



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS – EM
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



BÁRBARA DORNELAS DE ASSIS

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE UMA PILHA DE ESTOQUE DE MINÉRIO
HEMATÍTICO PARA PRODUÇÃO DE UM PELLET FEED

Ouro Preto

2019

BÁRBARA DORNELAS DE ASSIS

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE UMA PILHA DE ESTOQUE DE MINÉRIO
HEMATÍTICO PARA PRODUÇÃO DE UM PELLET FEED

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de graduação em Engenharia de Minas.

Orientadora: Prof. Dra. Érica Linhares Reis

Ouro Preto

2019

A848c Assis, Bárbara Dornelas.
Caracterização tecnológica de uma pilha de estoque de minério hematítico para produção de um pellet feed [manuscrito] / Bárbara Dornelas Assis. - 2019.

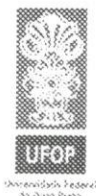
57f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Érica Linhares Reis.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Beneficiamento de minério. 2. Separação magnética de minério. I. Reis, Érica Linhares. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 622.778



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 24 dias do mês de janeiro de 2019, às 14h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado “*AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE UM PELLET FEED A PARTIR DE PILHAS DE ESTOQUE DE MINÉRIO HEMATÍTICO*”, pela aluna **Bárbara Dornelas de Assis**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof.^a Dr.^a Érica Linhares Reis (Orientadora)**, **Eng.^a de Minas Mariana Caroline Andrade Silva** e **Prof. M. Sc. Marcus Alexandre de Carvalho Winitkowski da Silveira**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela aprovação... da candidata, com a nota 7,5... concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

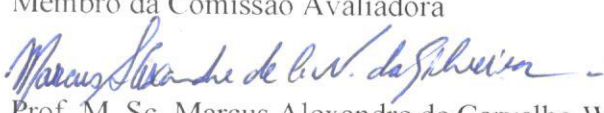
A aluna fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após o registro no Repositório UFOP, do exemplar definitivo, da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.


Ouro Preto, 24 de janeiro de 2019.


Prof.^a Dr.^a Érica Linhares Reis
Presidente da Comissão Avaliadora e Professora Orientadora


Eng.^a de Minas Mariana Caroline Andrade Silva
Membro da Comissão Avaliadora


Prof. M. Sc. Marcus Alexandre de Carvalho Winitkowski da Silveira
Membro da Comissão Avaliadora


Bárbara Dornelas de Assis


Prof. M.Sc. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina: Trabalho de Conclusão de Curso

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me abençoar e guiar meus caminhos até a conclusão desta grande etapa.

Agradeço aos meus pais maravilhosos, Cláudia e Rinaldo, por me apoiarem nos meus sonhos e por nunca terem medido esforços para que eu pudesse ir em busca deles. À minha irmã Bruna, pelo apoio e momentos de risadas. À minha família em geral, pela torcida.

À minha querida orientadora, Prof.^a Érica Linhares Reis, por me acompanhar há tanto tempo, pelo incentivo e pelos ensinamentos, que fizeram toda diferença e que a fazem parte desta conquista.

Agradeço aos amigos próximos, em especial Nayara e Matilde, pela amizade e companheirismo e por sempre me lembrarem do que sou capaz de realizar.

Ao Departamento de Mineração da ArcelorMittal de Maizières-les-Metz, por todas as experiências, crescimento profissional e ensinamentos durante o estágio.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Minas, da Escola de Minas/UFOP, pelo ensino e experiências passadas nesses anos.

RESUMO

A formação de pilhas de estoques pode ocorrer devido a uma série de fatores, como a prioridade que a mineradora estabelece para o processamento de minérios de alta qualidade, a ausência de tecnologia apropriada ou devido ao próprio mercado, cujos preços podem não viabilizar a extração e o processamento dos minérios mais pobres. Uma vez que os recursos disponíveis estão ficando cada vez mais escassos e complexos, além do alto custo envolvido no gerenciamento de estoques de baixo teor, existe uma tendência das mineradoras em aumentar a recuperação de seus minérios, desenvolvendo pesquisas e tecnologias com este fim, como forma de, não apenas evitar custos relacionados ao gerenciamento de estoques, mas também aumentar a vida útil de seus depósitos. Sendo assim, a recuperação dessas pilhas de estoque significa não apenas a diminuição dos custos relacionados à sua gestão, mas também o cumprimento das regulamentações de produção. O presente trabalho consistiu na caracterização do minério de ferro para se estabelecer os melhores parâmetros nas etapas de concentração, moagem do material para se atingir um grau de liberação de 80 % e separação magnética em três ou quatro estágios a depender da qualidade do produto final que se deseja atingir. Das técnicas de caracterização tecnológica utilizadas para se conhecer as características do minério de ferro que compõe as pilhas de estoques, pode-se citar peneiramento a úmido, determinação do conteúdo de magnetita por Satmagan, análise química por fluorescência de raios X, difração de raios X, estudo de liberação através do método de Gaudin e análise de imagens obtidas por MEV/EDS. As pilhas de estoque possuem uma complexa composição mineralógica de hematita (teor médio de ferro de 48,6 %) e minerais indesejáveis portadores de alumínio e enxofre, que requerem o desenvolvimento de uma via de processamento viável para produzir um concentrado de alto teor e ao mesmo tempo, níveis aceitáveis de contaminantes. Neste estudo, dentre as duas rotas de processamento propostas, a rota que prioriza a recuperação mássica apresenta maior viabilidade econômica.

Palavras-chave: pilhas de estoque, beneficiamento, *pellet feed*, separação magnética.

ABSTRACT

The formation of stockpiles may occur due to a number of factors, such as the priority the company sets for the processing of high quality ores, the absence of appropriate technology or due to the market itself, whose prices may not allow the extraction and processing of the poorest ores. As the available resources are becoming increasingly scarce and complex, in addition to the high cost involved in managing low grade stocks, there is a tendency for mining companies to increase the recovery of their ores by developing research and technologies for this purpose, such as a way to not only avoid costs related to stocks management, but also increase the useful life of your deposits. Thus, the recovery of these stockpiles means not only the reduction of costs related to their management, but also the compliance with production regulations. The present work consisted in the iron ore characterization to establish the best parameters in the concentration stages, milling the material to achieve a liberation degree of 80 % and magnetic separation in three or four stages depending on the quality of the final product that is desired. Given the technological characterization techniques used to know the characteristics of the haematitic ore that composes the stockpiles, it is possible to mention wet sieving, determination of the magnetite content by Satmagan, chemical analysis by X-ray fluorescence, X-ray diffraction, liberation study using Gaudin method and analysis of images obtained by SEM / EDS. The stockpiles have a complex mineralogical composition of hematite (average iron content of 48.6 %) and undesirable minerals bearing aluminum and sulfur, which require the development of a viable processing route for producing a high content concentrate and at the same time, acceptable levels of contaminants. In this study, among the two proposed processing routes, the route that prioritizes the mass recovery presents greater economic viability.

