



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto - Minas Gerais - Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

EM ENGENHARIA METALÚRGICA

**“Caracterização de rejeito arenoso por Análise Mineralógica
Automatizada: Sistema TIMA”**

Fabiano Strutz Pinto

Ouro Preto, abril de 2021.

Fabiano Strutz Pinto

**“Caracterização de rejeito arenoso por Análise Mineralógica Automatizada: Sistema
TIMA”**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico.

Orientadora: Prde^a. Dr^a. Maria Aparecida Pinto

Ouro Preto, abril de 2021.

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P659c Pinto, Fabiano Strutz .

Caracterização de rejeito arenoso por análise mineralógica automatizada [manuscrito]: sistema TIMA. / Fabiano Strutz Pinto. - 2021. 74 f.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Aparecida Pinto.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Rejeitos (Metalurgia) - Rejeito Arenoso. 2. Minas e recursos minerais - Análise metalúrgica. 3. Análise Mineralógica por computador. I. Pinto, Maria Aparecida. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 669.01

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais



ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

Aos 26 dias do mês de abril de 2021, às 15h, por meio de videoconferência via plataforma *Google Meet*, foi realizada a defesa de monografia de graduação em Engenharia Metalúrgica pelo aluno **Fabiano Strutz Pinto**, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores do DEMET/EM/UFOP: Maria Aparecida Pinto (Presidente), Gilberto Henrique Tavares Alvares da Silva (membro) e Cláudio Batista Vieira (membro). O aluno apresentou a monografia intitulada “**Caracterização de rejeito arenoso via Análise Mineralógica Automatizada - Sistema TIMA**”. A comissão deliberou, por unanimidade, pela aprovação da monografia, concedendo ao aluno um prazo de 15 dias para incorporar, ao texto final, as alterações sugeridas. Na forma regulamentar, lavrou-se a presente ata que vai devidamente assinada pelos membros da comissão e pelo aluno.

Ouro Preto, 26 de abril de 2021.


Prof.^a Maria Aparecida Pinto
Orientadora – Presidente


Prof. Gilberto Henrique Tavares Alvares da Silva
Membro


Prof. Cláudio Batista Vieira
Membro


Fabiano Strutz Pinto
Aluno

Dedico a toda a minha família e amigos, em especial meus pais, Edna e Mauro, e ao meu irmão Filipe por todo carinho, apoio e dedicação.

RESUMO

Os acidentes envolvendo os rejeitos provenientes dos processos de beneficiamento do minério de ferro evidenciaram ainda mais a necessidade da busca de alternativas de utilização desse passivo ambiental. Com uma produção de rejeitos superior a 270 milhões de toneladas por ano no Brasil, estudos estão sendo realizados para a reutilização dessa porção rejeitada do processo. A reutilização do rejeito está intimamente relacionada à caracterização do material, uma vez que o conhecimento a respeito deste facilita a busca por soluções. A análise elementar por meio do sistema TIMA é uma ferramenta que permite identificar, medir e classificar partículas minerais por composição, tamanho e textura, logo, definir a mineralogia em aplicações de diversas áreas. No presente estudo, o rejeito arenoso, proveniente do beneficiamento de minério de ferro, foi classificado em quatro faixas granulométricas: rejeito arenoso natural (AN), rejeito retido na peneira de 100# (A100), rejeito retido na peneira de 200# (A200) e o rejeito retido na peneira de 400# (A400). Para cada faixa granulométrica confeccionou-se pastilhas que foram analisadas ao Microscópio Eletrônico de Varredura com o sistema TIMA. O resultado das análises mostrou que o material apresentou uma composição básica formada por Quartzo, Goethita e Hematita/Magnetita em diferentes proporções e graus de liberação. A amostra A400 apresentou um elevado teor dos minerais provedores de Ferro, cerca de 70% da composição total, e um grau de liberação elevado do Quartzo de 85%, mostrando ser, assim, uma faixa granulométrica com um potencial de recuperação metálica. As amostras AN, A100 e A200 apresentaram uma mineralogia rica em Quartzo, sendo uma possível fonte de Silício.

Palavras chave: Rejeito Arenoso, Análise Mineralógica, Análise Mineralógica Automatizada.

ABSTRACT

Accidents involving tailings from iron ore beneficiation processes further demonstrated the need to search for alternatives to use this environmental liability. With a tailings production of more than 270 million tons per year in Brazil, studies are being carried out to reuse this rejected portion of the process. The reuse of the waste is closely related to the characterization of the material, since knowledge about it facilitates the search for solutions. Elementary analysis using the TIMA system is a tool that allows identifying, measuring and classifying mineral particles by composition, size and texture, thus defining the mineralogy in applications in different areas. In the present study, the sandy tailings, from the processing of iron ore, were classified into four granulometric ranges: natural sandy tailings (AN), tailings retained in the 100# sieve (A100), tailings retained in the 200# sieve (A200) and the tailings retained in the 400# (A400) sieve. Tablets were made for each size range, which were analyzed using the Scanning Electron Microscope with the TIMA system. The results of the analyzes showed that the material had a basic composition formed by Quartz, Goethite and Hematite/Magnetite in different proportions and degrees of release. The A400 sample had a high content of iron-providing minerals, about 70% of the total composition, and a high release degree of Quartz, close to 85%, thus showing it to be a particle size with a potential for metallic recovery. Samples AN, A100 and A200 presented a mineralogy rich in Quartz, being a possible source of Silicon.

Key words: Sandy Tailings, Mineralogical Analysis, Automated Mineralogical Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Mapa da região que abrange o QFe	18
Figura 3.2 - Fluxograma básico das etapas de processamento mineral.....	22
Figura 3.3 - Métodos de disposição de rejeitos em barragens.....	27
Figura 3.4 - Representação da delimitação de fronteiras das fases minerais por MEQ.	31
Figura 3.5 - Identificação das fases por coincidência dos espectros de elementos.	31
Figura 3.6 - Representação esquemática do funcionamento de um MEV sistema TIMA. .	32
Figura 3.7 - Identificação das fases pelo <i>sdetware</i> TIMA.....	33
Figura 3.8 - Estrutura e guias de navegação do <i>sdetware</i> TIMA.	34
Figura 4.1 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) que possui o sistema TIMA no NanoLab da REDEMAT/DEMET-EM-UFOP.	40
Figura 4.2 - Pastilhas recobertas por carbono e identificadas como A400, A200, A100 e NA, respectivamente.	41
Figura 4.3 - Critérios para cálculo de liberação de partículas.	43
Figura 4.4 - Exemplificação de partículas contendo diferentes fases minerais.....	44
Figura 5.1 - (a) Fotografia gerada no MEV da pastilha AN (b) delimitação da região central analisada.	50
Figura 5.2 - Visualização da região analisada (Figura 5.1a) de acordo com a caracterização mineralógica da pastilha AN.	52
Figura 5.3 - Região central ampliada da área analisada (Figura 5.1b) de acordo com a caracterização mineralógica da pastilha AN.	52
Figura 5.4 - (a) Fotografia gerada no MEV da pastilha A100 (b) delimitação da região central analisada.	54
Figura 5.5 - Visualização da região analisada (Figura 5.4a) de acordo com a caracterização mineralógica da pastilha A100.	55
Figura 5.6 - Região central ampliada da área analisada (Figura 5.4b) de acordo com a caracterização mineralógica da pastilha A100.	56
Figura 5.7 - (a) Fotografia gerada no MEV da pastilha A200 (b) delimitação da região central analisada.	57
Figura 5.8 - Visualização da região analisada (Figura 5.7a) de acordo com a caracterização mineralógica da pastilha A200.	59
Figura 5.9 - Região central ampliada da área analisada (Figura 5.7b) de acordo com a caracterização mineralógica da pastilha A200.	59

Figura 5.10 - (a) Fotografia gerada no MEV da pastilha A400 (b) delimitação da região central analisada.	60
Figura 5.11 - Visualização da região analisada (Figura 5.10a) de acordo com a caracterização mineralógica da pastilha A400.	63
Figura 5.12 - Região central ampliada da área analisada (Figura 5.10b) de acordo com a caracterização mineralógica da pastilha A400.	63
Figura 5.13 - Figura enfatizando os aglomerados e poros formados na pastilha A400.	64
Figura 5.14 - Análise mineralógica combinada das amostras.	66
Figura 5.15 - Distribuição do tamanho das partículas nas amostras AN, A100, A200 e A400.	67
Figura 5.16 - Espectro de liberação da Hematita/Magnetita.	68
Figura 5.17 - Espectro de liberação da Goethita.	68
Figura 5.18 - Espectro de liberação do Quartzo.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Relação entre os produtos obtidos das etapas de processamento mineral.....	16
Tabela 3.2 - Relação produtiva de minério de ferro no ano de 2017	17
Tabela 3.3 - Relação de reagentes e a sua finalidade	25
Tabela 3.4 - Modos de aquisição de dados do módulo <i>Data Aquisition</i>	35
Tabela 3.5 - Regras do esquema de classificação mineral.	36
Tabela 3.6 - Descrição dos relatórios emitidos no módulo <i>Data Management</i>	37
Tabela 4.1 - Associação entre novas fases minerais e os minerais conhecidos.	42
Tabela 4.2 - Análise de liberação das partículas Cp, Qz e Bg.....	45
Tabela 4.3 - Distribuição das amostras do trabalho de Ávila (2018).	46
Tabela 4.4 - Resultados das comparações entre as técnicas de caracterização mineral	46
Tabela 5.1 - Parâmetros e medidas obtidas na análise do material.	49
Tabela 5.2 - Fases minerais encontradas na pastilha AN.	51
Tabela 5.3 - Distribuição granulométrica da pastilha AN.	51
Tabela 5.4 - Grau de liberação dos minerais da pastilha AN.	53
Tabela 5.5 - Fases minerais encontradas na pastilha A100.	54
Tabela 5.6 - Distribuição granulométrica da pastilha A100.	55
Tabela 5.7 - Grau de liberação dos minerais da pastilha A100.	56
Tabela 5.8 - Fases minerais encontradas na pastilha A200.	57
Tabela 5.9 - Distribuição granulométrica da pastilha A200.	58
Tabela 5.10 - Grau de liberação dos minerais da pastilha A200.	60
Tabela 5.11 - Fases minerais encontradas na pastilha A400.	61
Tabela 5.12 - Distribuição granulométrica da pastilha A400.	62
Tabela 5.13 - Grau de liberação dos minerais da pastilha A400.	65

LISTA DE SIGLAS

#	Mesh
ANM	Agência Nacional de Mineração
AMA	Análise Mineralógica Automatizada
BIF	<i>Banded Iron Formations</i>
BSE	<i>Backscattering Electron</i>
DRX	Difratometria de Raios X
FDR	Fino para Redução Direta
FRX	Espectroscopia por Fluorescência de Raios X
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICOLD	<i>International Commission on Large Dams</i>
A.L.	Análise de Liberação
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
N.A.	Nível da Água
QFe	Quadrilátero Ferrífero
ROM	<i>Run of Mine</i>
TIMA	TESCAN <i>Integrated Mineral Analyser</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	14
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos Específicos	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1	Definições Básicas.....	15
3.2	Produção Mineral Atual.....	16
3.3	Quadrilátero Ferrífero.....	17
3.3.1	Itabirito	18
3.3.1.1	Hematita	18
3.3.1.2	Quartzo	19
3.3.1.3	Goethita	20
3.3.1.4	Magnetita.....	20
3.4	Processos de Beneficiamento Mineral.....	21
3.4.1	Cominuição.....	22
3.4.2	Classificação e peneiramento	23
3.4.3	Concentração	24
3.4.3.1	Flotação	24
3.5	Rejeitos	25
3.5.1	Métodos de disposição de rejeitos	26
3.5.1.1	Método de montante.....	27
3.5.1.2	Método de jusante	28
3.5.1.3	Método de linha de centro.....	28
3.5.2	Processamento a seco	28
3.5.3	Estudos de aproveitamento do rejeito arenoso	29
3.6	Análise Mineralógica.....	30

3.6.1	Análise mineralógica via <i>Sdetware</i> TIMA	32
3.6.1.1	<i>Data aquisition</i>	35
3.6.1.2	<i>Data management</i>	35
3.6.1.3	<i>Spectrum tools</i>	37
3.6.2	Aplicações da metodologia.....	38
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
4.1	Mineralogia.....	42
4.2	Granulometria.....	43
4.3	Liberção Mineral.....	43
4.4	Validação da Metodologia AMA - Sistema TIMA	45
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1	Rejeito Arenoso Natural (AN).....	50
5.2	Rejeito Arenoso Retido na Peneira de 100# (A100)	53
5.3	Rejeito Arenoso Retido na Peneira de 200# (A200)	57
5.4	Rejeito Arenoso Retido na Peneira de 400# (A400)	60
5.5	Observações Gerais	65
5.5.1	Análise mineralógica	65
5.5.2	Análise granulométrica.....	66
5.5.3	Análise de liberação.....	67
6	CONCLUSÕES.....	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

1 INTRODUÇÃO

A produção mineral se mostra essencial para o desenvolvimento humano uma vez que se torna necessária para a produção de materiais que, posteriormente, poderão ser utilizados para a melhoria da qualidade de vida e do conforto pessoal.

O minério de ferro é um recurso mineral finito, ou seja, possui um número limitado de reservas, e está fadado ao fim mesmo que sejam reservas de grande volume e quantidade. Atualmente, há a necessidade de lavra de corpos rochosos de menores teores em ferro na sua composição, devido à falta de jazidas mais ricas. Como consequência do processamento destas rochas mais empobrecidas, há o aumento do volume de material a ser rejeitado durante o processo para que se possa obter um produto mais concentrado em ferro.

Os recentes acidentes de 2015 e 2019, respectivamente em Mariana e Brumadinho, ambos em Minas Gerais - Brasil, envolvendo a ruptura de barragens contendo rejeito da produção de minério de ferro ressaltam a importância de se buscar novas formas de aproveitamento desse material a fim de minimizar seu impacto no meio ambiente e, possivelmente, torná-lo rentável por meio da transformação em novos produtos.

A transformação dos resíduos sólidos da mineração em novos produtos tem sido bastante explorada e estudada no Brasil e no mundo. Pesquisas que visam a sua utilização como areia nos processos de fundição metálica, na produção de concreto, tijolos e pavimentos na indústria da construção civil, até a sua utilização como pigmentos para tintas são exemplos de maneiras para diminuir o impacto causado pelas mineradoras (FIGUEIREDO, 2017; ASSIS *et al.*, 2018; SOUZA e GUEDES, 2017; SAMARCO, 2019).

Este trabalho tem como objetivo a caracterização detalhada via análise automatizada do rejeito mineral, produzido a partir da extração de minérios em rochas itabiríticas, de forma a colaborar para a melhoria dos processos de reutilização já existentes. A reutilização da porção rejeitada está intimamente relacionada à caracterização mineralógica, uma vez que o desenvolvimento de novas tecnologias de aproveitamento é facilitado com o conhecimento do material que está sendo utilizado.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo de caracterização mineralógica de amostras de rejeito arenoso.

2.2 Objetivos Específicos

Este trabalho é baseado nos seguintes objetivos específicos:

- Realizar a seleção de amostras e analisá-las conforme suas características químicas, físicas e mineralógicas;
- Caracterizar o rejeito arenoso na forma *in natura* e de suas frações beneficiadas.
- Caracterizar as amostras por meio da Análise Mineralógica Automatizada pelo sistema TIMA.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Definições Básicas

Segundo Luz *et al.* (2010), um *mineral* pode ser definido como um corpo natural sólido e cristalino, com composição definida resultantes dos processos físico-químicos, podendo ser encontrado na forma de agregados, as *rochas*, ou apenas na forma de um mineral. Se essas rochas possuem algum mineral valioso, elas são denominadas de *minério*. Outro conceito necessário é o de *minerais-minério*, onde são definidos pelo valor econômico agregado, ou seja, possuir viabilidade econômica na sua extração e processamento com o objetivo de gerar lucros. Já a parte não útil de um minério é denominada *ganga* e o seu agregado sendo a porção denominada rejeito do processo.

A definição de liberação mineral pode ser entendida, segundo Gaudin (1939), como o percentual entre as partículas minerais livres do total das partículas, sejam elas livres ou mistas. De maneira geral, o grau de liberação é a condição em que uma determinada espécie mineral se encontra livre do restante do material.

A determinação do grau de liberdade é considerada uma das informações mais fundamentais da caracterização de um minério, uma vez que a liberação indica uma possibilidade de recuperação do mineral de interesse. Há uma forte relação com a etapa de cominuição, uma vez que, quanto mais fina a granulometria, mais liberadas devem estar as fases minerais. (NEUMANN *et al.*, 2010 e FERREIRA, 2013)

Em relação aos produtos obtidos das etapas de tratamento de minérios, a sua utilização é normalmente feita a partir de minérios granulados e minérios aglomerados. Para Quaresma (2001), a classificação quanto ao tipo de produto gerado é realizada a partir da granulometria do material processado, sendo a fração denominada granulado obtida com partículas de maiores dimensões, enquanto, a partir dos minérios de granulação fina, obtém-se a fração *sinter feed* e a fração *pellet feed*. A Tabela 3.1 apresenta essa relação de produtos obtidos:

Tabela 3.1 - Relação entre os produtos obtidos das etapas de processamento mineral

Nomenclatura	Tamanho das partículas (mm)	Processo de aglomeração	Produção
Granulado	25 - 6	-	Etapas do processamento mineral
<i>Sinter feed</i>	6,32 - 0,15	Sinterização	Plantas siderúrgicas
<i>Pellet feed</i>	≤ 0,15	Pelotização	Etapas do processamento mineral

Fonte: (QUARESMA, 2001)

3.2 Produção Mineral Atual

Como justificativa importante desse trabalho, a análise e conhecimento da produção de minério de ferro itabirítico são de grande importância devido ao volume de finos de rejeito gerado no processamento do mesmo.

Os dados mais recentes encontrados sobre a produção mineral, em nível nacional, são datados do ano de 2018, onde levou-se em conta a produção do ano de 2017 para a realização do relatório, que foi produzido pela Agência Nacional de Mineração - ANM.

Na Tabela 3.2 é possível identificar uma elevada produção de minério de ferro no Brasil, sendo consequência disso, uma produção de rejeitos da ordem de 266.749.980 toneladas que possuem diferentes composições mineralógicas com diferentes teores de ferro. Isso mostra a necessidade de se ter um conhecimento a respeito desse material com o objetivo de dar um aproveitamento e fim a esse passivo ambiental.

