecânica de rochas, "gretas de Griffith". A existência dessas falhas nos materiais explica sua baixa resistência mecânica. A teoria da fratura estuda a formação de gretas a partir de falhas e sua propagação no sólido (ROWLAND, Jr, 1982). Mesmo quando as rochas são sujeitas a forças uniformes, as pressões internas não são igualmente distribuídas, pois as rochas se constituem de uma variedade de minerais dispersos com grãos de vários tamanhos. A distribuição da força depende, não só das propriedades mecânicas de cada mineral, mas principalmente da presença de gretas e falhas no corpo mineral que agem como sítios de concentração de forças (Figura 8).

Figura 8 - Concentração de esforços numa fenda.



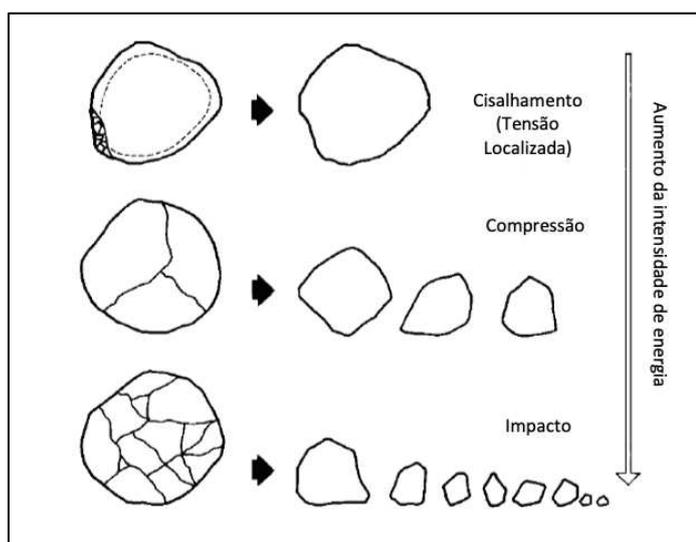
Fonte: Sampaio *et al.* (2018).

Quando a rocha está submetida a esforços, ativam-se as falhas existentes, o que significa que os esforços se concentram nas ligações atômicas localizadas na ponta das falhas multiplicando a tração.

A fragmentação dos sólidos pode ser desenvolvida pelos seguintes mecanismos: esmagamento (compressão), impacto e atrito. A abrasão é considerada por alguns autores como um quarto mecanismo de importância em alguns casos especiais de moagem.

Anticoi *et al.*, (2018), afirmam que, quando partículas irregulares são sujeitas à quebra por compressão, os produtos se apresentam em duas faixas de tamanho: grossas e finas. Na quebra por impacto, o produto apresenta-se como partículas de tamanho e forma semelhantes. Já a fragmentação pelo mecanismo de atrito produz muito material fino, o que geralmente é indesejável (BARBATO; SAMPAIO, 2007). A Figura 9 ilustra os mecanismos de compressão, impacto e abrasão e os produtos gerados em cada situação.

Figura 9 -Mecanismos de fragmentação das rochas, com indicação dos produtos gerados.



Fonte: Adaptado de Anticoi *et al.* (2018).

2.5.1 Britagem

Niu *et al.*, (2021) e Luz *et al.*, (2018), definem britagem como conjunto de operações que objetiva a fragmentação de blocos de minérios vindos das frentes de lavra, levando-os a granulometria compatíveis para utilização direta ou para posterior processamento, peneiramento ou moagem. Britagem é um estágio no processamento de minérios, que utiliza, em sucessivas etapas, equipamentos apropriados para a redução de tamanhos convenientes, ou para a liberação de minerais valiosos de sua ganga. Sua aplicação engloba fragmentos de tamanhos distintos, desde 1000mm até 10mm.

Para que a liberação física do mineral de interesse econômico seja atingida é necessário, geralmente, que o minério seja reduzido a uma granulometria fina. Nesse sentido, torna-se necessário o ajuste de sucessivos estágios de britagem, com diferentes britadores e tamanhos de alimentação e produtos, capazes de atender a exigência granulométrica da operação posterior (MITCHELL *et al.*, 2008). A Tabela 9 abaixo mostra a classificação normalmente usada na literatura.

Tabela 9 - Classificação dos estágios de britagem.

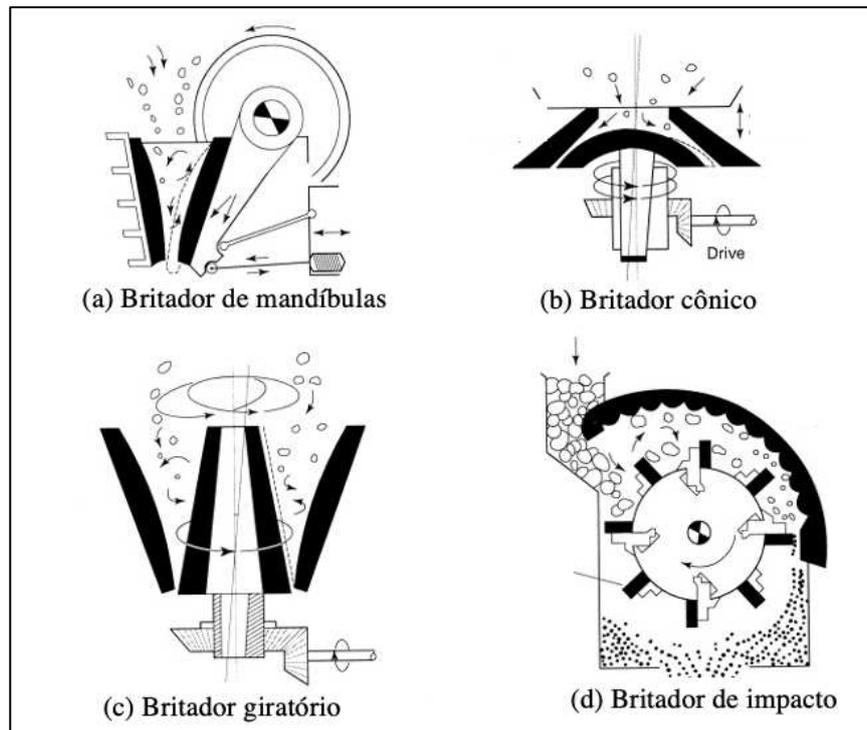
Estágio de Britagem	Tamanho Máximo da Alimentação (mm)	Tamanho Máximo da Produção (mm)
Britagem Primária	700 - 1000	100 – 300
Britagem Secundária	100 - 250	20 – 100
Britagem Terciária	14 - 100	10 - 50
Britagem Quaternária	10 - 40	10 - 20

Fonte: Adaptado de Mitchell *et al.*, (2008).

Na britagem primária os equipamentos são de grande porte e sempre operam em circuito aberto, a seco, sendo os britadores de mandíbulas e giratórios os principais equipamentos utilizados. O segundo estágio de britagem, na maioria dos casos, visa reduzir a granulometria do material para o terceiro estágio ou mesmo para a moagem. Os equipamentos normalmente utilizados são: britador de mandíbulas, britador cônico, de martelos e de rolos. Geralmente, a britagem terciária corresponde à última etapa de britagem nas usinas de beneficiamento e os equipamentos empregados são os cônicos.

A Figura 10 abaixo apresenta a ilustração esquemática dos principais britadores utilizados nas usinas de beneficiamento mineral e em laboratórios.

Figura 10 - Principais britadores utilizados: (a) Britador de mandíbulas; (b) britador cônico; (c) britador giratório; (d) britador de impacto.



Fonte: Adaptado de Youcai e Sheng (2017).

2.6 TÉCNICAS DE AMOSTRAGEM

A amostragem é definida como um conjunto de operações realizadas cujo objetivo é a obtenção de uma amostra, neste caso amostra mineral, rocha ou minério, que apresente representatividade com relação ao todo, universo, que foi amostrado. A amostra é considerada representativa quando as propriedades do universo (teor, composição química, mineralogia, massa específica, granulometria, entre outras propriedades) possuem variabilidade aceitável.

De acordo com Góis *et al.*, (2010), a amostragem é realizada basicamente em quatro etapas, que serão resumidas a seguir:

- Elaboração do plano de amostragem – esta etapa fundamenta-se na determinação da quantidade necessária para a amostragem, participando das definições de universo, do objetivo e da sequência de operações realizadas. O sistema de amostragem depende de diversos fatores, dentro os quais podem ser destacados o tamanho das partículas, a massa específica, a umidade, etc.

- Obtenção da amostra – consiste na definição de sequência e do número de incrementos (frações) a ser coletados. Depende essencialmente do tipo e da precisão demandados no estudo.
- Preparação da amostra – diz respeito ao conjunto de operações necessárias à adequação da amostra ao método de determinação do parâmetro de qualidade a ser analisado.
- Determinação de um parâmetro de qualidade - inserem-se as análises dos parâmetros que irão determinar a qualidade do universo.

Com relação ao tamanho da amostra, é necessário que seja estabelecida previamente a precisão requerida, bem como o nível de confiança. Uma vez realizada a amostragem, o grau de precisão depende do tamanho da amostra, do nível de confiança pretendido para as generalizações e do erro-padrão das estatísticas amostrais (Ladeira, 1987).

Outros termos importantes para o processo de amostragem e que devem ser definidos são:

- Incremento: cada porção (fração) retirada do lote é denominado incremento.
- Amostra primária: é a composição de vários incrementos retirados do lote em determinado tempo, é a quantidade de material manipulável resultante da amostragem propriamente dita.
- Amostra final: amostra obtida a partir da amostra primária, com massa adequada, geralmente superior, à demandada para realização das diversas análises.

2.6.1 Homogeneização e Quarteamento

A homogeneização da amostra primária tem por objetivo obter uma amostra com distribuição mais uniforme dos constituintes, permitindo, posteriormente, o quarteamento em frações de massa menor, adequando-se, dessa forma, aos mais diversos métodos de análise das amostras. Ainda segundo Góis *et al.* (2010), várias técnicas podem ser adotadas para realização da homogeneização, desde técnicas com aparelhos automáticos até a formação de pilhas em formato de tronco de cone e longitudinais.

O quarteamento é conduzida com intuito de reduzir a massa da amostra e preparar as alíquotas para as mais diversas análises posteriores (análise granulométrica, mineralógica, peso específico, etc.). Essas operações são realizadas a seco e podem ser manuais, através das pilhas, ou utilizando equipamentos simples, como o quarteador Jones.

Os métodos de homogeneização e quarteamento mais usuais em laboratórios são as pilhas, tanto tronco de cone como longitudinais, sobretudo em função da praticidade e por não requerer equipamentos sofisticados na sua formação.

Para construção da pilha tronco de cone, o material é disposto sobre uma lona quadrada e os vértices da lona são levantados de modo que o material da base da pilha de um dos lados seja colocado no topo da pilha. Repete-se esse procedimento algumas vezes para que o material seja homogeneizado (OLIVEIRA *et al.*, 2007).

Para realizar o quarteamento, a partir da pilha cônica divide-se em quatro partes e retira-se partes alternadas para formação de outras pilhas, do mesmo formato, até que seja alcançada a massa desejada para a análise específica. Esse método é conhecido como pazada fracionada.

De acordo com Oliveira *et al.* (2007), a construção das pilhas longitudinais é feita distribuindo o material, sobre uma lona retangular ou bancada, longitudinalmente, mediante sucessivas passagens. Após construir-se a pilha, as extremidades devem ser retomadas e espalhadas novamente sobre o centro. Para realizar o quarteamento por meio da pilha longitudinal, a pilha deve ser dividida em segmentos utilizando uma pá. O quarteamento é feito formando-se duas novas pilhas com as seções alternadas. A primeira tomando-se as porções de índices pares e a outra, as de índices ímpares.

2.7 CARACTERIZAÇÃO DE MINÉRIOS

A caracterização tecnológica de minérios é uma etapa fundamental para determinação do potencial de aproveitamento econômico de um bem mineral de forma viável e otimizada, pois fornece a equipe de engenharia informações acerca da mineralogia, teores e demais parâmetros necessários ao correto dimensionamento da rota de tratamento de minérios. Além disso, permite identificar, com precisão, ineficiências ou perdas em processos industriais já instalados, possibilitando a otimização do rendimento mineral ou metalúrgico (BERTOLINO *et al.*, 2018).

Ainda segundo Bertolino *et al.*, (2018), a identificação de um mineral específico e de sua respectiva composição química pode ser determinada também através de outras técnicas instrumentais, tais como: difratometria de raios X (DRX), microscópio eletrônico de varredura (MEV) equipado com unidade de análises por energia dispersiva (EDS) e microsonda eletrônica (ME).

A composição química total de um minério é, na maioria das vezes, indispensável no cálculo da estequiometria dos principais minerais do minério. Além dos métodos

clássicos como gravimetria, volumetria e colorimetria, as técnicas analíticas instrumentais mais difundidas são: espectrografia óptica de emissão (EOE), fluorescência de raios X (FRX), espectrofotometria de absorção atômica (EAA) e espectrometria de plasma (EP).

A seguir serão descritas as técnicas de caracterização tecnológica que foram utilizadas nesse estudo.

2.7.1 Fluorescência de raios X

A fluorescência de raios X (FRX), é uma técnica dita universal na caracterização de materiais e que nos últimos anos tem sido amplamente utilizada para este fim, sobretudo, em função da rapidez na obtenção de resultados, que podem ser qualitativos, semiquantitativos ou quantitativos. Segundo Bertolino *et al.* (2018), nessa técnica o processo de excitação da amostra deve-se a irradiação de um feixe primário de raios X, que resulta na geração de uma radiação secundária característica dos elementos químicos que compõem a amostra analisada.

Ainda segundo os mesmos autores, conhecendo-se os ângulos de reflexão e suas intensidades de radiação torna-se possível identificar os elementos, além de realizar, com precisão, sua quantificação. As análises qualitativas geralmente são mais confiáveis e fáceis, sobretudo, pela simplicidade do espectro. Enquanto que a análise para fins qualitativos, consiste na medida das linhas deste espectro característico dos elementos e da relação dessas intensidades com sua concentração na matriz onde encontram-se dispersos.

A amostra destinada para caracterização por FRX, geralmente, é enviada em forma de pó, passante em 75 μm (0,074mm), no entanto, a versatilidade do método permite que amostras líquidas também possam ser caracterizadas.

Saisinchai *et al.*, (2015), utilizou a fluorescência de raios X para caracterização de um minério fco em feldspatos associados a veios pegmatíticos do Distrito de Ban Tak, província de Tak, Tailândia. Os principais minerais contaminantes desses depósitos são muscovita, biotita e granada que resultaram na especificação de alto teor de Fe que não atende a indústria de matérias-primas cerâmicas. Os resultados da FRX indicaram que as composições químicas dos feldspatos são 75,93% SiO_2 , 14,34% Al_2O_3 , 0,63% Fe_2O_3 , 4,01% K_2O e 4,34% Na_2O .

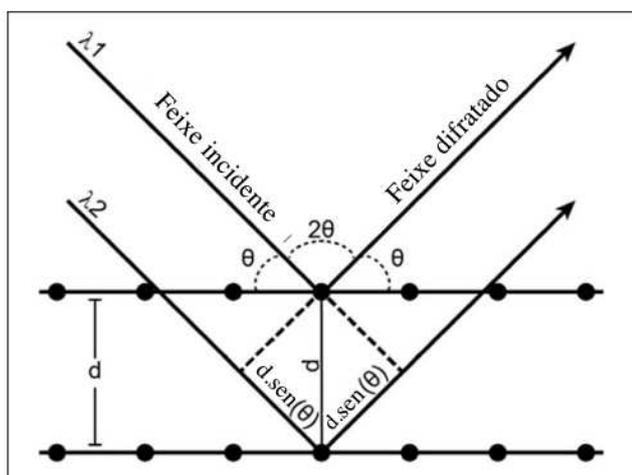
Gaied *et al.*, (2015), realizam análises composicionais por fluorescência de raios X para analisar a influência da composição no processamento de feldspatos da região de Gafsa, no sudoeste da Tunísia, que são utilizados na indústria cerâmica. Os resultados demonstraram uma variação na concentração de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , Na_2O , em

função das faixas granulométricas estudadas. O teor de Fe_2O_3 aumentou gradativamente com a redução da granulometria, atingindo 1,37% na fração abaixo de $63\mu\text{m}$ ($0,063\text{mm}$).

2.7.2 Difração de raios X

De acordo com Stan *et al.*, (2018), a técnica de difração de raios X têm sido um dos pilares da ciência dos materiais de estado sólido, geociência, e física, há mais de um século desde a invenção da técnica. Na aplicação da técnica, o feixe difratado sem mudança do comprimento de onda, resultante da dispersão dos raios X pelos elétrons dos átomos do cristal, só é gerado caso seja satisfeita a equação de Bragg ($n\lambda = 2d\text{sen}\theta$), que é ilustrada na Figura 11.

Figura 11 - Esquema básico da difração de raios-X.



Fonte: Stan *et al.* (2018).

Detalhando a equação:

- λ é o comprimento de onda dos raios atômicos no retículo difratados;
- d é a distância interplanar (dos átomos ou da rede de planos cristalino);
- n é um número inteiro correspondente à ordem de difração; em geral 1;
- θ é o ângulo oblíquo ou ângulo de Bragg;

Assim, utilizando-se da equação apresentada, Klug e Alexander (1974), indicam em seus estudos que cada substância tem um padrão de difração único, ou seja, específico e característico.

De acordo Gumustas *et al.* (2017), com os raios X espalhados do tubo de raios X é refletido através da amostra e no detector. Os raios X dispersos interferem construtivamente uns nos outros. Essa interferência pode ser observada usando a Lei de Bragg para determinar várias características dos materiais. A amostra a ser analisada pode estar na forma de fragmento de cristal ou em pó, sendo este último mais utilizado. Para

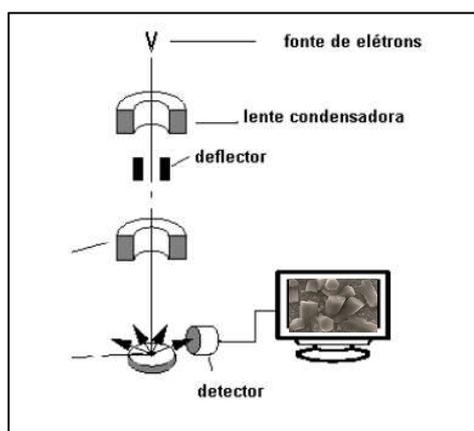
aplicar o DRX a massa utilizada é pequena, algo em torno de 1g, e apresenta como vantagem a rapidez na obtenção dos dados.

Gaied *et al.* (2015), utilizaram a difração de raios X para conhecimento das fases minerais de amostras de rochas ricas em feldspatos da região de Gafsa, no sudoeste da Tunísia. Os resultados indicaram a predominância de microclínio e quartzo e, em menor proporção picos característicos de albita, caulinita e illita. Miceli *et al.* (2017), obteve resultados quanto a composição mineralógica de amostras de granitos e gnaisses utilizando a difração de raios X. A técnica permitiu estimar que a composição mineralógica predominantemente das amostras corresponde a feldspatos e quartzo. Além destes, continham minerais como biotita, com teores variando de 4,7 a 9,7% e hornblenda (de 0,0 a 2,5%), correspondendo a minerais fontes de ferro. Os resultados nortearam os ensaios de separação magnética subsequentes, utilizados para redução da concentração de Fe_2O_3 .

2.7.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

A microscopia eletrônica de varredura baseia-se na utilização de um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para investigação da superfície da amostra, de acordo com o ponto que se deseja analisar. Este feixe em contato com a amostra, interage e resulta em elétrons que são detectados por dispositivos específicos e pode-se obter imagens através da conversão do sinal gerado, (MALISKA *et al.*, S.D). A Figura 12 apresenta o esquema básico da microscopia eletrônica de varredura.

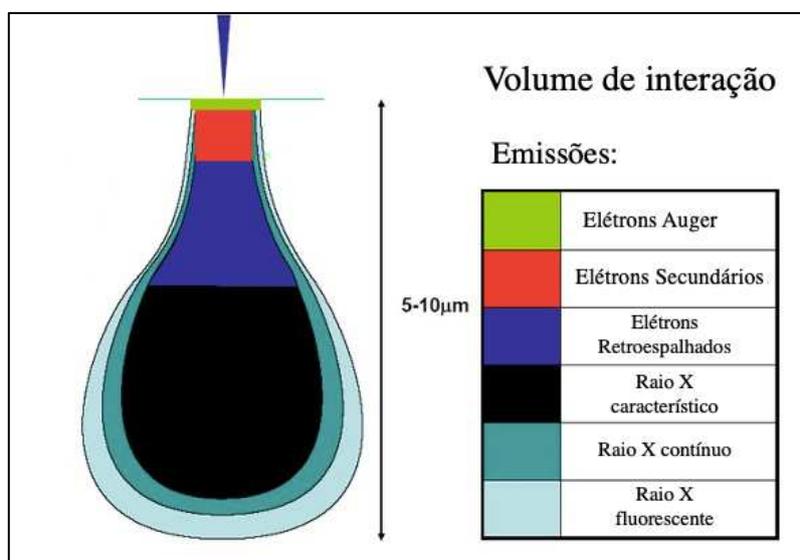
Figura 12 - Esquema básico representando o princípio do MEV.



Segundo Dedavid *et al.* (2007), o princípio do equipamento de MEV consiste em utilizar um feixe de elétrons para explorar a superfície da amostra, ponto a ponto, por linhas sucessivas e transmitir o sinal do detector a uma tela catódica cuja varredura está perfeitamente sincronizada com aquela do feixe incidente. Por um sistema de bobinas, o

referido feixe pode ser direcionado para investigar (varrer) a superfície da amostra de acordo com uma malha retangular. Ainda segundo Dedavid *et al.* (2007), quando o feixe primário incide na amostra, parte dos elétrons difundem-se e constituem um volume de interação cuja forma depende da tensão de aceleração e do número atômico da amostra, conforme Figura 13. Neste volume, os elétrons (secundários ou retroespalhados) e as ondas eletromagnéticas produzidas são utilizados para geração das imagens objetos de interpretação ou ainda para realização de análises químicas (JONES, 2019).