Keywords: stockpiles, beneficiation, pellet feed, magnetic separation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Geologia geral do depósito.	12
Figura 2 - Geologia regional do depósito.	13
Figura 3 - Fluxograma de beneficiamento da unidade que gera as pilhas de estoque....	14
Figura 4 - Alinhamento magnético.	16
Figura 5 - Características de quartzo grosso, com inclusões de óxido ferroso e rugosidade elevada.	18
Figura 6 - Minerais com porosidade elevada: goethita com disseminação de quartzo e hematita.	19
Figura 7 - Fotomicrografias (microscópio óptico de luz refletida): minerais ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos.	19
Figura 8 - Desenho com os principais componentes de um separador magnético de alta intensidade.	20
Figura 9 - Opções de projeto para os pólos.	21
Figura 10 - Classificação dos processos de separação magnética e os principais equipamentos utilizados.	22
Figura 11 - Divisor de amostras.	24
Figura 12 - Pulverizador de amostras modelo Mixer Mill MM 400.	26
Figura 13- Frações (-75 +53 μm) e (-150 +75 μm).	28
Figura 14 - Imagens obtidas por BSE das frações (-75 +53 μm) e (-106 +75 μm).	29
Figura 15 - Separador magnético Tubo Davis.	31
Figura 16 - Separador magnético WHIMS.	32
Figura 17 - Permeabilímetro de Blaine.	33
Figura 18 - Distribuição granulométrica do material estudado.	34
Figura 19 - Distribuição granulométrica do minério de ferro com os teores de ferro e sílica.	36
Figura 20 - Minerais determinados na Difração de raios X separados por fração retida	37
Figura 21 - Frações (-106 +75 μm) e (-75 +53 μm) antes da moagem.	38
Figura 22 - Frações (-106 +75 μm) e (-75 +53 μm) depois da moagem.	38
Figura 23 - Cinética de moagem.	39
Figura 24 - Distribuição granulométrica do material moído (peneiramento a úmido)...	40
Figura 25 - Produtos do Tubo Davis em um campo magnético de 1000 Gauss.	41
Figura 26 - Distribuição granulométrica do concentrado <i>Recleaner</i>	43
Figura 27- Análise de MEV/EDS.	44
Figura 28 - Análise de MEV/EDS.	44
Figura 29 - Análise de MEV/EDS.	45
Figura 30 - Análise de MEV/EDS.	45
Figura 31 - Análise de MEV/EDS.	46
Figura 32 - Análise de MEV/EDS.	46
Figura 33 - Fluxograma de beneficiamento com foco na qualidade do concentrado final.	47
Figura 34 - Fluxograma de beneficiamento com foco na recuperação mássica.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Técnicas de mineralogia de uso mais difundido na caracterização de minérios.	15
Tabela 2 - Peneiras utilizadas na análise granulométrica.	25
Tabela 3 - Parâmetros adotados na primeira série de testes do WHIMS.	32
Tabela 4 - Parâmetros adotados na segunda série de testes do WHIMS.	32
Tabela 5 - Parâmetros adotados na terceira série de testes do WHIMS.	33
Tabela 6 - Resultados da análise granuloquímica.	35
Tabela 7 - Resultados do estudo de liberação.	38
Tabela 8 - Resultados dos testes no WHIMS.	42
Tabela 9 - Resultados de superfície específica pelo Método de <i>Blaine</i>	43

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. OBJETIVOS.....	11
2.1 Objetivo Geral	11
2.2 Objetivos específicos.....	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1 Configuração Geológica Geral	12
3.2 A planta de beneficiamento	14
3.3 Técnicas de caracterização para minério de ferro	15
3.4 O comportamento magnético dos materiais	16
3.5 A separação magnética.....	17
3.6 Separadores magnéticos	20
3.7 Equipamentos de separação magnética e sua seleção	22
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
4.1 Homogeneização, quarteramento e amostragem	24
4.1.1 Caracterização da pilha de estoque do minério de ferro	24
4.1.2 Análise granuloquímica.....	25
4.1.3 Análise do conteúdo de magnetita	26
4.1.4 Análise Química.....	26
4.2 Caracterização mineralógica.....	27
4.2.1 Difração de raios X	27
4.2.2 Estudo de Liberação	28
4.2.3 MEV/EDS (Microscopia Eletrônica de Varredura)	29
4.3 Moagem.....	30
4.3.1 Estudo da cinética de Moagem.....	30
4.4 Estudo da separação magnética	30
4.4.1 Tubo Davis	30
4.4.2 WHIMS (Separador Magnético de Alta Intensidade).....	31
4.5 Determinação de superfície específica pelo Método de <i>Blaine</i>	33
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	34
5.1 Análise granuloquímica.....	34
5.2 Caracterização mineralógica.....	36
5.3 Estudo de liberação.....	38
5.4 Cinética de moagem	39
5.5 Tubo Davis	40

5.6 WHIMS	41
5.7 Determinação de superfície específica pelo Método de <i>Blaine</i>	43
5.8 MEV / EDS (Microscopia Eletrônica de Varredura).....	44
5.9 Rotas de processamento propostas	47
6. CONCLUSÃO.....	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
APÊNDICES	53
Apêndice A.....	53
Apêndice B	54
Apêndice C	55
Apêndice D.....	56

1. INTRODUÇÃO

Quando os preços de mercado não são favoráveis ou quando não existe tecnologia adequada que viabilize o processamento de minérios de baixo teor, as empresas de mineração tendem a estocá-los. Estoques de minério de baixo teor podem permanecer sem serem processados por muitos anos até que haja uma mudança no cenário descrito acima ou até que não haja mais disponibilidade de minérios mais ricos. Ao longo dos anos, tem-se notado um interesse crescente por parte das empresas na recuperação desses estoques, em decorrência dos recursos disponíveis se apresentarem mais escassos e complexos. Além disso, tal tendência também pode ser explicada pela maior rigidez das regulamentações em toda a produção mineral e pelos custos inerentes à manutenção dos estoques. Consequentemente, é hora da indústria de mineração demonstrar consciência e gestão ambiental no uso de seus recursos (Lima, 2017).

De acordo com Brandão *et al.* (2012), para o melhor estabelecimento de uma sequência eficiente de operações de processamento industrial, é de extrema importância a caracterização tecnológica. Esta etapa agrupa todos os trabalhos e estudos que são desenvolvidos com o objetivo de se conhecer as principais propriedades do minério que se deseja processar. Dessa forma, é possível tanto avaliar as possibilidades de aplicações industriais do minério, quanto determinar as melhores operações que visarão seu processamento.

Segundo Peres *et al.* (2012) concentração é a etapa do beneficiamento mineral em que ocorre a separação entre as espécies minerais (úteis e não-úteis), através de sistemas dinâmicos, onde várias forças estão envolvidas. A existência de uma propriedade diferenciadora entre as partículas que compõe o minério, permite que uma resultante desse jogo de forças seja capaz de conferir trajetórias diferentes a elas, promovendo assim a separação.

O método de concentração que será empregado dependerá diretamente dessa propriedade diferenciadora, que por sua vez pode ser cor, densidade, brilho, susceptibilidade magnética, condução de cargas e propriedades de superfície (naturais ou induzidas). Dessa forma, os métodos existentes para se concentrar minério podem ser divididos em métodos densitários (ou gravíticos), métodos magnéticos, métodos elétricos, flotação, etc (Peres *et al.*, 2012).

Através da prévia caracterização do minério das pilhas de estoque hematítico, será possível a determinação do melhor método de concentração, assim como o desenvolvimento das possíveis rotas de processamento para seu aproveitamento.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver rotas de processamento através das quais seja possível o aproveitamento de pilhas de estoque para obtenção do produto *pellet feed*.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar uma pilha de estoque de minério de ferro, determinando suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas, bem como o grau de liberação.
- Estabelecer os melhores equipamentos e parâmetros para propor rotas de processamento.

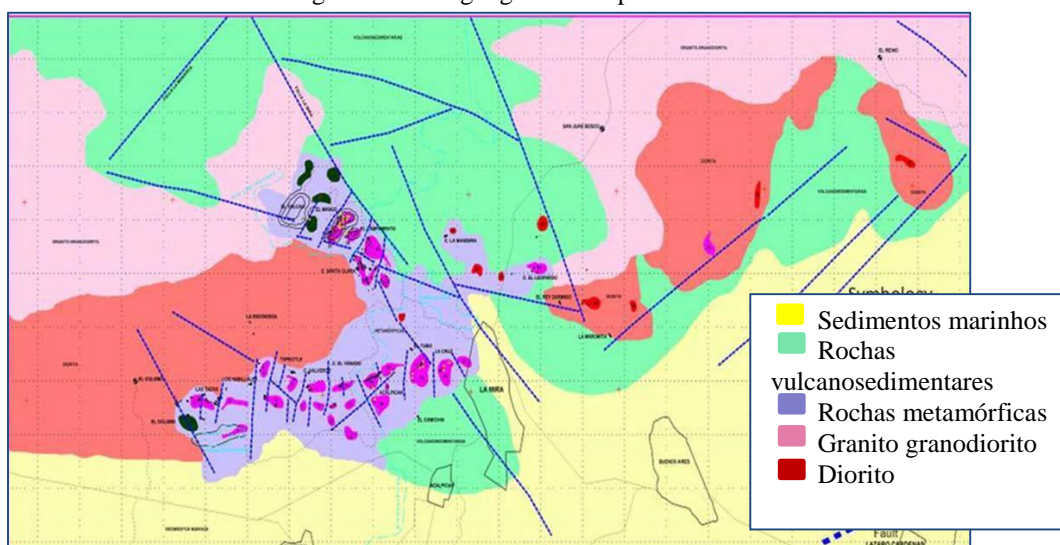
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Configuração Geológica Geral

A mineradora de ferro em questão se localiza na parte sudeste do estado de Michoacan, no México, ao longo da costa do Pacífico. O complexo é cercado pela porção sudeste da província de Sierra Madre del Sur, que consiste em rochas graníticas sedimentares e terciárias do Cretáceo, estoques intrusivos e diques, além de rochas metamórficas e vulcânicas (Gustavson Associates, 2017).