Tabela 3.2 - Relação produtiva de minério de ferro no ano de 2017

Estado	Quantidade (Run of Mine - ROM)		Contido em ferro		Teor Médio em ferro		
Minas Gerais	406.877.966	t	204.829.783	t	50,34	%	Fe
Pará	168.495.286	t	110.293.917	t	65,46	%	Fe
Mato Grosso do Sul	5.020.295	t	3.094.736	t	61,64	%	Fe
São Paulo	4.850.989	t	317.663	t	6,55	%	Fe
Maranhão	45.237	t	20.356	t	45,00	%	Fe
Bahia	36.459	t	23.510	t	64,48	%	Fe
Amazonas	5.913	t	4.139	t	70,00	%	Fe
Ceará	3.613	t	2.230	t	61,71	%	Fe
Rio Grande do Norte	1.818	t	711	t	42,42	%	Fe
		...					
Total: Ferro	585.337.085	t	318.587.105	t	54,43	%	Fe

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

3.3 Quadrilátero Ferrífero

De acordo com Dorr II (1964), o Quadrilátero Ferrífero, comumente abreviado por QFe, está localizado na região central estado de Minas Gerais - Brasil e possui uma área de aproximadamente 7.000 quilômetros quadrados, sendo uma das principais fontes da extração mineral do país, possuindo uma variedade de produtos como o minério de ferro, minério de manganês e ouro, compreendendo cidades como Belo Horizonte, Mariana e Ouro Preto, conforme apresentado na Figura 3.1.

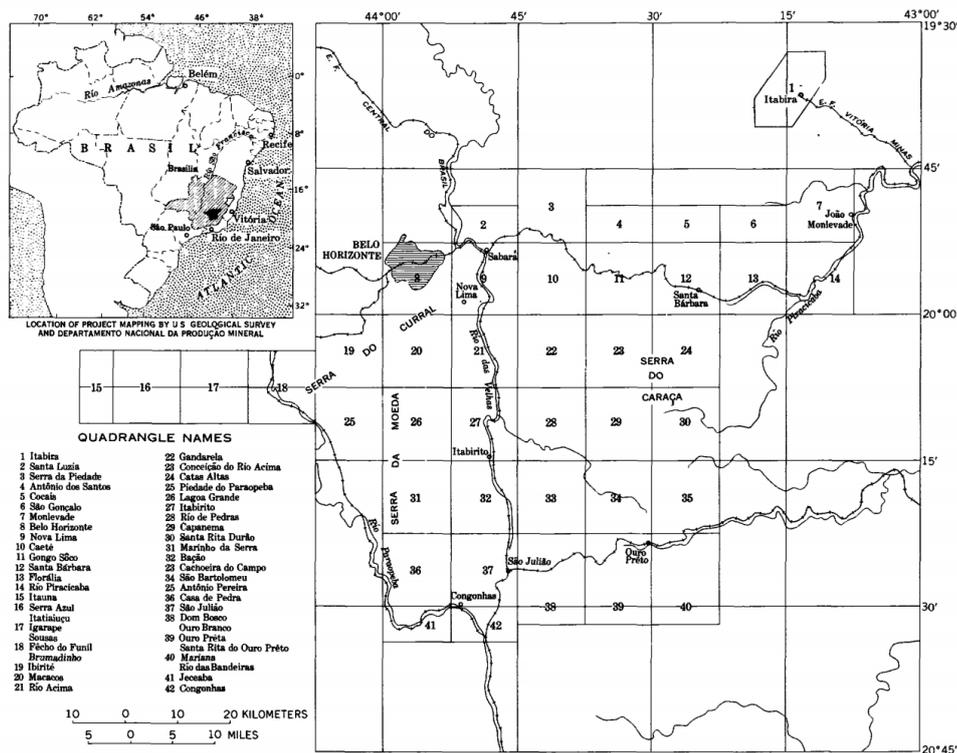


Figura 3.1 - Mapa da região que abrange o QFe
 Fonte: (DORR II, 1969)

3.3.1 Itabirito

O itabirito, uma das rochas mais utilizadas na extração de minério de ferro e presente na região do QFe, possui uma morfologia bandada (*Banded Iron Formations - BIF*), ou seja, camadas alternadas bem definidas de minerais que possuem origem sedimentar química contendo, no mínimo, 15% de ferro sedimentado (JAMES, 1954). Uma das posições contém óxidos de ferro como a hematita, magnetita e a goethita, enquanto a outra é composta por tectossilicatos como o quartzo e a dolomita. O itabirito é formado a partir do metamorfismo regional, onde seu teor primário em ferro situa entre 20% e 55%, podendo atingir valores superiores a 64%, sendo considerados corpos de alto teor de ferro (ROSIÈRE *et al.* 1993).

3.3.1.1 Hematita

A hematita, um mineral abundante encontrado na região do QFe a partir da rocha itabirito, é um óxido de ferro III de representação química $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ que possui cerca de 69,9% de ferro na sua composição e 30,1% de oxigênio (DANA, 1978).

Segundo Klein e Hurlbut (2001), as propriedades físicas e cristalográficas da hematita são:

- Cor: cinza metálico a preto ou vermelho sangue;
- Brilho: metálico;
- Transparência: opaco;
- Traço: vermelho ocre;
- Dureza na escala de Mohs: 6,5;
- Fratura: subconchoidal ou ausente;
- Hábito: romboédrico, tabular, granular, botroidal.
- Ausência de clivagem;
- Densidade: 5,3g/cm³;
- Magnetismo: paramagnético;
- Sistema cristalino: hexagonal compacto;
- Variedade: compacta, porosa e especular.

3.3.1.2 Quartzo

O mineral quartzo, também encontrado no QFe e na rocha itabirito, é definido como óxido de silício, sílica, da família de Tectossilicato e possui fase estável como SiO₂, conhecido como quartzo- α . É um dos minerais mais abundantes da crosta terrestre (GUZZO, 2008).

As suas propriedades diferenciadoras, conforme Klein e Hurlbut (1993), como mineral são:

- Cor: incolor, branco ou colorido devido a presença de impurezas;
- Brilho: vítreo ou gorduroso;
- Transparência: transparente;
- Traço: incolor;
- Dureza na escala de Mohs: 7;
- Fratura: conchoidal;
- Hábito: prismático;
- Ausência de clivagem;
- Densidade: 2,65g/cm³;
- Magnetismo: diamagnético;
- Sistema cristalino: trigonal.

3.3.1.3 Goethita

A Goethita é um mineral provedor de ferro da classe dos hidróxidos, podendo ser encontrado na região do QFe, a sua fase mais estável é representada por α -FeOOH e possui cerca de 62,9% de ferro na sua composição. As suas características mineralógicas são (NAVARRO *et al.*, 2017):

- Cor: vermelho, marrom, preto;
- Brilho: metálico;
- Transparência: opaco;
- Traço: amarelo amarronzado;
- Dureza na escala de Mohs: 5,0 - 5,5;
- Fratura: irregular;
- Hábito: prismático, tabular, fibroso, fibrorradiado ou botroidal.
- Clivagem: duas direções, uma perfeita {010} e uma distinta {100};
- Densidade: 3,30g/cm³ - 4,30g/cm³;
- Magnetismo: diamagnético;
- Sistema cristalino: ortorrômbico.

3.3.1.4 Magnetita

Segundo Navarro, *et al.* (2017), o mineral Magnetita é classificado como um óxido na classe dos minerais possuindo representação química α -Fe₃O₄. Contendo, teoricamente, 72,4% de ferro em sua composição possui as seguintes características:

- Cor: marrom, preto, preto acinzentado;
- Brilho: metálico;
- Transparência: opaco;
- Traço: preto;
- Dureza na escala de Mohs: 5,5 - 6,5;
- Fratura: irregular;
- Hábito: octaédrico, dodecaédrico ou cubico;
- Ausência de clivagem;
- Densidade: 5,17g/cm³ - 5,20g/cm³;

- Magnetismo: ferromagnético;
- Sistema cristalino: isométrico.

3.4 Processos de Beneficiamento Mineral

Após o processo de Lavra, tem-se a necessidade de obter o mineral-minério livre de impurezas, gangas, aplicando-se operações e técnicas que buscam a redução granulométrica com a finalidade de liberar o minério, obtendo-se um concentrado de maior teor do mineral de interesse. Os processos variam desde a cominuição, processos de redução do tamanho das partículas, passando por etapas de separação e concentração até a sua secagem e a disposição dos rejeitos. A Figura 3.2 apresenta, em forma de fluxograma, um esquema básico de rota para o processamento dos minérios de ferro, sendo destacadas as etapas que compreendem a adição de água no processo (LUZ *et al.*, 2010).

Santana (2012) destaca que a necessidade de um tratamento de minérios, com operações que envolvem estágios de classificação e concentração, comumente a úmido, são destinados aos minérios empobrecidos em seu teor, uma vez que os minérios de elevado teor são obtidos a partir da liberação nos primeiros passos de fragmentação e classificação, que abrangem os ciclos de britagem, moagem e peneiramento, sem a necessidade de etapas de flotação.

O minério encontrado no Complexo Minerário de Carajás, localizado no Pará, é um exemplo de minério de alto teor onde não se faz necessário os processos de flotação para a concentração do material, sendo obtido como produtos: o granulado, *sinter feed* e o *pellet feed*, e tem sua rota de produção basicamente como apresentado no fluxograma na Figura 3.2, onde, na etapa de concentração, não se é utilizada a tecnologia de flotação (SAMPAIO *et al.*, 2001).

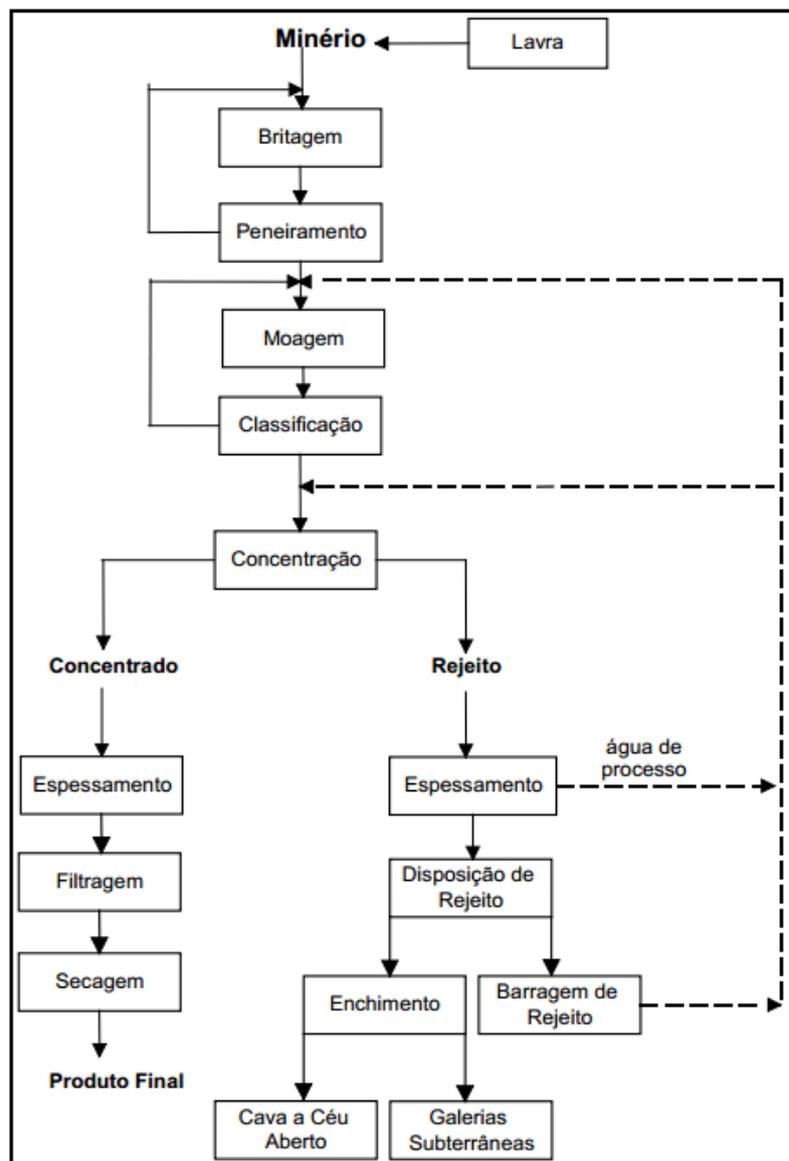


Figura 3.2 - Fluxograma básico das etapas de processamento mineral
 Fonte: (LUZ *et al.*, 2010)

3.4.1 Cominuição

Sendo a cominuição o primeiro estágio do processamento, a sua operação unitária de fragmentação tem por objetivo a redução do tamanho das partículas e adequação das mesmas para os processos seguintes.

Luz *et al.* (2010) informa que o método tem início no processo de desmonte durante a lavra do minério, utilizando explosivos, obtendo-se porções de rochas de grande massa e dimensões com um tamanho que permita a alimentação em equipamentos subsequentes. A

partir de esforços mecânicos gerados nos equipamentos, o corpo sólido tende a se fragmentar de forma a obter a liberação dos minerais da rocha.

Em relação aos custos de operação de uma planta de beneficiamento, e considerando a divisão clássica da fragmentação com operações de desmonte, britagem e moagem, o seu gasto é o maior durante o processamento e, assim, o seu melhor aproveitamento impacta tanto nos estágios posteriores quanto no lucro do empreendedor e até mesmo na demanda global de energia. Em termos quantitativos, o consumo energético chega a ser da ordem de 80% da energia total consumida na usina, sendo uma área de estudo bastante importante com a finalidade de melhorar o processo e torná-lo cada vez mais viável (LUZ *et al.*, 2010; DELBONI JÚNIOR, 2007).

Há diversos equipamentos de cominuição mineral, como exemplo os britadores de mandíbula, que consistem de uma mandíbula fixa e uma mandíbula móvel fornecendo o movimento de afastamento e aproximação, realizando pressão e impacto no corpo que é alimentado à máquina e realizando a sua fragmentação. Outros equipamentos comuns nesse estágio são os moinhos cilíndricos, alimentados posteriormente aos processos de britagem. Podem conter como corpos moedores bolas, barras ou seixos, sendo composto por uma carcaça cilíndrica de material metálico e revestido internamente, gerando uma proteção contra o desgaste. O funcionamento de um moinho horizontal consiste basicamente na rotação do equipamento, onde o corpo moedor tende a cair, sob o efeito da força gravitacional, sobre as partículas de minério que o preenchem, formando preferencialmente um efeito cascata, a fim de obter melhor a eficiência, e realizando a moagem (LUZ *et al.*, 2010).

3.4.2 Classificação e peneiramento

O objetivo da classificação mineral, no âmbito do seu processamento, é, de forma geral, a formação de duas ou mais frações de material com dimensões distintas entre si (CARRISSO e CORREIA, 2004).

Um dos equipamentos mais utilizados são as peneiras vibratórias, das quais se obtém o *oversize* e o *undersize* como sendo, respectivamente, as frações que ficaram retidas e as frações que passam pela tela da peneira. O processo pode ser realizado utilizando água (via úmido), ou a seco. São utilizados diferentes tipos de malhas na etapa de peneiramento, o

maquinário pode ser fixo ou realizar algum tipo de movimento dando maior probabilidade de contato entre as partículas e a tela proporcionando maior efetividade da etapa. O conceito de *mesh*, malha, corresponde ao número de aberturas contido em uma polegada linear de tela, é empregado na utilização de peneiras padronizadas da série Tyler. Outro equipamento para classificação, é o hidrocliclone que tem como princípio básico de separação a sedimentação centrífuga com o auxílio de água no processo (LUZ *et al.*, 2010; SAMPAIO *et al.*, 2007; CORREIA, 2010).

3.4.3 Concentração

A etapa de concentração do processamento refere-se à capacidade de separar uma ou mais espécies minerais de forma a aumentar a sua proporção em alguma mistura, tomando como exigência para a realização do ciclo a existência de diferença entre as propriedades físicas entre os mesmos. Há diferentes processos para a realização dessa etapa, como os que têm como fundamento as diferenças de densidade ou as diferenças de susceptibilidade magnética de cada espécie, que é a capacidade da partícula em responder a campos magnéticos induzidos (CHAVES *et al.*, 2018).

3.4.3.1 Flotação

Um dos processos mais predominante de concentração para partículas finas é o chamado de flotação. O processo de flotação tem como princípio de funcionamento o borbulhamento de ar ou a agitação da suspensão contendo o material e água a fim de promover o contato entre as partículas e as bolhas formadas e, assim, promovendo a separação e concentração do minério (RABOCKAI, 1979).

Das diferentes propriedades físico-químicas dos minerais, a hidrofobicidade, sendo determinada como a capacidade da partícula de repelir ou adsorver água, é a característica essencial para a realização do processo de flotação. O funcionamento de uma coluna de flotação consiste no contato formado entre as bolhas de ar, resultantes do borbulhamento, e as partículas, podendo promover a sua adesão na superfície da bolha devido à hidrofobicidade, sendo então carregadas para fora da coluna. As partículas que aderem à superfície da bolha são definidas como hidrofóbicas, enquanto as que possuem afinidade pela água são estabelecidas como partículas hidrofílicas (GAUDIN, 1939).

Segundo Nunes (2010), para que o contato ocorra de forma adequada, há a necessidade de adicionar alguns reagentes que melhoram o desempenho dos equipamentos e a aderência entre a partícula e bolha, sendo esses reagentes apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Relação de reagentes e a sua finalidade

Reagentes	Finalidade
Coletor	Responsável por dar hidrofobicidade às partículas na polpa por meio da adsorção em sua superfície
Ativador	Propicia a adesão do coletor com a superfície das partículas
Depressor	Agente seletivo que se deposita na superfície a fim de impedir a adesão dos coletores.
Espumante	Utilizado para impedir a sedimentação da matéria retida no topo da célula por meio da estabilidade e consistência das espumas formadas.
Reguladores	Regulador de pH melhorando a eficiência da coleta.

Fonte: Adaptado de Nunes (2010)

3.5 Rejeitos

Os processos de lavra e beneficiamento mineral têm como resultado, durante os processos, o produto rico em teor do mineral-minério e uma grande geração de massa rejeitada. O aumento do volume produzido de rejeitos está aliado com a crescente demanda mundial por bens que consomem e utilizam minerais. Associado a isso vem o aproveitamento de minérios considerados mais pobres na proporção ganga e ferro (SOARES, 2010).

De acordo com Nociti (2011), as etapas de beneficiamento de minério de ferro da rocha itabirito são a principal fonte de rejeitos, sendo eles distribuídos em dois tipos: o rejeito de lama e o rejeito arenoso. A procedência do rejeito arenoso é dos processos de flotação, onde as suas características variam em função da planta de beneficiamento e das necessidades que as mineradoras possuem para atender seus clientes. Já o rejeito em porção mais fina, o de lama, possui uma composição química menos variável e é encontrado em diversos pontos do processo. Um minério mais rico em teor de ferro possui um rejeito de composição

diferente quando comparado com o rejeito obtido no processamento de uma rocha mais pobre em porcentagem de ferro.

O International Commission on Large Dams (ICOLD) aponta que, conforme cresce a preocupação com os métodos de disposição de rejeitos, devido ao aumento significativo das estruturas armazenadoras e de acidentes envolvendo barragens, há uma mobilização por parte da comunidade técnico-científica, de autoridades governamentais e de organizações internacionais em estudar uma alternativa para o aproveitamento desse passivo ambiental de forma a reduzir e mitigar seus danos (GUEDES e SCHNEIDER, 2018; SOARES, 2010)

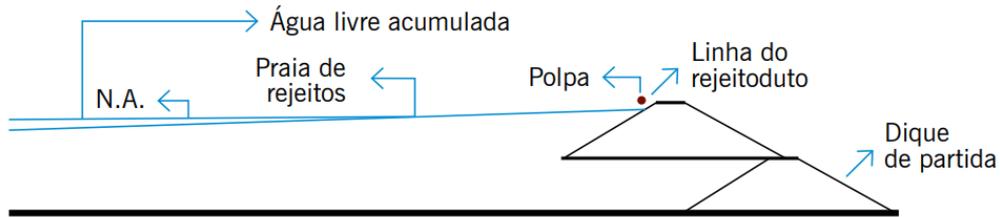
3.5.1 Métodos de disposição de rejeitos

Quanto à forma de acomodação do material, segundo o IBRAM (2016), a disposição dos rejeitos pode ser feita por meio da disposição em minas subterrâneas, cavas exauridas de minas, pilhas, empilhamento a seco, disposição em pasta e barragens de rejeito.