Figura 13 -Volume de interação gerados na microscopia eletrônica de varredura.



Fonte: Adaptado de Jones *et al.*, (2019).

- Elétrons Secundários (SE) e Elétrons Retroespalhados (BSE)

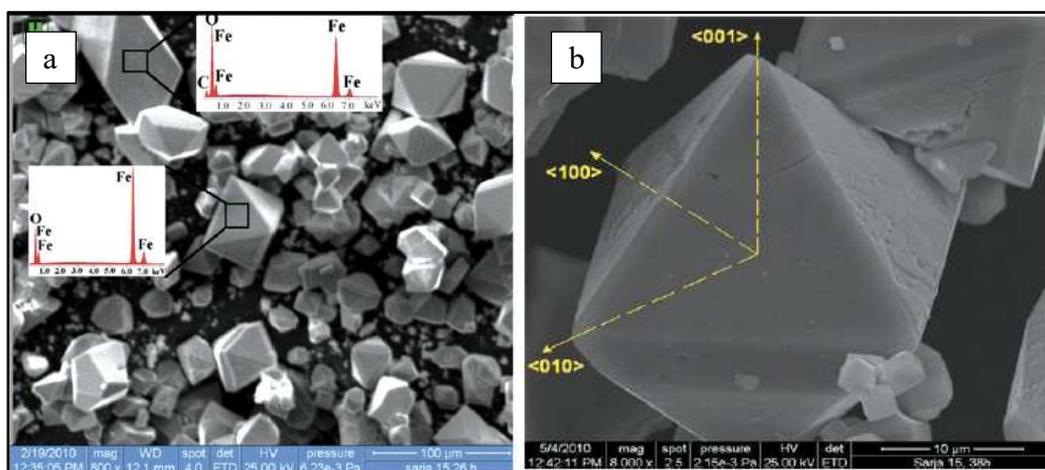
Os elétrons secundários são resultantes de baixa energia (<50eV), que produzem imagens de alta resolução. Somente os elétrons secundários próximos da superfície da amostra podem ser detectados, em razão da configuração física do MEV, formando uma imagem que evidencia o relevo da amostra. Os elétrons retroespalhados são aqueles que sofrem espalhamento elástico, possuem alta energia que varia de 50eV até a energia do elétron primário. As imagens geradas pelos retroespalhados fornece informações em relação ao contraste apresentando, além da característica topográfica, uma imagem de composição, função do contraste do número atômico dos constituintes da amostra analisada, confirme Dedavid *et al.*, (2007).

De acordo com Nurit *et al.*, (2022), o uso da microscopia eletrônica (MEV) nos permite observar o tamanho dos minerais e entender sua formação e as relações entre vários minerais nos sedimentos. Ao usar microscopia eletrônica de varredura, a granulometria dos

minerais pode ser avaliada, a morfologia e as relações entre fases como revestimento ou erosão de cristais podem ser constatadas. Segundo Nurit (2013), a microscopia eletrônica de varredura é uma técnica que permite a detecção bastante válida de óxidos de ferro devido a análise composicional fornecida pela interpretação das diferenças nos tons de cinza das imagens, quando se utiliza a configuração de elétrons retroespalhados.

Nuemann *et al.*, (2010), destaca ainda que, as imagens com maior significância são aquelas obtidas pela detecção de elétrons retroespalhados, visto que nessas imagens, o nível de cinza é proporcional ao número de elétrons, e conseqüentemente ao peso atômico médio em cada pixel da imagem, o que possibilita, indiretamente, a formação de uma imagem composicional, sendo possível separar fases de acordo com o seu nível de cinza. Se o MEV dispõe de EDS, a identificação dos minerais é imediata pela investigação pontual da composição química, tornando o processo de identificação da composição mineral prática e eficiente. A Figura 14 apresenta imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura para amostras de magnetita estudadas por Chirita *et al.*, (2012), comparando diferentes configurações utilizadas por esta técnica de caracterização.

Figura 14 - a) Imagem de MEV obtida por detector de elétrons secundários para cristais de magnetita, com EDS acoplado; b) imagem de MEV evidenciando um cristal de magnetita.



Fonte: Chirita *et al.* (2012)

2.7.4 Separação Magnética

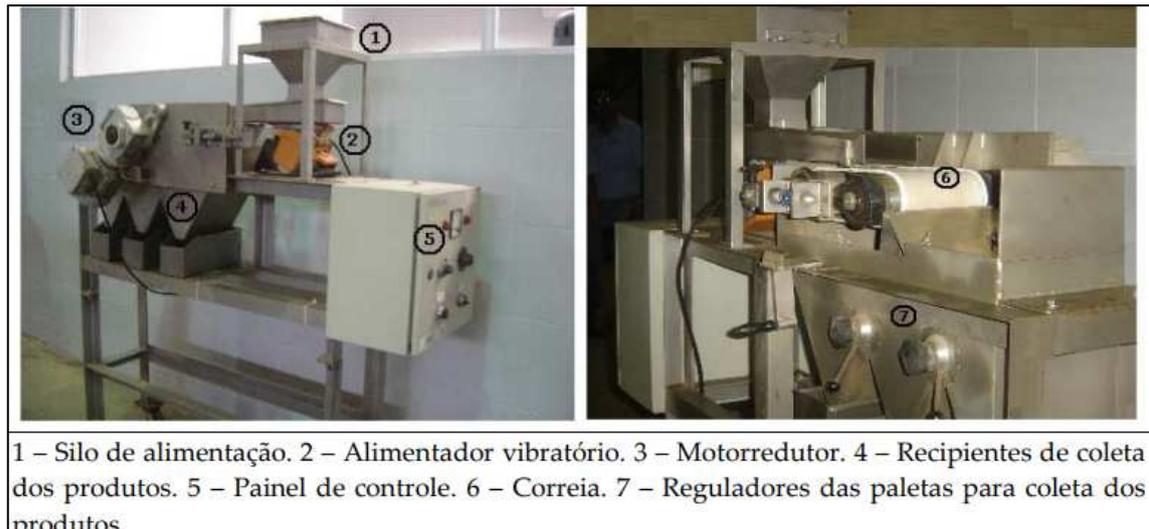
Separadores magnéticos são equipamentos empregados para concentração de materiais com susceptibilidades magnéticas diferentes. São comumente utilizados no processamento de minérios com as mais diversas granulometrias, podendo ser utilizados em outras áreas da indústria como a separação de sucatas metálicas. Estes separadores magnéticos empregados na concentração mineral podem ser utilizados para purificação de minérios, a exemplo dos minérios ricos em feldspatos, ou ainda para concentrar um minério suscetível ao do campo magnético.

A propriedade de um material que determina sua resposta a um campo magnético é chamada de susceptibilidade magnética. Os minerais podem ser atraídos ou repelidos pelo campo magnético. Conforme Luz *et al.* (2008), os minerais atraídos pelo campo magnético podem ser os ferromagnéticos, fortemente atraído se paramagnéticos, fracamente atraídos. Há também os minerais que são repelidos pelo campo magnético, os diamagnéticos. Existem inúmeros modelos de separadores magnéticos, mas eles podem ser separados basicamente em dois tipos quanto a fonte do campo magnético, os que utilizam eletroímãs e aqueles que usam ímãs permanentes.

Segundo Wills e Finch (2016), a tecnologia de separação magnética evoluiu significativamente nos últimos anos, tornando possível separar a seco com intensidades de campo magnético cada vez maiores com o auxílio de ímãs de terras raras.

Os separadores com eletroímãs são os mais comumente utilizados, mas os feitos com ímãs permanentes estão tornando-se mais comuns devido a criação de novos ímãs com terras raras, que proporcionam altas intensidades. A vantagem deste tipo de equipamento está na redução do consumo de energia. Os separadores magnéticos podem ainda ser divididos também pela forma de alimentação do material, a seco ou a úmido. A Figura 15 apresenta um separador magnético utilizado para concentrações a seco, enquanto o separador magnético observado na Figura 16 aplica-se para concentrações de minério em polpa.

Figura 15 – Separador magnético de ímãs permanentes.



Fonte: Sampaio, *et al.* 2007.

Figura 16 - Separador magnético a úmido de alta intensidade.



Fonte: Sampaio, *et al.* 2007.

Silva *et al.*, (2019), realizou estudos de rotas de processamento mineral para produção de feldspatos a partir de rochas alcalinas visando aplicações na indústria cerâmica. Para o estudo, o autor aplicou a separação magnética de alta intensidade e flotação catiônica. Os resultados da separação magnética indicam uma redução no teor de ferro de 3,20% para 0,48% e aumento o teor de feldspato de 72,20% para 81,23% com 65,31% de recuperação de massa e 73,48% de recuperação metalúrgica.

Miceli *et al.*, (2017), ao utilizar a separação magnética de alta intensidade em amostras granitos e gnaisses afirma que esta etapa de separação foi capaz de alcançar apenas uma modesta redução do conteúdo de minerais portadores de ferro na fração mais grossa (+1,18 mm) nas diferentes amostras, o que está associado a uma liberação muito limitada dos minerais contendo ferro nessa granulometria.

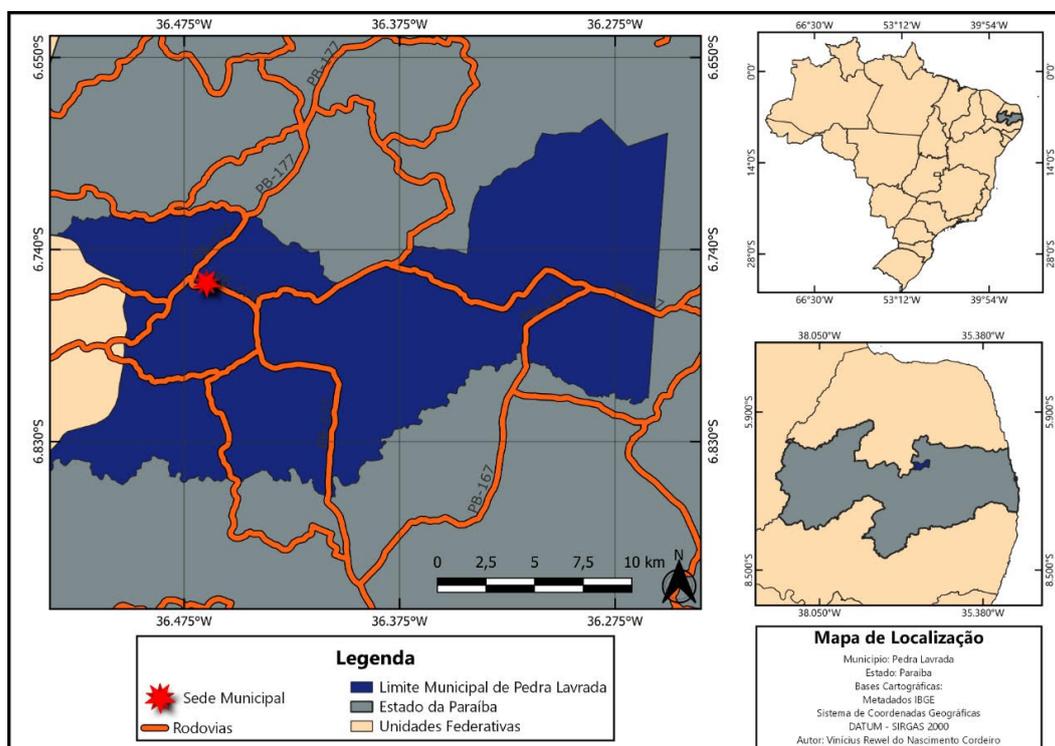
Capítulo III
MATERIAL E MÉTODOS

3. MATERIAL E MÉTODOS

A coleta da amostra primária foi realizada no município de Pedra Lavrada/PB, mais especificamente na extração pertencente à empresa Elisabeth. A referida Mina foi escolhida por possuir grandes reservas minerais da rocha estudada. Além disso, a facilidade de acesso às instalações e informações da empresa foram fatores cruciais na escolha do local para coleta das amostras, frente às outras opções na região.

O município de Pedra Lavrada situa-se na região centro-norte do estado da Paraíba, Mesorregião Borborema e Microrregião Seridó Oriental Paraibano, limitando-se com os municípios de Nova Palmeira, Sossego, Cubati, Seridó e com o estado do Rio Grande do Norte, abrangendo uma área de 391,3 km². A sede do município tem uma altitude média de 516 m e apresenta coordenadas 06°45'28" de latitude sul e 36°28'15" de longitude oeste, distando da capital cerca de 55 km, sendo seu acesso, a partir de João Pessoa, efetuado através das rodovias pavimentadas BR-130 e PB-177. A Figura 17 apresenta um mapa de localização do município de Pedra Lavrada/PB.

Figura 17 - Mapa de localização do município de Pedra Lavrada/PB.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Para desenvolvimento da pesquisa aqui relatada foram coletadas cerca de 200 (duzentos) quilogramas de rocha, com granulometria média de 100 milímetros (conforme

Figura 18, em cinco diferentes frentes de extração mineral. O material coletado foi colocado em sacos etiquetados, com indicação da frente de lavra do qual foi removido. Após isso, toda a massa foi transferida para o Laboratório de Cominuição e Classificação Granulométrica localizado no IFPB, Campus Picuí.

Figura 18 - Fragmentos de rocha coletados nas frentes de lavra da empresa Elisabeth Mineração.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Posteriormente, as amostras foram encaminhadas ao Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) para realização dos ensaios de caracterização e de processamento mineral.

3.1 Britagem de amostras primárias

Os ensaios de britagem das amostras foram realizados em um britador de mandíbulas para laboratório, fabricado pela Top Size Soluções (Figura 19). Este equipamento possui a abertura de entrada de 150x100mm e capacidade horária de 400 kg. Tais parâmetros de controle, “Gape” e capacidade, devem garantir a redução de fragmentos com “Top Size” de 120 mm até granulometrias na ordem de milímetros e micrômetros, a depender da resistência mecânica da amostra a ser cominuída.

Figura 19 - Britador de mandíbulas utilizado nos ensaios.



Fonte: Autoria própria, 2022.

As amostras britadas foram homogeneizadas e quarteadas, pela formação de pilhas cônicas e alongadas, para obtenção de alíquotas a serem destinadas aos ensaios subsequentes, conforme metodologia proposta por Luz (2019), Figura 20.

Figura 20 - Processo de preparação de amostras: (a) Produto obtido após a britagem; (b) pilha cônica; (c) pilha cônica; (d) pilha piramidal.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Com estas etapas foram preparadas 03 (três) amostras finais, uma contendo 01 (um) quilograma, destinada aos ensaios de caracterização inicial, e as demais com 05 (cinco) quilogramas visando os ensaios de concentração mineral.

3.2 Classificação granulométrica

Para realização do ensaio de classificação granulométrica, empregou-se o peneirador suspenso que opera via úmida para maior eficiência do peneiramento, além disso, o conjunto de peneiras variando de 6 a 325 malhas (3,35 a 0,043mm), Figura 21. A fração retida em cada peneira foi desaguada, seca em estufa e pesada para aquisição dos dados para composição das curvas de distribuição de tamanhos.

Figura 21 -Classificação granulométrica por peneiramento a úmido.



Fonte: Autoria própria, 2022.

3.3 Separação magnética

Os ensaios de separação magnética foram realizados no concentrador magnético de Rolos, modelo RE-05 da fabricante Inbras, equipamento que opera a seco, e utiliza anéis de ímãs permanentes de terras raras, colocados lado a lado, Figura 22.

Figura 22 – Separador magnético de rolos, ímãs permanentes de terras raras.



Fonte: A autoria própria, 2022.

Nesta etapa, foram realizados ensaios variando a granulometria de alimentação e a velocidade dos rolos do equipamento, conforme Tabela 10. Vale destacar que os dois intervalos granulométricos foram escolhidos por apresentarem significativas liberações dos minerais portadores de ferro. Os ensaios foram realizados em duplicata e as frações magnéticas e não magnética foram submetidas a ensaios de caracterização mineralógica e química posteriormente.

Tabela 10 - Indicação das amostras submetidas a ensaios de separação magnética a seco.

Descrição da amostra	Granulometria	Massa (g)	Velocidade dos rolos
S.M1	-0,6+0,3mm	400	Menor
S.M2	-0,6+0,3mm	400	Maior
S.M3	-0,3+0,15mm	400	Menor
S.M4	-0,3+0,15mm	400	Maior

Fonte: Autor, 2022.

3.4 Preparação de amostras para caracterização tecnológica

Frações provenientes dos ensaios de britagem (alimentação), retidos na classificação granulométrica, e produtos da separação magnética, foram transferidas ao Laboratório de preparação de amostras. O primeiro procedimento da preparação consistiu em utilizar o quarteador rotativo, da fabricante Quantachrome (Rotary Micro Riffler), indicado na Figura 23, para divisão das amostras em porções de menor massa.

Figura 23 - Quarteador rotativo empregado na preparação das amostras para caracterização.

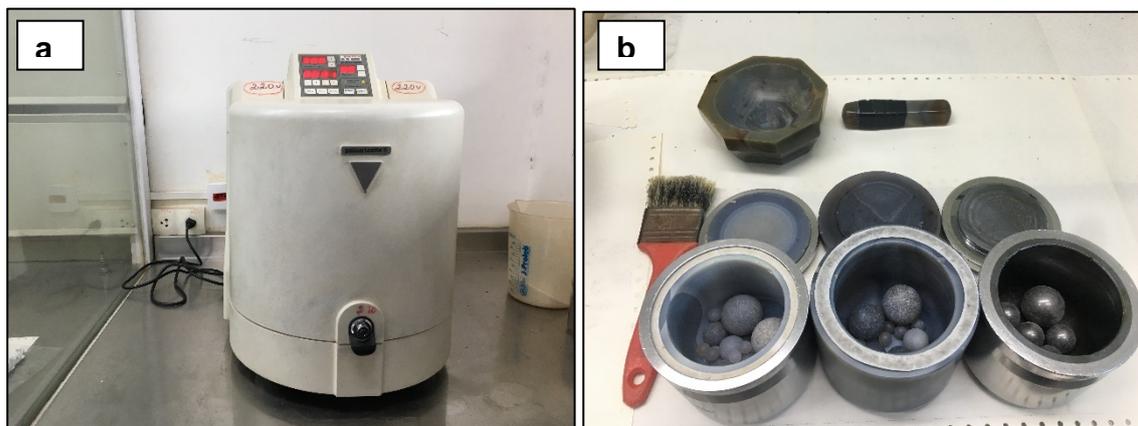


Fonte: Autoria própria, 2022.

O equipamento representado na Figura 24 contém 8 cubetas para coleta da amostra durante o movimento rotatório do carrossel. Recolheu-se o material contido em 4 destas cubetas e transferiu-se para o moinho planetário, sendo a massa das 4 restantes reunidas e arquivadas.

A amostra intermediária foi alimentada no moinho planetário, da fabricante Frithch, sendo utilizado o jarro fabricado em aço inoxidável para evitar a contaminação da amostra. A Figura 27(a) indica o moinho utilizado, e Figura 27(b) os jarros que podem ser utilizados a depender das propriedades da amostra a ser fragmentada.

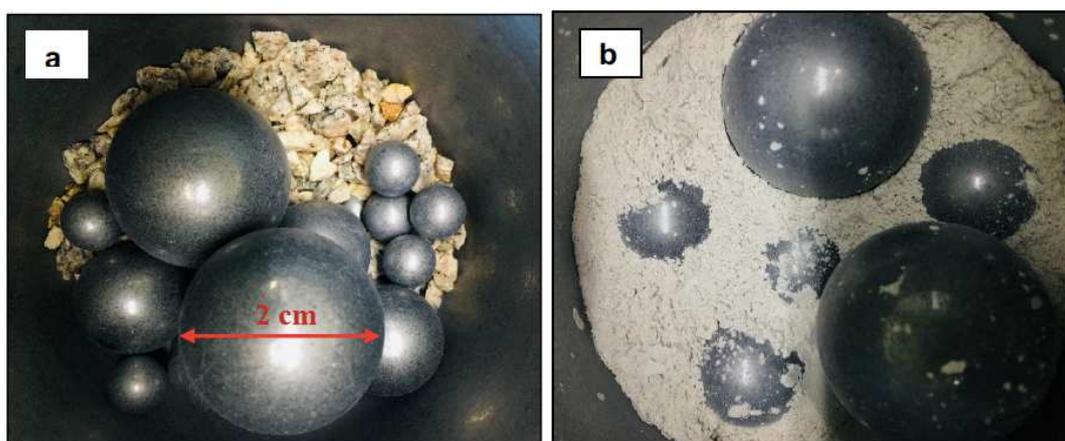
Figura 24 - (a) Moinho planetário; (b) tipos de jarros.



Fonte: Autoria própria, 2022.

A Figura 25 exemplifica a eficiência do referido moinho para redução das partículas minerais à granulometria exigida aos ensaios de caracterização, inferior à 106 malhas. No exemplo, a moagem foi realizada durante três minutos, sob uma velocidade de rotação fixada em 330 rpm.

Figura 25 - (a) Amostras antes da moagem; (b) produto após moagem durante três minutos.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Subsequentemente, as amostras foram retiradas do jarro do moinho e, transferidas para a peneira de 106 malhas ($150\mu\text{m}$) para realização da verificação de adequação de tamanhos ao exigido, inferior a esta malha. A fração não passante na peneira, retornava ao moinho até que toda a massa inicialmente alimentada estivesse passante.