De acordo com Gustavson Associates (2017), a mineralização de ferro está associada a fluidos magmáticos e atividade hidrotérmica originada por um complexo diorito de quartzo-monzonito que intrudiu rochas sedimentares mesozóicas anteriores e um granodiorito regional, conhecido localmente como o Batólito da Costa. Este batólito foi formado durante a Orogenia de Laramide no final do período Mesozóico. Fluidos mineralizados de ferro foram injetados no contato entre o complexo monzonito-diorito e rochas sedimentares, vulcânicas e metamórficas sobrepostas dentro das zonas de *skarn/hornfels*. Algumas das apófises e diques do Batólito afetaram a sequência vulcano-sedimentar em várias áreas diferentes. A cobertura dessas unidades pré-existentes é uma sequência discordante que consiste em arenitos alterados e conglomerados de idade Terciária Inferior. As estruturas regionais são orientadas para quase N de imersão em E – W, além de atingirem os mergulhos de NE - SW para NW e N – S, mergulhando para o W, conforme mostrado na Figura 1.

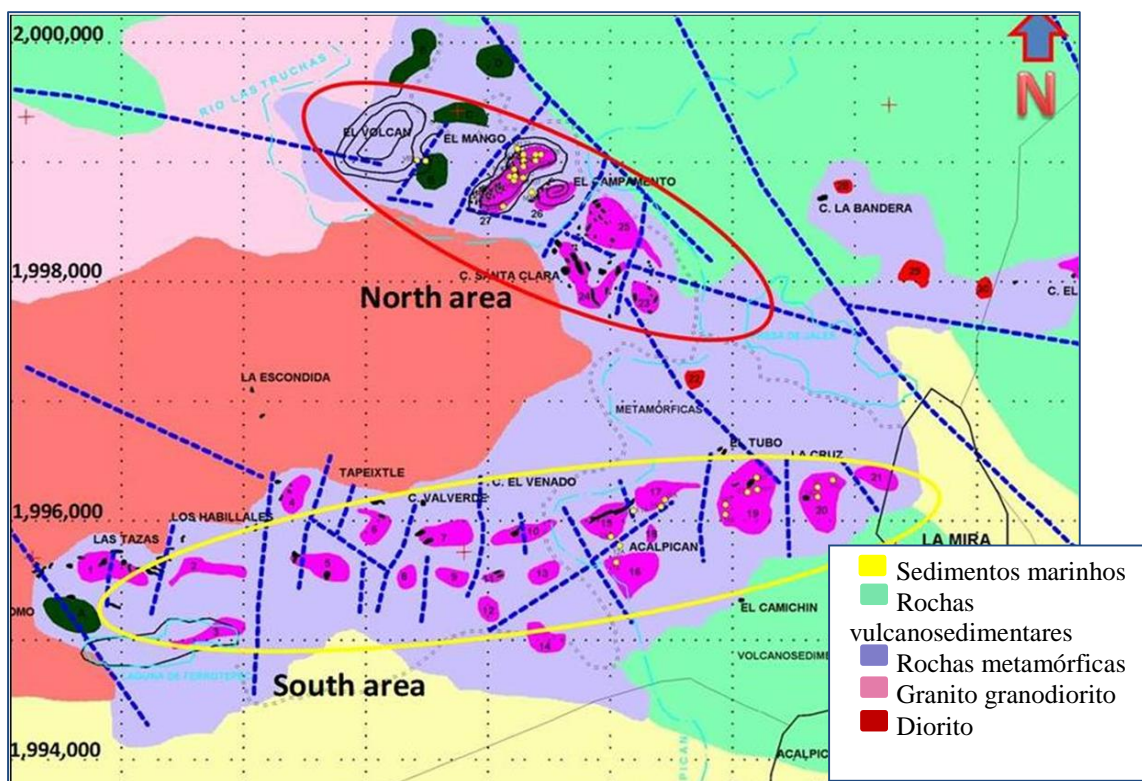
Figura 1- Geologia geral do depósito.



Fonte: Adaptado de Gustavson Associates, 2017.

Em termos de geologia local (Figura 2), a área consiste em afloramentos de mineralização de ferro resistentes à erosão em altitudes mais elevadas em relação às rochas circundantes, cerca de 200 a 300 m mais altas do que o vale do rio. As rochas ígneas do complexo são constituídas por dioritos, granitos, granodioritos, dioritos de quartzo, diques aplíticos, andesito e pequenos diques irregulares de pórfiro-andesito. As concentrações de ferro mais consideráveis estão localizadas nas zonas de contato entre as rochas metamórficas do complexo mineralógico em questão e o diorito. Estas rochas metamórficas consistem de *skarn*, *hornfels*, anfibolitos, calcário recristalizado e mármore, que têm uma estreita relação com a mineralização de ferro e que está relacionada principalmente ao *pluton* diorítico (Gustavson Associates, 2017).

Figura 2 - Geologia regional do depósito.



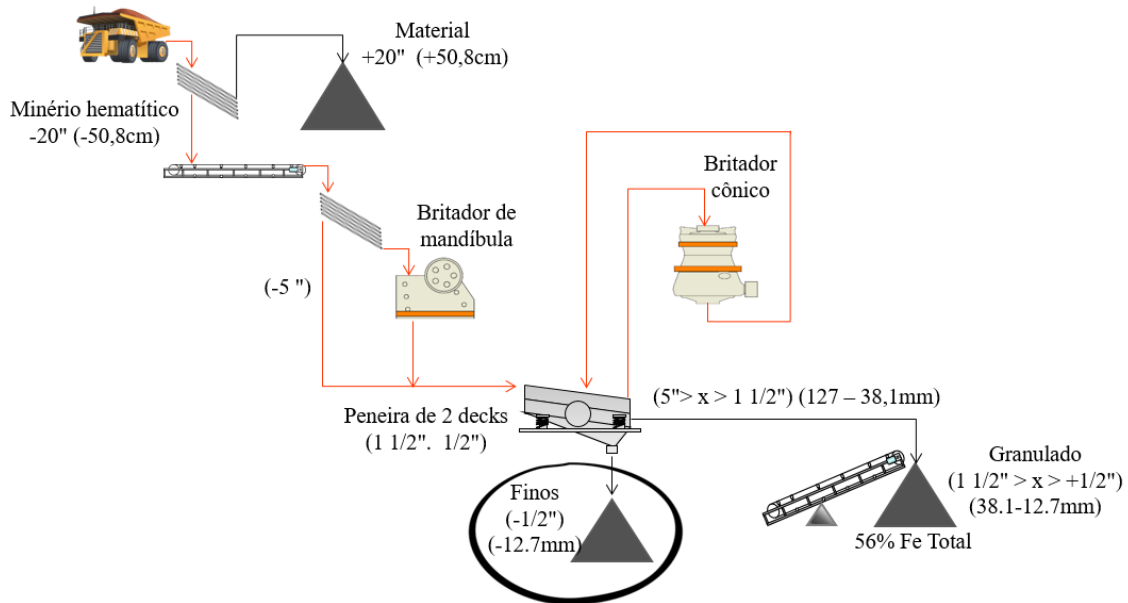
Fonte: Adaptado de Gustavson Associates, 2017.

De acordo com Lima (2017), a mineralização do complexo pode ser descrita como bastante homogênea e constituída por óxidos de ferro, hematita (martita) e magnetita, assim como pequenas quantidades de hematita especular e hidróxidos de ferro, como limonita e goethita.

3.2 A planta de beneficiamento

A pilha de estoque deste estudo foi gerada por uma rota de processamento que consiste basicamente de britagem e classificação, como mostra a Figura 3, produzindo dois tipos de produtos.

Figura 3 - Fluxograma de beneficiamento da unidade que gera as pilhas de estoque.



Fonte: Lima, 2017.

Depois que o minério passa pelo britador de mandíbula, primeiro estágio de britagem, ele é submetido a uma peneira vibratória de dois decks, que produz materiais de três faixas de tamanho. O primeiro material retido, entre 5 e 1,5 polegadas (127 a 38 mm), é direcionado para o estágio de britagem secundária em um britador cônico e classificado novamente. A fração entre 1,5 e 0,5 polegadas (38 a 12,7 mm) é denominada granulado, enquanto o material abaixo de 0,5 polegada (12,7 mm) é chamado de “finos” e estocado nas pilhas. A recuperação em massa do granulado é de cerca de 45 %, portanto, os finos (material abaixo de 12,7 mm) representam 55 % da massa processada.