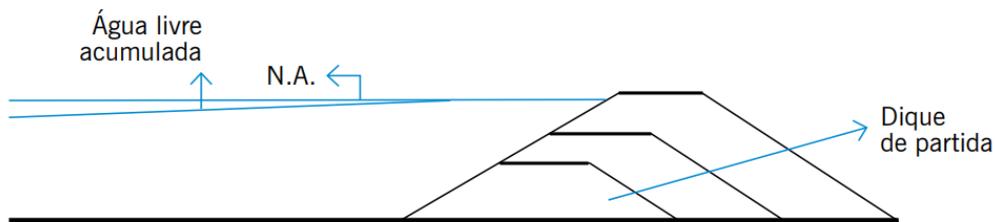
A disposição feita por meio do lançamento em barragens, sendo atualmente o método mais seguro e tecnologicamente mais viável economicamente, pode ser executado por meio da utilização de processos mais tradicionais como terra compactada, utilizando o próprio rejeito ou com o estéril. A tecnologia do método de disposição em barragens não é tão desenvolvida e estudada quanto os processos de beneficiamento e extração mineral, uma vez que o seu elevado custo de manutenção e desenvolvimento não trazem retorno financeiro imediato para a empresa que minera, sendo assim, há a necessidade de explorar o tema de forma a minimizar o impacto e os acidentes causados pela produção de rejeito (SOARES, 2010).

A forma de despejo dos rejeitos é apresentada de maneira esquemática na Figura 3.3. Os principais métodos de disposição são: a montante, a jusante e por linha de centro.

MÉTODO DE MONTANTE



MÉTODO DE JUSANTE



MÉTODO DA LINHA DE CENTRO

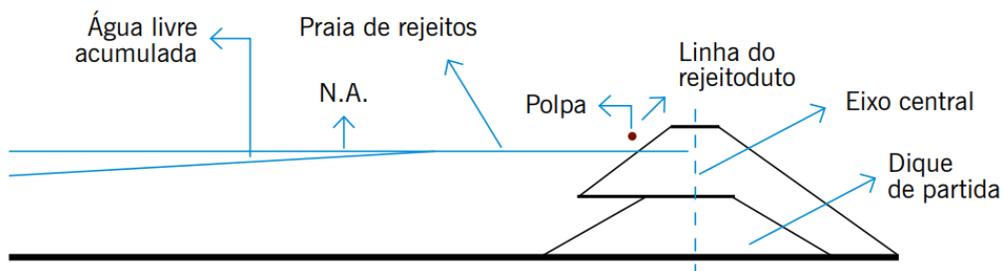


Figura 3.3 - Métodos de disposição de rejeitos em barragens
Fonte: (IBRAM, 2016)

3.5.1.1 Método de montante

Dos métodos de disposição, o de montante é considerado o mais econômico em relação à construção, sendo o mais simples e o mais antigo empregado, a tecnologia é a mais utilizada pelas mineradoras. A sua construção tem como base um dique de partida de material compactado, onde o rejeito é lançado por canhões com direção a montante da superfície da água do lago de decantação, sendo formadas as praias de deposição ao longo de toda a barragem, realizando descarga periférica, tornando-se o ponto de partida para o próximo alteamento (IBRAM, 2016; SOARES, 2010).

3.5.1.2 Método de jusante

O método de jusante possui vantagens no que diz respeito ao controle do lançamento e da compactação, já que não há construção ou despejo sobre rejeito anteriormente depositado. Há também a possibilidade de instalação de sistemas de drenagem interna durante a estruturação da barragem, o que aumenta a sua estabilidade e, assim, a sua segurança. O seu maior custo está relacionado ao grande volume de material na construção e, conseqüentemente, a maior área ocupada sendo considerada uma desvantagem para esse sistema (IBRAM, 2016).

3.5.1.3 Método de linha de centro

Uma mescla entre os dois métodos citados é o chamado método de linha de centro, criado com a finalidade de diminuir as desvantagens de ambos os métodos. Tendo como diferença o alteamento realizado verticalmente apoiando-se entre os rejeitos depositados anteriormente, o que exige um menor volume de material e, conseqüentemente, uma área de ocupação menor, e possibilita também a utilização de drenos internos a fim de obter maior controle (ESPÓSITO, 2000; PRESOTTI, 2002).

3.5.2 Processamento a seco

Uma alternativa à utilização de barragens de rejeito, apesar do maior investimento econômico, é a mineração realizada a seco. A Vale S.A. vem implementando o processamento a seco do minério de ferro de forma gradativa na usina de S11D localizada no Pará. Esse tratamento dado ao minério só é possível devido ao alto teor de ferro contido na rocha lavrada, eliminando, assim, as etapas de concentração e flotação. A rota de beneficiamento passa apenas por processos de britagem, moagem, peneiramento e a realização de filtragem do material rejeitado para a retirada da umidade contida, dando a esse um menor volume devido à compactação e, por fim, estocando-o em um aterro. O processo se torna mais caro devido à necessidade dessa etapa de filtragem e à maior necessidade de etapas de cominuição (CAVALLINI, 2019).

Apesar de diminuir a utilização de barragens de contenção, a utilização do processamento a seco não diminui a produção de rejeitos. A aplicação do método é benéfica em relação aos riscos da utilização da estrutura de acomodação dos rejeitos, porém não elimina ou diminui

a preocupação com a utilização dos resíduos produzidos. Sendo assim, há a necessidade do contínuo estudo para identificar potenciais métodos de utilização, já que o passivo ambiental ainda existe e apenas estará disposto de uma maneira diferente.

3.5.3 Estudos de aproveitamento do rejeito arenoso

A transformação do rejeito mineral arenoso, sendo esse um passivo ambiental de grande impacto, como um potencial produto no mercado incluem variados estudos que buscam alguma forma de utilização e que, conseqüentemente, causam a diminuição do impacto causado ao meio ambiente, podendo tornar-se uma alternativa com potencial econômico positivo.

Figueiredo (2017) apresenta um estudo sobre a possibilidade de utilização da porção arenosa de rejeitos de mineração na fabricação de moldes em processos de fundição, uma vez que são utilizadas areias silicosas na produção de certos tipos de moldes necessários para a obtenção de peças metálicas. O seu trabalho consistiu na caracterização analítica e tecnológica de rejeitos simulando processos de fundição em areia a verde, em areia de cura a frio e em areia com silicato de sódio/CO₂, e realizando uma comparação com areias silicosas para fundição utilizadas no mercado. Os resultados obtidos foram promissores, indicando a possibilidade de utilização neste segmento.

Outro estudo com resultado bastante positivo foi o apresentado por Lv *et al.* (2019) que realizou uma comparação entre a utilização de rejeitos de minério de ferro e agregados naturais normalmente utilizados em concretos, com aplicações em barragens na China, onde o concreto que utiliza rejeito torna-se superior ao concreto natural principalmente devido ao seu superior desempenho quanto às propriedades térmicas, por exemplo, a sua melhor condução de calor, e mantendo as propriedades mecânicas como o módulo de elasticidade e tensões compressivas. O estudo mostra que o concreto com adições de rejeito é economicamente viável a partir da realização de um estudo de caso comprovando uma redução de custo na produção.

O setor da construção civil é uma das possíveis áreas da aplicação e reutilização de rejeitos. Fontes *et al.* (2018) realizaram um trabalho de viabilização do aproveitamento de resíduos provenientes do minério de ferro como pigmento e na produção de ladrilhos hidráulicos, utilizados em revestimentos. O estudo mostrou que o rejeito utilizado é tecnicamente viável

para a utilização em ambos os materiais, pigmentos e ladrilhos, sendo essa uma diferente alternativa para a mitigação desse passivo ambiental.

Para todos os casos de aproveitamento do rejeito arenoso, faz-se necessário o conhecimento das suas características como composição mineralógica e fração mássica das fases presentes.

3.6 Análise Mineralógica

A metodologia de análise e caracterização mineral via TIMA (*Tescan Integrated Mineral Analyser*) possibilita a identificação de fases minerais presentes em uma amostra a partir da definição dos elementos químicos presentes em partículas dessa, combinando técnicas de imagem por feixe de elétrons retroespalhados e de espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDS). Além da identificação de fases a partir de um banco de dados, é possível ainda obter diversos dados acerca das partículas minerais encontradas como, por exemplo, tamanho, grau de liberação e textura. Devido à sua grande reprodutibilidade, algo que se deve ao grau de automatização atingido pelos microscópios eletrônicos de varredura e seus acessórios atualmente, tal metodologia vem sendo utilizada para acompanhar diversos processos minero-metalúrgicos como a cominuição e flotação, a lixiviação e o *smelting*, sendo ainda base para diversos estudos em geometurgia e modelamento metalúrgico de operações de recuperação e monitoramento de processos e plantas.

Com a utilização de um Microscópio Eletrônico de Varredura, equipado com ao menos um analisador EDS, para a realização da análise química, e um *software* de tratamento de dados (GU, 2003), as informações mineralógicas são obtidas a partir da combinação de imagens de elétrons retroespalhados (BSE), que usufrui dos níveis de cinza produzidos em cada pixel, proporcionais aos números atômicos médios naquele ponto, sendo assim possível a delimitação das fronteiras entre diferentes partículas conforme a representação mostrada na Figura 3.4, e espectros de EDS de cada fase mineral (GU, 2003 e FANDRICH *et al.*, 2007).

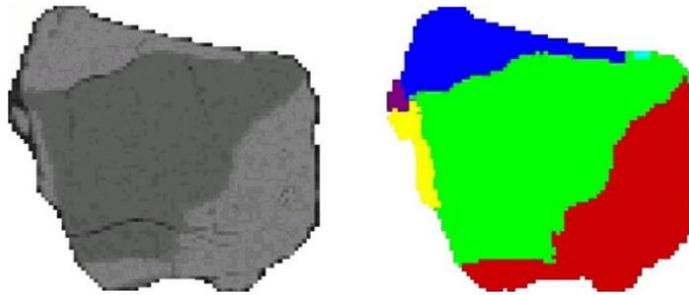


Figura 3.4 - Representação da delimitação de fronteiras das fases minerais por MEQ.
 FONTE: (FANDRICH *et al.*, 2007)

A identificação da fase é caracterizada quando ocorre a coincidência entre o espectro adquirido no ponto e o espectro do banco de dados havendo uma sobreposição da imagem obtida por uma grade, onde, em cada pixel, é adquirido o espectro de EDS, que, por meio da comparação com os espectros de variadas espécies químicas contidos no banco de dados, identifica os elementos químicos presentes naquela região da partícula ou da amostra caracterizando, por fim, as fases presentes (GU, 2003; FANDRICH *et al.*, 2007).

A título de exemplificação, a Figura 3.5 mostra a identificação das fases minerais Bornita e Calcopirita, após a delimitação das fronteiras com escalas de cinza, por meio do pico respectivo de elementos como Ferro, Cobre e Enxofre em diferentes intensidades, que são característicos de cada fase, quando comparado ao banco de dados pré-existente no *software* utilizado na AMA: MLA DataView (SAMPAIO, 2016 e FANDRICH *et al.*, 2007).

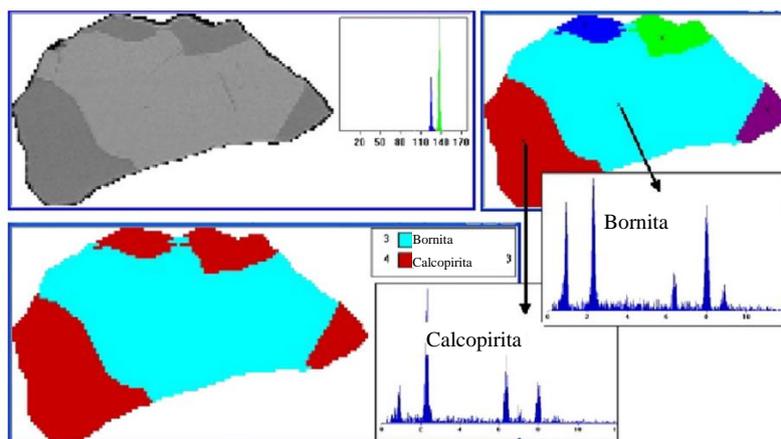


Figura 3.5 - Identificação das fases por coincidência dos espectros de elementos.
 FONTE: Adaptado de Fandrich *et al.* (2007).

Dos *softwares* de tratamento e obtenção dos dados para a aplicação das técnicas de caracterização mineral automatizada, podemos destacar o MLA, *Mineral Liberation*

Analyzer, o QEMSCAN, *Qualitative Evaluation Minerals & Scanning Microscope*, e o TIMA, TESCAN *integrated Mineral Analyser*, do qual se faz uso neste trabalho (ÁVILA, 2018).

3.6.1 Análise mineralógica via *Sdetware* TIMA

Para a caracterização mineralógica por sistemas automatizados, Silva (2014), de maneira simplificada, define o sistema TIMA-MIRA, onde o sufixo MIRA tem sua origem e destino comercial (SAMPAIO, 2016), como um programa de análise de dados minerais por meio de um programa de controle de varredura contido em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), sendo composto por detectores de energia de Raios X associado a um canhão de elétrons de emissão de campo, podendo ser visualizado na Figura 3.6.

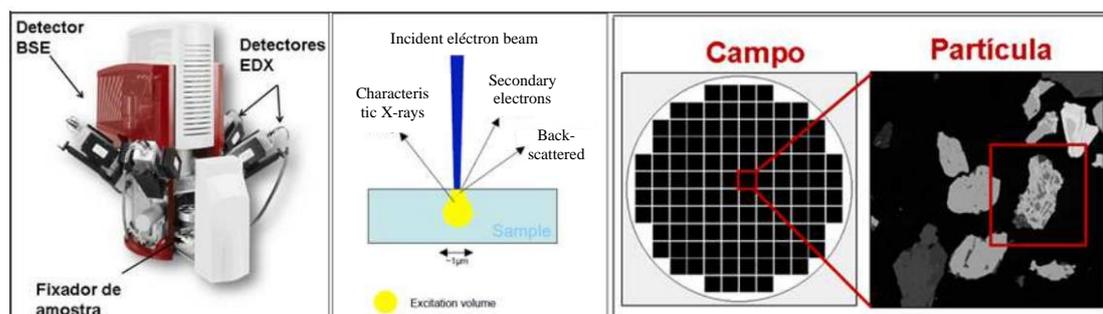


Figura 3.6 - Representação esquemática do funcionamento de um MEV sistema TIMA.
Fonte: (SILVA, 2014)

A Figura 3.6 exemplifica o esquema básico de funcionamento do *sdetware* TIMA atrelado a um MEV, indicando a posição dos detectores, o local de inserção da amostra, o princípio de funcionamento do sistema, o campo obtido para a incidência dos raios e, por fim, uma ampliação desse campo destacando a partícula a ser analisada pela incidência de um feixe de elétrons.

Sampaio (2016) descreve o funcionamento do *sdetware* TIMA baseado por um sistema MEV-EDS no qual a identificação dos Raios X, característicos de cada elemento químico contido na amostra, conforme exemplificado na Figura 3.7, é realizado pelos espectrômetros de energia dispersiva, enquanto as imagens dos elétrons retroespalhados são geradas pelo MEV, em altas velocidades de digitalização. Na geração de uma imagem para a identificação de cada grão mineral, os sinais estáveis dos elétrons retroespalhados condicionam o parâmetro brilho BSE seguindo uma escala RGB com seus valores entre 0 e 256, correspondente a 0% BSE e 100% BSE, respectivamente. Os limites entre os grãos são

fornecidos pelas variações da escala de cinzas, sendo valorizados por apresentar uma identificação da fase mineral contida em cada região analisada (SAMPAIO, 2016).

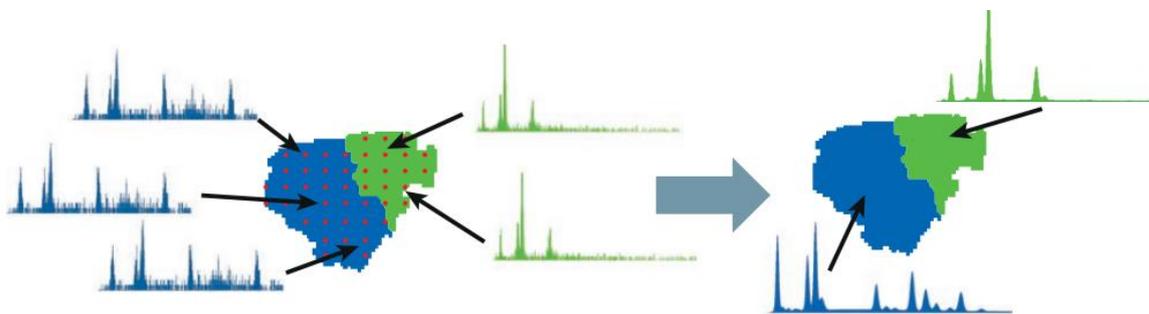


Figura 3.7 - Identificação das fases pelo *sdetware* TIMA.
FONTE: (TESCAN, 2017)

O sistema tem por finalidade realizar a análise mineralógica por meio da comparação dos espectros de EDS, gerados em cada partícula, uma vez que possui um banco de dados com diversos minerais cadastrados tendo a possibilidade de alteração pelo operador, seja ela a inclusão ou exclusão de novas fases minerais (SILVA, 2014; ÁVILA, 2018). Essa identificação da fase mineral pode ser avaliada por meio de uma única análise de EDS, ou por meio da varredura no centro geométrico em um único ponto ou em uma região definida do grão durante o mapeamento de EDS onde, quando se obtém conformidade entre o mineral analisado, por meio da tonalidade de cinza (brilho BSE) e o espectro EDS com o mineral adicionado ao banco de dados, ocorre a identificação da fase mineral (SAMPAIO, 2016; ÁVILA, 2018).

De maneira geral, o TIMA usufrui do resultado obtido pelos elétrons retroespalhados que associa ao respectivo espectro de Raios X característicos dos minerais analisados obtendo, assim, informações acerca das espécies (SAMPAIO, 2016).

O *sdetware*, em sua versão mais completa, possui sua estrutura dividida em dois principais módulos, o *Data Acquisition* e o *Data Management*, e uma ferramenta denominada *Spectrum Tools* sendo representados, respectivamente, pelas abas *Acquisition*, *Project* e *Tools* no esquema mostrado na Figura 3.8 (SAMPAIO, 2016).