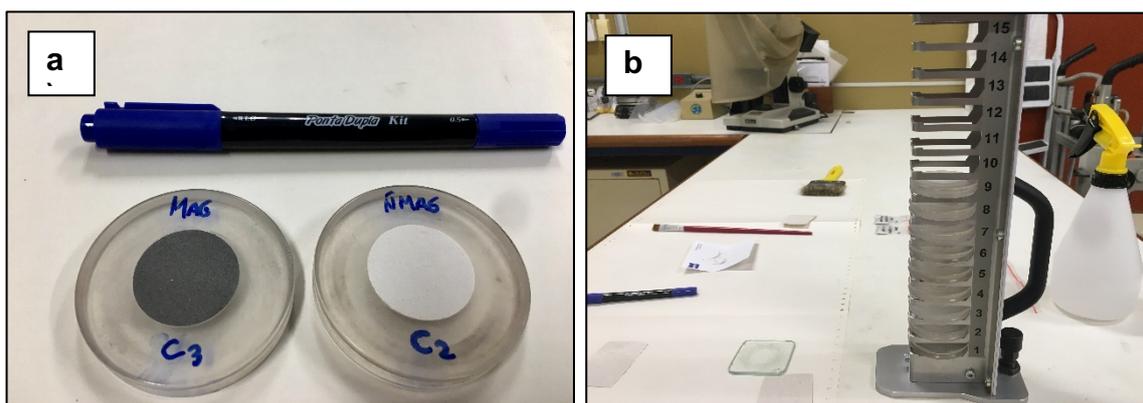
Finalmente, a amostra moída e dentro das especificações granulométrica, foi novamente alimentada no quarteador rotativo para separação das alíquotas a serem

destinadas às técnicas de caracterização, garantindo, por esses procedimentos, a representatividade da amostra primária.

3.5 Difração de Raios X

As amostras preparadas, conforme descrição no item 3.5, foram dispostas em porta amostras, nomeadas e inseridas na torre com capacidade para comportar até 15 amostras, Figura 26, e direcionadas para análise de DRX.

Figura 26 - (a) amostras na porta amostra; (b) amostras dispostas na torre.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Os difratogramas de raios X das amostras, obtidos pelo método do pó, foram realizados através de um equipamento Bruker-D8, nas seguintes condições de operação: radiação Cu K α (40 kV/40 mA); velocidade do goniômetro de 0,02° 2 θ por passo com tempo de contagem de 0,5 segundos por passo e coletados de 4 a 80° 2 θ , com detector sensível. As interpretações qualitativas de espectro foram efetuadas por comparação com padrões contidos no banco de dados PDF02 (ICDD, 2006) em software EVA, conforme Figura 27.

Figura 27 - Equipamento utilizado na aquisição dos difratogramas.



Fonte: Autoria própria, 2022.

3.6 Microscopia Eletrônica de Varredura

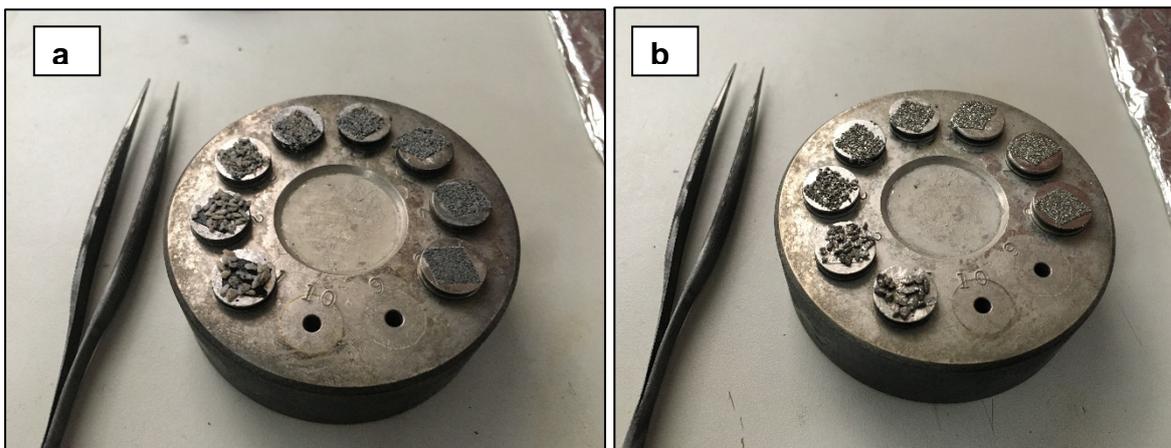
As amostras analisadas pela microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram dispostas em porta amostra e previamente recobertas com uma fina camada de prata no metalizador da fabricante Bal-Tec, Figura 28. A Figura 29 indica as amostras antes e após o processo de metalização.

Figura 28 - Metalizador utilizado para recobrimento das amostras para MEV.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Figura 29 - (a) Amostras antes da metalização com prata; (b) amostras com recobrimento.



Fonte: Autoria própria, 2022.

A identificação dos minerais presentes, suas composições e as relações de liberação mineral foram determinadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) FEI Quanta 400, equipado com um sistema de microanálise química por dispersão de energia (EDS) Bruker Quantax.

3.7 Microscopia em Lupa Binocular

As amostras de maior granulometria, mais especificamente entre o intervalo granulométrico de 3,36mm a 2,0mm, foram analisadas na lupa binocular, e imagens de cada fração foram capturas por um software específico. A Figura 30 apresenta a lupa binocular utilizada no registro.

Figura 30 - Lupa binocular utilizada nas análises de frações mais grossas.



Fonte: Autoria própria, 2022.

3.8 Densidade aparente

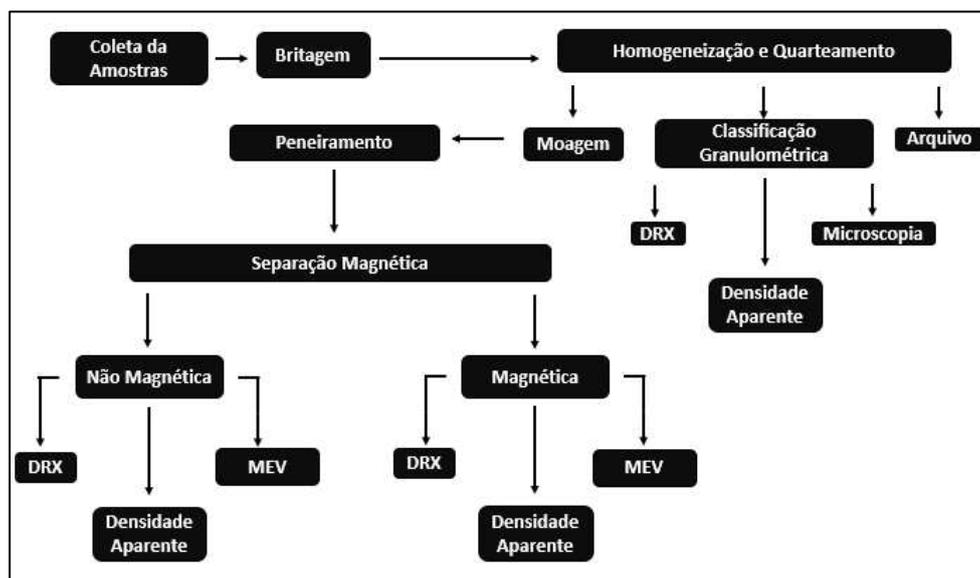
A determinação da densidade aparente das diferentes frações foi realizada utilizando o picnômetro a gás hélio, modelo ACCUPYC II 1340 (Figura 31), fabricado pela Micromeritics. O equipamento emprega o método de deslocamento de gás para medir volumes com precisão e realizar o cálculo com base na massa informada para a amostra.

Figura 31 – Picnômetro a gás hélio, modelo ACCUPYC II 1340.



Fonte: Autoria própria, 2022

Figura 32 - Fluxograma ilustrando a metodologia empregada no estudo.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Capítulo IV
RESULTADOS

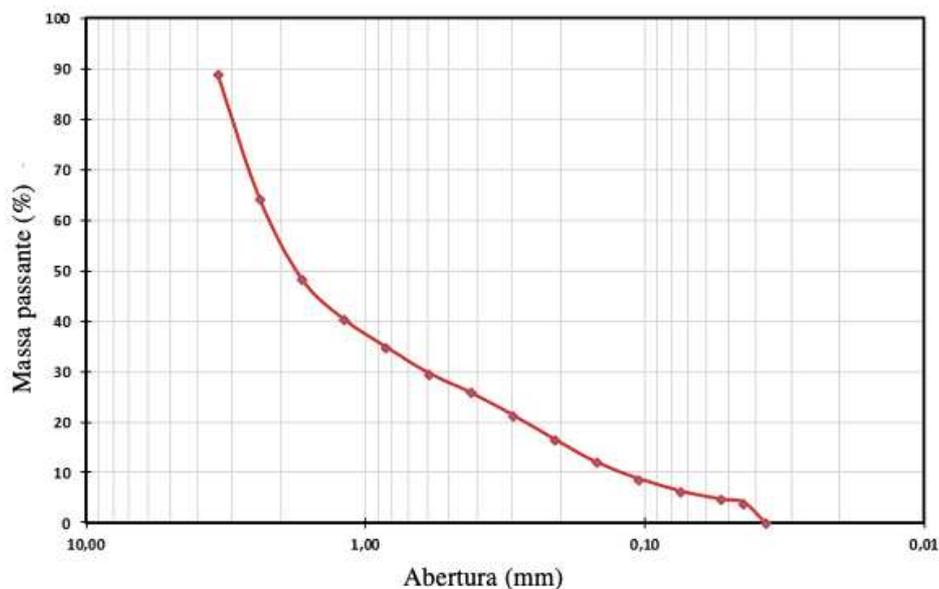
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os resultados preliminares, correspondentes a análise granulométrica da amostra de alimentação, caracterização química, mineralógica, densidade aparente e da microscopia eletrônica de varredura dos intervalos granulométricos e frações magnéticas e não magnéticas.

4.1. Análise granulométrica

Os resultados obtidos na análise granulométrica por peneiramento estão expressos na Figura 33, que indicam as curvas de distribuição de passante em função da abertura da malha.

Figura 33 - Curva de distribuição granulométrica da massa passante.



Fonte: Autor, 2022

A partir da análise da curva visualizada na Figura 36, nota-se uma distribuição regular do tamanho das partículas após as duas etapas de fragmentação em britador de mandíbulas (britagem primária). Destaca-se que as faixas mais grosseiras, cuja liberação dos minerais portadores de ferro é baixa, retiveram percentuais de massa considerados altos, conforme indicado por Luz *et al.*, (2018). Dessa forma, se confirma a necessidade de aplicação de estágios de moagem para liberação física dos minerais, visando a operação de concentração mineral.

4.2 Fluorescência de Raios X

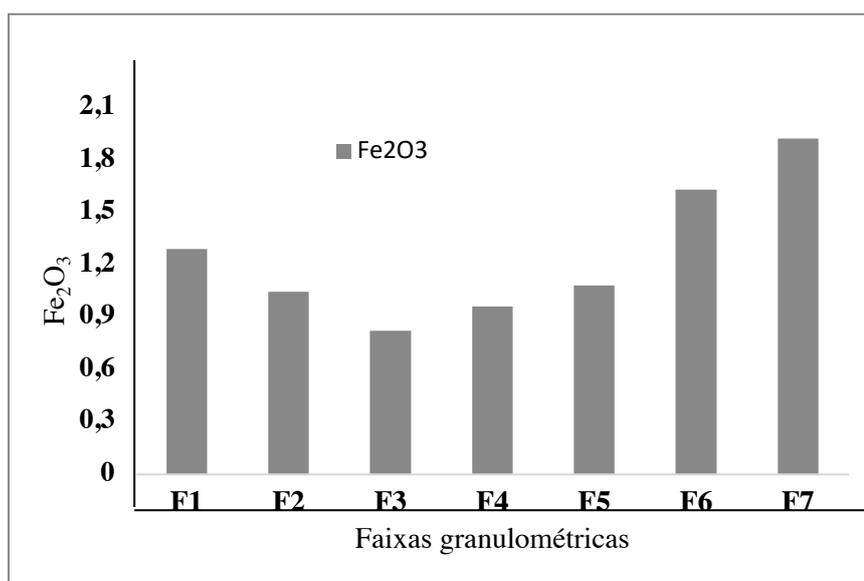
Na Tabela 11 são apresentados resultados das análises composicionais das 07 amostras, correspondentes aos intervalos granulométricos definidos, antes do beneficiamento por separação magnética.

Tabela 11 - Resultados da análise por FRX por granulometria (% em peso).

Am.	Granulometria	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	BaO	TiO ₂	Rb ₂ O
F1	-2,0+1,18mm	68,225	19,097	5,574	3,799	1,385	1,290	-	0,399	0,087	0,006
F2	-1,18+1,0mm	68,019	19,195	5,299	4,111	1,209	1,047	0,564	0,296	0,101	0,006
F3	-1,0+0,85mm	68,814	18,787	5,134	4,038	1,063	0,822	0,596	0,335	0,029	0,006
F4	-0,85+0,71mm	68,777	19,128	5,651	3,744	1,007	0,962	0	0,305	0,054	0,006
F5	-0,71+0,60mm	68,024	19,697	6,152	3,068	0,969	1,083	0,556	0,323	0,021	-
F6	-0,60+0,30mm	66,602	19,53	6,275	3,197	1,524	1,631	0,62	0,232	0,163	-
F7	0,30+0,15mm	66,153	18,539	5,662	3,934	2,272	1,924	0,594	0,305	0,206	0,007

Os percentuais químicos obtidos nas amostras em função das frações granulométricas condizem com a composição esperada para uma rocha mineralizada em feldspato e quartzo como minerais majoritários. Estas concentrações químicas demonstram que, para todas as faixas de tamanho de partículas, mesmo antes do processamento para remoção do conteúdo de minerais portadores de ferro, os teores de álcalis (Na₂O e K₂O) somados são significativamente altos para fins de aplicação na indústria cerâmica. Enquanto que os teores de Fe₂O₃, para todas as faixas estudadas, estão notadamente acima do limite aceitável para as citadas aplicações industriais (0,15%), conforme Figura 34, indicando a necessidade de purificação por separação magnética.

Figura 34 - Variação no teor de Fe₂O₃ em função da granulometria.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Em razão das mais altas concentrações de Fe_2O_3 observadas nas amostras “F6” e “F7”, sendo 1,631% e 1,924% respectivamente, e somada à constatação da maior liberação física dos minerais portadores de ferro nesses intervalos de tamanho, estes foram indicados para realização dos ensaios de concentração mineral.

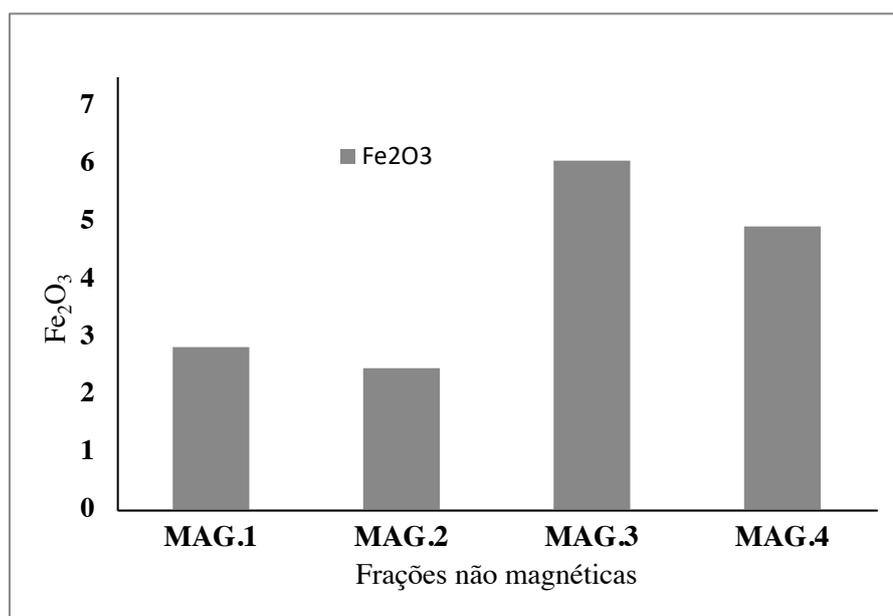
A Tabela 12 indica os resultados da análise composicional para as frações magnéticas obtidas após o processamento das amostras por separação magnética a seco. Os resultados estão expressos em função da granulometria e da velocidade de rotação dos rolos do equipamento de concentração, conforme exposto na Tabela 10.

Tabela 12 - Resultados da análise por FRX para as frações magnéticas a seco (% em peso).

Am.	Granulometria	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	BaO	TiO ₂	SO ₃
MAG.1	-0,6+0,3mm	67,111	17,399	5,686	3,058	2,003	2,835	0,882	0,237	0,203	0,325
MAG.2	-0,6+0,3mm	67,098	17,788	5,554	3,421	1,906	2,47	0,82	0,261	0,202	0,238
MAG.3	-0,3+0,15mm	62,904	17,713	5,583	3,06	2,387	6,069	1,224	0,292	0,284	0,176
MAG.4	-0,3+0,15mm	64,148	17,89	5,696	2,859	2,141	4,923	1,294	0,232	0,285	0,279

Nota-se a variação de teores de Fe_2O_3 (Figura 35) cujo aumento dessas concentrações nas frações magnéticas é evidente em comparação as amostras indicadas na Tabela 11. O Fe pode estar associado a magnetita e hornblenda, que foram removidos, em diferentes recuperações metalúrgicas, da amostra quando expostas ao processo de separação magnética. O titânio provavelmente encontra-se associado à amostra por cristais de ilmenita, comum em rochas alcalinas.

Figura 35 - Variação no teor de Fe_2O_3 nas frações magnéticas obtidas.



Fonte: Autoria própria, 2022.

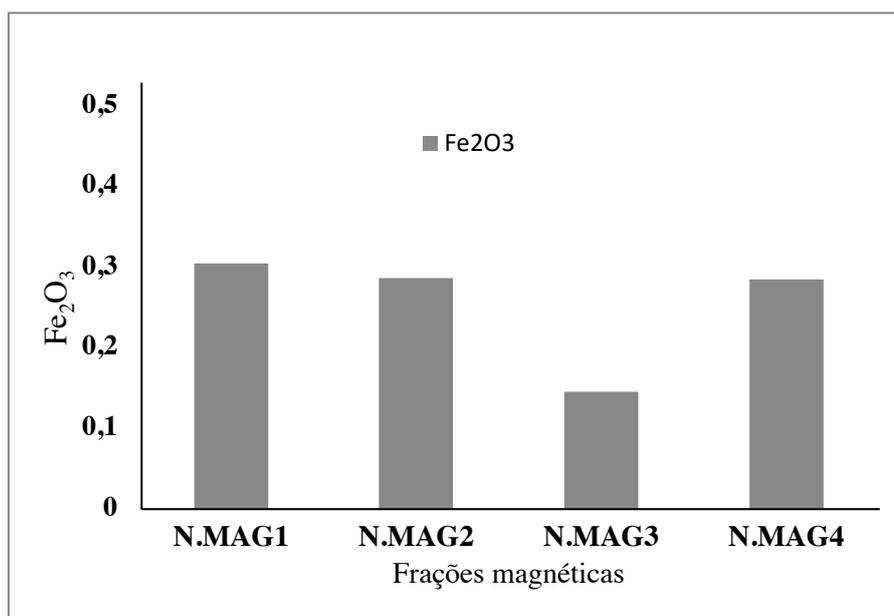
A Tabela 13 indica os resultados da análise composicional para as frações não magnéticas obtidas após o processamento das amostras por separação magnética a seco.

Tabela 13 - Resultados da análise por FRX para as frações não magnéticas separadas a seco (% em peso).

Am.	Granulometria	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	BaO	TiO ₂	SO ₃
N.MAG1	-0,6+0,3mm	69,891	18,348	5,74	4,155	0,745	0,305	0	0,302	0	0,28
N.MAG2	-0,6+0,3mm	69,762	18,238	5,713	4,247	0,841	0,287	0	0,369	0	0,312
N.MAG3	-0,3+0,15mm	69,414	18,945	6,47	3,429	0,798	0,146	0	0,255	0	0,236
N.MAG4	-0,3+0,15mm	69,051	18,758	6,292	4,028	0,958	0,285	0	0,35	0	0

Percebe-se a redução significativa dos teores de Fe₂O₃, em comparação as amostras indicadas na Tabela 11, evidenciando a eficiência do beneficiamento por concentração magnética, mostrando que os minerais portadores de ferro foram concentrados com recuperações metalúrgicas variadas em função da granulometria da amostra e da velocidade de rotação dos rolos do equipamento empregado. A Figura 36 destaca os percentuais de Fe₂O₃ em função das frações não magnéticas caracterizadas.

Figura 36 - Variação no teor de Fe₂O₃ nas frações não magnéticas obtidas.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Apenas na amostra nomeada como N.MAG3, o teor de Fe₂O₃ exigido para aplicação na indústria de porcelanato (Fe₂O₃ inferior a 0,15%) foi obtido, enquanto as concentrações desse elemento estiverem dentro do limite para aplicações menos nobres nas indústrias cerâmica ou vidreira (KUZMICKAS *et al.*, 2013).

4.3 Difração de raios X

4.3.1 Amostras: Frações granulométricas

As Figuras 37 a 43 apresentam os difratogramas de raios X das diferentes frações granulométricas estudadas (F1 a F7), respectivamente.

Figura 37 - Difratograma de raios X da fração -2,0+1,8mm.