3.3 Técnicas de caracterização para minério de ferro

Nos últimos anos pode-se observar um interesse crescente por estudos de caracterização de minérios em decorrência da exploração de reservas que, também são cada vez mais complexas. Isso porque, ao especificar características do minério como composição mineralógica ou suas propriedades por exemplo, é possível promover melhorias na eficiência das rotas de processamento através do estabelecimento dos melhores parâmetros e equipamentos que irão compor tais rotas.

Segundo Neumann *et al.* (2010), a caracterização tecnológica se constitui como uma etapa fundamental para o aproveitamento de um recurso mineral de forma otimizada, uma vez que através dela é possível determinar os subsídios mineralógicos e texturais necessários à seleção correta e ao dimensionamento adequado dos equipamentos que serão usados nas operações unitárias que compõe a rota de processamento, permitindo que o rendimento da usina seja otimizado.

Atualmente, existem inúmeras técnicas que são utilizadas na caracterização tecnológica de minérios e que apresentam diferentes níveis de complexidade. Na Tabela 1 pode-se observar as técnicas mais empregadas (Gonzaga, 2014).

Tabela 1 - Técnicas de mineralogia de uso mais difundido na caracterização de minérios.

Técnica		Propriedades
Microscopia Óptica	Microscópio estereoscópicos microscópios de polarização	Forma, cor, alterações, associações, propriedades ópticas
Difração de Raios-X	Método do pó	Caracterização textural, identificação das espécies minerais
Microscopia Eletrônica de Varredura	Microscópio eletrônico de varredura	Forma, associações, liberação
Sistema de Microanálise	Dispersão de energia (EDS) dispersão de comprimento de onda (WDS)	Composição química
Recursos Diversos	Fluorescência de Raios-X	Composição química, identificação dos elementos presentes
Tomografia de Raios-X	Tomógrafos	Reconstrução tridimensional das partículas, análise de liberação

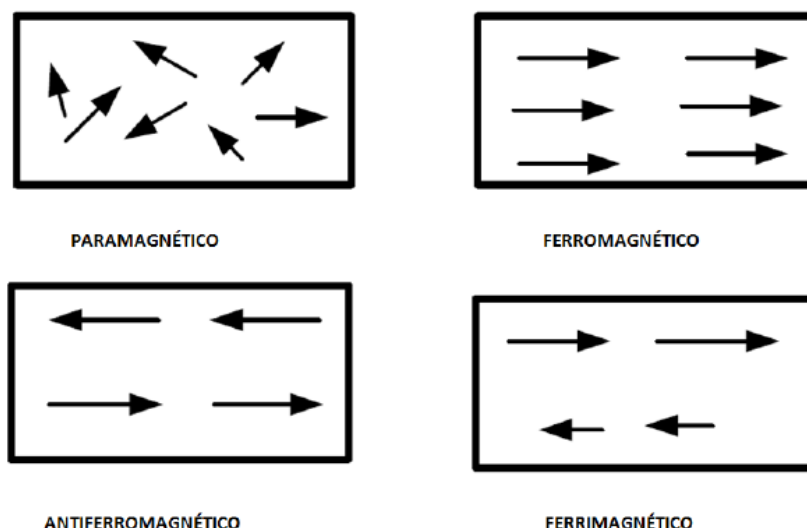
Fonte: Gonzaga, 2014.

3.4 O comportamento magnético dos materiais

Os métodos de separação magnética utilizam como propriedade diferenciadora o comportamento das partículas minerais quando são submetidas a um campo magnético. Os materiais podem ser separados em pelo menos cinco grupos. O primeiro, chamado diamagnético, é constituído por átomos sem momento magnético; sua suscetibilidade magnética é pequena e negativa, como gases inertes, por exemplo. O segundo, paramagnético, apresenta átomos com momentos magnéticos orientados aleatoriamente, sendo sua suscetibilidade pequena e positiva, como alguns metais ou alguns gases diatômicos. Os átomos que constituem o terceiro grupo, ferromagnético, apresentam momentos magnéticos alinhados paralelamente. Portanto, sua suscetibilidade magnética é grande, por exemplo, metais de transição, como o ferro. O quarto grupo, antiferromagnético, tem átomos com momentos magnéticos alinhados paralelamente. A suscetibilidade é pequena, como metais de transição. Por fim, o último grupo, denominado ferrimagnético, é constituído por átomos que apresentam momentos magnéticos mistos paralelos e anti-paralelos, sendo sua suscetibilidade grande. Um bom exemplo de mineral que pertence ao grupo ferrimagnético é a magnetita (Petty, 2007).

O alinhamento magnético dos quatro últimos grupos pode ser observado na Figura 4:

Figura 4 - Alinhamento magnético.



Fonte: Silva, 2012.

De acordo com Silva (2012), a separação magnética tem dois grandes campos de aplicação: remoção de peças de ferro ou sucatas que apresentem alta susceptibilidade

magnética e a concentração e purificação de misturas minerais nas quais um mineral de ferro está presente em qualquer de suas formas. É uma técnica que além de causar menor impacto ambiental, ainda tem vasta aplicação, desde materiais coloidais aos mais grosseiros, de materiais menos magnéticos a aqueles fortemente magnéticos.

3.5 A separação magnética

Embora hoje seja amplamente utilizada, a separação magnética só começou a ser difundida no final do século XIX, quando pesquisadores demonstraram que era viável a separação de partículas fortemente magnéticas de partículas não-magnéticas, comprovando assim sua importância prática. Porém hoje, o cenário da separação magnética é bem diferente. O método pode ser aplicado a uma gama de materiais que apresentam variabilidade tanto em relação à sua granulometria, quanto em relação à sua susceptibilidade magnética, graças ao aumento na compreensão dos princípios do magnetismo e ao desenvolvimento de materiais permanentemente magnéticos (Silva, 2014).

A separação magnética é fortemente influenciada pelas características dos minerais que compõe o material a ser alimentado. Tais atributos afetam não somente a eficiência do processo de concentração como também a escolha do separador magnético na fase inicial. A seleção do equipamento adequado deve ser feita levando-se em consideração a granulometria das partículas, a distribuição das propriedades magnéticas e a taxa de alimentação estabelecida para o separador (Silva, 2014).

Quando se trata da separação de alta intensidade de campo magnético, como é o caso deste estudo, deve-se dar atenção principalmente à estrutura mineralógica/física dos minerais. Pode-se destacar como aspectos mais relevantes (Paula, 2014):

- Alta porosidade das partículas (maior que 30 % da área). A fim de garantir recuperação mássica ao final do processo, tal característica exige que a água de lavagem seja aplicada com menor pressão e/ou operar com um gap com menor abertura e/ou trabalhar com uma polpa cujo percentual de sólidos seja mais elevado;
- Quartzo com granulometria mais grossa em comparação aos minerais de ferro. Tal característica exige que a operação aconteça com uma abertura de gap maior para se evitar possíveis entupimentos, levando à diminuição na recuperação mássica, uma vez que acontece a perda dos minerais de ferro de granulometria mais fina;

- Minérios tipicamente specularíticos tendem a apresentar quartzo com inclusões de hematita. Esta característica faz com que o quartzo seja recuperado na concentração de alta intensidade de campo magnético, diminuindo o teor do concentrado final;
- Minerais de quartzo que apresentam alta rugosidade tendem a ficar aderidos à superfície dos minerais de ferro e assim serem recuperados, diminuindo o teor do concentrado;
- Recomenda-se evitar qualquer quantidade de magnetita preservada, relictual ou associada, pois prejudica a concentração de alta intensidade de campo;
- Deve-se evitar partículas com granulometrias menores que 0,075 mm, pois estas tendem a compor o rejeito da separação magnética aplicada a minério de ferro (Paula, 2014).

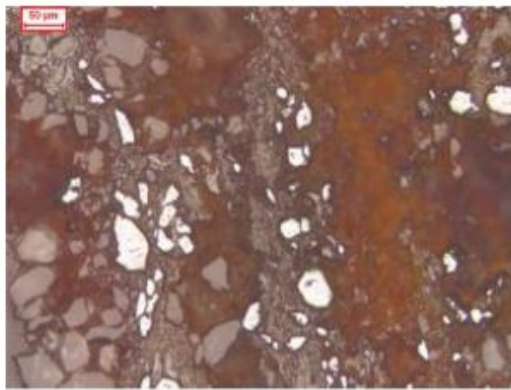
Algumas das características descritas acima podem ser observadas nas Figuras 5, 6 e 7 a seguir. As fotomicrografias foram registradas em microscópio óptico de luz refletida através de um analisador de imagens conectado ao software QWin LEICA (Paula, 2014).

Figura 5 - Características de quartzo grosso, com inclusões de óxido ferroso e rugosidade elevada.