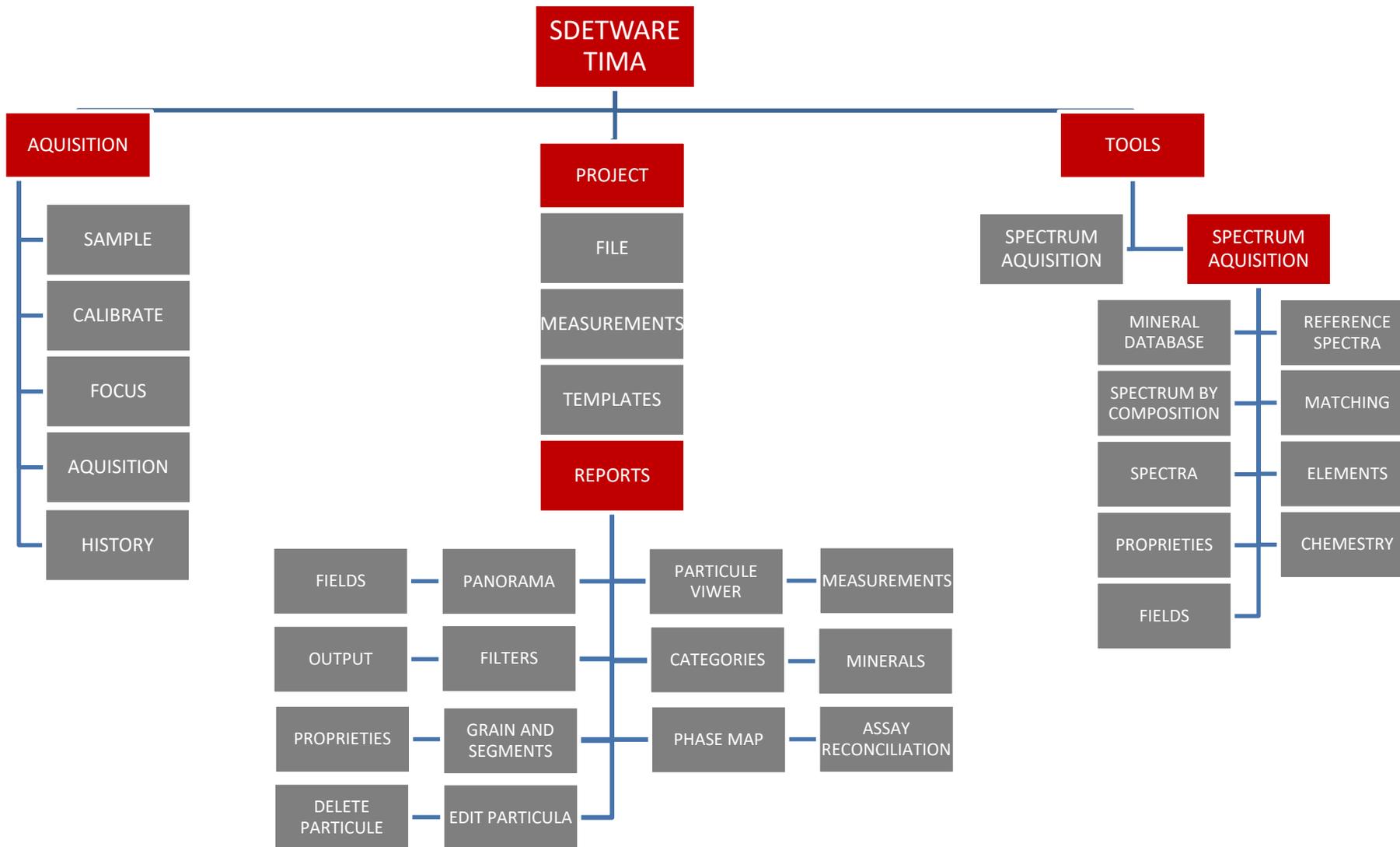


Figura 3.8 - Estrutura e guias de navegação do *sdetware* TIMA.
 FONTE: Adaptado de Sampaio (2016).

3.6.1.1 *Data acquisition*

Sampaio (2016) apresenta que o módulo de *Data Acquisition* obedece às etapas em sequência, conforme apresentado na Figura 3.7 pela aba *Acquisition*, sendo elas a identificação da amostra, procedimento de calibração, ajuste do foco, definição dos parâmetros de medidas e a aquisição dos dados.

A Tabela 3.4 fornece os modos de aquisição dos parâmetros de medidos sendo descritos de maneira simplificada.

Tabela 3.4 - Modos de aquisição de dados do módulo *Data Acquisition*.

Modos de aquisição	Descrição do modo
<i>Modal Analysis</i>	Classifica os pixels e determina a frequência das fases e, por meio da detecção das variações dos minerais ou da composição química, fornece uma avaliação detalhada dos minerais e de suas proporções.
<i>Liberation Analysis</i>	Detecta partículas individuais por meio da combinação do nível de BSE com os respectivos espectros de Raios X característicos
<i>Bright Phase Search</i>	Filtra as partículas que contenham um mineral ou elemento de interesse em função do elevado número atômico, gerando maiores níveis de BSE e, conseqüentemente, sendo mais brilhantes.

FONTE: (SAMPAIO, 2016).

3.6.1.2 *Data management*

O módulo de *Data Management* é responsável por toda etapa de gerenciamento, processamento e apresentação dos dados, sendo eles, armazenados em um projeto, dando, assim, a possibilidade para a visualização e a manipulação dos dados por meio de edições e seleção das partículas ou alterações no esquema de classificação mineral, sendo esse constituído por uma lista de minerais, associados as suas regras de classificação, e seus respectivos espectros (SAMPAIO, 2016).

Sampaio (2016) informa que é possível utilizar o banco de dados do site Webmineral (BARTHELMY, 2020), onde contém cerca de 4700 registros de espécies minerais com suas

respectivas características sendo elas, como exemplo, a sua fórmula química, densidade e composição química, para serem importadas e compor o banco de dados do *sdetware*.

As regras de classificação e os espectros são compostos por dados adquiridos, sendo elas definidas por meio da intensidade de picos dos elementos químicos contidos na amostra (SAMPAIO, 2016). A

Tabela 3.5 descreve cada regra individualizada de maneira generalizada.

Tabela 3.5 - Regras do esquema de classificação mineral.

Regras de classificação	Descrição da regra
<i>Intensity</i>	Baseada na intensidade dos picos dos elementos químicos que constituem a amostra.
<i>Ratio</i>	Baseada na relação das intensidades dos picos de três elementos, recomendada a minerais constituídos pelos mesmos elementos em diferentes proporções.
<i>BE Level</i>	Baseada na emissividade de BSE, sua identificação mineralógica é efetuada por meio de uma varredura na lista de minerais do esquema de classificação selecionado, em ordem decrescente de complexidade de regras de classificação.
<i>Sum</i>	Baseada na soma das intensidades dos picos de dois elementos. Isso é útil no caso em que um mineral tem um elemento substituindo outro.

FONTE: Adaptado de Sampaio (2016).

Sampaio (2016) realizou a descrição dos resultados dos relatórios que constam no *Workbook* do projeto, emitidos individualmente por meio de gráficos, tabelas e imagens, e os resume conforme apresentado na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Descrição dos relatórios emitidos no módulo *Data Management*

Relatórios	Descrição
<i>Mineral mass</i>	Fração em massa dos minerais.
<i>Elemente mass</i>	Fração em massa dos elementos químicos.
<i>Elemental deperment</i>	Distribuição dos elementos químicos selecionados nas fases presentes.
<i>Elements maps</i>	Distribuição de todos os elementos químicos.
<i>Mineral associations</i>	Relação espacial entre os minerais ou grupos minerais dentro das partículas.
<i>Mineral liberation</i>	Distribuição das fases, elementos ou partículas em categorias de liberação.
<i>Mineral release</i>	Liberação do mineral de interesse por fração de tamanho.
<i>Grade-recovery curve</i>	Recuperação máxima do mineral ou elemento em um nível do processo de flotação.
<i>Grain size</i>	Distribuição da população de grãos dos minerais selecionados em categorias de tamanho.
<i>Particle size</i>	Divisão de partículas em categorias de tamanho.
<i>Particle density</i>	Divisão de partículas em categorias baseada na densidade relativa média.
<i>Particle viewer</i>	Visualização de todas as partículas individualizadas ou em faixas granulométricas e/ou químicas pré-determinadas pelo usuário.
<i>Category viewer</i>	Distribuição das fases, grupos minerais ou elementos químicos em uma tabela por categorias de partículas definida pelo usuário.

FONTE: (SAMPAIO, 2016).

3.6.1.3 *Spectrum tools*

A ferramenta *Spectrum Tools*, para Sampaio (2016), é descrita como uma ferramenta de identificação e correlação de espectros de Raios X, sendo obtidos na aba *Tools*, a partir de um conjunto de dados previamente adquiridos, ou sendo possível a obtenção por meio de análises de concentração relativas de elementos químicos, utilizando análises

semiquantitativas e, desde que totalizem um mínimo de 1200 contagens, podem ser armazenados e importados como espectros de referência.

3.6.2 Aplicações da metodologia

No âmbito da caracterização mineral, especificamente rejeito arenoso proveniente da mineração de itabiritos do quadrilátero ferrífero, Ávila (2018) estudou a aplicabilidade da técnica de Análise Mineralógica Automatizada, utilizando o sistema TIMA, para a caracterização mineralógica, obtendo um resultado válido para a técnica quando comparada a outras.

Silva (2014) estudou a utilização dos resíduos da concentração de minério de ferro na produção de *pavers* de cerâmica aplicando a técnica de caracterização por meio da AMA, sistema TIMA, obtendo resultados promissores na utilização do rejeito no que diz respeito à resistência mecânica, hermeticidade e absorção de água.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras utilizadas neste trabalho são provenientes do rejeito arenoso proveniente de uma companhia de mineração localizada no quadrilátero ferrífero, que foi beneficiado nos Laboratórios da Fundação Gorceix, em Ouro Preto, Minas Gerais, e classificado em quatro tipos:

- 1) Rejeito arenoso natural - identificado como AN;
- 2) Rejeito arenoso retido na peneira de 100# - identificado como A100;
- 3) Rejeito arenoso retido na peneira de 200# - identificado como A200;
- 4) Rejeito arenoso abaixo de 400# - identificado como A400.

As amostras foram quarteadas, homogeneizadas e enviadas para confecções de pastilhas para análise via Análise Mineralógica Automatizada - AMA.

O sistema utilizado para AMA está instalado no laboratório NanoLab da REDEMAT, localizado em Ouro Preto, MG na Universidade Federal de Ouro Preto, podendo ser observado conforme a Figura 4.1, e possui as seguintes características conforme descritas por Sampaio (2016) e Ávila (2018):

- Um MEV/FEG modelo MIRA3 LMH, onde o FEG, *Field Emission Gun*, produz um campo de elétrons mais coerente, de menor diâmetro e, conseqüentemente, gerando imagens muito mais brilhantes, quando comparado aos feixes produzidos por filamentos de tungstênio, tendo um aumento significativo na resolução espacial e do índice de sinal-ruído;
- *Sdetware* TIMA versão 1.6.68;
- Tensão do MEV para aceleração do feixe de elétrons de 25 keV;
- Diâmetro do feixe de 70nm;
- Magnificação de 180x;
- Resolução de imagens de 3 μ m;
- Campos quadrados com lado de 1500 μ m;
- Varredura de 12 campos para cada amostra;
- Média de 200.000 partículas analisadas por amostra.



Figura 4.1 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) que possui o sistema TIMA no NanoLab da REDEMAT/DEMET-EM-UFOP.

Para os ensaios as amostras foram embutidas em resina epóxi, no formato de pastilhas com 30mm de diâmetro, polidas, devido a necessidade que sejam desprovidas de quaisquer rugosidades, e recobertas com uma película de carbono, devido a necessidade de condução. Uma vez que as amostras são de natureza não condutora, há a necessidade da formação de uma fina película condutora produzida pelo carbono para a sua utilização na AMA (SAMPAIO, 2016 e ÁVILA, 2018). É possível observar na Figura 4.2 o formato das amostras e o seu brilho proveniente da película de carbono. O tempo de análise para cada pastilha foi, em média, 90 minutos (ÁVILA, 2018).



Figura 4.2 - Pastilhas recobertas por carbono e identificadas como A400, A200, A100 e NA, respectivamente.

Sampaio (2016) realizou um trabalho de formação do banco de dados no TIMA, do sistema contido na REDEMAT, que classifica e realiza a sua montagem levando em consideração o aspecto mineralógico brasileiro por meio da identificação e inserção de 195 espécies minerais diferentes de procedência brasileira, sendo 96 importados de Barthelmy (2020) e informações coletadas do sistema MEV/EDS, 56 foram alteradas para a realidade dos depósitos geológicos nacionais e 43 espécimes sendo mantidos do banco de dados original do sistema TESCAN.

As análises das amostras pela AMA - Sistema TIMA envolveram os seguintes itens, cálculo e determinação da composição mineralógica, análises de liberação mineral e análise granulométrica.

A análise foi realizada por meio de duas contagens distintas de emissão de Raios X por pixel, sendo elas:

- Análise de Liberação (A.L.) #1 - Possui contagem de 1000 eventos Raios X por pixel;
- Análise de Liberação (A.L.) #2 - Possui contagem de 200 eventos Raios X por pixel.

A contagem do número de eventos de Raios X por pixel é entendida como a quantidade dos eventos incididos em um intervalo de tempo para se obter um resultado a respeito da incidência desse raio. O TIMA é capaz de lidar com mais de 500.000 eventos de Raios X por segundo, mas para uma análise mais fiel, se utiliza o padrão de 1000 eventos representando a aquisição de 500 espectros por segundo (HRSTKA *et al.*, 2018). Sendo

assim, A.L. #1 possui uma maior precisão nas partículas analisadas devido a aquisição de 100 espectros por segundo, contra os 500 espectros em A.L. #2, exigindo um maior tempo para a análise de todo o material que tem por consequência a análise de mais partículas.

4.1 Mineralogia

No desenvolvimento do estudo de Ávila (2018), foi criado um banco de dados específico para caracterizar rejeitos de minério de ferro para garantir uma melhor classificação e identificação das fases fornecidas pelo sistema e complementar a biblioteca de aproximadamente 4.700 minerais existentes no *sdetware* (TESCAN, 2017). Esse banco de dados leva em consideração a presença de Fe, Si e Al na constituição dos principais minerais presentes nos minérios de ferro, conforme a Tabela 4.1, sendo seus teores obtidos pela média de no mínimo 20 grãos de cada uma delas.

Tabela 4.1 - Associação entre novas fases minerais e os minerais conhecidos.

Novas fases minerais	%Fe	%Si	%Al	%O	Mineral Conhecido
Hematita/Magnetita	67,7	0,3	0,3	31,7	Hematita/Magnetita
Material Goethítico	58,5	1,5	2,0	38,0	Goethita
Material Goethítico terroso	26,5	11,0	10,5	52,0	Goethita terrosa
Material Caulinítico	3,0	17,4	18,9	60,7	Caulinita
Material Caulinítico ferroso	13,0	14,5	15,5	57,0	
Material Gibbsítico	2,1	0,6	33,0	64,3	Gibbsita
Material Gibbsítico ferroso	12,8	0,8	23,8	62,6	
Material Quartzoso	4,0	28,5	5,5	62,0	Quartzo
Material Quartzoso ferroso	16,5	27,8	3,2	52,5	

FONTE: (ÁVILA, 2018)

Devido às dificuldades do sistema TIMA para diferenciar os minerais Hematita e Magnetita, por possuírem o mesmo espectro de EDS e a igualdade em seus números atômicos, essas fases foram caracterizadas em conjunto como Hematita/Magnetita, onde foi levada em consideração na caracterização, para essas fases, um pequeno teor em sílica e alumina. O sufixo ferroso criado na Tabela 4.1 se deve ao maior teor de ferro na composição química do mineral (ÁVILA, 2018).

A análise da massa mineral, que expõe a fração em massa das fases presentes nas amostras, foi responsável pela obtenção da composição mineralógica da mesma enquanto a densidade da fase é utilizada para expor a participação mássica de uma fase. Para o cálculo das frações, o *sdetware* considera a igualdade do percentual entre as relações das áreas totais e individuais com as relações de volumes totais e individuais, sendo assim, se o volume de pixels não classificados for baixo, não há comprometimento dos resultados para as outras fases minerais analisadas (ÁVILA, 2018 e TESCAN, 2017).

4.2 Granulometria

No estudo de granulometria das amostras, Ávila (2018) científica que o TIMA utiliza da área das partículas para a determinação do tamanho das mesmas, sendo considerado um círculo de diâmetro d com a mesma área da partícula ou grão, a área A em número de *pixels* e, como um parâmetro de análise do *sdetware*, o *pixel spacing* compoendo, assim, a Equação 4.1.

Equação 4.1 - Cálculo do tamanho das partículas.

$$d = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} \times \text{pixel spacing}$$

O *sdetware* permite, também, a visualização do tamanho partículas ou grãos a partir da geração imagens, seja ela ampliada ou de maneira a compor toda a amostra, dando, assim, uma avaliação visual da sua distribuição.

4.3 Liberação Mineral

Ávila (2018) sugere que para a análise de liberação mineral, que será apresentada por meio do espectro de liberação contendo a distribuição das fases em categorias de percentual de liberação, podem ser utilizados dois critérios para o cálculo da liberação: liberação por volume e liberação por superfície exposta. É possível ilustrar os critérios utilizados para o cálculo da liberação a partir da definição de uma fase primária conforme a Figura 4.3.

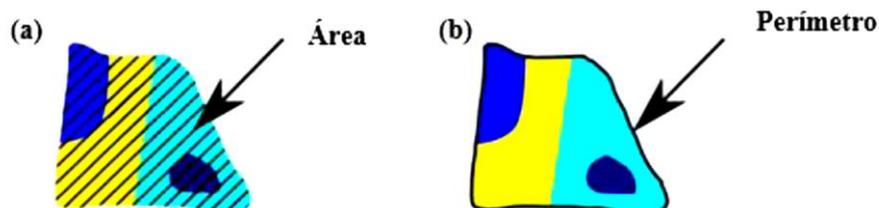


Figura 4.3 - Critérios para cálculo de liberação de partículas.
 (a) Liberação por volume e (b) Liberação por superfície exposta.
 Fonte: (TESCAN, 2017)

Dos dois critérios que podem ser utilizados para o cálculo da liberação, Ávila (2018) define ambos como:

- Análise por superfície exposta que determina o grau de liberdade por meio da fração do comprimento do perímetro externo da partícula que se encontra coberto por uma fase em relação ao comprimento do perímetro total da partícula.
- Análise por volume que utiliza da fração da área da fase analisada em relação a área total da partícula expresso em termos percentuais.

De maneira a exemplificar a análise de liberação para um mineral qualquer, a Figura 4.4 faz uso de três diferentes fases fictícias denominadas Cp, Qz e Bg. Sendo Cp a fase primária, mineral de interesse, Qz a fase considerada ganga, secundária, e Bg considerada como uma fase não classificada.