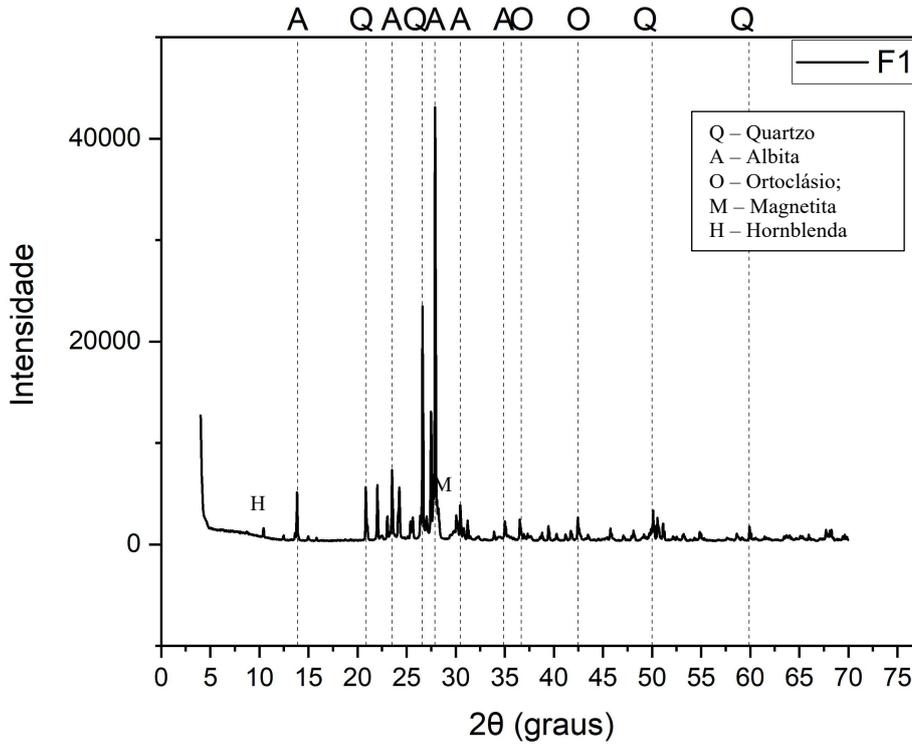


Figura 38 - Difratograma de raios X da fração -1,18+1,0mm.

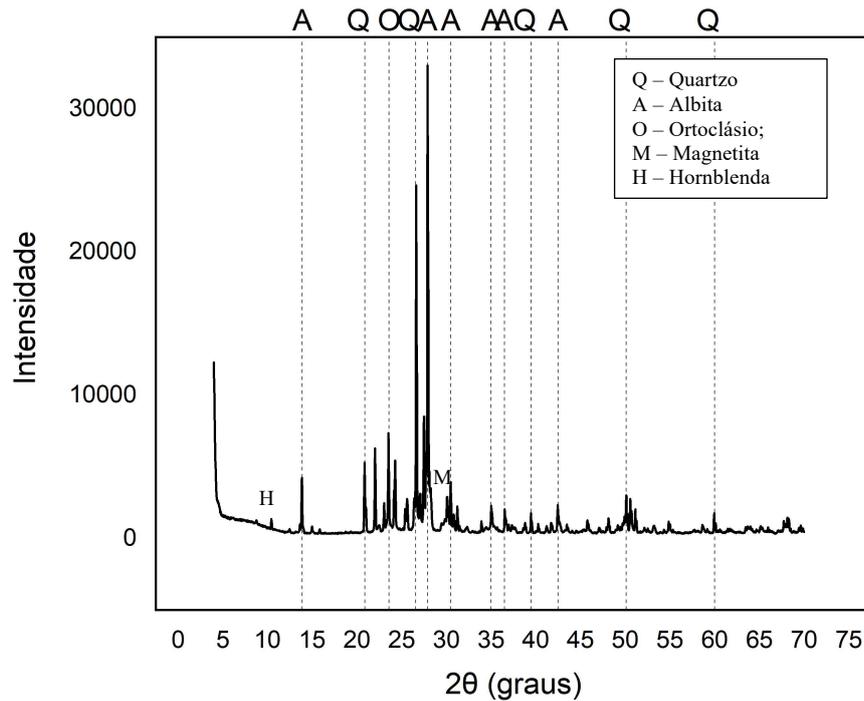


Figura 39 - Difratoograma de raios X da fração -1,0+0,85mm.

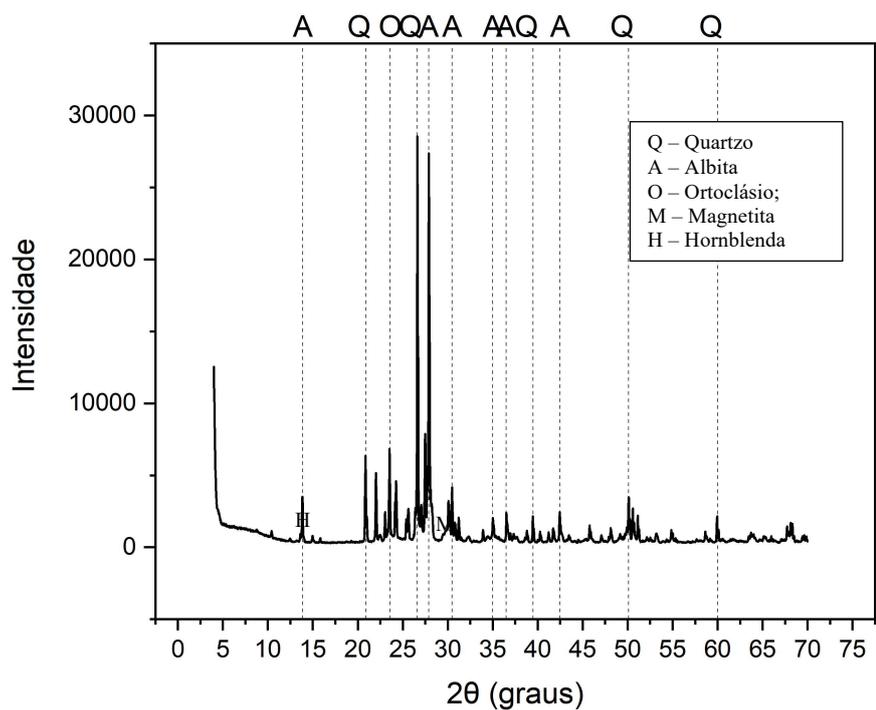


Figura 40 - Difratoograma de raios X da fração -0,85+0,71mm.

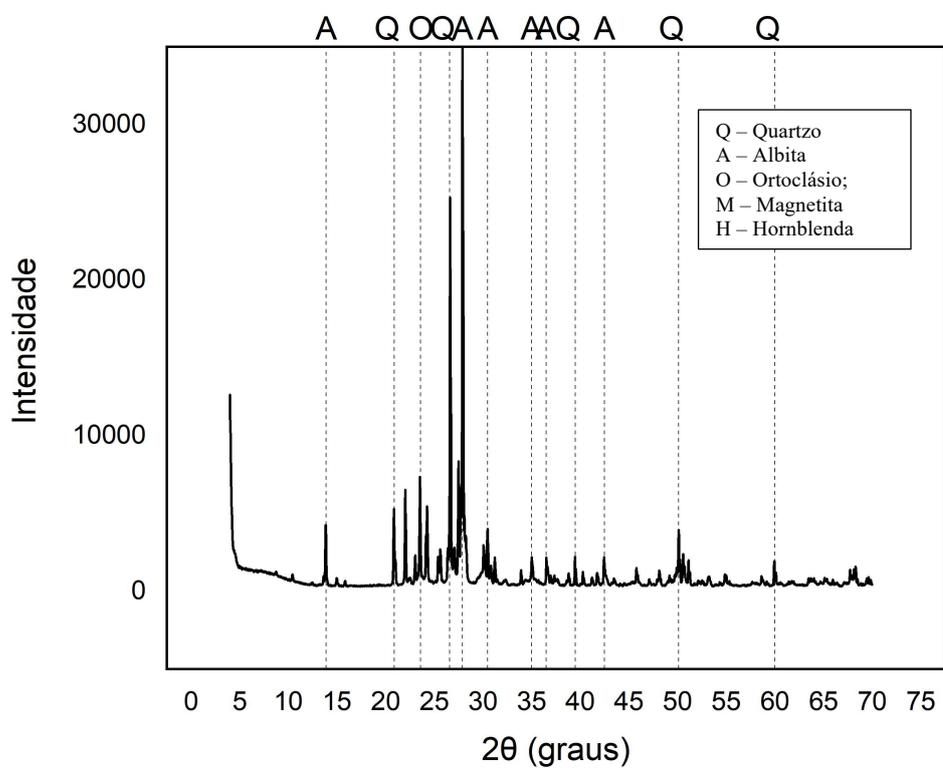


Figura 41 - Difratoograma de raios X da fração -0,71+0,6mm.

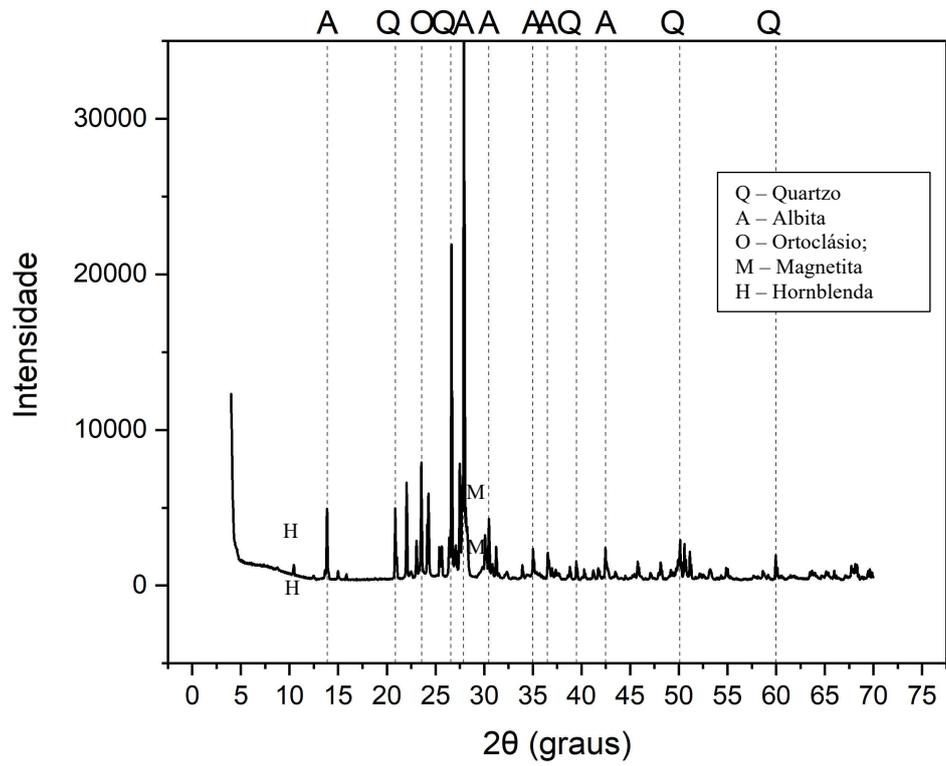


Figura 42 - Difratoograma de raios X da fração -0,6+0,3mm.

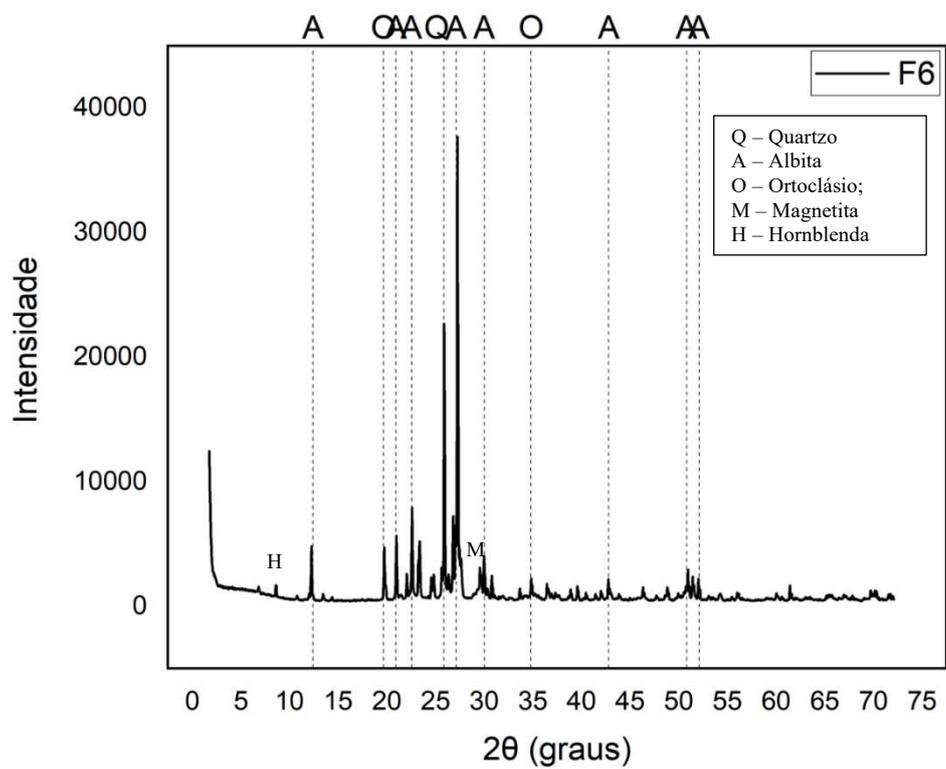
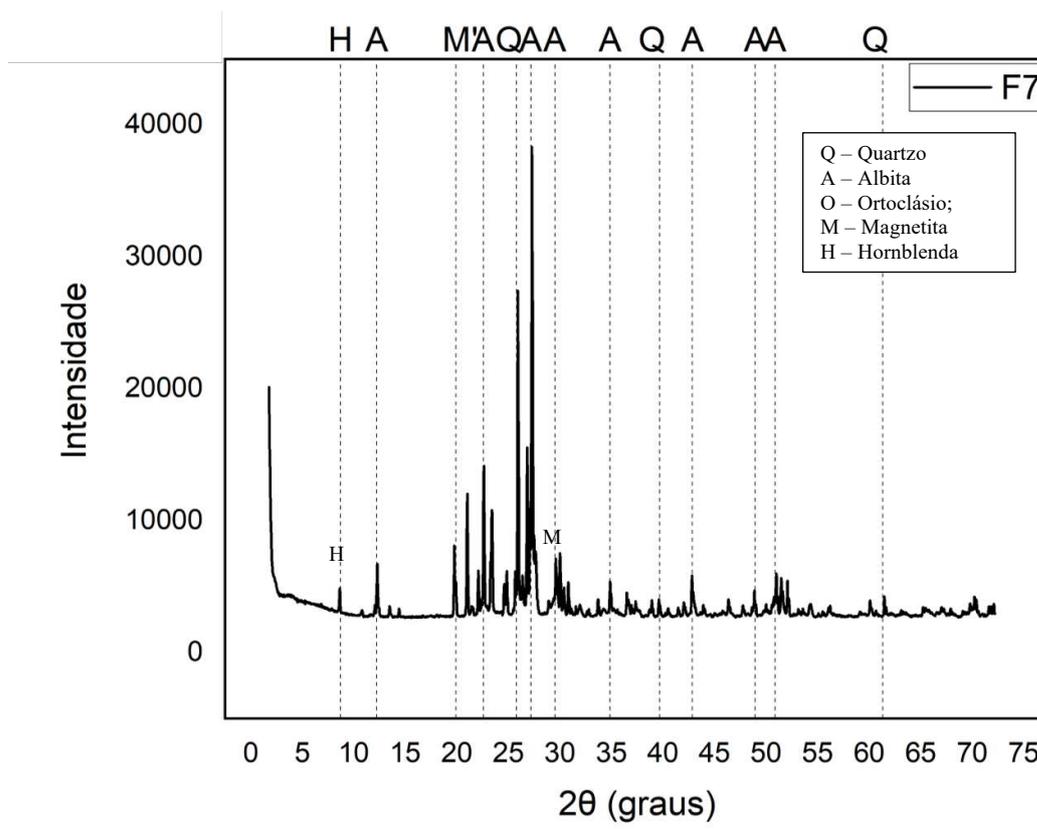


Figura 43 - Difratoograma de raios X da fração -0,3+0,15mm.



Observa-se que composição mineralógica é bastante semelhante para as diferentes frações granulométricas, pela verificação de alterações sutis nas intensidades dos picos característicos dos minerais, o que corresponde, em caráter semiquantitativo, a variação na concentração dos minerais essenciais, albita, ortoclásio, microclínio e quartzo. Em todas as faixas granulométricas investigadas, picos característicos de magnetita e hornblenda foram identificados, com variação crescente nas granulometrias mais finas.

Os picos de maior intensidade para os minerais portadores de ferro foram identificados para as frações -0,6+0,3mm e -0,3+0,15mm, corroborando a indicação dos teores significativos de Fe_2O_3 , 1,631% e 1,924%, respectivamente, conforme Tabela 11. As Figuras 44 e 45 destacam os picos dos minerais portadores de ferro, para as amostras F6.

Figura 44 – Difratoograma de raios X com destaque dos picos de hornblenda na amostra F6.

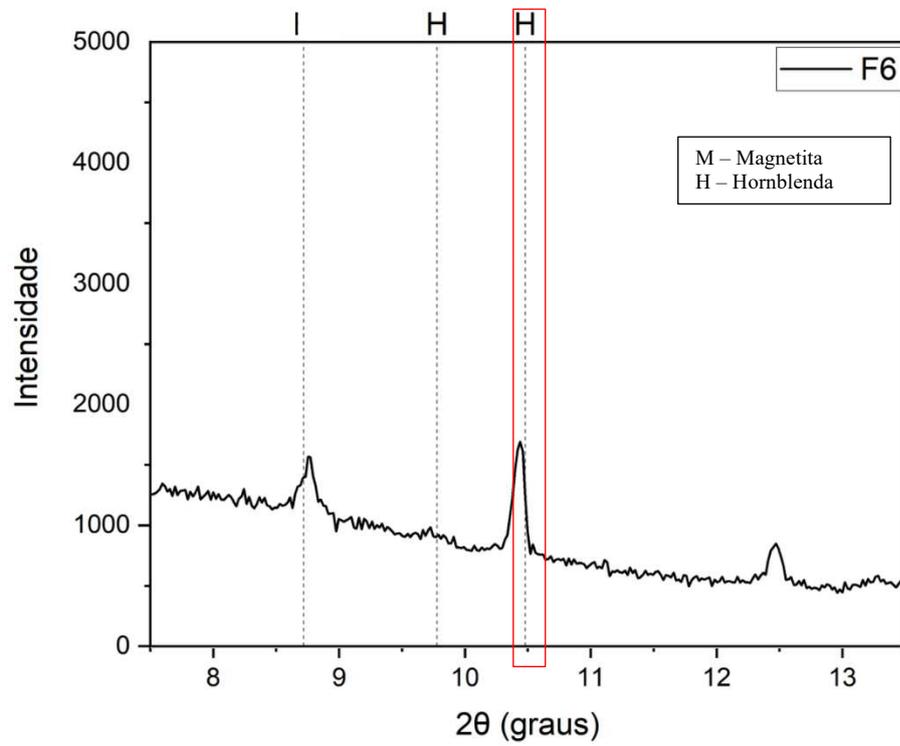
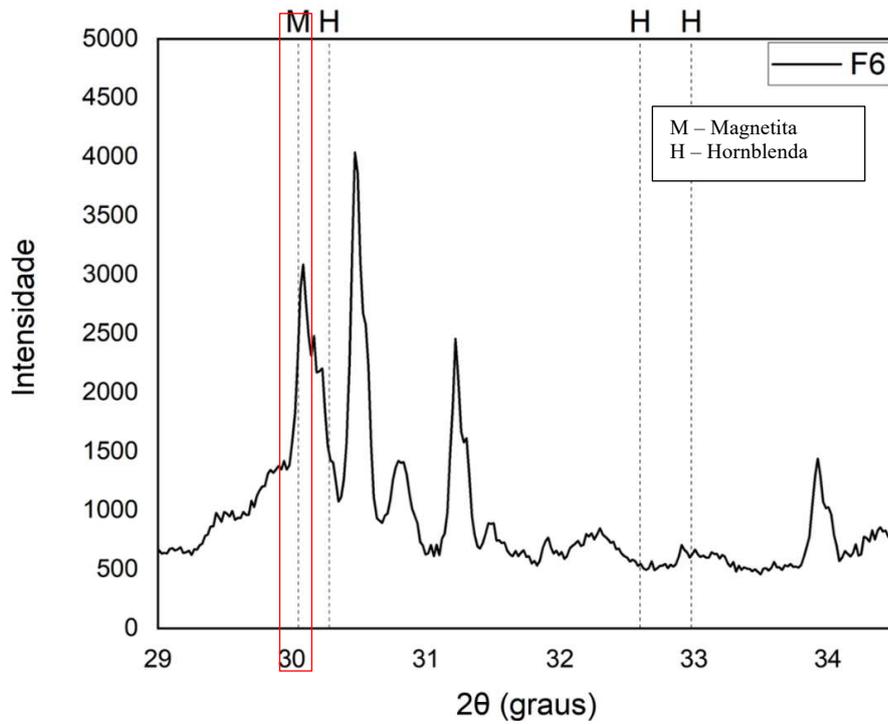


Figura 45 - Difratoograma de raios X com destaque do pico de magnetita na amostra F6.



Nas Figuras 46 e 47 estão destacam os picos dos minerais portadores de ferro, nos difratogramas da fração F7 (-0,3+0,15mm), evidenciando a maior concentração de hornblenda e magnetita, nessa faixa granulométrica em comparação a F6 (-0,6+0,3mm), contribuindo com os resultados da análise química, os quais indicaram uma maior concentração de Fe_2O_3 na fração F7.

Figura 46 - Difratograma de raios X com destaque dos picos de hornblenda na amostra F7.