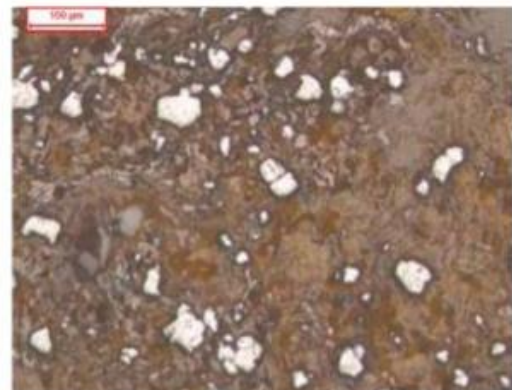


Fonte: Silva, 2012.

Figura 6 - Minerais com porosidade elevada: goethita com disseminação de quartzo e hematita.



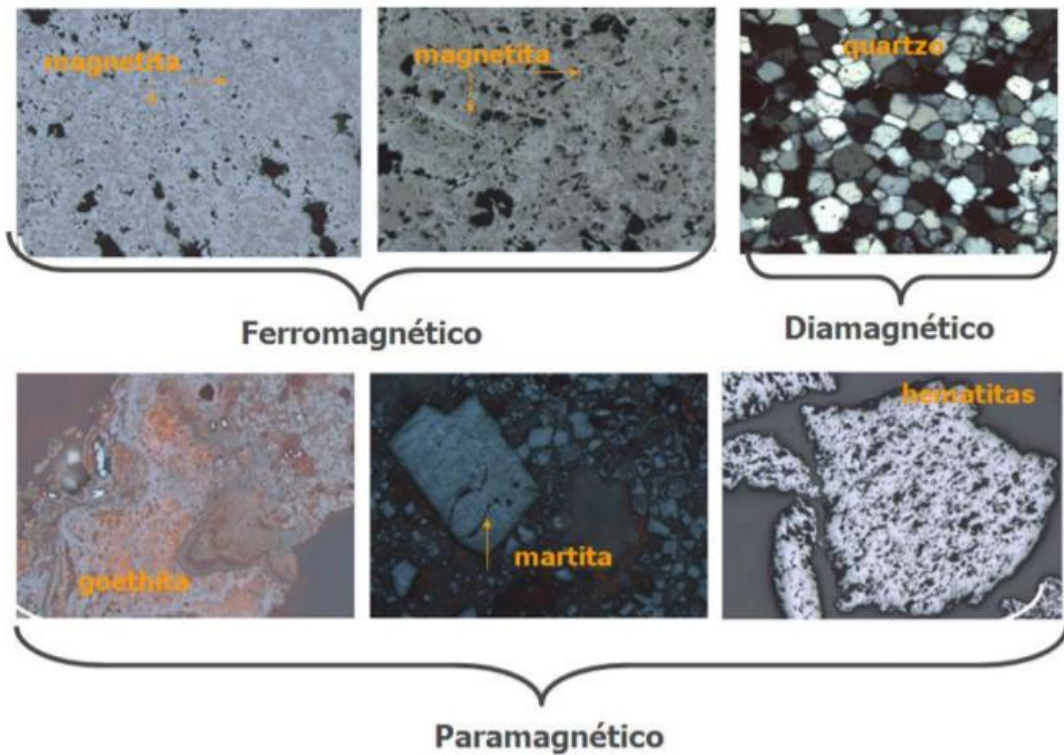
Goethita com quartzo e hematita disseminada



Goethita com hematita disseminada

Fonte: Silva, 2012.

Figura 7 - Fotomicrografias (microscópio óptico de luz refletida): minerais ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos.



Fonte: Silva, 2012.

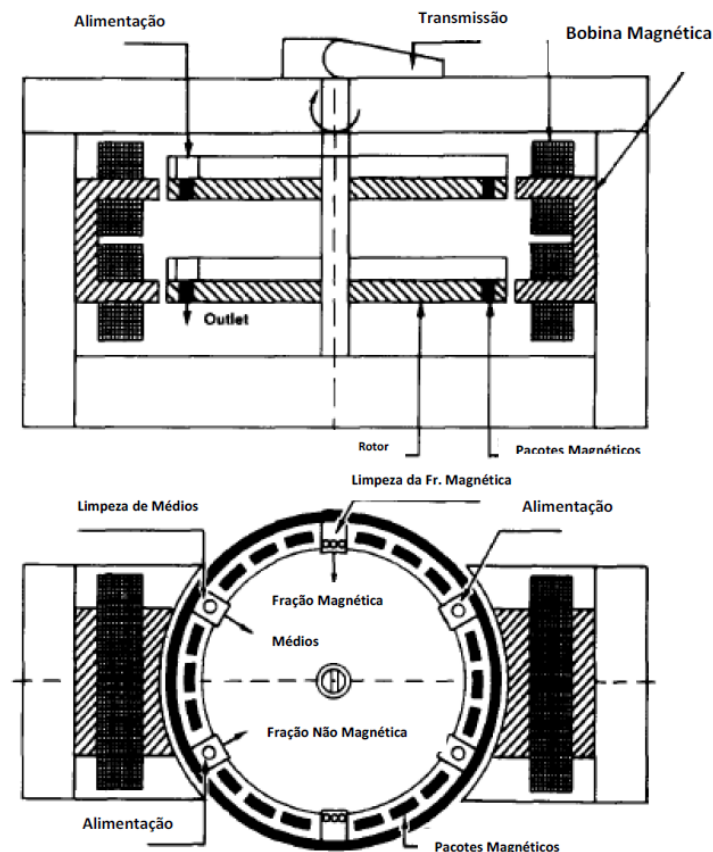
3.6 Separadores magnéticos

A diferença nos valores de susceptibilidade magnética entre as partículas que compõem a polpa é o que permite que os separadores magnéticos promovam a separação das mesmas, de forma que aquelas partículas cuja susceptibilidade é maior, fiquem concentradas na fração magnética, constituindo o concentrado, e as partículas cuja susceptibilidade é menor, se concentrem na fração não-magnética, constituindo o rejeito (Silva, 2014).

O separador magnético tipo carrossel de alta intensidade de campo magnético possui dois rotores, que contêm os pacotes magnéticos. Normalmente, cada rotor possui dois locais de alimentação, dois locais de limpeza de médios e dois locais de limpeza de concentrado. Estes equipamentos possuem duas ou mais bobinas por rotor, que podem ser resfriadas com água ou óleo (Silva, 2014).

A Figura 8 a seguir apresenta um separador magnético de alta intensidade e seus principais componentes:

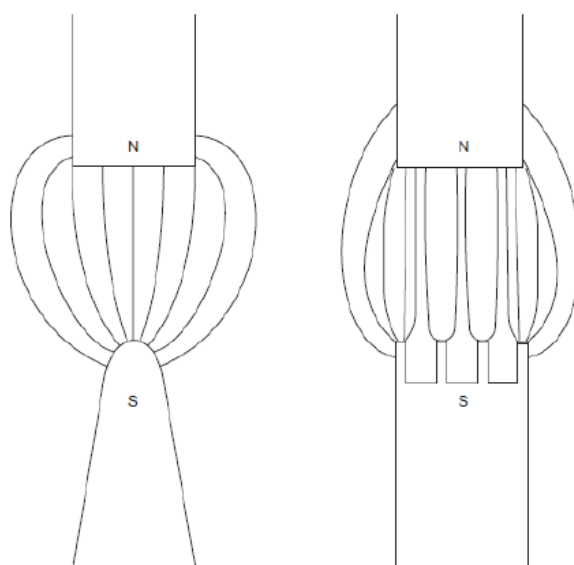
Figura 8 - Desenho com os principais componentes de um separador magnético de alta intensidade.



Fonte: Silva, 2014.

Segundo Silva (2014), os campos magnéticos são produzidos através dos eletroímãs e os pólos fabricados com o objetivo de aumentar o gradiente do campo. Nos eletroímãs o campo pode ser controlado através da intensidade da corrente que se aplica. Outra alternativa de controlar o gradiente do campo é utilizando o pólo com uma das peças mais estreita. Esta característica faz com que a intensidade do campo fique maior nas proximidades da peça que é menor, criando assim um gradiente, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Opções de projeto para os pólos.



Fonte: Silva, 2014.

Ainda de acordo com Silva (2014), quando se trata dos separadores magnéticos de alta intensidade (WHIMS), a separação acontece nos pacotes magnéticos que se localizam na circunferência de dois rotores equipados com determinado número de placas ranhuradas equidistantes, as matrizes. A capacidade dos separadores depende do volume de polpa que é capaz de passar pelos pacotes magnéticos, que dependem da distância entre as placas e da largura da matriz.