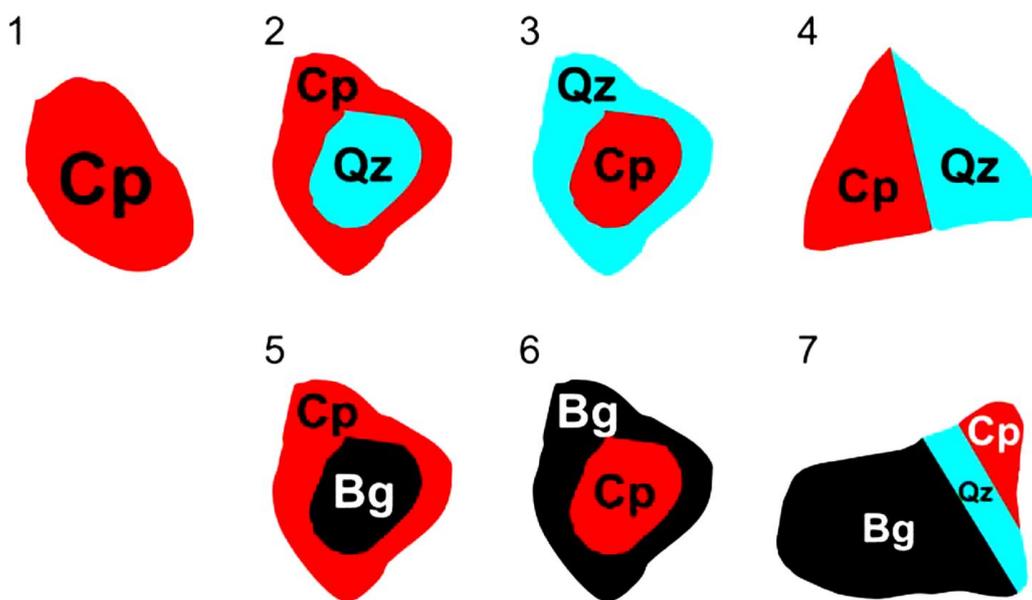


Figura 4.4 - Exemplificação de partículas contendo diferentes fases minerais.
Fonte: (TESCAN, 2017)

A partir da Figura 4.4, pode-se realizar uma análise quanto o percentual de liberação utilizando os diferentes critérios apresentados anteriormente e apresentadas conforme a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Análise de liberação das partículas Cp, Qz e Bg.

Partícula	Liberação por volume	Liberação por superfície exposta
1	100%	-
2	50%	100%
3	50%	0%
4	50%	50%
5 e 6	100% (Bg é desconsiderada quando o volume é determinado)	100% (Bg é desconsiderado e a superfície da partícula é somente Cp)
7	50% (Bg é desconsiderado quando o volume é determinado)	30% (contorno entre Bg e Qz faz parte da superfície da partícula)

Fonte: (TESCAN, 2017 *apud* ÁVILA, 2018).

A partir da Tabela 4.2, vale salientar que podemos identificar, a partir do cálculo de liberação por volume, a partícula 1 como totalmente liberada, porém, quando calculada por meio da superfície exposta, não se obtém resultados já que para a base para o cálculo faz-se necessária a presença de outra fase.

Neste trabalho o critério utilizado para a avaliação do grau de liberação das fases foi a liberação por volume a fim de garantir a classificação de todas as partículas analisadas.

4.4 Validação da Metodologia AMA - Sistema TIMA

Para a validação da utilização do sistema TIMA na AMA do rejeito arenoso proveniente da extração de itabiritos do QFe, Ávila (2018) dividiu seu trabalho basicamente em amostragem e preparação das alíquotas, análises do material e, por fim, a obtenção dos resultados e a realização de discussões. Ainda sobre o trabalho de Ávila (2018), são utilizadas diferentes amostras e diversas metodologias de análises, obtendo, assim, 7 diferentes amostras, denominadas de maneira geral como AM e seu respectivo sufixo para identificação, em um total de 142 amostras obtidas e divididas entre 7 utilizadas para peneiramento/cicloclassificação, 57 empregadas para análise química, 7 usadas para

granulometria a laser, 57 aproveitadas para AMA, 7 em picnometria de hélio e 7 para a análise em DRX, conforme a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Distribuição das amostras do trabalho de Ávila (2018).

Amostras	Peneiramento/ Cicloclassificação	Análise química	Granulometria a laser	AMA	Picnometria de Hélio	DRX	Total
AM1	1	9	1	9	1	1	22
AM2	1	8	1	8	1	1	20
AM3	1	8	1	8	1	1	20
AM4	1	7	1	7	1	1	18
AM5	1	9	1	9	1	1	22
AM6	1	8	1	8	1	1	20
AM7	1	8	1	8	1	1	20
TOTAL	7	57	7	57	7	7	142

Fonte: (ÁVILA, 2018)

Dos resultados obtidos, a fidelidade da técnica de AMA com o sistema TIMA foi aferida por meio da comparação de resultados obtidos com outras técnicas, tendo a sua distribuição apresentada na Tabela 4.3. É possível a sintetização dos resultados obtidos conforme apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Resultados das comparações entre as técnicas de caracterização mineral

Característica estudada	Técnica	Resultado
Identificação de Minerais Minoritários	DRX	Resultados mais precisos
Composição Química	FRX	Divergências inferiores a 2%
Densidade Estrutural	Picnometria de hélio	Resultados precisos
Dimensões das Partículas	Peneiramento	Assentimento com a técnica
Dimensões das Partículas	Cicloclassificação	Assentimento com a técnica

Fonte: Adaptado de Ávila (2018)

Sendo assim, pode-se considerar a caracterização mineralógica dos rejeitos de minério de ferro por meio da AMA uma metodologia eficiente, precisa e confiável na identificação e quantificação automatizada dos minerais contidos.

Vale salientar que este resultado obtido no trabalho de Ávila (2018) só é possível após um ajuste do banco de dados contidos no sistema TIMA, especificamente para a caracterização de rejeito de minério de ferro descrito anteriormente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros de análise são apresentados na Tabela 5.1 para as quatro pastilhas utilizadas, assim como a discriminação entre as A.L. #1 e A.L. #2, onde são destacados os distintos tempos de análises, em média mais de 2 horas contra 27 minutos, que refletem a fidelidade e qualidade entre os estudos e apontam para a análise A.L. #1 como a mais precisa, devido a sua baixa contagem e maior varredura.

Na comparação dos resultados obtidos com a A.L. #1 e A.L. #2, o número da incidência de Raios X por pixel é um importante indicador já que pode ser entendido como o número de eventos de Raios X em um determinado espaço de tempo para se obter um resultado espectral a partir da incidência do raio, sendo assim, há uma maior e mais precisa quantidade de partículas analisadas quanto menor for o número de eventos em um segundo, já que exige um maior tempo de análise na coleta das informações tendo mais chances de identificar diferentes fases (HRSTKA *et al.*, 2018). Isto é comprovado, conforme apresentado na Tabela 5.1, onde há um maior número de partículas analisadas em cada pastilha no primeiro método de análise quando comparado ao segundo método. Outros critérios adotados pelo software TIMA foram o espaçamento entre os pixels como $5\mu\text{m}$ e tamanho do campo de análise de $1500\mu\text{m}$. O mineral apresentado como Quartzo (Fe) foi caracterizado como partículas de Quartzo que possuem 2% ou mais de Ferro na sua composição.

Tescan (2017) informa que análises com fases não classificadas acima de 5% não são consideradas boas, porém, foi tomado como nível aceitável de partículas não classificadas, *Unclassified*, como no máximo 6% para validar o estudo, uma vez que o valor acima dos 5% estipulados por Tescan (2017) na Tabela 5.11 são explicados como falhas de preparação da amostra. Sendo assim, é possível observar que os valores apresentados na Tabela 5.2, Tabela 5.5, Tabela 5.8 e Tabela 5.11 não ultrapassam tal valor de 6%.

Tabela 5.1 - Parâmetros e medidas obtidas na análise do material.

	AN A.L. #1	A100# A.L. #1	A200# A.L. #1	A400# A.L. #1	AN A.L. #2	A100# A.L. #2	A200# A.L. #2	A400# A.L. #2
TIMA <i>sdetware</i>	1.6.68	1.6.68	1.6.68	1.6.68	1.6.68	1.6.68	1.6.68	1.6.68
Eventos raio x por segundo	1000	1000	1000	1000	200	200	200	200
Tamanho de campo	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Espaçamento entre pixels	5	5	5	5	5	5	5	5
Separação entre fases	10	10	10	10	10	10	10	10
Número de partículas	155150	83557	76625	692571	6118	3784	3533	31149
Campos escaneados	205	205	205	205	9	9	9	9
Duração total	2 horas 12 minutos 34 segundos	2 horas 4 minutos 24 segundos	2 horas 13 minutos 34 segundos	2 horas 8 minutos 2 segundos	30 minutos 52 segundos	26 minutos 30 segundos	26 minutos 30 segundos	28 minutos 24 segundos

5.1 Rejeito Arenoso Natural (AN)

A Figura 5.1 apresenta a imagem da pastilha da amostra AN, gerada no MEV, que foi objeto da análise. A Figura 5.2 apresenta o panorama das fases presentes na amostra (Figura 5.1a) de acordo com a característica mineralógica. A Figura 5.3 apresenta uma ampliação relativa ao campo delimitado em destaque na região quadriculada da Figura 5.1b, para melhor visualização das fases presentes.

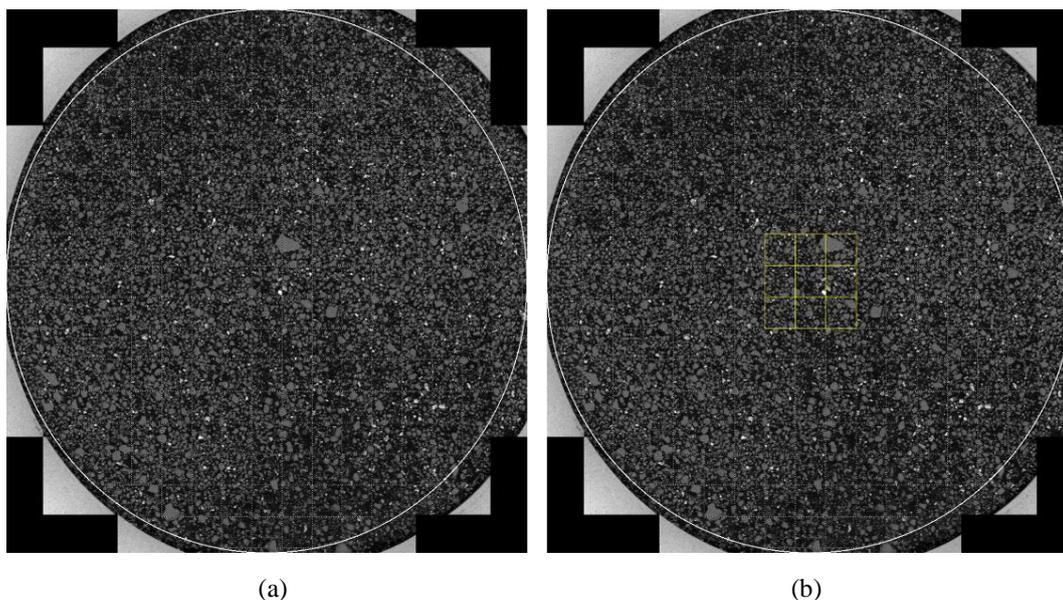


Figura 5.1 - (a) Fotografia gerada no MEV da pastilha AN (b) delimitação da região central analisada.

De modo geral, a pastilha que representa o rejeito natural não possui uma mineralogia complexa e sim uma predominância de fontes de Silício (Quartzo) e Ferro (Goethita e Hematita/Magnetita) conforme pode ser observado na Tabela 5.2. A visualização das fases está destacada em cores nas Figuras 5.2 e 5.3.

Os dados da Tabela 5.3 correspondem à distribuição granulométrica da amostra AN, com maior concentração de partículas entre 74 μ m e 297 μ m.

Tabela 5.2 - Fases minerais encontradas na pastilha AN.

Fases Primárias	FBNO Normal - A.L. #1	FBNO Normal - A.L. #2
	[%]	[%]
Quartzo	81,64	84,31
Goethita	8,61	8,49
Hematita/Magnetita	4,88	3,38
Quartzo (Fe)	1,23	2,01
Goethita terrosa	0,22	0,28
Greenalite	0,06	0,04
Aluminosos	0,06	0,03
Grunerite	0,05	0,03
Caulinita	0,05	0,02
Siderite	0,04	0,02
Caulinita (Fe)	0,01	0,01
Silico Aluminosos	0,01	0,01
Diversos	0,01	0,00
Não classificadas	3,06	1,32
Resto	0,06	0,04
Total	100,00	100,00

Tabela 5.3 - Distribuição granulométrica da pastilha AN.

FBNO Normal - A.L. #1 [μm]	Ponto Médio [μm]	Global [%]	Quartzo [%]	Goethita [%]	Hem/Mag [%]	Quartzo (Fe) [%]
<18.00		4,78	1,96	0,97	0,82	0,04
>=18.00<26.00	21,63	2,36	1,08	0,53	0,54	0,02
>=26.00<37.00	31,02	2,99	1,69	0,54	0,58	0,03
>=37.00<53.00	44,28	4,99	3,44	0,65	0,62	0,06
>=53.00<74.00	62,63	7,88	6,06	0,82	0,65	0,09
>=74.00<105.00	88,15	14,06	11,49	1,33	0,66	0,17
>=105.00<149.00	125,08	19,78	16,81	1,67	0,54	0,28
>=149.00<210.00	176,89	20,62	18,12	1,38	0,34	0,28
>=210.00<297.00	249,74	15,19	13,83	0,66	0,12	0,23
>=297.00<420.00	353,19	5,83	5,66	0,05	0,01	0,04
>=420.00<594.00	499,48	0,73	0,73	0,00	0,00	0,00
>=594.00<840.00	706,37	0,79	0,78	0,00	0,00	0,00
Total de partículas		100	81,64	8,61	4,88	1,23

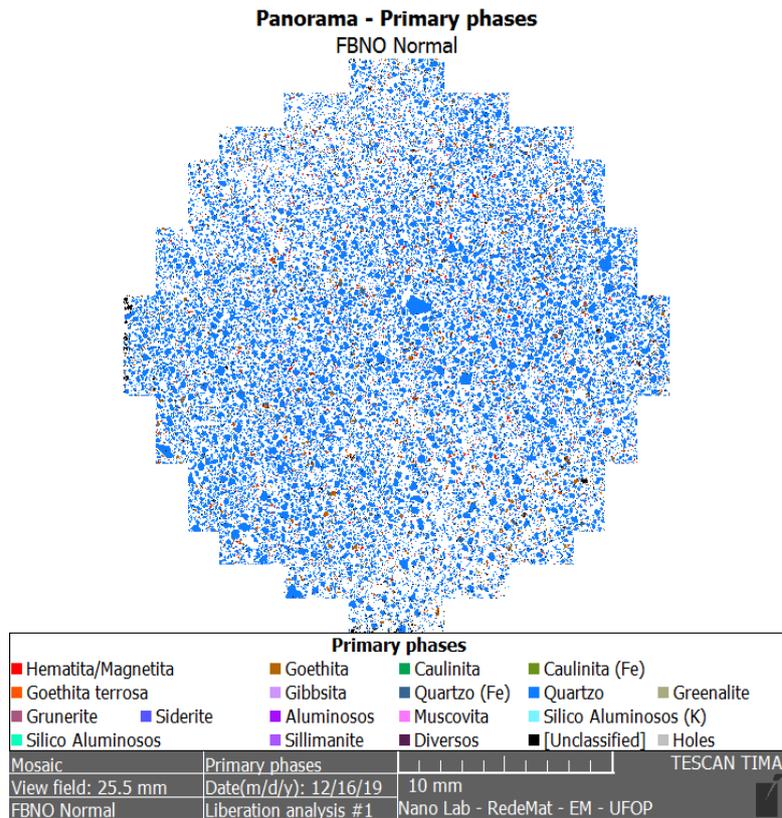


Figura 5.2 - Visualização da região analisada (Figura 5.1a) de acordo com a caracterização mineralógica da pastilha AN.

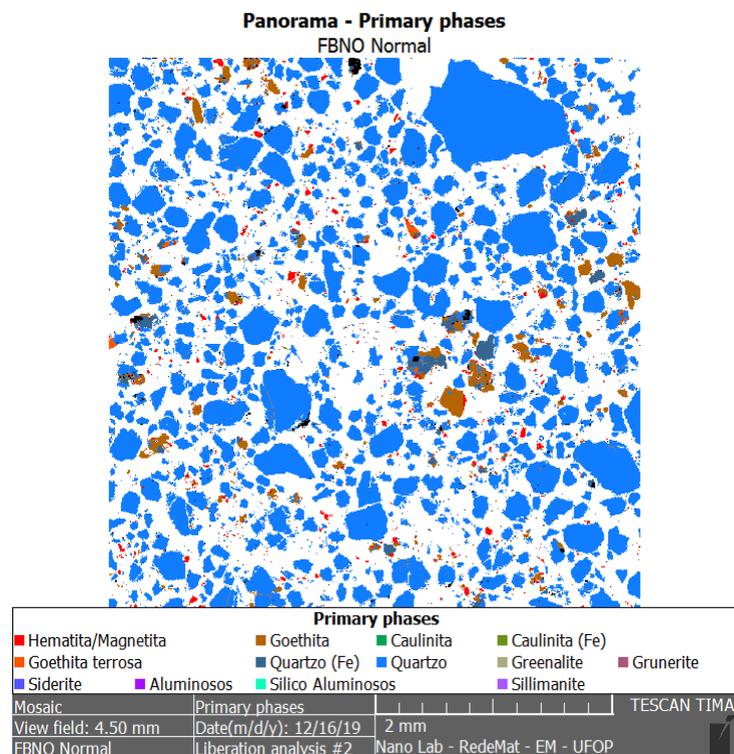


Figura 5.3 - Região central ampliada da área analisada (Figura 5.1b) de acordo com a caracterização mineralógica da pastilha AN.

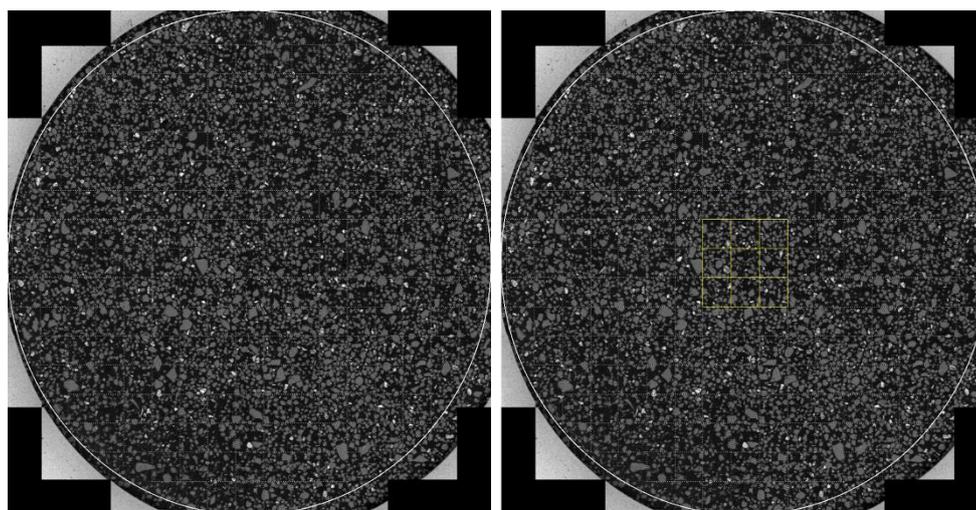
O grau de liberação dos minerais analisados, mostrado na Tabela 5.4 para a amostra AN, é considerado como elevado para o Quartzo, sendo possível inferir que quase todas as partículas estão liberadas uma vez que, como exemplo, 81,33% dos 84,31% do total de Quartzo encontra-se entre 90% a 100% liberados. Já para as partículas dos minerais provedores de ferro, não é possível afirmar que possuem um elevado grau de liberação uma vez que se encontram aglomerados.