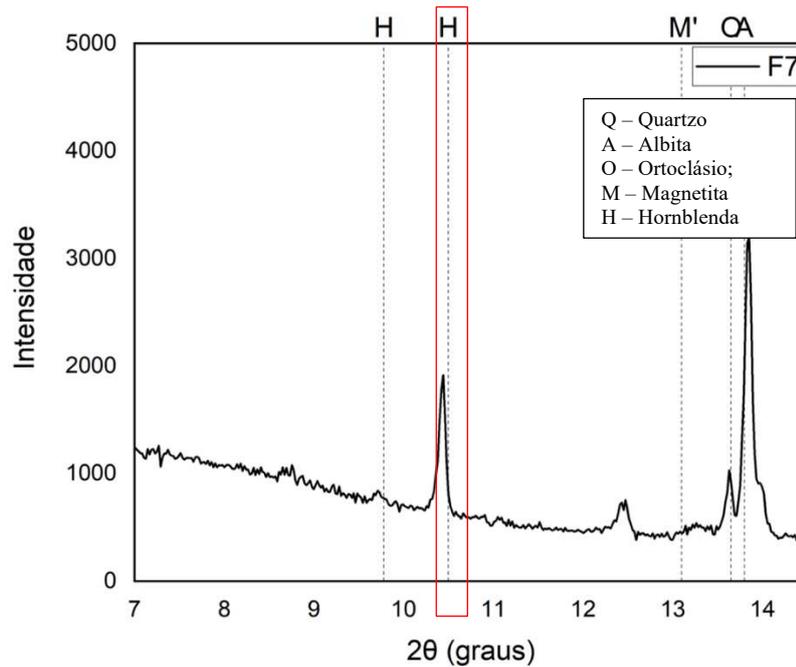
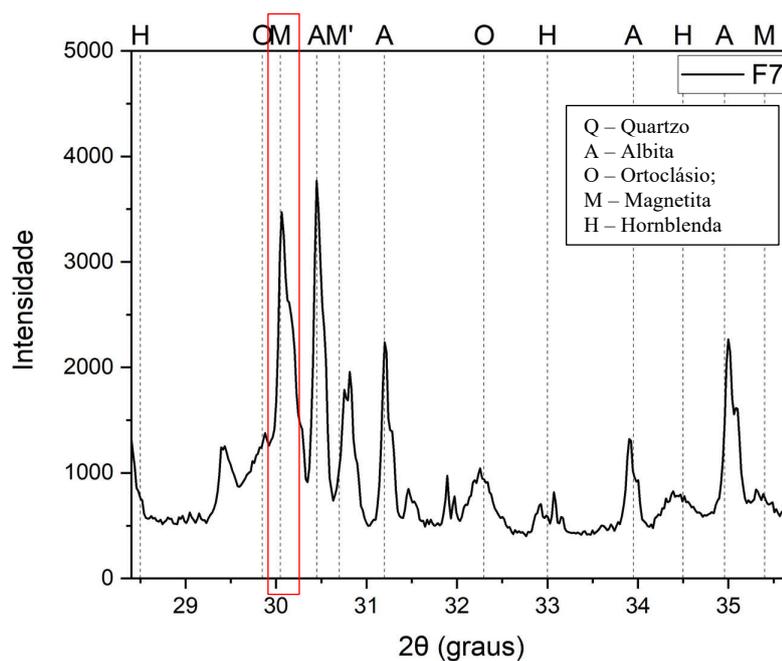


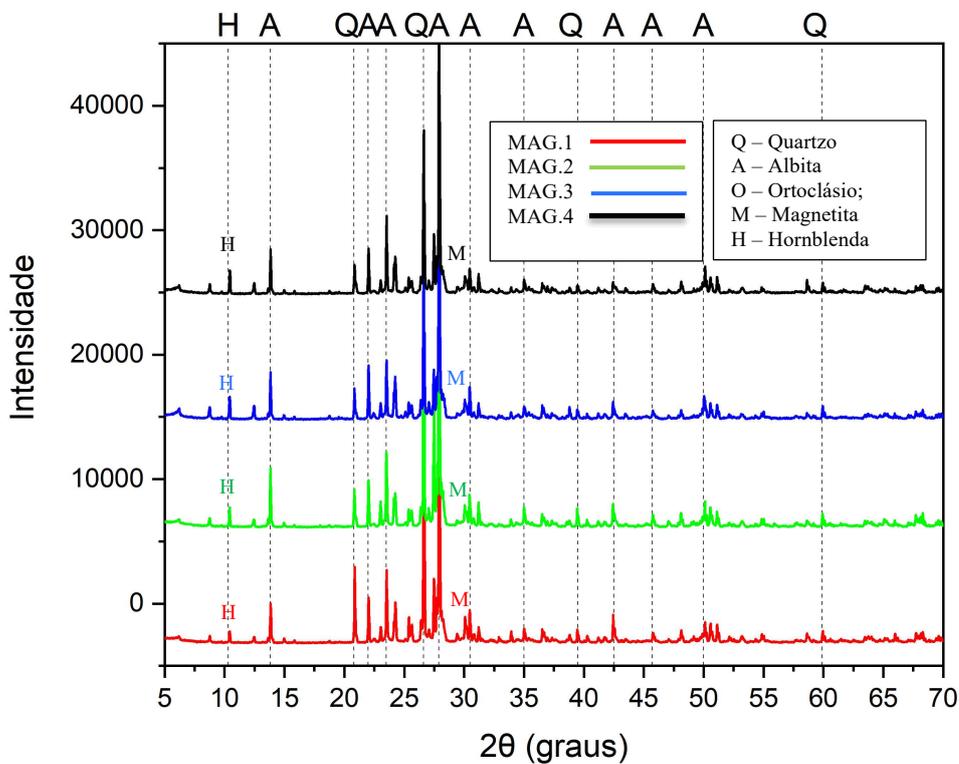
Figura 47 - Difratograma de raios X com destaque do pico de magnetita na amostra F7.



4.3.2 Amostras: Frações magnéticas e não magnéticas

A Figura 48 apresenta a sobreposição dos difratogramas de raios X para as frações magnéticas, confirmando os maiores teores de minerais portadores de ferro nas amostras MAG.3 e MAG.4, pela maior intensidade dos picos característicos da hornblenda (em 9,75°) e magnetita (em 30,01°), o que indica que os ensaios S.M3 e S.M4 foram mais eficientes para remoção desses minerais da amostra inicial, sobretudo pela maior liberação mineral na faixa granulométrica F7 (-0,6+0,3mm) utilizada nesses dois ensaios. Considerando que a faixa de alimentação dos ensaios S.M1 e S.M2, F6 (-0,6+0,3mm), possui menor liberação que a F7, a remoção dos óxidos de ferro foi menos significativa.

Figura 48 - Sobreposição dos difratogramas de raios X das frações magnéticas.

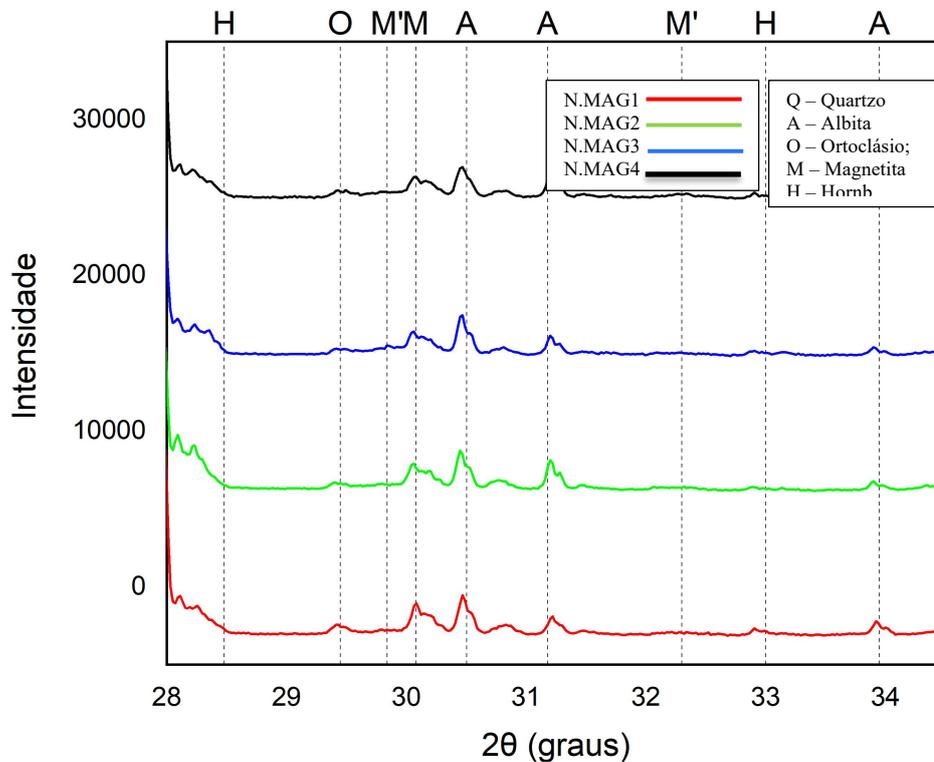


A maior concentração de minerais portadores de ferro nas amostras MAG.3 e MAG.4 pode ser comprovada pelos percentuais de Fe_2O_3 , que correspondem a 6,069% na fração MAG.3 e 4,923 na fração MAG.4, conforme Tabela 12.

Para destacar a eficiência da separação magnética a seco para purificação do minério, no que diz respeito à redução de Fe_2O_3 , na Figura 49 estão sobrepostos os difratogramas de raios X das frações não magnéticas, com destaque para a região de ocorrência do pico característico da magnetita (em 30,01°), que, para as quatro amostras

(N.MAG1, N.MAG2, N.MAG3 e N.MAG4) ocorre com uma baixa intensidade em comparação ao pico evidenciado previamente a aplicação da separação magnética.

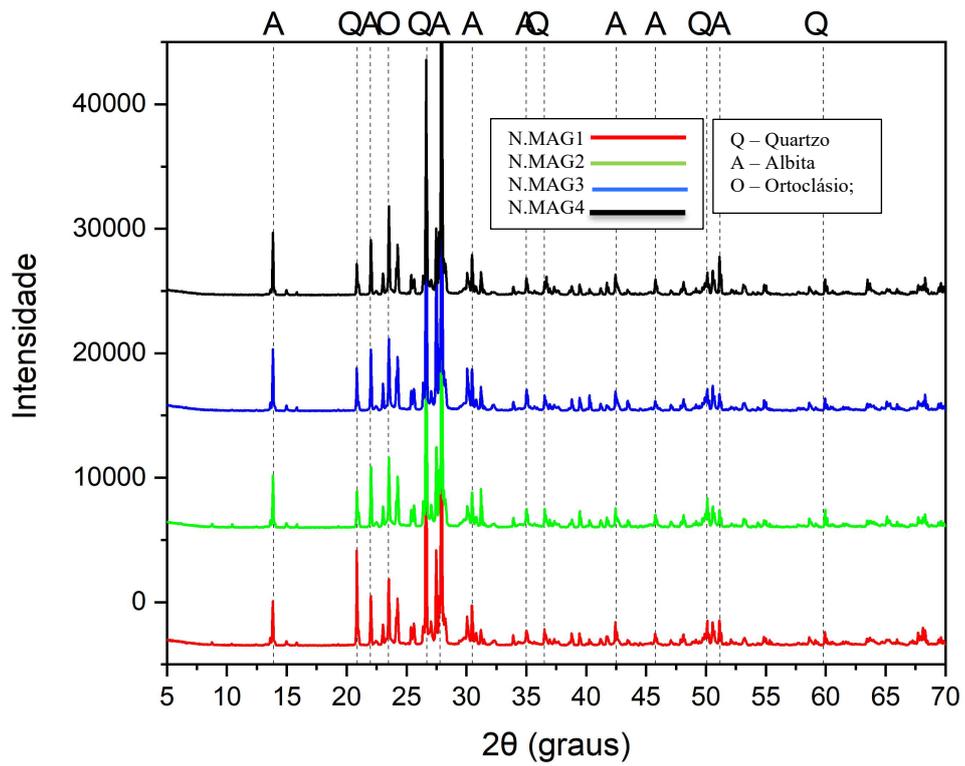
Figura 49 - Sobreposição dos difratogramas de raios X das frações não magnéticas, com destaque para a região de ocorrência do pico de magnetita.



Os picos característicos de magnética com menor intensidade são verificados nas amostras N.MAG3 e N.MAG.4, sendo estas frações não magnéticas as que apresentaram menores concentrações de Fe_2O_3 , que corresponderam a 0,146% e 0,285%, nessa ordem.

Na Figura 50 estão sobrepostos os difratogramas de raios X das frações não magnéticas, demonstrando toda a região de difração, comprovando a inexistência dos picos característicos da hornblenda antes verificados no ângulo $9,75^\circ$ (2θ), e predominância dos minerais essenciais da rocha, albita, ortoclásio e quartzo.

Figura 50 - Sobreposição dos difratogramas de raios X das frações não magnéticas.

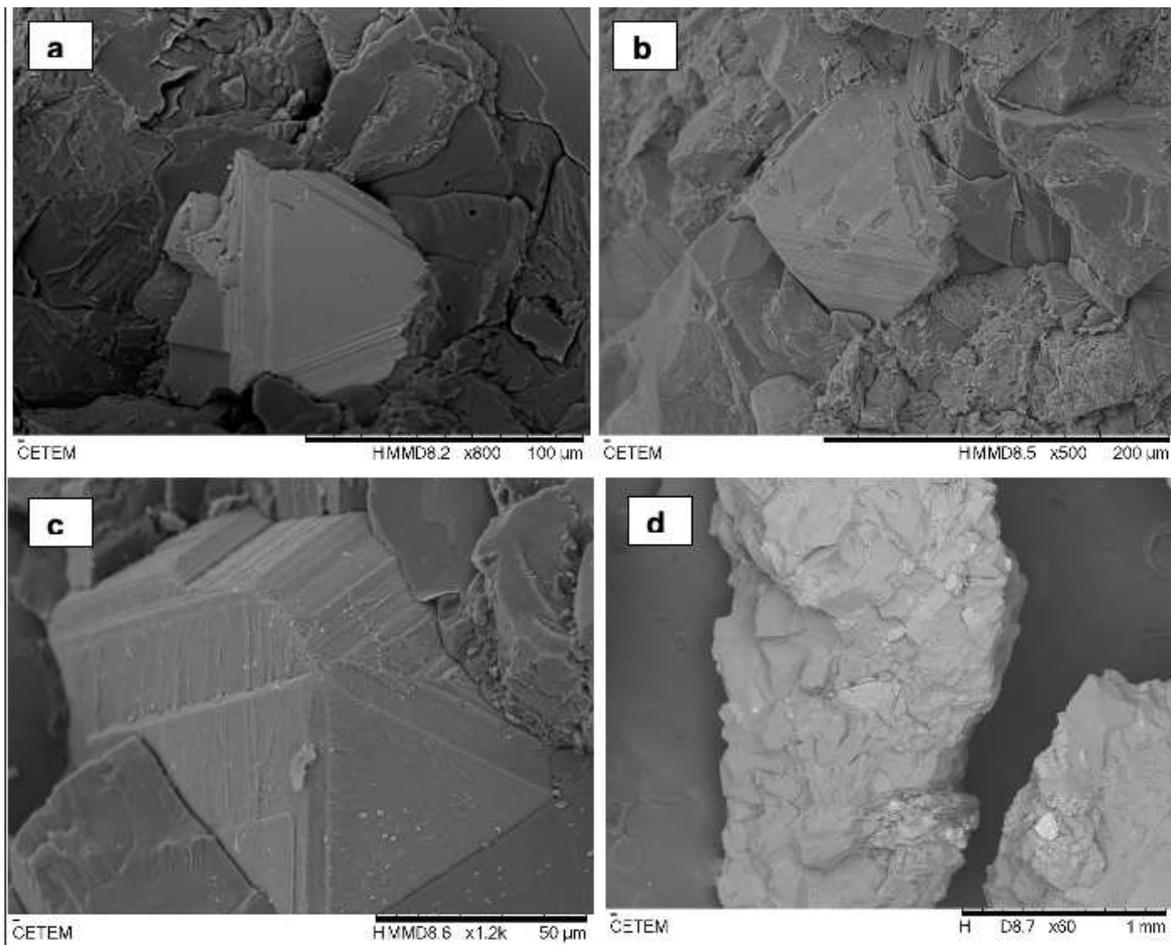


4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

4.4.1 Amostras: Frações granulométricas

A seguir estão representadas as imagens obtidas no microscópio eletrônica de varredura para as diferentes frações granulométricas (F1 a F7). A Figura 51 apresenta imagens obtidas MEV da fração F1 (-2,0+1,18mm)

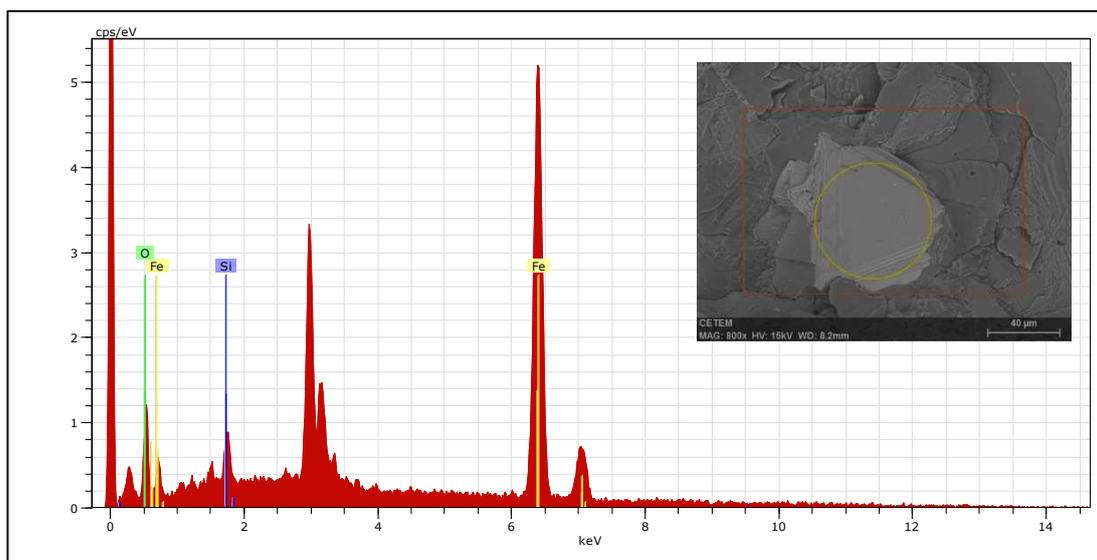
Figura 51 - Imagens da fração F1 (-2,0+1,2mm). (a), (b), (c) indicam partículas do mineral magnetita formando partículas mistas com outros minerais, como o quartzo. (d) representa uma partícula mista com minerais portadores de ferro.



Fonte: Autoria própria, 2022.

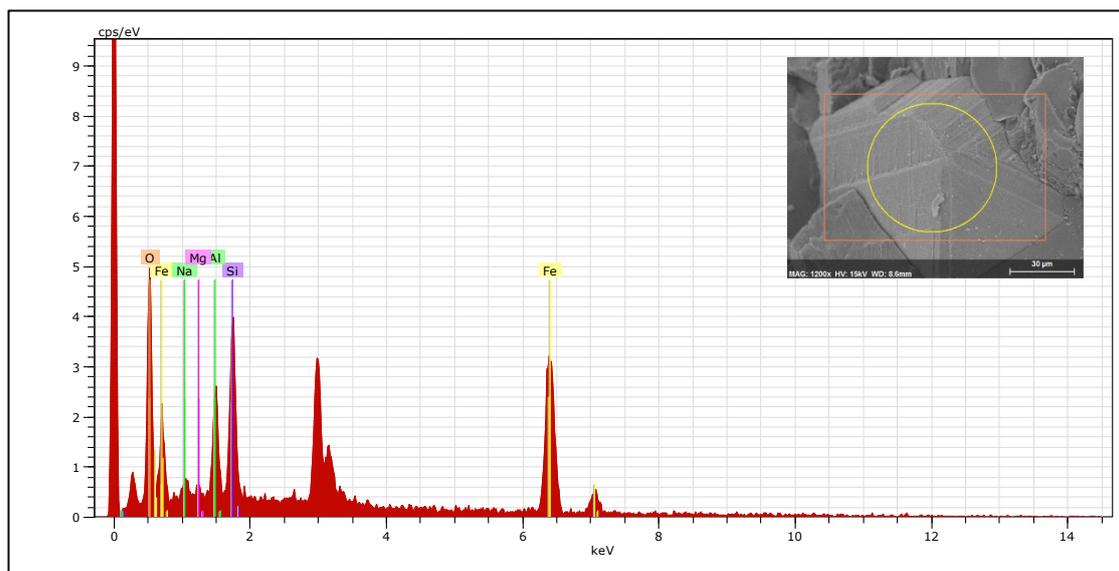
Observa-se grãos de magnetita com cerca 100µm inclusos na matriz da rocha. Estes grãos mantêm as faces nítidas e não fraturadas (euédricos), indicando que, nessa fração, o mecanismo de compressão do britador de mandíbulas não promove a degradação física dos grãos de magnetita. O hábito bipiramidal característico, conforme Chirita *et al.* (2012), a tonalidade cinza mais clara, correspondente a elementos químicos mais densos, o espectro de EDS (Figura 52 e 53) confirmam a presença deste mineral.

Figura 52 - Espectro de EDS para a região delimitada da partícula mineral representada na Figura 54(a), confirmando a composição química da magnetita.



Fonte: Autoria própria, 2022.