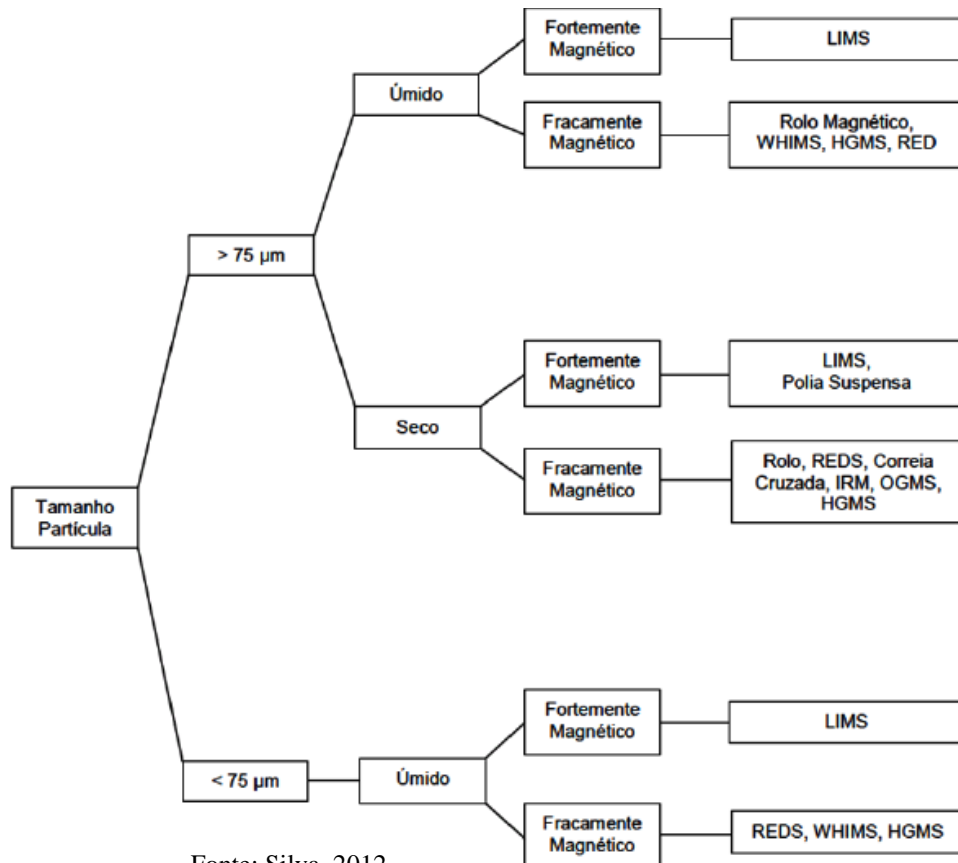
A força magnética é um dos parâmetros de processo, dentre comprimento da matriz, velocidade da polpa, direção do campo magnético, etc, que influenciam no processo de concentração. Ela é a principal força atuante sobre as partículas, sendo proporcional à intensidade do campo magnético que está sendo aplicado. Sendo assim, alterações na intensidade do campo, geram alterações na força magnética atuante nas partículas, que geram mudanças no desempenho dos separadores. O que acontece de maneira geral é um

aumento na recuperação das partículas magnéticas no concentrado quando se aumenta o campo magnético aplicado, mas dentro de certos limites. Pois em certas situações, o aumento do campo pode acarretar em baixa recuperação ou baixa qualidade do concentrado. Tal fato pode ser explicado por fatores como a redução da susceptibilidade magnética das partículas com o aumento do campo, ou a redução da área da matriz que está disponível para capturar partículas com o aumento no campo magnético. A redução na área da matriz acontece devido ao aumento na quantidade de material depositado na mesma, provocando a redução da porosidade da camada depositada e o aumento da velocidade com que a polpa escoar no interior da matriz (Silva, 2014).

3.7 Equipamentos de separação magnética e sua seleção

Algumas das classificações de separadores magnéticos (Figura 10) se baseiam na intensidade de campo e segundo o fluido em que acontece a separação, se a seco ou a úmido, a depender da granulação dos constituintes a serem tratados.

Figura 10 - Classificação dos processos de separação magnética e os principais equipamentos utilizados.



Fonte: Silva, 2012.

É importante ressaltar que o diagrama apresentado na Figura 10 não leva em consideração o gradiente do campo magnético que, como foi descrito acima, se trata de um importante parâmetro de processo. No entanto, apesar de existirem exceções, pode-se considerar que separadores de baixa intensidade geralmente geram baixos gradientes de campo, enquanto separadores de alta intensidade geram alto gradiente (Silva, 2012).

Existem os mais diferentes tipos de separadores magnéticos e sua seleção depende muito da experiência para se fazer o melhor arranjo a ser aplicado em um determinado contexto e com um determinado tipo de material. Uma vez que tais arranjos são possibilitados pelas combinações entre tipos de equipamentos, de fluido e de fonte do campo magnético, a escolha da técnica de separação magnética deve estar condicionada principalmente ao tamanho da partícula e às propriedades magnéticas do material a ser concentrado (Silva, 2012).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Homogeneização, quarteamento e amostragem

Para determinar quais testes de concentração e rotas de processamento precisam ser feitos, um estudo profundo sobre as características e propriedades particulares do minério foi realizado. Antes de iniciar a caracterização, foram aplicadas técnicas de amostragem adequadas para que as amostras fossem representativas, em pequena quantidade, de modo a garantir todas as suas características e propriedades existentes na população de partículas. Dessa forma, foi possível extrair informações relacionadas à toda população de partículas da pilha amostrada.

Com o objetivo de obter pequenas frações exequíveis, foi realizado um quarteamento adotando um divisor de amostras Gilson Universal, mostrado na Figura 11. Este equipamento é constituído por uma série de trilhos inclinados, dispostos lado a lado. A alimentação foi feita no topo do divisor, que tem uma forma de tronco piramidal.

Figura 11 - Divisor de amostras.



Fonte: Gilson Company, 2018.

A largura da calha deve ser pelo menos três vezes o tamanho do maior fragmento. O procedimento de quarteamento foi realizado com todo o material recebido e, após o quartamento, uma das frações foi utilizada para realizar um peneiramento a úmido.

4.1.1 Caracterização da pilha de estoque do minério de ferro

Para que seja possível a determinação da rota de processamento mais adequada, assim como dos melhores parâmetros para beneficiamento das pilhas de estoque de minério de ferro, é necessário que o presente estudo se inicie com a caracterização tecnológica das amostras. A caracterização do minério de ferro no caso deste estudo se

deu por meio de análise granulométrica e Satmagan. A análise mineralógica foi efetuada através de Difração de raios X, estudo do grau de liberação por meio da contagem de pontos e análise de imagens obtidas através do sistema MEV/EDS (Microscopia Eletrônica de Varredura). Antes da etapa de concentração também foi realizado um ensaio de cinética de moagem, para determinação do tempo de moagem necessário para se atingir o tamanho de liberação previamente determinado.

4.1.2 Análise granulométrica

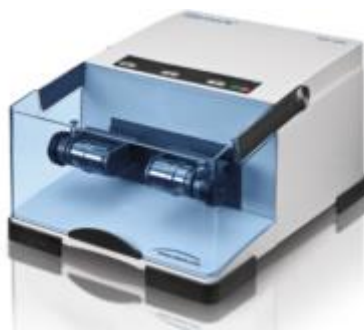
Após o recebimento do material amostrado de uma das pilhas de estoque, a análise granulométrica por peneiramento a úmido foi realizada com aproximadamente 2,0 kg de sua massa total utilizando a série de peneiras listadas na Tabela 2, a fim de se conhecer a distribuição de tamanho das partículas. De acordo com o fluxograma de beneficiamento da unidade de onde veio a amostra, a distribuição de tamanho da amostra deve estar abaixo de 0,5 polegadas (12,7 mm). Os *oversizes* obtidos em cada peneira foram secos em estufa de secagem a 120 ° C e pesados a fim de se construir o gráfico contendo a curva relacionada à distribuição granulométrica do material.

Tabela 2 - Peneiras utilizadas na análise granulométrica.