Tabela 5.4 - Grau de liberação dos minerais da pastilha AN.

FBNO Normal - A.L. #1	Ponto Médio [%]	Volume % de Quartzo	Volume % de Goethita	Volume % de Hem/Mag	Volume % de Quartzo (Fe)
<10.00		0,13	0,43	0,38	0,14
>=10.00<20.00	15	0,12	0,77	0,22	0,17
>=20.00<30.00	25	0,23	0,16	0,05	0,09
>=30.00<40.00	35	0,22	0,29	0,05	0,23
>=40.00<50.00	45	0,06	0,15	0,12	0,40
>=50.00<60.00	55	0,20	0,44	0,17	0,16
>=60.00<70.00	65	0,16	0,42	0,09	0,05
>=70.00<80.00	75	0,55	1,50	0,17	0,00
>=80.00<90.00	85	1,31	0,88	0,41	0,33
>=90.00<=100.00	95	81,33	3,45	1,73	0,44
Total de partículas		84,31	8,49	3,38	2,01

5.2 Rejeito Arenoso Retido na Peneira de 100# (A100)

A Figura 5.4 apresenta a imagem da pastilha da amostra A100, gerada no MEV, que foi objeto da análise. Foi adotado o mesmo procedimento de análise executado para a amostra AN. Para a pastilha A100, a Tabela 5.5 mostra uma presença majoritária do mineral Quartzo e uma pequena porção de Goethita e Hematita/Magnetita. Com isso, pode-se dizer que nessa fração analisada não há uma mineralogia complexa podendo ser indicada para algum aproveitamento do silício contido. As Figuras 5.5 e 5.6 mostram a distribuição das fases apresentadas na Tabela 5.5.



(a)

(b)

Figura 5.4 - (a) Fotografia gerada no MEV da pastilha A100 (b) delimitação da região central analisada.

A distribuição granulométrica é apresentada na Tabela 5.6, com a concentração de partículas na faixa de 105 μ m a 297 μ m, um pouco inferior à amostra AN. A presença de uma quantidade relativa de partículas abaixo de 149 μ m (100#) pode ser justificada em função da preparação da amostra nas etapas de lixamento e polimento com quebra de partículas, assim como pela ineficiência do peneiramento.

Tabela 5.5 - Fases minerais encontradas na pastilha A100.

Fases Primárias	FBNO 100# - A.L. #1	FBNO 100# - A.L. #2
	[%]	[%]
Quartzo	86,52	86,53
Goethita	6,62	6,15
Hematita/Magnetita	2,52	2,01
Quartzo (Fe)	1,32	2,82
Goethita terrosa	0,21	0,62
Greenalite	0,07	0,49
Grunerite	0,05	0,02
Caulinita	0,03	0,03
Aluminosos	0,02	0,01
Gibbsita	0,01	0,01
Siderite	0,01	0,00
Calcita	0,01	0,00
Não classificadas	2,55	1,24
Resto	0,05	0,04
Total	100	100

Tabela 5.6 - Distribuição granulométrica da pastilha A100.

FBNO 100# - A.L. #1 [μm]	Ponto Médio [μm]	Global [%]	Quartzo [%]	Goethita [%]	Hem/Mag [%]	Quartzo (Fe) [%]
<18.00		2,36	1,58	0,11	0,07	0,02
>=18.00<26.00	21,63	0,99	0,77	0,07	0,05	0,01
>=26.00<37.00	31,02	1,07	0,87	0,08	0,06	0,01
>=37.00<53.00	44,28	1,64	1,32	0,14	0,10	0,02
>=53.00<74.00	62,63	2,79	2,26	0,23	0,16	0,04
>=74.00<105.00	88,15	6,33	5,19	0,57	0,33	0,05
>=105.00<149.00	125,08	17,37	14,54	1,53	0,67	0,21
>=149.00<210.00	176,89	28,34	24,27	2,26	0,69	0,46
>=210.00<297.00	249,74	23,36	20,64	1,42	0,34	0,4
>=297.00<420.00	353,19	10,91	10,3	0,21	0,04	0,1
>=420.00<594.00	499,48	3,94	3,9	0,00	0,00	0,00
>=594.00<840.00	706,37	0,89	0,89	0,00	0,00	0,00
Total de partículas		100	86,52	6,62	2,52	1,32

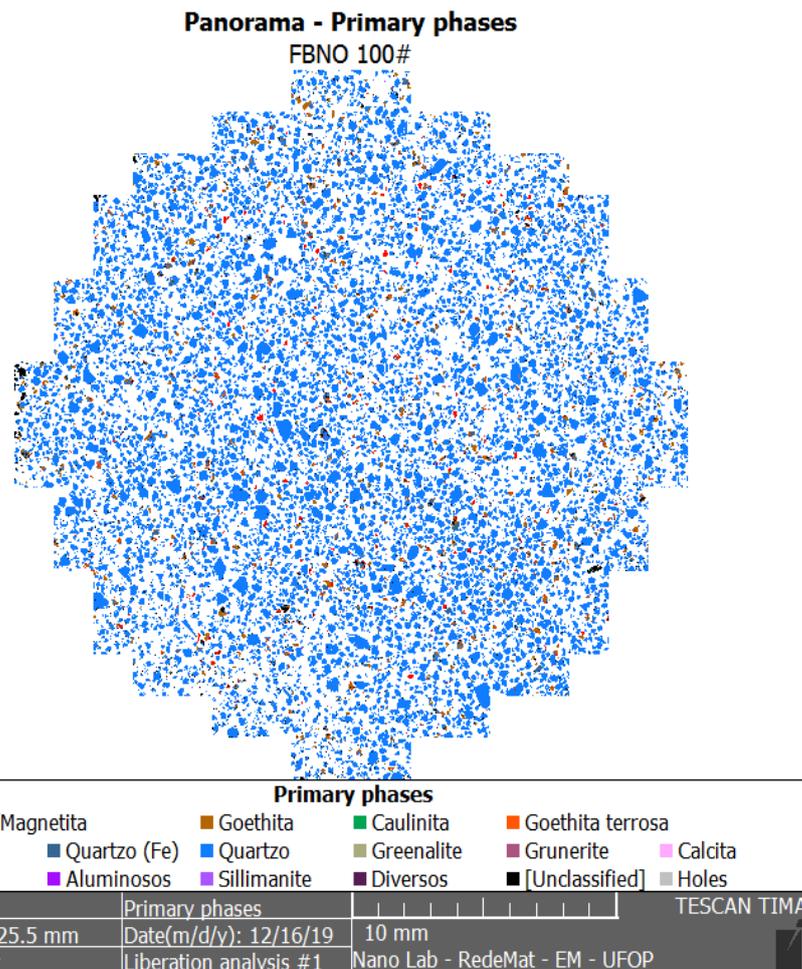


Figura 5.5 - Visualização da região analisada (Figura 5.4a) de acordo com a caracterização mineralógica da pastilha A100.

5.3 Rejeito Arenoso Retido na Peneira de 200# (A200)

A Figura 5.7 apresenta a imagem da pastilha da amostra A200, gerada no MEV, que foi objeto da análise. Foi adotado o mesmo procedimento de análise executado para a amostra AN.

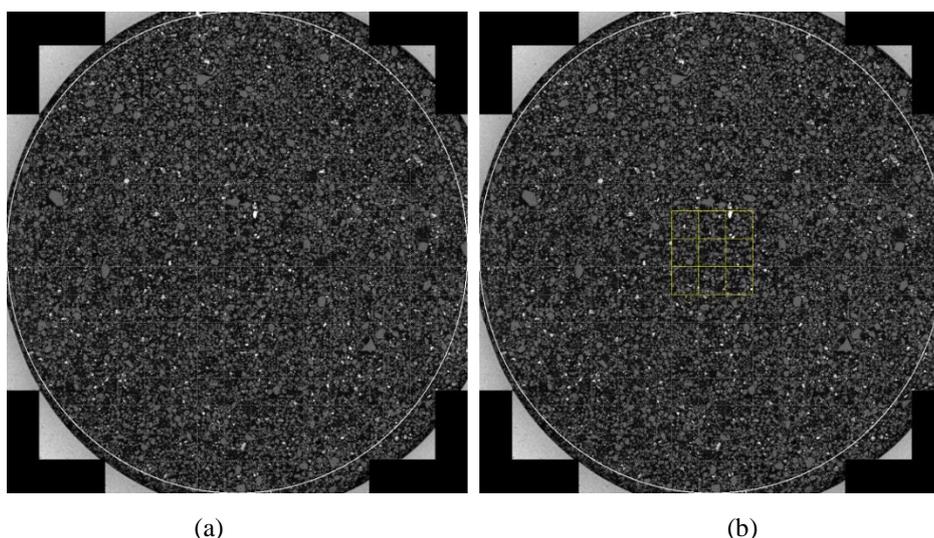


Figura 5.7 - (a) Fotografia gerada no MEV da pastilha A200 (b) delimitação da região central analisada.

Assim como a amostra A100, a pastilha A200 não possui uma mineralogia diversificada como apresentado na Tabela 5.8, mostrando um ligeiro aumento nos teores de minerais férricos em detrimento do Quartzo, principalmente.

Tabela 5.8 - Fases minerais encontradas na pastilha A200.

Fases Primárias	FBNO 200# - A.L. #1	FBNO 200# - A.L. #2
	[%]	[%]
Quartzo	85,64	85,74
Goethita	6,59	7,76
Hematita/Magnetita	4,24	3,84
Quartzo (Fe)	1,42	1,79
Goethita terrosa	0,17	0,05
Grunerite	0,05	0,04
Greenalite	0,04	0,03
Siderite	0,01	0,01
Caulinita	0,02	0,00
Diversos	0,01	0,00
Não classificadas	1,74	0,72
Resto	0,06	0,02
Total	100,00	100,00

A Tabela 5.9 apresenta a distribuição granulométrica da amostra A200 mostrando uma concentração de partículas na faixa de 74µm a 297µm.

Tabela 5.9 - Distribuição granulométrica da pastilha A200.

FBNO 200# - A.L. #1 [µm]	Ponto Médio [µm]	Global [%]	Quartzo [%]	Goethita [%]	Hem/Mag [%]	Quartzo (Fe) [%]
<18.00		1,71	1,17	0,11	0,13	0,01
>=18.00<26.00	21,63	0,76	0,54	0,07	0,09	0,01
>=26.00<37.00	31,02	1,20	0,87	0,10	0,18	0,01
>=37.00<53.00	44,28	2,81	2,23	0,18	0,30	0,02
>=53.00<74.00	62,63	7,90	6,40	0,58	0,64	0,09
>=74.00<105.00	88,15	18,18	15,06	1,38	1,12	0,24
>=105.00<149.00	125,08	23,15	19,87	1,66	0,90	0,33
>=149.00<210.00	176,89	21,48	18,61	1,59	0,58	0,36
>=210.00<297.00	249,74	14,26	12,90	0,66	0,25	0,20
>=297.00<420.00	353,19	5,96	5,48	0,24	0,04	0,13
>=420.00<594.00	499,48	2,17	2,10	0,02	0,00	0,03
>=594.00<840.00	706,37	0,42	0,42	0,00	0,00	0,00
Total de partículas		100,00	85,64	6,59	4,24	1,42

As Figuras 5.8 e 5.9 mostram a distribuição das fases na amostra A200 de acordo com a caracterização mineralógica.

A respeito do grau de liberação, assim como a pastilha A100, a amostra A200 tem um elevado percentual de liberação, como pode ser observado na Tabela 5.10, significando que as partículas se encontram quase que totalmente liberadas para o Quartzo. A mesma análise realizada para a amostra A100 é válida para a amostra A200, quanto aos minerais férricos. A visualização dos minerais férricos aglomerados, facilitada pela ampliação mostrada na Figura 5.9, indica uma menor liberação.

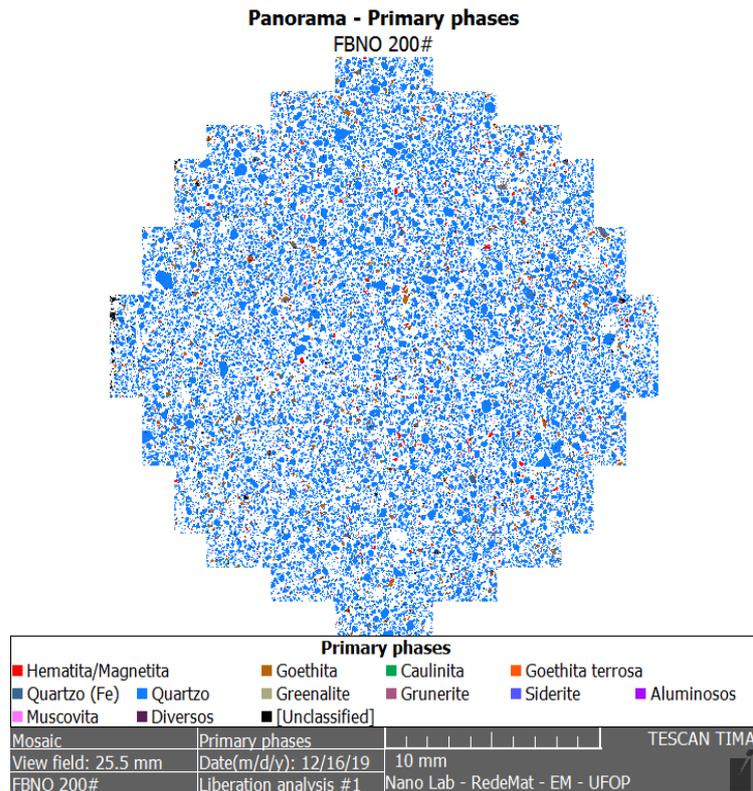


Figura 5.8 - Visualização da região analisada (Figura 5.7a) de acordo com a caracterização mineralógica da pastilha A200.

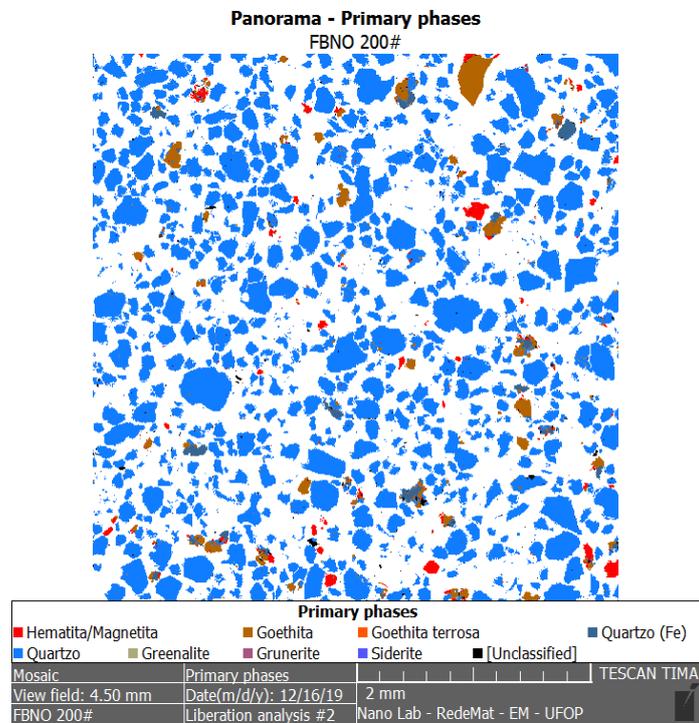


Figura 5.9 - Região central ampliada da área analisada (Figura 5.7b) de acordo com a caracterização mineralógica da pastilha A200.

Tabela 5.10 - Grau de liberação dos minerais da pastilha A200.

FBNO 200# - A.L. #1	Ponto Médio [%]	Volume % de Quartzo	Volume % de Goethita	Volume % de Hem/Mag	Volume % de Quartzo (Fe)
<10.00		0,13	0,32	0,54	0,08
>=10.00<20.00	15	0,14	0,26	0,10	0,18
>=20.00<30.00	25	0,30	0,43	0,04	0,35
>=30.00<40.00	35	0,10	0,14	0,13	0,16
>=40.00<50.00	45	0,05	1,05	0,01	0,20
>=50.00<60.00	55	0,06	0,54	0,04	0,18
>=60.00<70.00	65	0,09	0,69	0,24	0,00
>=70.00<80.00	75	0,26	0,01	0,27	0,27
>=80.00<90.00	85	1,60	1,08	0,17	0,12
>=90.00<=100.00	95	83,00	3,25	2,30	0,25
Total de partículas		85,74	7,76	3,84	1,79

5.4 Rejeito Arenoso Retido na Peneira de 400# (A400)

A Figura 5.10 apresenta a imagem da pastilha da amostra A400, gerada no MEV, que foi objeto da análise. Foi adotado o mesmo procedimento de análise executado para a amostra AN.

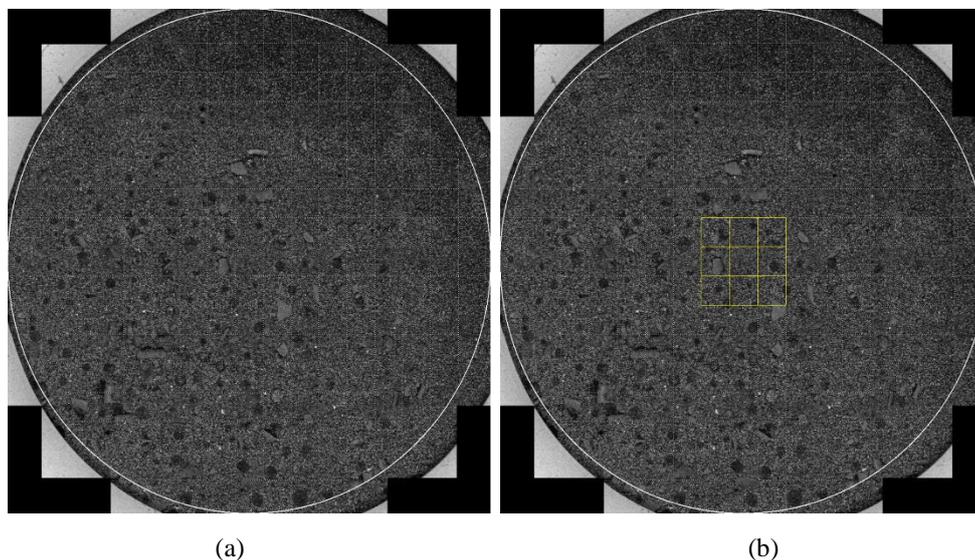


Figura 5.10 - (a) Fotografia gerada no MEV da pastilha A400 (b) delimitação da região central analisada.