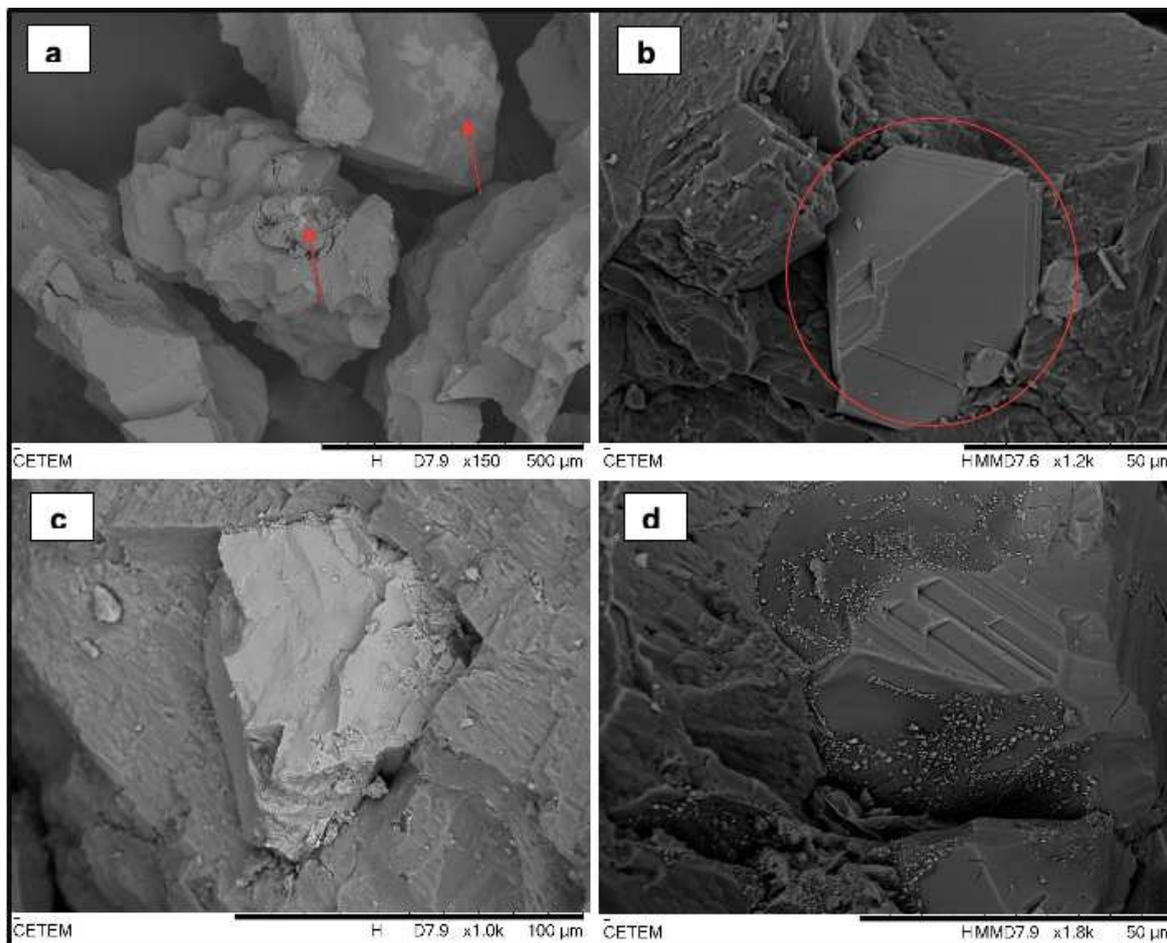
Figura 53 - Espectro de EDS para a região delimitada da partícula mineral representada na Figura 54(c), confirmando a composição química da magnetita



Fonte: Autoria própria, 2022

A Figura 54 apresenta imagens obtidas para a fração F2 (-1,18+1,0mm).

Figura 54 - Imagens da fração F2 (-1,18+1,0mm). (a) e (c) indicam partículas mistas, onde os tons mais claros representam minerais portadores de ferro do mineral. (b) representa um cristal de magnética não liberado e, (d) cristal de torianita.

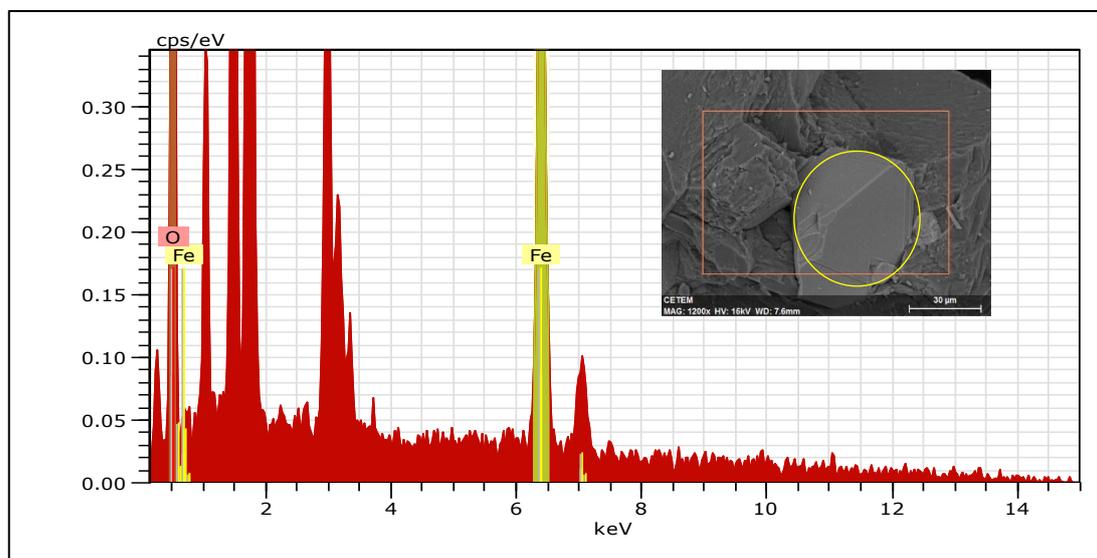


Fonte: Autoria própria, 2022

Os espectros de EDS, Figuras 55 e 56 corroboram com a indicação dos minerais destacados. Para a granulometria F2 (-1,18+1,0mm), verifica-se a não liberação física dos minerais portadores de ferro, com destaque para cristais de magnetita como partículas mistas principalmente com variedades de feldspatos e com quartzo, conforme Figura 57.

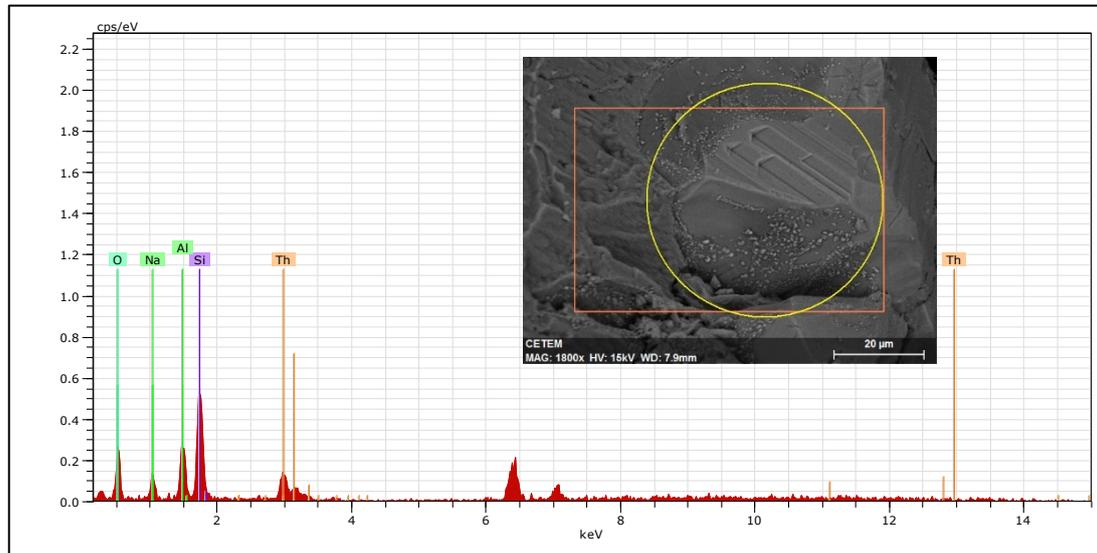
Este resultado converge para os resultados de Miceli *et al.*, (2017), que utilizou frações granulométricas similares a F1 e F2 em ensaios de separação magnéticas de alta intensidade e não obteve resultados satisfatórios pela baixa liberação dos minerais portadores de ferro na alimentação dos testes.

Figura 55 - Espectro de EDS para a região delimitada na Figura 57(b).



Fonte: Autoria própria, 2022.

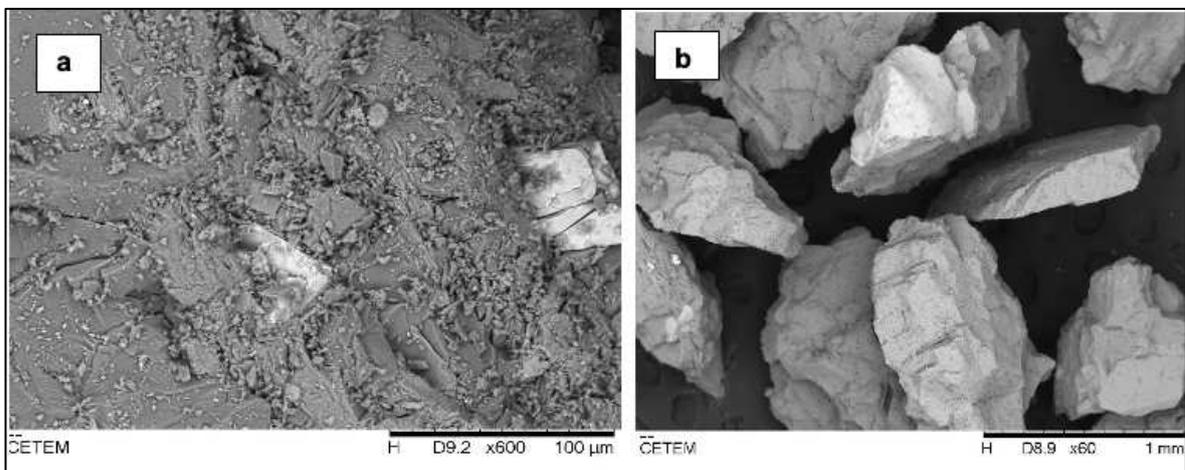
Figura 56 - Espectro de EDS indicando a composição química da partícula representada na Figura 55(d), com destaque para a presença do elemento químico Tório (Th).



Fonte: Autoria própria, 2022.

Para o intervalo granulométrico F3 (-1,0+0,85mm), observa-se na Figura 60(a) grãos de magnetita parcialmente não liberados, com aproximadamente 100µm e faces perceptíveis, enquanto que a Figura 57(b) destaca um grão de magnetita parcialmente liberado fisicamente.

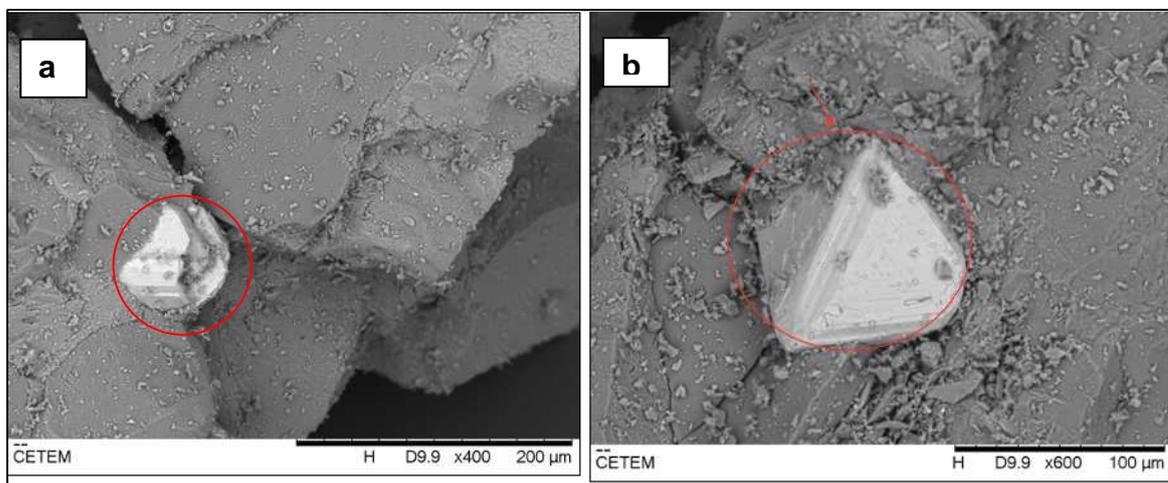
Figura 57 - Imagens da fração F3 (-1,0+0,85mm). (a) partículas de magnetita não liberada; (b) partícula de mineral portador de ferro parcialmente liberado.



Fonte: Autoria própria, 2022.

A Figura 58 apresenta imagens obtidas para a fração F4 (-0,85+0,71mm), indicando que, nesse intervalo granulométrico, as partículas minerais de magnetita estão mistas com os demais minerais.

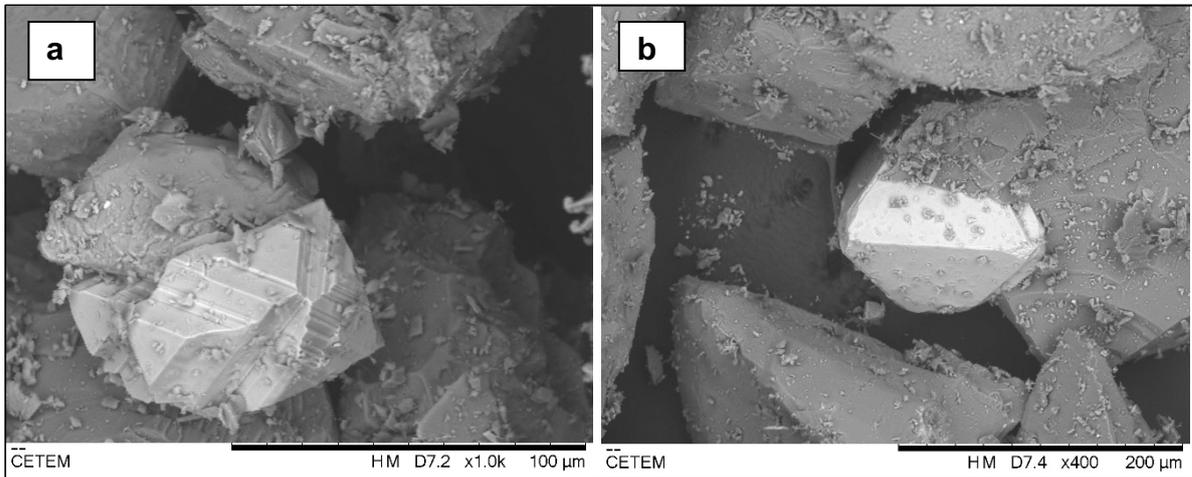
Figura 58 - Imagens da fração F4 (-0,85+0,71mm). (a), (b) partículas de magnetita não liberadas em relação aos demais minerais.



Fonte: Autoria própria, 2022.

A Figura 59 apresentam imagens obtidas para a fração F5 (-0,71+0,60mm), indicando que, nesse intervalo granulométrico, as partículas minerais de magnetita estão parcialmente liberadas em relação aos demais minerais.

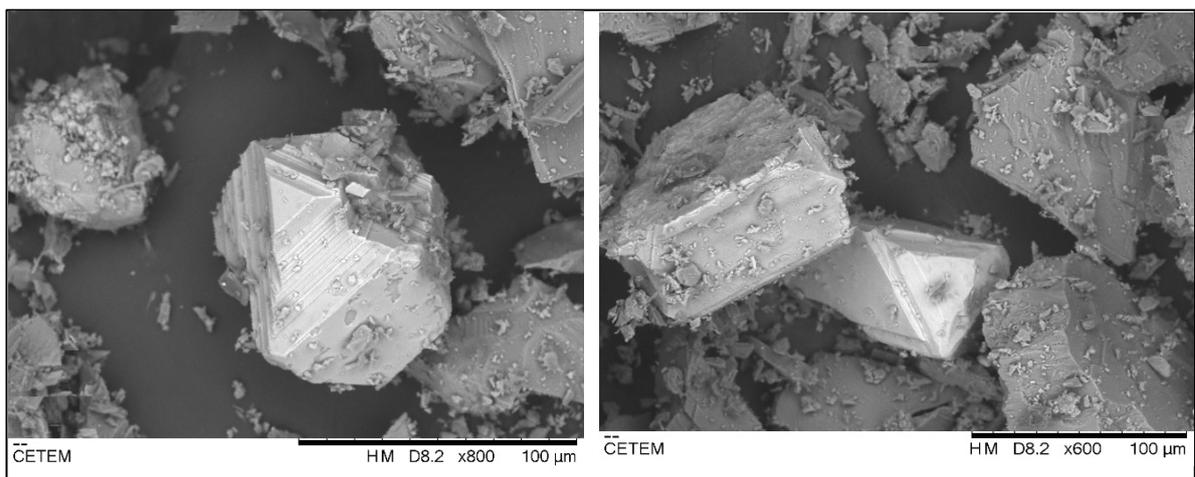
Figura 59 - Imagens da fração F5 (-0,71+0,6mm). (a) partícula de magnetita parcialmente liberada; (b) partícula de mineral portador de ferro parcialmente liberado.



Fonte: Autoria própria, 2022.

A partir do intervalo granulométrico F6 (-0,6+0,3mm) pode-se constatar a liberação física mais significativa dos grãos de minerais portadores de ferro, razão que favoreceu a opção das amostras F6 e F7 para aplicação da separação magnética. Os grãos de magnetita individualizados são claramente percebidos nas Figura 60, no entanto, detecta-se, ainda que em menor proporção, partículas mistas de magnetita.

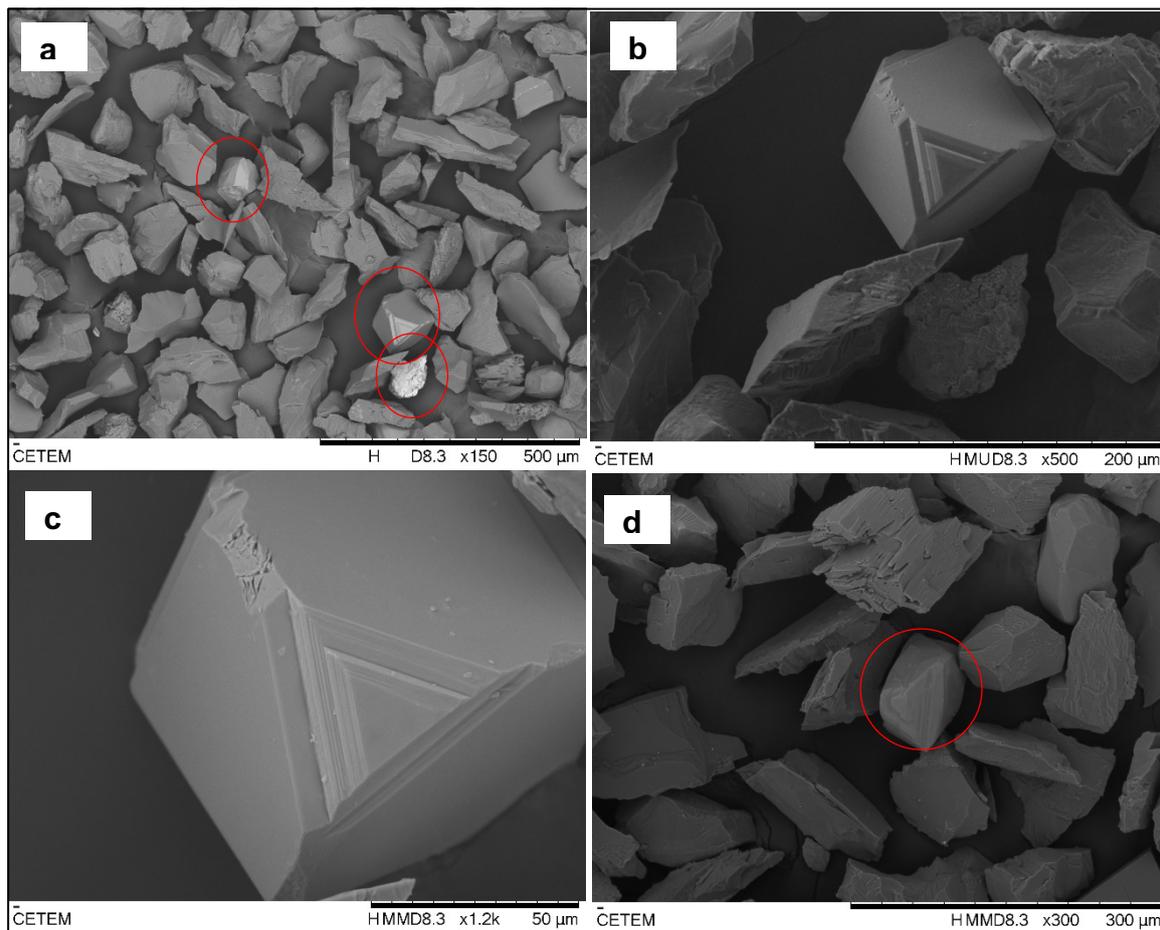
Figura 60 - Grãos de magnetita fisicamente liberados em -0,6+0,3mm.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Para a fração granulométrica F7 (-0,3+0,15mm), a liberação mineral possui uma maior significância, conforme observado pelas imagens de MEV dispostas na Figura 61. Nessa fração granulométrica, uma menor quantidade de partículas mistas (contendo minerais portadores de Fe_2O_3) foi observada pela microscopia eletrônica de varredura, corroborando para a afirmação de maior grau de liberação mineral.