Peneira escolhida	Abertura de peneira equivalente		
	Polegadas (")	Milímetros (mm)	Micrômetros (µm)
6,3 mm	0,250	6,3	6300
3,35 mm	0,132	3,35	33500
2,0 mm	0,079	2,0	2000
1,18 mm	0,046	1,18	11800
0,5 mm	0,0197	0,5	500
0,3 mm	0,0117	0,3	300
0,150 mm	0,0059	0,150	150
0,075 mm	0,0029	0,075	75
0,053 mm	0,0021	0,053	53

Cada fração retida obtida no peneiramento foi homogeneizada e dividida para obtenção de alíquotas em torno de 30 gramas. Estas alíquotas foram enviadas para análises químicas, caracterizações mineralógicas e determinação do teor de magnetita. A fim de adequar a granulometria de cada alíquota, foi realizada uma moagem utilizando o Mixer Mill 400, mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Pulverizador de amostras modelo Mixer Mill MM 400.



Fonte: Retsch, 2017.

Este modelo de moinho é compacto e multifuncional, especialmente desenvolvido para pequenas quantidades de amostra. Ele mistura e homogeniza, realizando essa tarefa em poucos segundos e fornecendo tamanhos de moagem na faixa submícron de acordo com parâmetros como oscilação, frequência e tempo de moagem, que podem ser definidos digitalmente (Retsch, 2017).

4.1.3 Análise do conteúdo de magnetita

O equipamento mais comum usado para determinar o teor de magnetita na amostra é o Satmagan. É um método fácil e rápido de medir o conteúdo magnético, que tem uma precisão de 0,4% e cujo tempo de medição é de aproximadamente um minuto. Por outro lado, a análise precisa de compostos ferro-magnéticos de ferro é extremamente difícil quando se trata do uso de métodos convencionais. É uma máquina que mede o momento magnético total de uma amostra em um campo magnético saturante para obter o conteúdo mineral ferromagnético da amostra. O princípio é medir a força atuando na amostra em um campo magnético com um gradiente especial. Este campo magnético é forte o suficiente para saturar o componente magnético na amostra (Satmagan Procedures, MMP, 2015).

Após a medição do conteúdo de magnetita de cada fração, os resultados foram calculados através da média aritmética de três medidas e transformados em conteúdo de magnetita utilizando uma curva de calibração.

4.1.4 Análise Química

Para determinação da porcentagem dos elementos químicos nas amostras, foram realizados testes de análise química adotando-se o método de fluorescência de raios X. É uma técnica elementar de análise química que utiliza as amostras em seu estado sólido, o

que é uma grande vantagem em termos de economia de tempo, uma vez que outros métodos precisam dissolver a amostra na sua preparação (Brandão *et.al*, 2012). O princípio de operação consiste em deslocar os elétrons de suas posições orbitais atômicas, fazendo com que liberem uma quantidade de energia específica para cada elemento. Essa liberação de energia é detectada pelo instrumento que classifica as energias por elemento (Bruker, 2017). Os elementos analisados incluíram o teor total de ferro, FeO, SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, TiO₂, P, Mn, C, S, Na₂O, K₂O e perda por calcinação (PPC), entre outros.

O método para determinar o teor de enxofre e carbono é bem diferente dos demais. As porcentagens são determinadas através de um forno de indução que libera carbono e enxofre a altas temperaturas acima de 2000 ° C (Eltra GmbH, 2017). Quanto à perda por calcinação, pode-se analisá-la submetendo as amostras em altas temperaturas pré-determinadas, que provocam a perda de água, matéria orgânica e carbonato mineral, possibilitando a estimativa de seu conteúdo pela medida da massa final, que será menor. (Loss-on-ignition standard operating procedure, 2013).

4.2 Caracterização mineralógica

4.2.1 Difração de raios X

A Difração de raios X é uma ferramenta básica da caracterização mineral. É um método baseado na interação de ondas na frequência de raios X com os planos de repetição sistemática do retículo cristalino. Portanto, é aplicado apenas a materiais cristalinos, ou não amorfos. A Lei de Bragg fornece a seguinte equação:

$$\lambda = 2d \sin \theta$$

Sendo: λ = Comprimento de onda;

d = Distância entre os planos cristalográficos;

θ = Ângulo de reflexão.

A amostra é colocada no centro de um círculo chamado Círculo de Bragg, onde recebe feixes de raios X de um dispositivo, enquanto um detector de radiação mede os ângulos formados pelas difrações e fornece as distâncias entre os planos com base na Lei de Bragg (Luz, Sampaio e Almeida, 2004).

De acordo com Gonzaga (2014), essas informações serão utilizadas na construção de um gráfico da intensidade do feixe difratado pelo ângulo de difração 2θ . Dessa forma surgirão picos de alta intensidade quando a condição de difração de Bragg for satisfeita por algum conjunto de planos cristalográficos, sendo possível reconhecer a estrutura cristalina

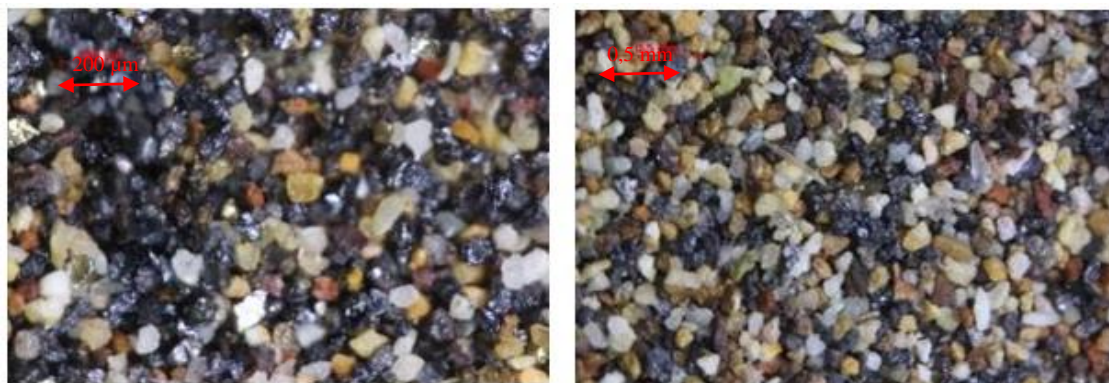
do mineral e identificá-lo. A Difração de raios X de cada fração *oversize* obtida pelo peneiramento foi realizada por meio de um Bruker D2 Phaser.

4.2.2 Estudo de Liberação

O estudo de liberação é um passo importante no processo de caracterização mineralógica no que diz respeito à eficácia de um processo de concentração. A liberação pode ser definida como a condição de liberdade mútua entre os minerais de um sistema (Brandão *et.al*, 2012). Portanto, o grau de liberação é a porcentagem do mineral de interesse que ocorre como partículas livres no minério em relação ao conteúdo total. Quando um bom grau de liberação é alcançado, não há apenas economia de energia nos estágios de fragmentação, mas também os estágios posteriores de separação tornam-se mais fáceis e eficientes (Wills e Napier-Munn, 2006).

O grau de liberação do minério de ferro foi calculado aplicando o método óptico desenvolvido por Gaudin, através da contagem das partículas liberadas e mistas nas imagens. As menores faixas de tamanho (-150 μm + 75 μm) e (-75 μm + 53 μm) foram coletadas e sua liberação foi observada em uma lupa estereoscópica do modelo LED LEICA KL 200 para estabelecer um tamanho presumível de liberação. As imagens foram feitas utilizando-se uma câmera CANON EOS 600 D e estão mostradas na Figura 13.

Figura 13- Frações (-75 +53 μm) e (-150 +75 μm).



Estas amostras foram submetidas a um novo peneiramento utilizando uma peneira de 106 μm , valor estabelecido como tamanho de liberação, para obter as frações para análise por MEV/EDS, mostradas na Figura 14 e utilizadas para calcular o grau de liberação. Nas amostras, contaram-se mais de 200 partículas para a fração mais grossa e mais de 400 partículas para a fração mais fina, entre elas, ganga, partículas de minerais

de ferro e partículas mistas. Os valores de grau de liberação por faixa de tamanho foram calculados através da equação:

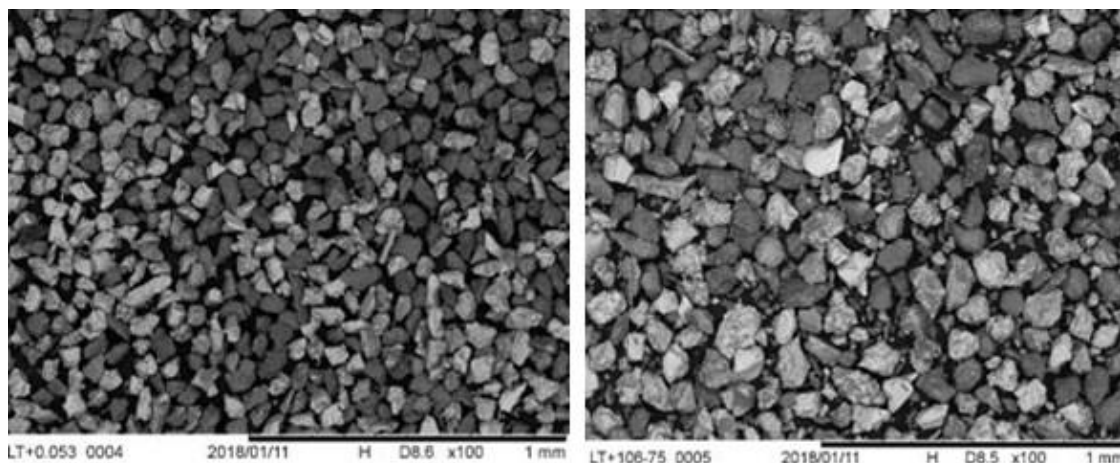
$$LDFe = qFe / (qFe + qm)$$

Sendo: LDFe = Grau de liberação em relação às partículas de minerais de ferro;

qFe = Quantidade de partículas livres de minerais de ferro;

qm = Quantidade de partículas mistas.