É possível identificar poros formados na pastilha A400 a partir da Figura 5.10. Essa formação é proveniente da cura da resina epóxi utilizada na fabricação da pastilha e das etapas de preparação, já que, durante as etapas de desbaste e lixamento, pode ocorrer o arrancamento de partículas.

A Tabela 5.11 mostra um alto teor em Hematita/Magnetita, Goethita e um teor considerável de Quartzo (Fe), que, para um cálculo teórico, levando em consideração os teores em ferro das fases minerais de 70%, 63% e 2%, respectivamente, e analisando a A.L. #2, possui cerca de 48,4% de Ferro, representando, assim, um alto potencial de aproveitamento dessa fração granulométrica de rejeito.

O aumento na taxa de não classificados também é explicado devido à porosidade e à formação de aglomerados na amostra, porém não ultrapassou o limite aceitável estipulado de 6%. É notável o aumento da quantidade de fases minerais encontradas nessa faixa granulométrica, como pode ser observado na Tabela 5.11, mas não há um aumento considerável que afete a composição mineralógica básica encontrada em todas as amostras analisadas. A Goethita terrosa, segundo Santos e Brandão (2002), é uma variação da Goethita que apresenta teor de Fe_2O_3 predominante com teores medianos de Al_2O_3 menores que 5,0% e SiO_2 com de 4,0%.

Tabela 5.11 - Fases minerais encontradas na pastilha A400.

Fases Primárias	FBNO 400# - A.L. #1 [%]	FBNO 400# - A.L. #2 [%]
Hematita/Magnetita	45,87	49,70
Goethita	25,52	21,54
Quartzo	17,74	19,09
Quartzo (Fe)	2,15	3,14
Goethita terrosa	1,23	1,46
Greenalite	0,30	0,39
Siderite	0,45	0,20
Grunerite	0,25	0,33
Caulinita	0,22	0,25
Aluminosos	0,24	0,08
Caulinita (Fe)	0,12	0,11
Sílico Aluminosos	0,04	0,05
Sílicos	0,03	0,03
Sílico Aluminosos (Mg)	0,02	0,03
Sílico Aluminosos (K)	0,02	0,03
Almandine	0,02	0,02
Sillimanite	0,04	0,01
Oxidos (Fe) (Mn)	0,01	0,02
Almandine- Ferrogredrite	0,01	0,01
Não classificadas	5,65	3,46
Resto	0,06	0,05
Total	100,00	100,00

A Tabela 5.12 apresenta a distribuição granulométrica da amostra A400 mostrando uma concentração de partículas menores que de 37 μ m.

Tabela 5.12 - Distribuição granulométrica da pastilha A400.

FBNO 400# - A.L. #1 [μ m]	Ponto Médio [μ m]	Global [%]	Quartzo [%]	Goethita [%]	Hem/Mag [%]	Quartzo (Fe) [%]
<18.00		31,03	3,46	9,41	14,08	0,50
>=18.00<26.00	21,63	23,94	2,32	7,03	13,05	0,23
>=26.00<37.00	31,02	22,62	2,47	5,99	13,09	0,19
>=37.00<53.00	44,28	8,41	1,24	1,90	4,82	0,10
>=53.00<74.00	62,63	2,25	1,27	0,26	0,51	0,08
>=74.00<105.00	88,15	2,78	2,14	0,18	0,13	0,17
>=105.00<149.00	125,08	3,32	2,56	0,20	0,12	0,26
>=149.00<210.00	176,89	2,11	1,43	0,12	0,03	0,27
>=210.00<297.00	249,74	1,41	0,70	0,10	0,01	0,11
>=297.00<420.00	353,19	0,96	0,08	0,13	0,01	0,13
>=420.00<594.00	499,48	0,83	0,05	0,13	0,01	0,08
>=594.00<840.00	706,37	0,34	0,01	0,05	0,00	0,03
>=840.00<1190.00	999,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
>=1190.00<1680.00	1413,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
>=1680.00<2360.00	1991,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total de partículas		100,00	17,74	25,52	45,87	2,15

Na Figura 5.11 tem-se a visualização da região analisada de acordo com a caracterização mineralógica da pastilha A400. Na Figura 5.11 e Figura 5.12 é notável as diferenças entre as composições mineralógicas quando comparadas às pastilhas A100 e A200. Ocorre uma inversão de minerais em maiores proporções de Quartzo para Hematita/Magnetita e Goethita, indicando, assim, um maior teor em ferro nessa fração de granulometria.

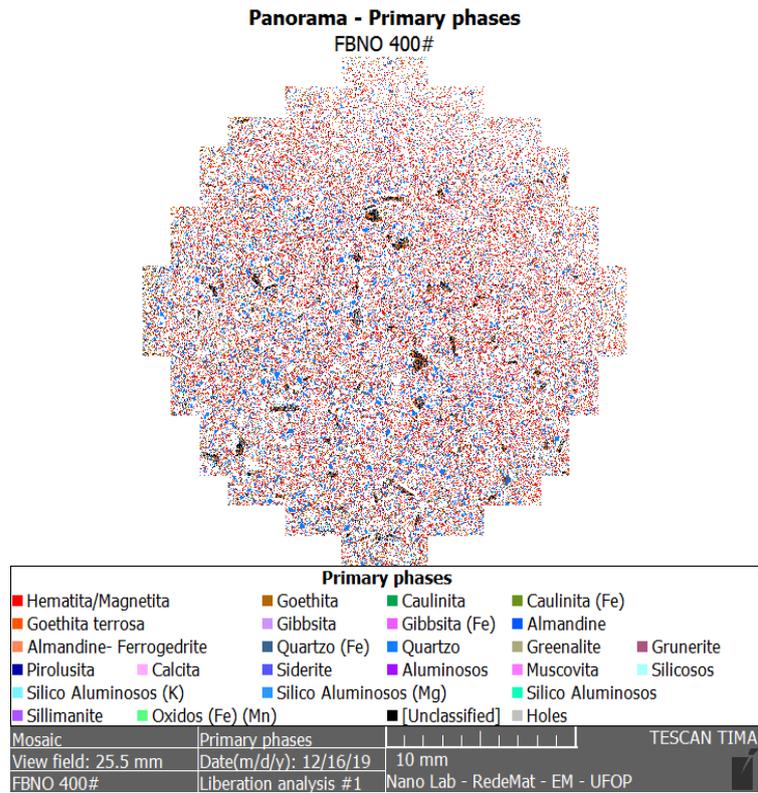


Figura 5.11 - Visualização da região analisada (Figura 5.10a) de acordo com a caracterização mineralógica da pastilha A400.

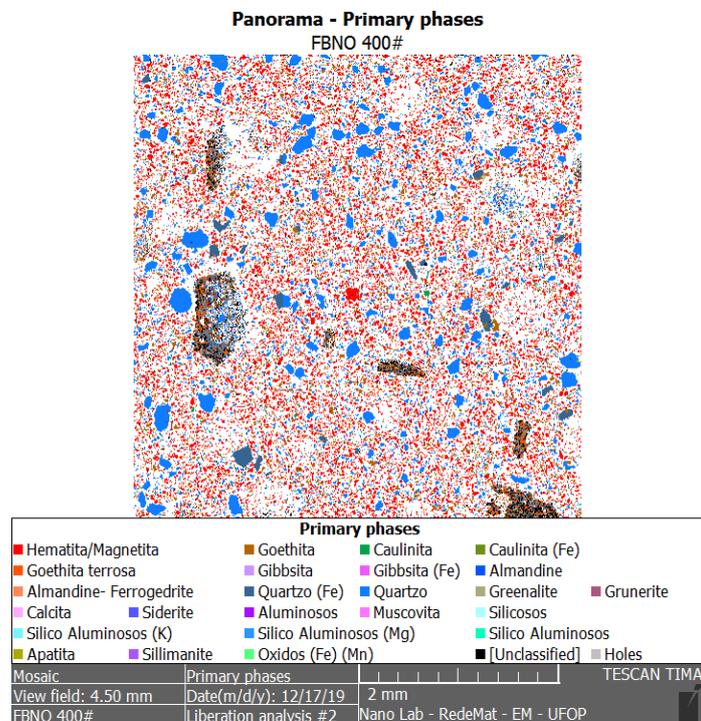


Figura 5.12 - Região central ampliada da área analisada (Figura 5.10b) de acordo com a caracterização mineralógica da pastilha A400.

Na Figura 5.13 é possível observar que houve um desenvolvimento de aglomerados e poros na amostra, sendo justificada em função da preparação da pastilha, uma vez que a adição da resina pode ocasionar no acúmulo de partículas em determinadas regiões.

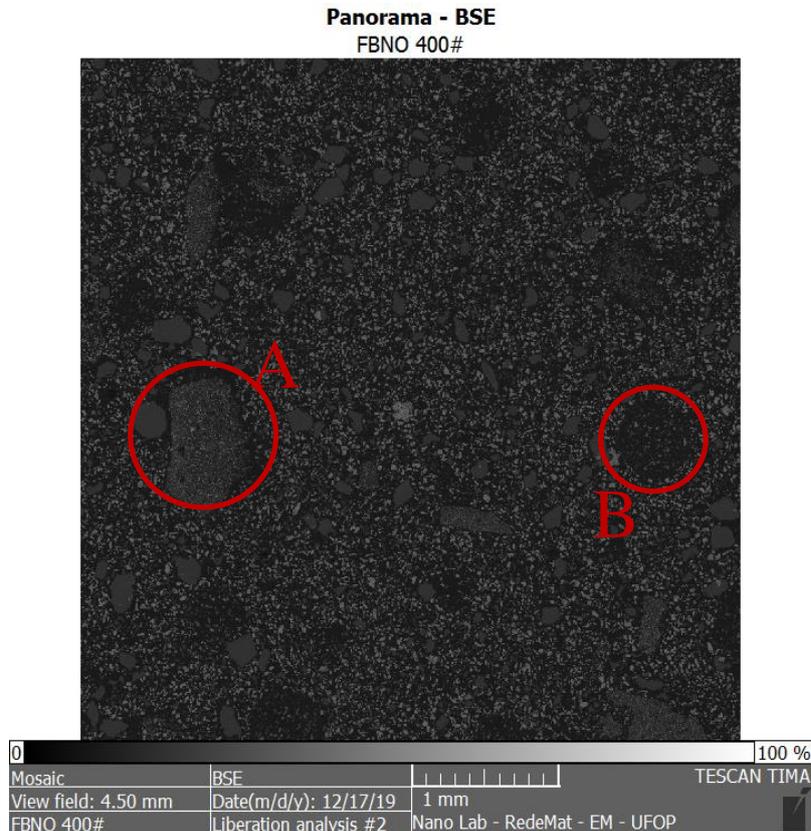


Figura 5.13 - Figura enfatizando os aglomerados e poros formados na pastilha A400.
A - Formação de um aglomerado. B - Formação de um poro.

A liberação das fases da pastilha A400 é mostrada na Tabela 3.1, sendo identificado que cerca de 85% das partículas de Quartzo encontram-se liberadas. A Goethita e o Quartzo (Fe) possuem cerca de 45% de liberação e a Hematita/Magnetita possui, aproximadamente, 63% das suas partículas livres de outras fases minerais.

Tabela 5.13 - Grau de liberação dos minerais da pastilha A400.

FBNO 400# - A.L. #1	Ponto Médio [%]	Volume % de Quartzo	Volume % de Goethita	Volume % de Hem/Mag	Volume % de Quartzo (Fe)
<10.00		0,36	0,82	0,28	0,37
>=10.00<20.00	15	0,16	1,61	0,34	0,34
>=20.00<30.00	25	0,19	1,34	0,58	0,10
>=30.00<40.00	35	0,18	1,08	0,71	0,06
>=40.00<50.00	45	0,14	1,03	1,09	0,09
>=50.00<60.00	55	0,21	1,40	1,95	0,07
>=60.00<70.00	65	0,40	1,32	2,63	0,17
>=70.00<80.00	75	0,41	1,53	3,98	0,14
>=80.00<90.00	85	0,78	1,69	6,72	0,38
>=90.00<=100.00	95	16,27	9,71	31,41	1,42
Total de partículas		19,09	21,54	49,70	3,14

Os agregados formados na pastilha podem explicar um menor grau de liberdade encontrado para as fases ferrosas, uma vez que, ao observar a Figura 5.12 tem-se a presença de aglomerados que são responsáveis por diminuir o percentual de liberação dessas fases devido à presença simultânea de outros minerais ou até mesmo as fases não identificadas

5.5 Observações Gerais

5.5.1 Análise mineralógica

Para a análise geral das fases minerais contidas, a Figura 5.14 condensa os resultados obtidos no TIMA em formato gráfico para melhor visualização e interpretação dos dados.

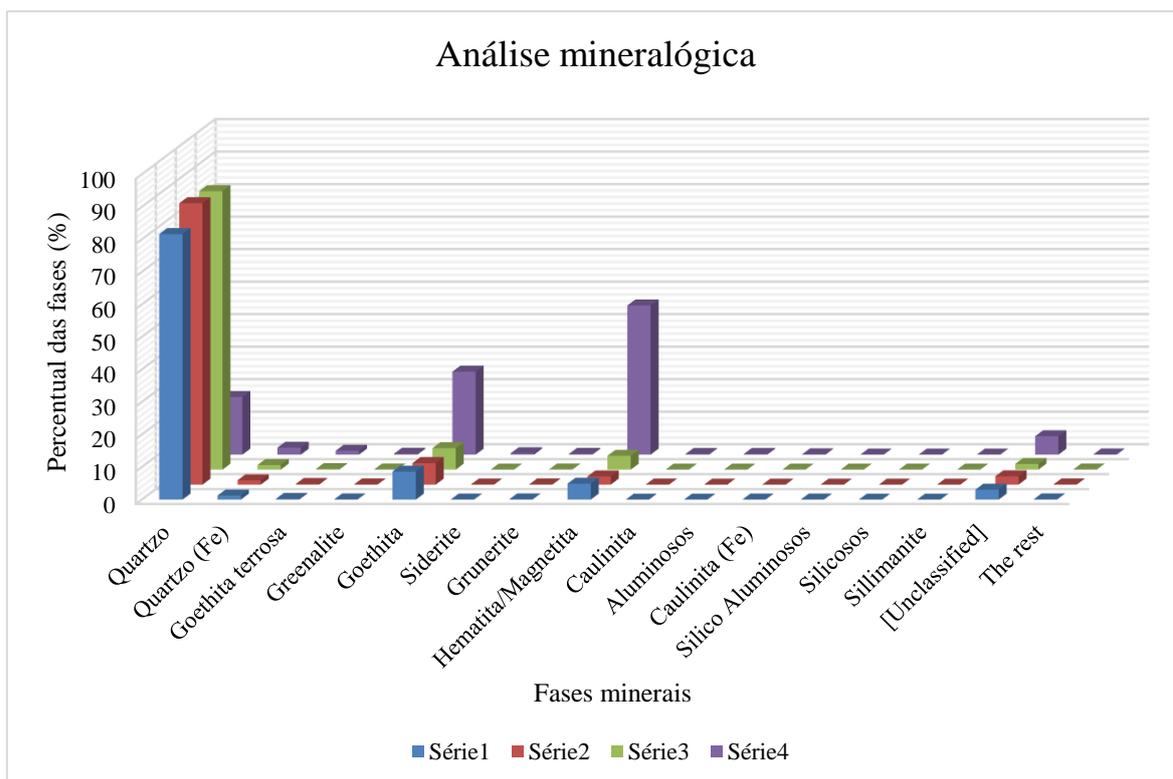


Figura 5.14 - Análise mineralógica combinada das amostras.

De modo geral, a mineralogia básica encontrada em todas as amostras, AN, A100, A200 e A400, são formadas por Quartzo, Hematita/Magnetita, Goethita e Quartzo (Fe) em diferentes percentuais. Apesar da constituição básica das fases presentes nas amostras AN, A100 e A200 serem basicamente formadas por Quartzo, a amostra A400 apresenta maior presença da fase Hematita/Magnetita e Goethita com percentual superior ao Quartzo encontrado na mesma.

5.5.2 Análise granulométrica

A Figura 5.15 condensa os dados de todas as amostras, em formato gráfico, e exhibe o tamanho das partículas levando em consideração a sua dimensão global identificada e calculada pelo TIMA sendo assim possível a obtenção aproximada dos respectivos D_{50} , sendo definido como o tamanho que correspondente a 50% do tamanho das partículas. Para a amostra de rejeito arenoso natural, AN, se obtém um D_{50} de 190 μm , 195 μm para A100, 260 μm para A200 e para A400 um D_{50} de 34 μm . É possível observar a semelhança entre as curvas A200 e AN indicando que a constituição do tamanho geral das partículas se concentra na amostra A200.

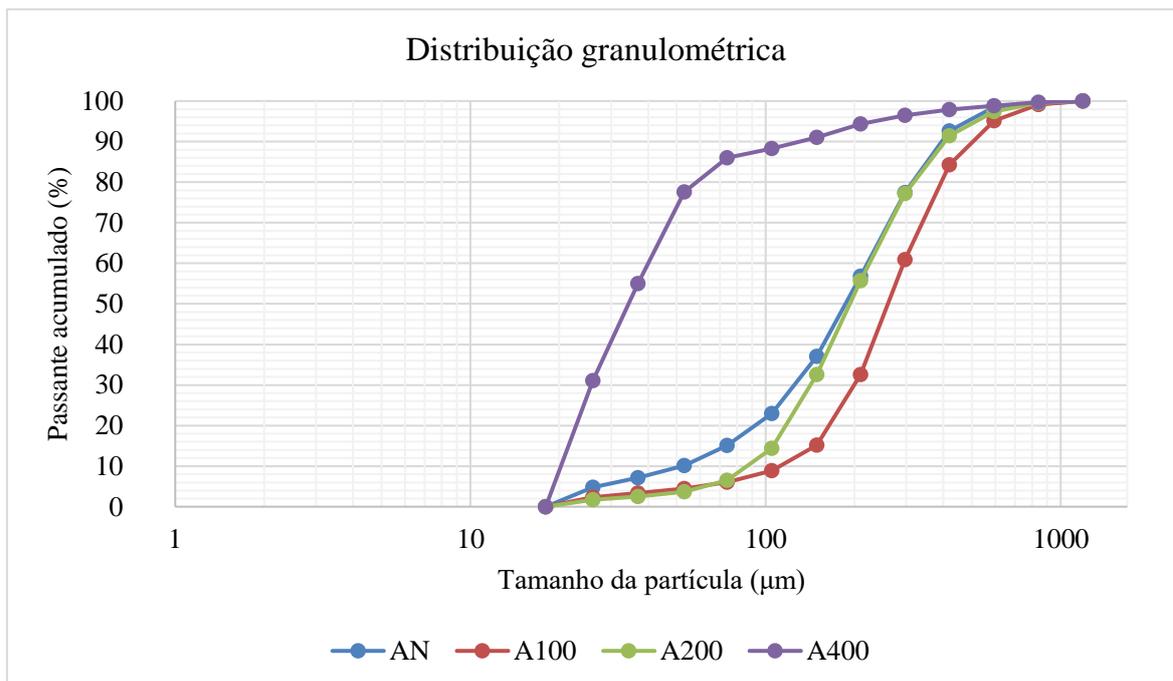


Figura 5.15 - Distribuição do tamanho das partículas nas amostras AN, A100, A200 e A400.