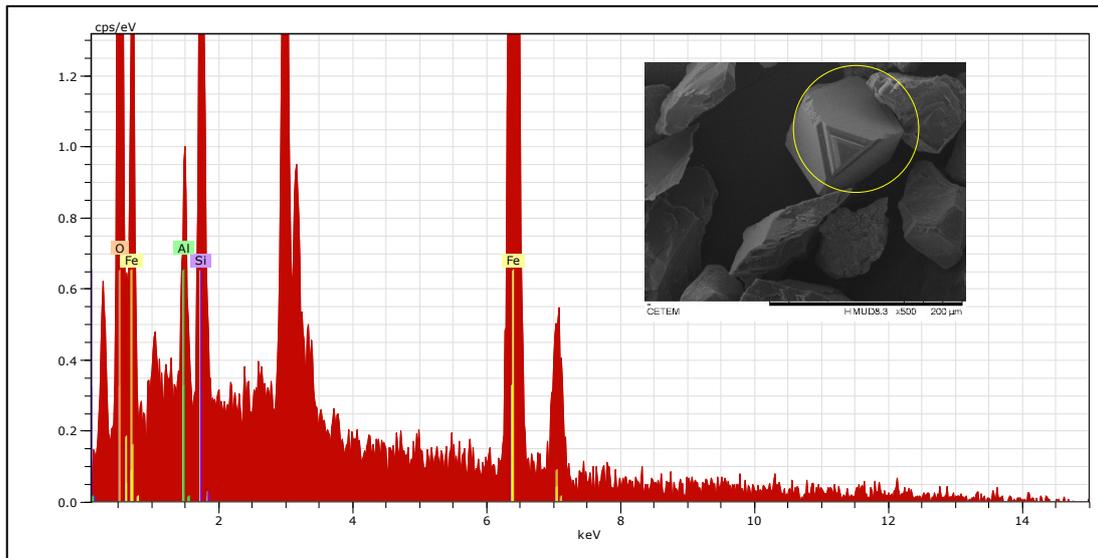
Figura 61 - Imagens de MEV da fração F7 (-0,3+0,15mm). (a) e (d) evidenciam maiores quantidades de partículas minerais indicando a liberação física das partículas. (b) e (c) destacam um cristal de magnetita fisicamente liberado.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Para confirmar a indicação da magnetita fisicamente liberada, a Figura 62 apresenta o resultado do EDS, comprovando a composição química desse mineral.

Figura 62 - Espectro do EDS para região definida na Figura 61(b).

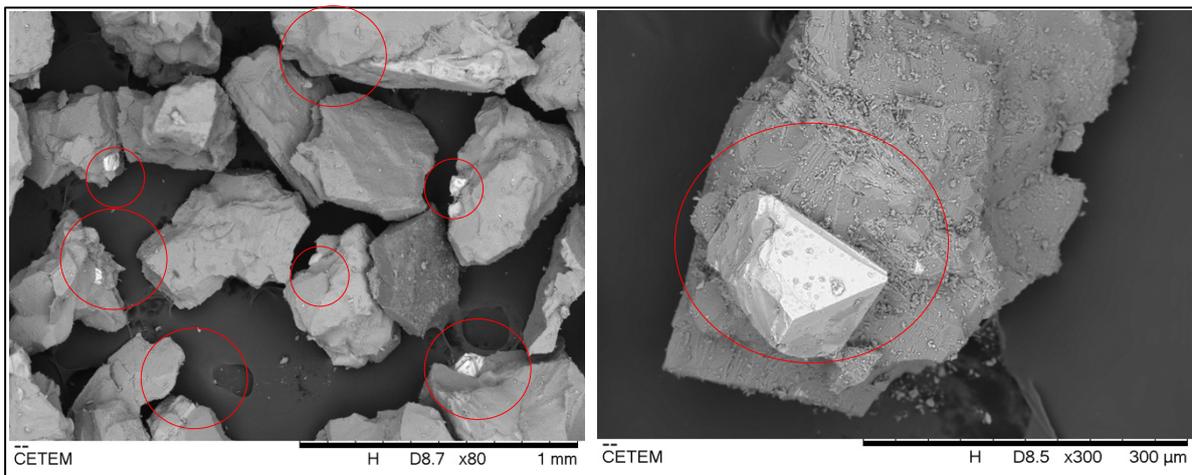


Fonte: Autoria própria, 2022.

4.4.2 Amostras: Frações magnéticas e não magnéticas

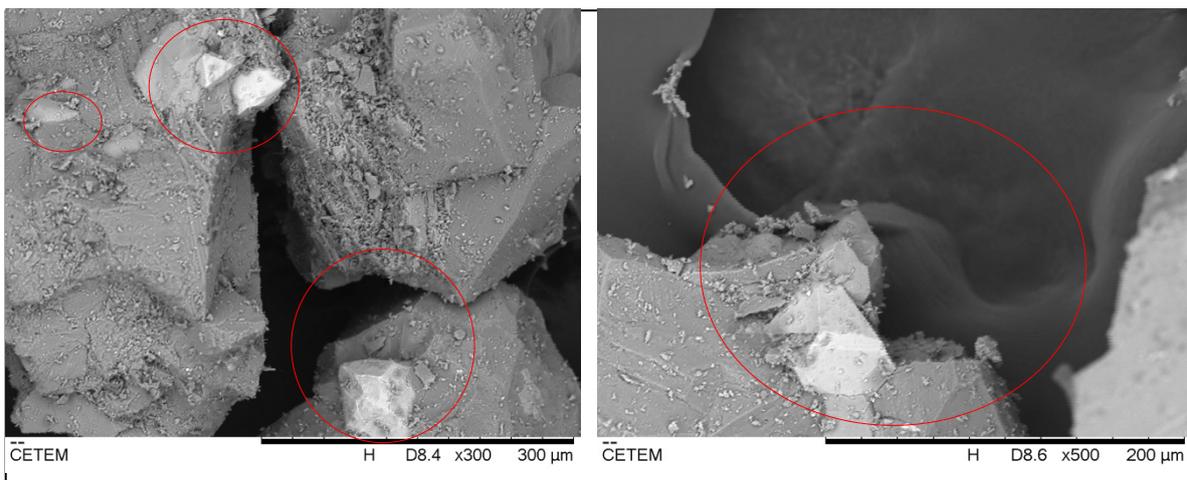
A seguir estão representadas as imagens obtidas no microscópio eletrônica de varredura para as frações magnéticas (MAG.1, MAG.2, MAG.3 e MAG.4) e para as frações não magnéticas (N.MAG1, N.MAG2, N.MAG3 e N.MAG4) obtidas na separação magnética a seco. A Figura 63 a 66 apresentam as imagens obtidas para a fração magnéticas, destacando a alta concentração de minerais portadores de ferro, além de partículas não magnéticas eventualmente atraídas pelo campo magnético aplicado na separação mineral.

Figura 63 - Imagens de MEV da fração MAG.1. (a) partículas magnéticas. (b) partícula de magnetita parcialmente liberada.



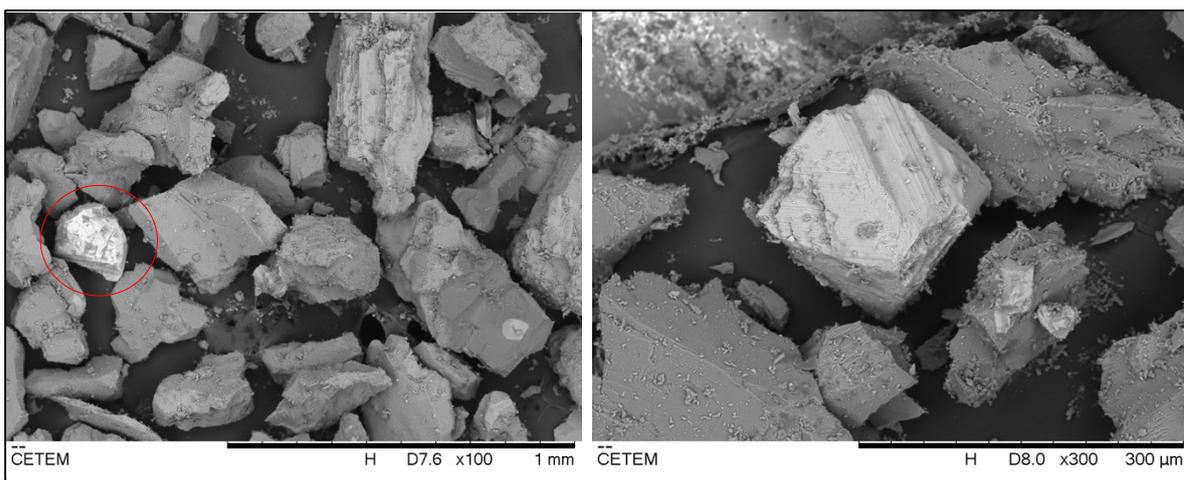
Fonte: Autoria própria, 2022.

Figura 64 - Imagens de MEV da fração MAG.2. (a) partículas magnéticas. (b) partícula de magnetita parcialmente liberada.



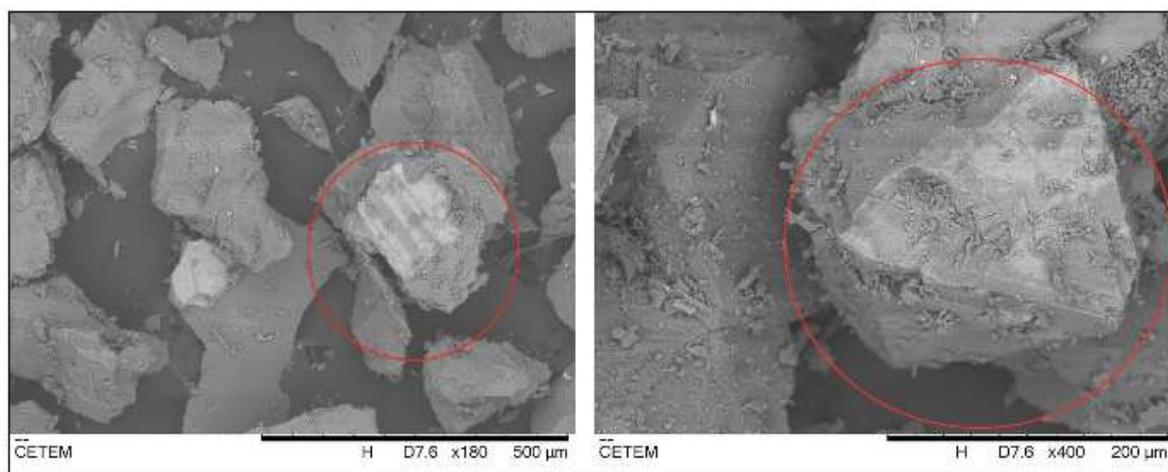
Fonte: Autoria própria, 2022.

Figura 65 - Imagens de MEV da fração MAG.3. (a) partículas magnéticas liberadas. (b) partícula de magnetita totalmente liberada.



Fonte: Autoria própria, 2022.

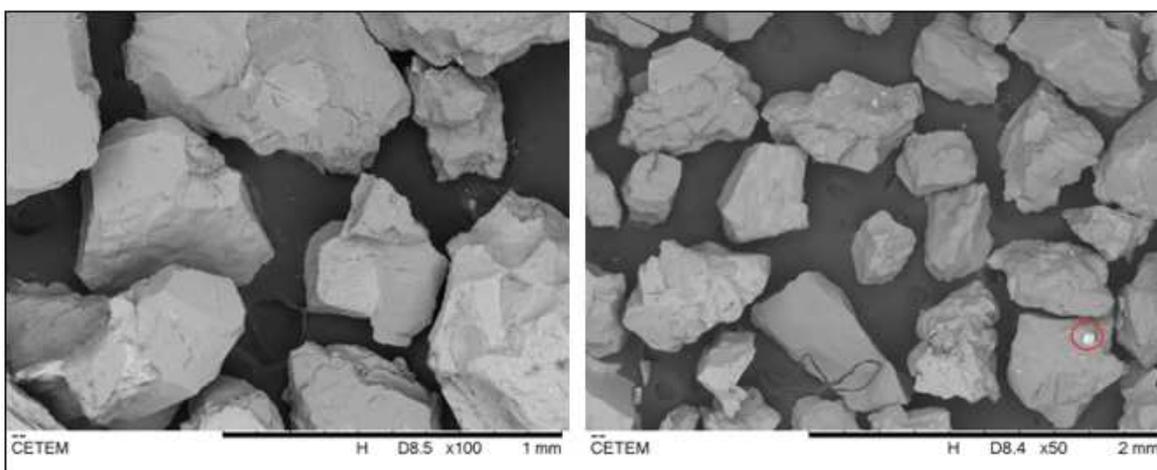
Figura 66 - Imagens de MEV da fração MAG.4. (a) partículas magnéticas liberadas e parcialmente liberadas. (b) partícula de magnetita libera



Comparando as Figuras 67 a 70 pode-se destacar a maior predominância de partículas magnéticas nas frações MAG.3 e MAG.4, que aparecem com maior liberação em relação as partículas magnéticas destacadas nas frações MAG.1 e MAG.2. Esta maior concentração de partículas magnéticas (Figura 68 e 69) foram comprovadas pela maior concentração de Fe_2O_3 nessas amostras, conforme resultadas da análise química apresentados na Tabela 12, bem como, com os difratogramas da Figura 54.

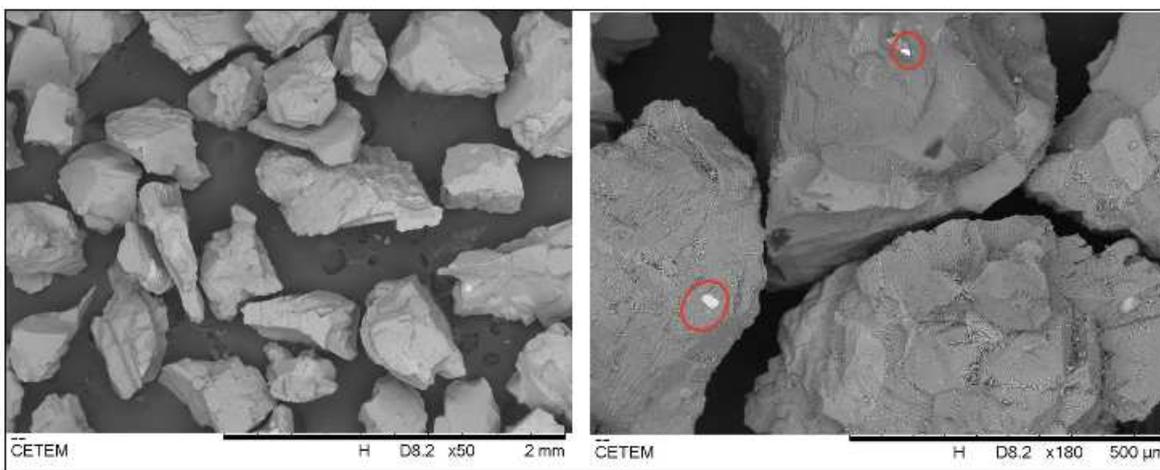
A baixa concentração de minerais portadores de ferro nas frações não magnéticas pode ser constatada pelas imagens de MEV dispostas nas Figuras 70 a 73, para as amostras N.MAG1, N.MAG2, N.MAG3 e N.MAG4, respectivamente.

Figura 67 - Imagens de MEV da fração N.MAG1. (a) conjunto de partículas não magnéticas. (b) partícula não magnéticas, destaque (em vermelho) para partícula contendo grão de magnetita.



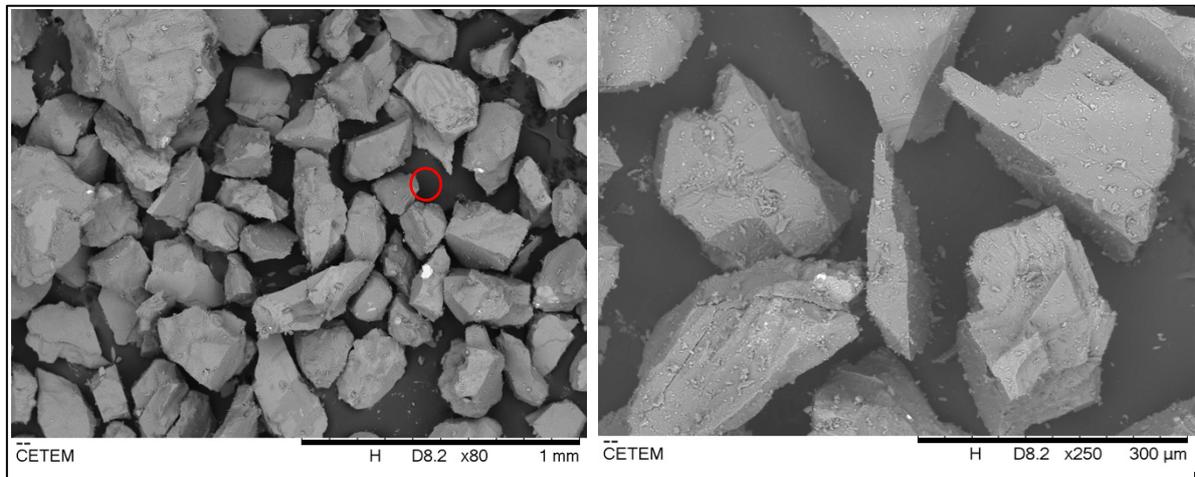
Fonte: Autoria própria, 2022.

Figura 68 - Imagens de MEV da fração N.MAG2. (a) conjunto de partículas não magnéticas. (b) partícula não magnéticas, destaque (em vermelho) para partículas não magnéticas contendo grãos de magnetita de baixa granulometria.



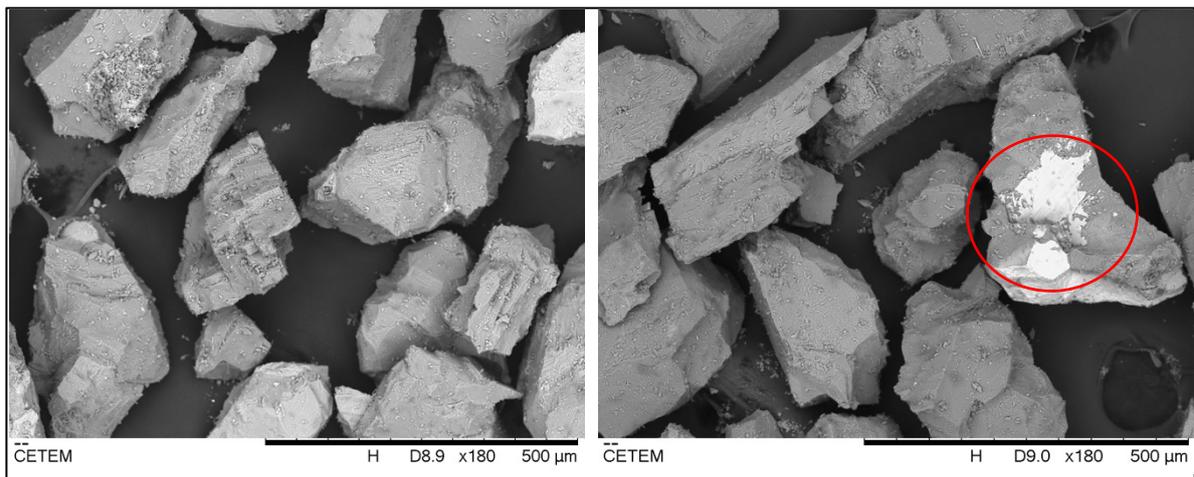
Fonte: Autoria própria, 2022.

Figura 69 - Imagens de MEV da fração N.MAG3. (a) conjunto de partículas não magnéticas com destaque (em vermelho) para partícula mista contendo grão de magnetita. (b) partícula não magnéticas.



Fonte: Aatoria própria, 2022.

Figura 70 - Imagens de MEV da fração N.MAG4. (a) conjunto de partículas não magnéticas. (b) partícula não magnéticas e destaque (em vermelho) para partícula contendo Fe_2O_3 .

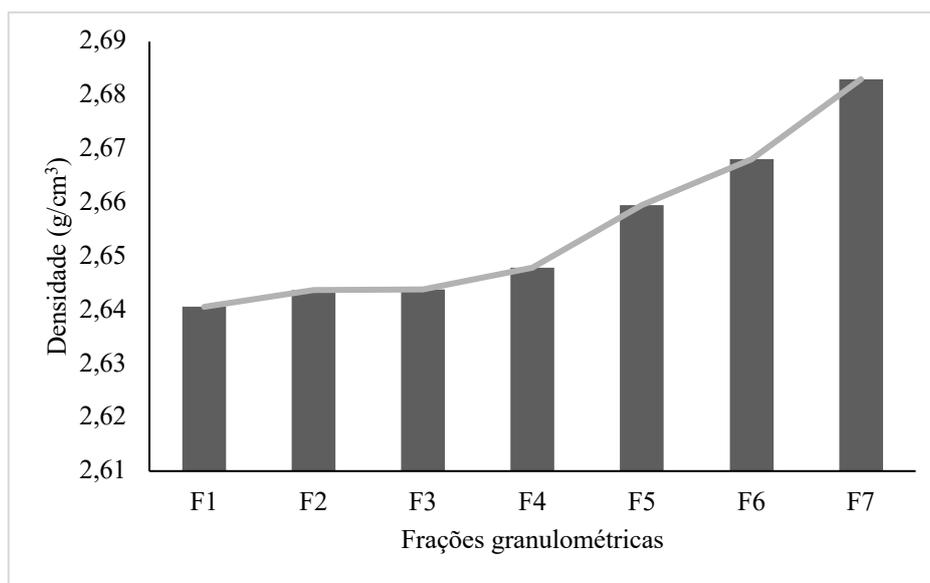


Fonte: Aatoria própria, 2022.

4.5 DENSIDADE ABSOLUTA

Considerando a similaridade na composição mineralógica e química das frações granulométricas, os resultados de densidade corroboram com os dados de DRX, FRX e MEV, havendo uma aproximação com as densidades dos minerais essenciais (albita, 2,62 g/cm³, ortoclásio, 2,61 g/cm³ e quartzo, 2,65 g/cm³), conforme Figura 71.

Figura 71 - Densidades das frações granulométricas.