As amostras de 100#, 200# e 400#, com seus respectivos tamanhos de aberturas 147μm, 74μm e 38μm, quando analisados com a Tabela 5.6, Tabela 5.9, Tabela 5.12 e a Figura 5.15, se pode obter informações a respeito da eficiência do peneiramento realizado nas etapas de beneficiamento do rejeito. O peneiramento realizado na malha de 100# se mostra ineficiente, uma vez que a amostra A200 contém um percentual global superior a 40% de partículas maiores que o tamanho da malha de 147μm. O mesmo não ocorre na amostra A400, que apresenta 88% das suas partículas com frações menores que 74μm, indicando assim um peneiramento eficiente na malha 200#, já que reteve as partículas maiores que 74μm.

Uma explicação para o ineficiente peneiramento de 100# seria o tamanho não uniforme das partículas irregulares podendo assim atravessar a malha e serem identificadas pelo TIMA em posições diferentes que possuem maior dimensão, ou até mesmo poderia estar em aberturas maiores que 147μm causadas pelo desgaste da malha, o que aumenta assim a probabilidade de partículas maiores passarem.

5.5.3 Análise de liberação

Para uma análise de liberação de maneira generalizada e em conjunto de todas as amostras, foram realizados espectros de liberação para as principais fases encontradas na análise mineralógica e apresentada em formas gráficas sendo elas à Figura 5.16 que diz respeito ao

espectro de liberação referente a fase Hematita/Magnetita, a Figura 5.17 referente a fase Goethita e a Figura 5.18 para a fase Quartzo.

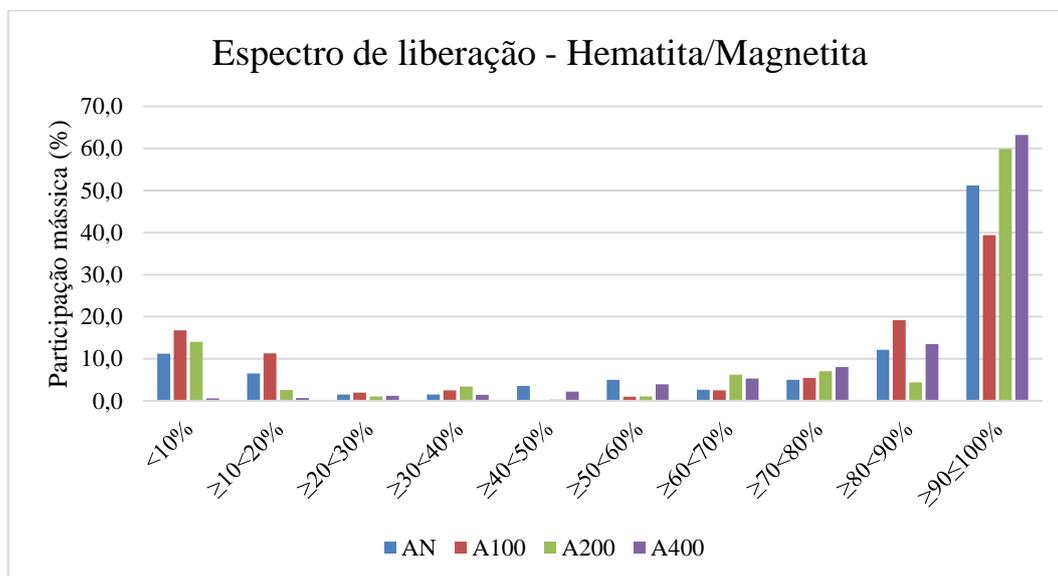


Figura 5.16 - Espectro de liberação da Hematita/Magnetita.

A presença de partículas com percentual de liberação superior a 90% para a fase Hematita/Magnetita se encontra em maior participação mássica na amostra A400 e A200. Entretanto a amostra A200 também apresenta um percentual baixo de liberação inferior a 10% que constitui aproximadamente 15% da sua participação mássica o que representa uma diversificação entre a liberdade das partículas conforme a Figura 5.16.

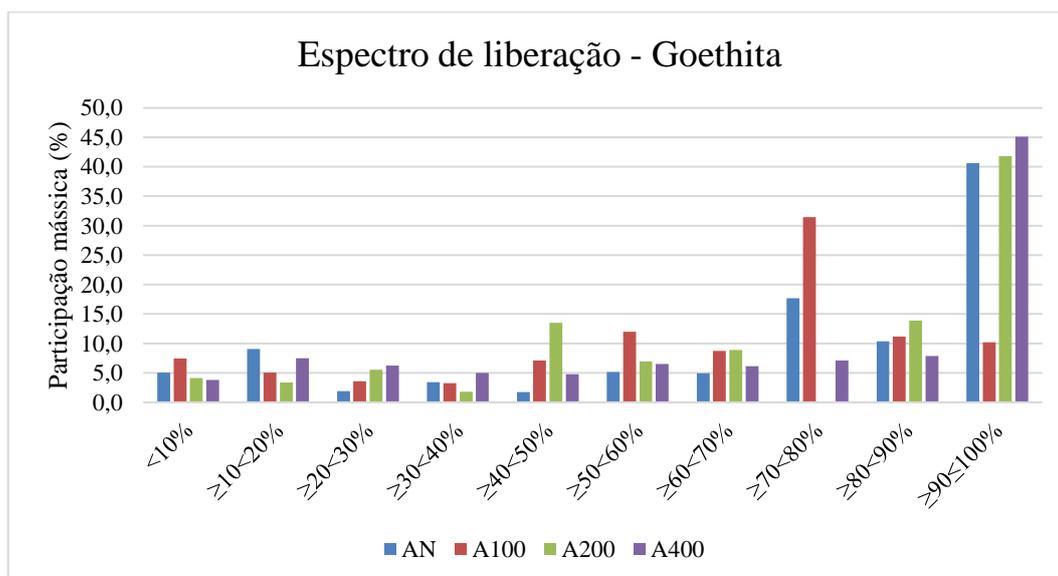


Figura 5.17 - Espectro de liberação da Goethita.

A partir da Figura 5.17 se pode identificar uma maior concentração de partículas mistas, que possuem mais de uma associação mineral, sendo necessária mais etapas de cominuição para a liberação dessa fase.

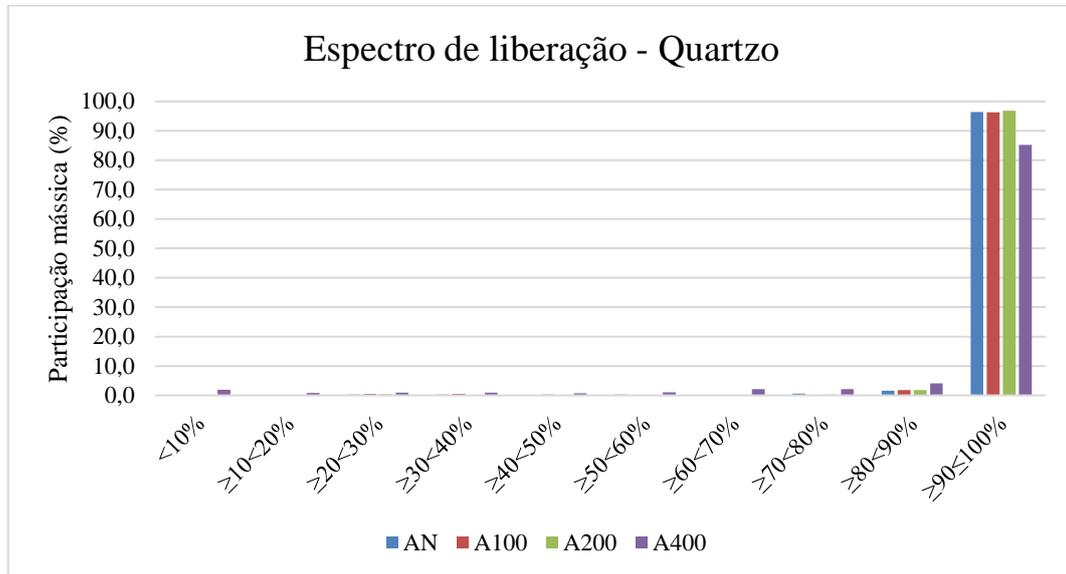


Figura 5.18 - Espectro de liberação do Quartzo.

Para a análise do Quartzo, a Figura 5.18 indica um elevado percentual de partículas consideradas liberadas, acima de 90%, indicando assim que há uma possível associação entre as outras partículas que não seja necessariamente com a fase Quartzo. Essa análise pode impactar em um possível reprocessamento do rejeito, uma vez que a etapa de flotação se utiliza da separação das fases por meio da separação silicosa das fases ferrosas e esta fase já estando consideravelmente liberada, se faz necessário o estudo de uma técnica ou metodologia diferente para a liberação das partículas ferrosas associadas entre si.

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos revelam uma mineralogia não tão complexa, composta basicamente por Quartzo, Goethita e a classificada Hematita/Magnetita, variando principalmente em suas proporções em cada pastilha. O maior destaque vai para a inversão na amostra A400 das frações dos minerais provedores de ferro com o Quartzo, quando comparada às outras amostras analisadas, contendo aproximadamente 70% desses minerais onde, em média, há cerca de 10% de Goethita e Hematita/Magnetita combinadas nas pastilhas AN, A100 e A200.

O grau de liberação obtido em todas as amostras analisadas apresenta um elevado percentual de mais de 96% para o Quartzo, exceto para a amostra A400, que apresenta 85% de liberação para esse mineral, sendo explicada tal diminuição de fração devido a formação dos aglomerados e poros. Os minerais provedores de ferro possuem uma associação entre si o que diminui consideravelmente a liberdade de cada fase possuindo as mais variadas faixas de liberdade.

A Análise Mineralógica Automatizada mostrou-se uma ferramenta confiável devido ao percentual de partículas analisadas com sucesso, obtendo-se uma fração de partículas não identificadas abaixo dos 6% estipulado como confiável, e identificando e analisando corretamente as fases presentes nas pastilhas.

O percentual de recuperação do Ferro na pastilha A400 mostrou-se promissor, uma vez que possui cerca de 48% em Ferro na pastilha, podendo ser aproveitado como fonte ferrífera após um estudo de metodologias para a extração dos minerais Goethita, Hematita e a Magnetita.

O tempo de análise se mostra eficaz e bastante automatizado, uma vez que após preparadas as amostras, leva cerca de 2 horas até ter o seu completo relatório gerado pelo TIMA, sendo assim, uma veloz e poderosa ferramenta no que diz respeito ao tempo gasto nas análises minerais, podendo ser aplicável até como controle das etapas contidas nos processos de beneficiamento de maneira rápida quando comparada aos métodos utilizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSIS, D. M.; QUEIROGA, F. O. C. S.; MENDES, J. C. Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro na fabricação de tijolos maciços. **Agora - A revista científica da FASAR**, v. 3, n. 1, p. 191-200, jul. 2018.

ÁVILA., K. S. P. **Caracterização mineralógica de rejeitos de flotação de itabiritos do Quadrilátero Ferrífero utilizando mineralogia quantitativa eletrônica**. 2018. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2018.

BARTHELMY, D. **Mineralogy Database**. Disponível em <<http://webmineral.com>>. Acesso em: 30 out. 2020.

CARRISSO, R. C. C.; CORREIA, J. C. G. Classificação e Peneiramento. In: **Tratamento de minérios**. 4. ed. Rio de Janeiro: CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL - CETEM, 2004. v. 4, p. 197-238.

CAVALLINI, M. **Mais cara, mineração a seco é alternativa a barragens, apontam especialistas**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2019/02/01/mais-cara-mineracao-a-seco-e-alternativa-a-barragens-apontam-especialistas-entenda.ghtml>>. Acesso em: 18 out. 2019.

CHAVES, A. P.; LEAL FILHO, L. S.; BRAGA, P. F. A. Flotação. In: **Tratamento de minérios**. 6.ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral - CETEMIC, 2018. Cap.10, p. 405-459.

CORREIA, J. C. G. Classificação e Peneiramento. In: **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM - Centro de Tecnologia Mineral, 2010. p. 257-297.

COSTA, M. M. D.; FERREIRA FILHO, O. B.; SANTOS, A. A. Principais substâncias metálicas. **Anuário Mineral Brasileiro**, v. 1, 2018. , 44p.

DANA, J. D. **Manual de Mineralogia**. Rio de Janeiro: 1ª ed. Livros Técnicos e Científicos. Editora S.A., 1978, 642 p.

DELBONI JUNIOR, H. Cominuição. In: **Tendências tecnológicas Brasil 2015: geociências e tecnologia mineral**. Rio de Janeiro: CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL - CETEM, 2007. p. 108-136.

DORR II, J. V. N. **Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero Minas Gerais. Brazil**. Washington, D.C. United States: Geological Survey, 1969. 117p.

ESPÓSITO, T. D. J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeitos construídas por aterro hidráulico**. 2000. 363 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2000.

FANDRICH, R. GU, Y; BURROWS, D; MOELLER, K. Modern SEM-based mineral liberation analysis. **Internatxional Journal of Mineral Processing**, v.84, p.310-320, 2007.

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

FIGUEIREDO, R. A. M. **Caracterização de areias silicosas e de rejeitos de mineração para uso em processo de fundição**. 2017. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

FONTES, W. C.; FONTES, G. G.; COSTA, E. C. P.; MENDES, J. C.; SILVA, G. J. B.; PEIXOTO, R. A. F. Rejeito de barragem de minério de ferro na produção de ladrilhos hidráulicos: uma análise de valor para sustentabilidade de edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 4, p. 395-412, dez. 2018.

GAUDIN, A. M. **Principles of mineral dressing**. New York: Mc Graw Hill, 1939. p. 554.

GU, Y. Automated Scanning Electron Microscope Based Mineral Liberation Analysis. An Introduction to JKMRC/ FEI Mineral Liberation Analyser, In.: **Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering**, USA, v. 2, p. 33-41, 2003.

GUEDES, G. B., SCHNEIDER, C. L. **Disposição de rejeitos de mineração: as opções tecnológicas para a redução dos riscos em barragens**. Rio de Janeiro: CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL - CETEMIC, 2018. 26p.

GUZZO, P. L. Quartzo. In: **Rochas e Minerais Industriais**. 2^a ed. Rio de Janeiro: CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL - CETEM, 2008. p. 681-721.

HRSTKA, T.; GOTTLIEB, P.; SKÁLA, R.; BREITER, K.; MOTL, D. Automated mineralogy and petrology: applications de TESCAN Integrated Mineral Analyzer (TIMA). **Journal of Geosciences**, v. 63, n. 1, p. 47-63, 6 mar. 2018. Disponível em: http://www.jgeosci.org/content/jgeosci.250_hrstka.pdf. Acesso em: 19 abr. 2021.

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. Brasília, 2016. 128p.

JAMES, L. Sedimentary facies de iron-formation. **Economic Geologists**, v. 49, p. 235-293, 1954.

KLEIN, C.; HURLBUT JR., C. S. **Manual de mineralogy**. 21. ed. New York: John Wiley. 681 p. 1993.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento De Minerios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL - CETEM, 2010. 965 p.

LV, X.; SHEN, W.; WANG, L.; DONG, Y.; ZHANG, J.; XIE, Z. A comparative study on the practical utilization de iron tailings as a complete replacement de normal aggregates in dam concrete with different gradation. **Journal of Cleaner Production**, China, v. 211, p. 704-715, Feb. 2019.

NAVARRO, G. R. L B.; ZANARDO, A.; MONTIBELLER, C. C.; LEME, T. G. **GOETHITA**. São Paulo: Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert, 2017. Disponível em: <https://museuhe.com.br/mineral/goethita-goethite/>. Acesso em: 26 dez. 2019.

NAVARRO, G. R. L B.; ZANARDO, A.; MONTIBELLER, C. C.; LEME, T. G. **MAGNETITA**. São Paulo: Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert, 2017. Disponível em: <https://museuhe.com.br/mineral/magnetita-magnetite/>. Acesso em: 28 dez. 2019.

NEUMANN, R., SCHNEIDER, C. L., NETO, A. A. Caracterização Tecnológica de minérios Parte II. In: LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., ALMEIDA, S. L. M. **Tratamento de minério**, Centro de Tecnologia Mineral - CETEM, 5ª edição. Capítulo 3, p. 85-139. Rio de Janeiro, 2010.

NUNES, D. G. Aplicação da flotação em coluna na concentração de minério de ferro de baixo teor. In: **JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA**, p. 18. Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral - CETEM, 2010.

NOCITI, D. M. **Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelhas**. 2011. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2011.

PRESOTTI, E. S. **Influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro**. 2002. 153 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2002.

QUARESMA, L. F. **Ferro - Balanço Mineral Brasileiro**. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-ferro>>. Acesso em: 21 ago. 2019

RABOCKAI, T. **Físico-Química de Superfícies**. Instituto de Química da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1979. 128 p.

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JR., F.; GUIMARÃES, M. L. V. Um Modelo Para a Evolução Microestrutural Dos Minérios De Ferro Do Quadrilátero Ferrífero. Parte I - Estruturas E Recristalização. **Revista Geonomos**. v. 1. p. 64-84. Fev. 1993.

SAMARCO S. A. **Aproveitamento de rejeitos**. Disponível em: <https://www.samarco.com/aproveitamento-de-rejeitos>. Acesso em: 14 out. 2019.

SAMPAIO, N. P. **Construção de banco de dados de minerais brasileiros para Analisador Mineral Integrado, acoplado a Sistema MEV-EDS automatizado**. 2016. 261 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2016.

SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B.; LINS, F. F. **Usinas de beneficiamento de minérios do Brasil**. 1. ed. Rio de Janeiro: CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL - CETEM, 2001. 398 p.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais**. 1. ed. Rio de Janeiro: CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL - CETEM, 2007. p. 570.

SANTANA, P. P. **Flotação direta de minério de ferro itabirítico**. 2012. 162f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) - UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2012.

SANTOS, L. D.; BRANDÃO, P. R. G. Estudos mineralógicos e microestruturais em amostras de minérios de ferro da mina de Alegria - MG. **XIX ENTMME - Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**. Recife, p. 110-116, 2002.

SILVA, F. L. **Aproveitamento e reciclagem de resíduos da concentração de minério de ferro na produção de Pavers e cerâmica**. 126 f. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2014.

SOARES, L. Barragem de rejeitos. In: **Tratamento de minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL - CETEM, 2010. cap 19. p. 831-888.

SOUZA, J. V. S.; GUEDES, J. S. M. O rejeito de minério de ferro e suas aplicações na construção civil. In: IX Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental, XV Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Ambiental e III Fórum Latino Americano de Engenharia e Sustentabilidade, num. 2, 2017. **Anais eletrônicos...** Belo Horizonte: 2017. p. 14. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/o-rejeito-de-minerio-de-ferro-e-suas-aplicaes-na-construo-civil-26814>. Acesso em: 24 out. 2019.

TESCAN. **TIMA User's Manual Release 1.5.36**. Brno, TESCANA Brno S.R.O. 2017.