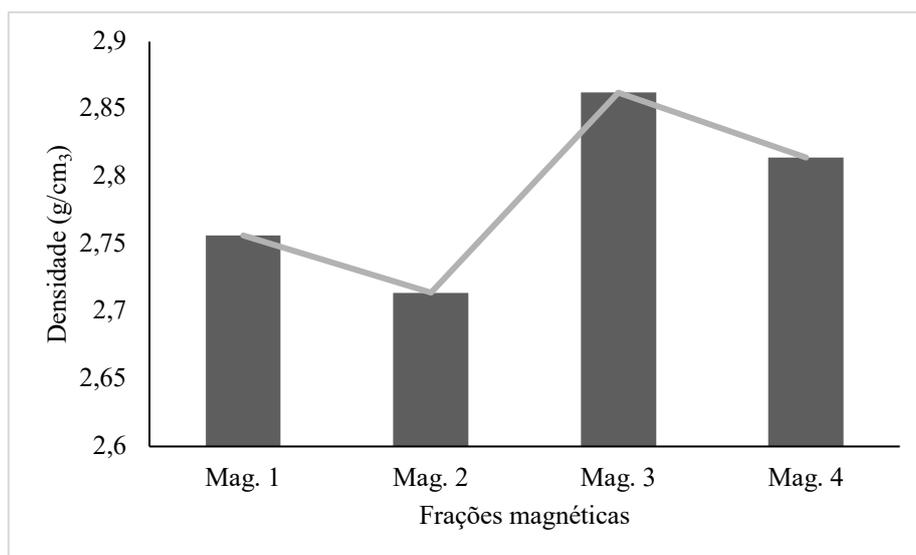


Fonte: Autoria própria, 2022.

Observa-se que as frações F6 e F7 apresentam as densidades mais elevadas, atingindo 2,6681 g/cm³ e 2,6820 g/cm³, respectivamente. Estes desvios crescentes nas densidades nessas frações são justificados pela maior concentração de Fe₂O₃, conforme Tabela 11, em relação aos demais intervalos granulométricos.

Considerando a densidade dos minerais portadores de ferro nas amostras, principalmente magnetita (densidade 5,17 g/cm³) e em menor proporção hornblenda (densidade 3,45 g/cm³), as densidades das frações magnéticas, Figura 72, indicam uma leve variação associada ao teor variado dos minerais portadores de ferro, sendo a densidade mais elevada verificada em MAG.3, correspondente a 2,8622 g/cm³, amostra magnética com maior teor de Fe₂O₃ (6,069%).

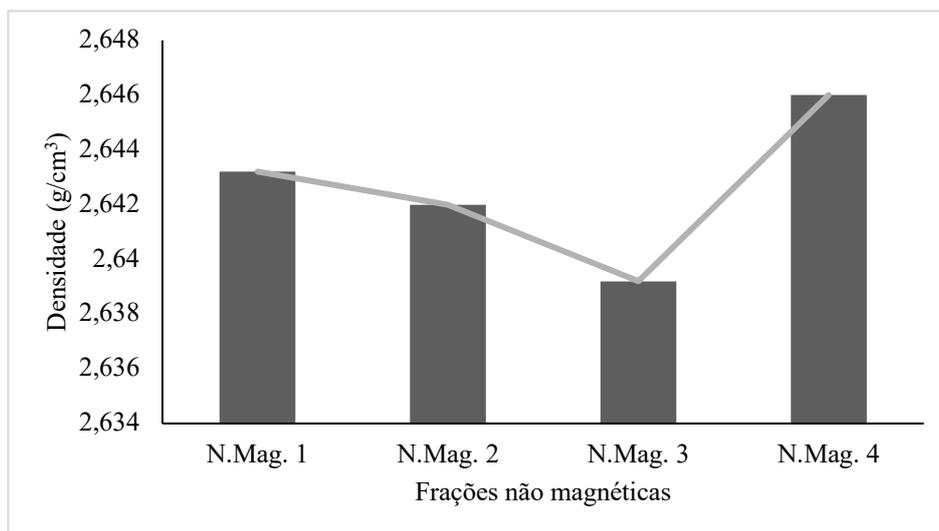
Figura 72 - Densidades das frações magnéticas.



Fonte: Autoria própria, 2022.

As densidades das frações não magnéticas, Figura 73, mostram que a fração N.MAG3 apresenta uma densidade inferior em relação às demais frações não magnéticas. Este menor valor da densidade é justificado pela constatação dessa amostra conter a menor concentração de Fe₂O₃ (0,147%).

Figura 73 - Densidades das frações não magnéticas.



Fonte: Autoria própria, 2022.

4.6 BALANÇO DE MASSA

A eficiência da separação magnética para redução do teor de Fe_2O_3 foi mensurada por balanço de massa, calculando as recuperações de massa e metalúrgicas das frações obtidas. A Tabela 15 apresenta os dados de balanço de massa para os 04 (quatro ensaios) de separação magnética.

Tabela 14 - Balanço de massa e metalúrgico para Fe_2O_3 (% em peso).

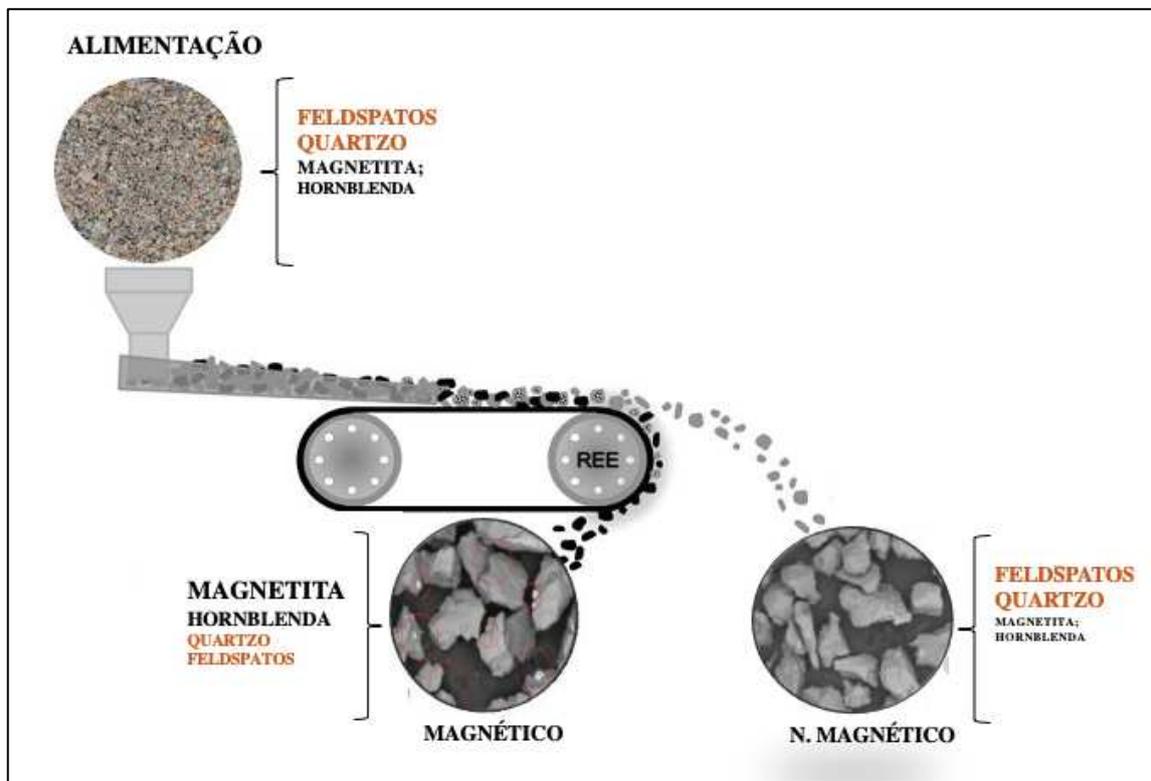
Balanço de Massa e Metálico					
S.M.1	Granulometria	Massa (g)	Fe_2O_3 (%)	Recuperação Mássica	Recuperação metálica (Fe_2O_3) %
ALIMENTAÇÃO		400	1,631		
MAG.1	-0,6+0,3mm	83,31	2,835	20,83	36,20
N.MAG1		316,69	0,305	79,17	
S.M.2	Granulometria	Massa (g)	Fe_2O_3 (%)	Recuperação Mássica (%)	Recuperação metálica (Fe_2O_3) %
ALIMENTAÇÃO		400	1,631		
MAG.2	c	82,02	2,474	20,51	31,10
N.MAG2		316,98	0,287	79,25	
S.M.3	Granulometria	Massa (g)	Fe_2O_3 (%)	Recuperação Mássica	Recuperação metálica (Fe_2O_3) %
ALIMENTAÇÃO		400	1,924		
MAG.3	0,30+0,15mm	97,4	6,069	24,35	76,81
N.MAG3		302,6	0,147	75,65	
S.M.3	Granulometria	Massa (g)	Fe_2O_3 (%)	Recuperação Mássica	Recuperação metálica (Fe_2O_3) %
ALIMENTAÇÃO		400	1,924		
MAG.4	0,30+0,15mm	102,34	4,923	25,58	65,46
N.MAG4		297,66	0,285	74,41	-

Fonte: Autoria própria, 2022.

Os resultados acima apresentados demonstram recuperações mássicas que variam de 20,51% a 25,59% para as frações magnéticas, indicando uma oportunidade para melhoria da seletividade nos ensaios de separação magnética. As Figuras 66 a 69 confirmam a expressiva quantidade de partículas não magnéticas compondo a fração magnética, estando essa

constatação associada ao arraste de eventuais partículas mistas e/ou paramagnéticas durante a exposição ao campo magnético. A Figura 74 esquematiza a eficiência dos ensaios de separação magnética para as espécies minerais da amostra.

Figura 74 - Esquema de representação da eficiência da separação magnética.



Fonte: Autoria própria, 2022.

A recuperação metálica do elemento Fe nos ensaios S.M3 e S.M4 foram significativamente superiores (76,81% e 65,46%, nessa ordem) as recuperações metálicas dos ensaios S.M1 e S.M2 (36,20% e 31,10% respectivamente), em razão da maior liberação física dos minerais portadores de ferro na fração granulometria -0,30+0,15mm em comparação ao intervalo granulométrico -0,6+0,3mm.

As recuperações metálicas podem ser consideradas significativas considerando a redução do conteúdo de Fe_2O_3 , 1,924% na alimentação de S.M3 e S.M4, para 0,147% e 0,285, respectivamente. Estes resultados são mais expressivos que os destacados por Miceli *et al.*, (2017), visto que a liberação mineral na alimentação no referido trabalho era limitada, reduzindo a eficiência da separação magnética.

Comparando a melhor eficiência da S.M3 em relação a S.M4, as quais foram alimentadas com o mesmo intervalo granulométrico e aplicado o mesmo campo magnético, pode-se justificar a maior recuperação metalúrgica (76,81%) em razão do maior tempo de exposição ao campo magnético, considerando a menor velocidade dos rolos do separador magnético no ensaio S.M3.

Capítulo V
CONCLUSÕES

5. CONCLUSÕES

As técnicas empregadas na caracterização química e mineral permitiram a interpretação satisfatória dos resultados quanto à composição mineralógica e definição do espectro liberação mineral, essenciais para a tomada de decisões visando as operações unitárias de beneficiamento mineral, incluindo cominuição a fim de atender as granulometrias definidas em função do espectro de liberação, e concentração mineral por separação magnética a seco de alta eficiência.

Os difratogramas de raios X indicaram que a rocha estudada apresenta altas concentrações de feldspatos (albita, ortoclásio e microclínio), quartzo e um conteúdo relevante de magnetita e hornblenda, sendo estes últimos os principais minerais portadores de Fe_2O_3 , e a serem removidos por separação magnética (a seco) para redução do teor desse óxido até o limite tolerável de 0,15% para aplicação na indústria de porcelanatos.

O teor médio de Fe_2O_3 na rocha é 1,25%, sendo as maiores concentrações presentes nas frações granulométricas de $-0,6+0,3\text{mm}$ e $-0,3+0,15\text{mm}$, com percentuais de 1,621% e 1,924%, respectivamente. A maior predominância, e considerando a classificação como mineral ferromagnético, a magnetita representa o mineral que norteia a indicação da separação magnética de baixa intensidade como operação de purificação da rocha rica em feldspatos

As imagens da microscopia eletrônica de varredura demonstraram uma maior liberação física das fases minerais magnéticas abaixo de $0,3\text{mm}$, devendo as operações de fragmentação serem projetadas visando estes parâmetros granulométrico para eficiência nas operações de concentração mineral. Os equipamentos de britagem e moagem que integram a usina de processamento mineral da Elizabeth Mineração são adequados para fornecimento de um padrão granulométrico de acordo a liberação mineral de $-0,3+0,15\text{mm}$.

Os ensaios de separação magnética a seco promoveram recuperações mássicas e metalúrgicas variadas em função da granulometria de alimentação e da velocidade de operação dos rolos do separador.

Os resultados mais expressivos foram obtidos nas amostras submetidas a separação magnética a seco, cujo intervalo granulométrico utilizado foi $-0,3+0,15\text{mm}$ e baixa velocidade de operação dos rolos, gerando uma fração não magnética contendo 0,147% de Fe_2O_3 (redução de 76,81% do ferro em relação a alimentação), estando este índice dentro dos padrões químicos exigidos para aplicação na composição de porcelanatos.

As demais condições operacionais dos ensaios magnéticos produziram frações não magnéticas com teores de Fe_2O_3 oscilando entre 0,285% e 0,3%, levemente superiores aos limites da indústria de porcelanato, contudo, adequados a produção de cerâmicas ou vidros menos nobres.

REFERÊNCIAS

6. REFERÊNCIAS

ANM - **Sumário Mineral Brasileiro 2017**. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumariomineral_2017. Acesso em: 02 de julho de 2022

ANTICOI, H. *et al.* **Breakage Function for HPGR: mineral and mechanical characterization of tantalum and tungsten ores**. Minerals, [S.L.], v. 8, n. 4, p. 170, 20 abr. 2018. MDPI AG.

ANTUNES, R. J. F. **Mapeamento Geológico e caracterização petrografia na região de Serra das Flechas, município de Pedra Lavrada/PB**. 2019. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/34370>. Acesso em: 20 maio 2022.

ASSIS, H. F. S. *et al.* **Avaliação dos impactos ambientais provocados pela atividade mineradora no município de Pedra Lavrada/PB**. Revista Âmbito Jurídico, N 90- Ano XIV, 2011, p. 1-16.

BARBATO, C. N.; SAMPAIO, J. A. **Determinação experimental do Índice de Trabalho (WI)**. In: SAMPAIO, João Alves *et al.* Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. Cap. 10. p. 179-189.

BARROS, P. S. **Mapeamento geológico e síntese do potencial mineral de uma área ao sul do município de Pedra Lavrada-PB**. 2019. f. 9 TCC (Curso Técnico) – Geologia, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Campis Picuí.

BERTOLINO, L. C. *et al.* **Caracterização Mineralógica de Minérios**. In: LUZ, Adão Benvindo da; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida. Tratamento de Minérios. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2018. Cap. 3. p. 69-101.

CANCELLIER, E. L. **Desenvolvimento de massa para grés porcelanato**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2001.

CHIRITA, M. *et al.* **Superparamagnetic Unusual Behavior of Micrometric Magnetite Monodisperse Monocrystals Synthesized by Fe-EDTA Thermal Decomposition**. Particulate Science And Technology, [S.L.], v. 30, n. 4, p. 354-363, jul. 2012. Informa UK Limited.

COELHO, J. M. **Perfil do Feldspato**. Ministério de Minas e Energia – Recife, PE, 2009.

DEDAVID, B. A. *et al.* **Microscopia Eletrônica de Varredura: aplicações e preparação de amostras**. Porto Alegre: Edipucrs, 2007. 58 p. Disponível em: <https://editora.pucrs.br/edipucrs/acessolivre/livros/microscopia.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2022.

DEER, W.A., HOWIE; R.A., ZUSSMAN, Y. (1966) - **Minerais constituintes das rochas: Uma introdução**. Editora Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal, 1ª Edição, 358 pp.

GAIED, M. *et al.* **Beneficiation of feldspar ore for application in the ceramic industry: influence of composition on the physical characteristics**. *Arabian Journal Of Chemistry*, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 186-190, mar. 2015. Elsevier BV.

GÓIS, M. A. C. de *et al.* **Amostragem**. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Sílvia Cristina Alvas. *Tratamento de Minérios*. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2010. Cap. 2. p. 23-53.

GUMUSTAS, M. *et al.* **Effect of Polymer-Based Nanoparticles on the Assay of Antimicrobial Drug Delivery Systems**. *Multifunctional Systems For Combined Delivery, Biosensing And Diagnostics*, [S.L.], p. 67-108, 2017. Elsevier.

JONES, I. P. *et al.* **Electron microscopy for Engineers**. *Iop Conference Series: Materials Science and Engineering*, [S.L.], v. 4, p. 012001, 1 ago. 2019. IOP Publishing.

KAUFFMAN, R. A., VAN DYK, D. **Feldspars**. In: *Industrial Mineral and Rocks*, Donald D. Carr, Senior Editor, 6th Edition, SMME, Littleton, Colorado, 1994, p. 473-481.

KLUG, H.P., ALEXANDER, L.E. **X-ray diffraction procedures**. 2nd ed. New York: John Wiley, 1974. 966p.

KUZMICKAS, L. *et al.* **Influence of diopside: feldspar ratio in ceramic reactions assessed by quantitative phase analysis (X-ray diffraction - Rietveld method)**. *Cerâmica*, v. 59, n. 350, 2013 Tradução. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0366-69132013000200022>. Acesso em: 17 nov. 2022.

LUZ, A. B., LINS, F. A. F., COELHO, J. M.. Cap. 21, **Feldspato. Rochas & Minerais Industriais**. Ed. Adão Benvindo da Luz e Fernando Antonio Lins. 2 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 990 p., 2008.

LUZ, A. B. da *et al.* **Britagem e Moagem**. In: LUZ, Adão Benvindo da *et al.* *Tratamento de Minérios*. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2018. Cap. 42. p. 135-182.

MALISKA, A. M. *et al.* **Microscopia Eletrônica de Varredura**. Santa Catarina: Lcm, . 95 p. Disponível em: http://www.usp.br/nanobiodev/wp-content/uploads/MEV_Apostila.pdf. Acesso em: 11 maio 2022.

MEDEIROS, M. R. M. de; LISBOA, V. A. C. **Relatório de Estágio Supervisionado-Elizabeth Mineração**. Instituto Federal da Paraíba, Campus Picuí -, 2022.

MICELI, H. *et al.* **Contaminant removal from manufactured fine aggregates by dry rare-earth magnetic separation**. *Minerals Engineering*, [S.L.], v. 113, p. 15-22, nov. 2017. Elsevier BV.

MITCHELL, C.J. *et al.* 2008. **Quarry fines minimisation: can we really have 10mm aggregate with no fines?** Pp. 37-44 in Walton, G. (Ed.) Proceedings of the 14th Extractive Industry Geology Conference, EIG Conferences, 109p.

MOURA, O. J. M. 1981. **Programa Pegmatitos**. Metamig, Belo Horizonte, 95p.

NIU, Y. *et al.* **Mechanism of the Breakage of Spherical Gypsum Particles under 3-Point Contact Conditions**. Processes, [S.L.], v. 9, n. 6, p. 1029, 11 jun. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/pr9061029>.

NUEMANN, R. *et al.* Caracterização Tecnológica de Minérios: parte ii. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Sílvia Cristina A. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2010. Cap. 3. p. 85-137.

NURIT, T. G. **Recrystallization Processes Involving Iron Oxides in Natural Environments and in Vitro, INTECH Recent Developments in the Study of Recrystallization**. In: Wilson P, editor. 2013. pp. 163-174. ISBN: 978-953-51-0962-4.

NURIT, T. G. *et al.* **Minerals Observed by Scanning Electron Microscopy (SEM), Transmission Electron Microscopy (TEM) and High-Resolution Transmission Electron Microscopy (HRTEM)**. Electron Microscopy, [S.L.], v. -, n. -, p. 35-44, 17 ago. 2022. IntechOpen.

OLIVEIRA, M. L. M. de *et al.* **Amostragem**. In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. Alves; BRAGA, P. F. A. Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. Cap. 1. p. 3-33.

ROWLAND Jr., C. A. **Testing for the selection of comminution circuits to prepare concentration feed**. Mill Operator's Conference. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1982.

SAISINCHAI, S. *et al.* **Upgrading Feldspar by WHIMS and Flotation Techniques**. Engineering Journal, [S.L.], v. 19, n. 4, p. 83-92, 31 jul. 2015. Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. <http://dx.doi.org/10.4186/ej.2015.19.4.83>.

SAMPAIO, J. A. *et al.* **Cominuição: princípios da cominuição**. In: LUZ, A. B. da *et al.* Tratamento de Minérios. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2018. Cap. 4. p. 107-131.

SAMPAIO, J. A. *et al.* **Ensaios de Separação Magnética e Eletrostática**. In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F.A. Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. Cap. 18. p. 321-348.

SILVA E. F. A. DA., CUNHA J. C., MARINHO M. M. 1996. **Pegmatitos da região de Itambé, Bahia: geologia e potencialidade econômica**. (Série Arquivos Abertos; 10). Salvador: CBPM. 30p.

SILVA, A. C. *et al.* **Feldspar production from dimension stone tailings for application in the ceramic industry**. Journal Of Materials Research And Technology, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 1-7, jan. 2019. Elsevier BV.

STAN, C. *et al.* **X-Ray Diffraction under Extreme Conditions at the Advanced Light Source.** Quantum Beam Science, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 4, 23 jan. 2018. MDPI AG.

WILLS, B.A., FINCH, J.A. **Magnetic and electrical separation. In: Wills' Mineral processing technology - An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery.** 8th Edition, Elsevier, 498p. p. 381-408, 2016.

YOUCAI, Z., SHENG, H. **Recycling Technologies and Pollution Potential for Contaminated Construction and Demolition Waste in Recycling Processes.** Pollution Control And Resource Recovery, [S.L.], p. 195-331, 2017. Elsevier.

ZANON B. JR. *et al.* **Matérias primas fundentes para a indústria cerâmica.** 2002. Tese de Doutorado. DEMA/UFSCAR, 2002.