Figura 14 - Imagens obtidas por BSE das frações (-75 +53 µm) e (-106 +75 µm).



4.2.3 MEV/EDS (Microscopia Eletrônica de Varredura)

O sistema MEV/EDS (Microscópio Eletrônico de Varredura com uma microsonda acoplada utilizando o método de Dispersão de Energia), é um equipamento indispensável para identificar e quantificar os elementos químicos localmente presentes em uma amostra. Sua operação baseia-se na interação de um feixe de elétrons finamente colimado com a amostra, fornecendo imagens com diferentes tons de cinza, que são proporcionais ao sinal criado pela interação entre a amostra e o elétron do feixe. Na caracterização mineralógica, as imagens criadas pela ação dos elétrons retroespalhados são as mais importantes, uma vez que o nível de cinza é proporcional à quantidade de elétrons e, conseqüentemente, ao peso atômico em cada pixel da imagem. Portanto, através da imagem criada, se torna possível a determinação da composição mineralógica da amostra, eventualmente complementada por conhecimentos prévios sobre o material obtidos por outros métodos (Luz, Sampaio e Almeida, 2004).

Estas análises podem ser realizadas com as amostras em forma de seções polidas ou em pó, que é o caso deste estudo, apesar da forte influência topográfica na operação. No

entanto, a relação entre níveis de cinza e peso atômico ainda é preponderante (Luz, Sampaio e Almeida, 2004).

4.3 Moagem

4.3.1 Estudo da cinética de Moagem

Com o objetivo de se determinar o tempo de moagem necessário para atingir o grau de liberação $D_{80} = 106 \mu\text{m}$, foi realizada uma moagem primária adotando um moinho de bolas Sepor, que tem um comprimento de 20 cm, diâmetro de 18 cm e um volume interno total de 5080 ml. A distribuição da carga de bolas usada durante os testes foi de 8 bolas de 40 mm, 17 bolas de 34 mm, 27 bolas de 21 mm e 28 bolas de 15 mm. A porcentagem de sólidos na polpa foi de 70 % em peso; 1273,83 g de minério, 570,0 g de água e a velocidade utilizada foi de 70 % da velocidade crítica. A velocidade crítica é definida através da equação:

$$V_c = 42,2 / \sqrt{(D - d)}$$

Sendo: V_c = Velocidade crítica;

D = Diâmetro interno do moinho de bolas (metros);

d = Diâmetro máximo das bolas (metros).

Como a velocidade crítica calculada foi de 112,8 rpm, 70% corresponde a 79 rpm. Com esses parâmetros estabelecidos, três ensaios de cinética de moagem foram realizados para construir a curva de cinética de moagem.

4.4 Estudo da separação magnética

4.4.1 Tubo Davis

Para testar a concentração por separação magnética úmida em baixa intensidade de campo magnético, foram realizados alguns testes exploratórios de separação magnética adotando o Davis Magnetic Tube Test, mostrado na Figura 15. É um equipamento com um eletroímã que fornece até 4000 Gauss de campo magnético, um tubo de vidro e um mecanismo de agitação acionado por motor. O tubo está localizado entre os pólos do ímã em um ângulo de 45 graus. O motor elétrico fornece um mecanismo de agitação que faz o tubo se movimentar para cima e para baixo enquanto ele gira simultaneamente. Sob a ação do campo magnético, todas as partículas magnéticas são atraídas na zona de

magnetismo, permanecendo dentro do tubo, enquanto as partículas não-magnéticas são liberadas do mesmo (Davis Tube Procedures, 2018).

Figura 15 - Separador magnético Tubo Davis.



Fonte: Eriez, 2018.

Os ensaios no Tubo Davis foram realizados com as seguintes faixas de tamanho: (-150 μm + 75 μm) e (-75 μm + 53 μm), sendo importante ressaltar que essas frações não passaram pela moagem; foram obtidas através do peneiramento a úmido realizado ainda no início dos estudos. Os dois testes foram realizados usando 20,0 g de cada fração, em uma intensidade de campo magnético de 1000 Gauss durante 10 minutos.

4.4.2 WHIMS (Separador Magnético de Alta Intensidade)

Neste estudo, a separação magnética foi realizada usando um Separador Magnético de Alta Intensidade (WHIMS), mostrado na Figura 16. O campo magnético do separador é produzido por eletroímãs, que proporcionam um campo magnético de alta intensidade através do qual passa o minério. Portanto, no caso do minério de ferro, as partículas que apresentam suscetibilidade magnética positiva são atraídas às matrizes e coletadas como concentrado após a desativação do campo magnético, enquanto partículas não-magnéticas passam livremente pelas matrizes e são coletadas como rejeito.

Figura 16 - Separador magnético WHIMS.



Os testes foram realizados usando o WHIMS em três configurações diferentes, como mostrado nas Tabelas 3, 4 e 5. A primeira configuração (primeiro teste) consiste apenas nas etapas *Rougher* e *Scavenger*, como mostra a Tabela 3. A segunda configuração, implementada pelo segundo e terceiro testes consiste nas etapas: *Rougher*, *Cleaner* e *Scavenger*, como mostra a Tabela 4 e a terceira configuração por sua vez, aplicada no quarto e quinto testes consiste nos estágios: *Rougher*, *Cleaner*, *Recleaner* e *Scavenger*, de acordo com a Tabela 5. Para preparar a polpa, 20 gramas de amostra foram colocados em um béquer (500 ml de volume) e foram adicionadas 46,7 ml de água, a fim de se obter uma polpa com 30 % de sólidos, sendo misturada e alimentada em uma matriz de 1,5 mm. Os produtos obtidos foram identificados e secos em estufa de secagem a 120 °C. Após esse processo, os produtos foram pesados, homogeneizados e quarteados até a obtenção de uma alíquota de cada produto, para serem enviadas para análises químicas.

Tabela 3 - Parâmetros adotados na primeira série de testes do WHIMS.

Etapas	Campo magnético (Gauss)	Corrente elétrica (A)	Abert. da matriz (mm)	Sólidos na polpa (%)
Rougher	1500	0,4	1,5	30
Scavenger	9000	2,8		

Tabela 4 - Parâmetros adotados na segunda série de testes do WHIMS.

Etapas	Campo magnético (Gauss)	Corrente elétrica (A)	Abert. da matriz (mm)	Sólidos na polpa (%)
Rougher	1500	0,4	1,5	30
Cleaner				
Scavenger	9000	2,8		

Tabela 5 - Parâmetros adotados na terceira série de testes do WHIMS.

Etapas	Campo magnético (Gauss)	Corrente elétrica (A)	Abert. da matriz (mm)	Sólidos na polpa (%)
Rougher	1500	0,4	1,5	30
Cleaner				
Recleaner	6000	1,6		
Scavenger				

4.5 Determinação de superfície específica pelo Método de *Blaine*

Blaine é um parâmetro obtido usando um aparelho de permeabilidade ao ar para determinar a superfície específica de uma amostra na forma de pó. O equipamento, mostrado na Figura 17, mede o tempo que um determinado volume de ar leva para atravessar uma amostra de minério que é colocada em um recipiente dentro do aparelho, sendo possível calcular a superfície das partículas. Portanto, quanto mais fino o material, maior a área calculada (Modo operatoire Permeabilimetre de *Blaine*, 2015).

A quantidade de material usada para realizar o teste depende de sua densidade. Portanto, é utilizada uma massa de amostra diferente para cada material diferente.

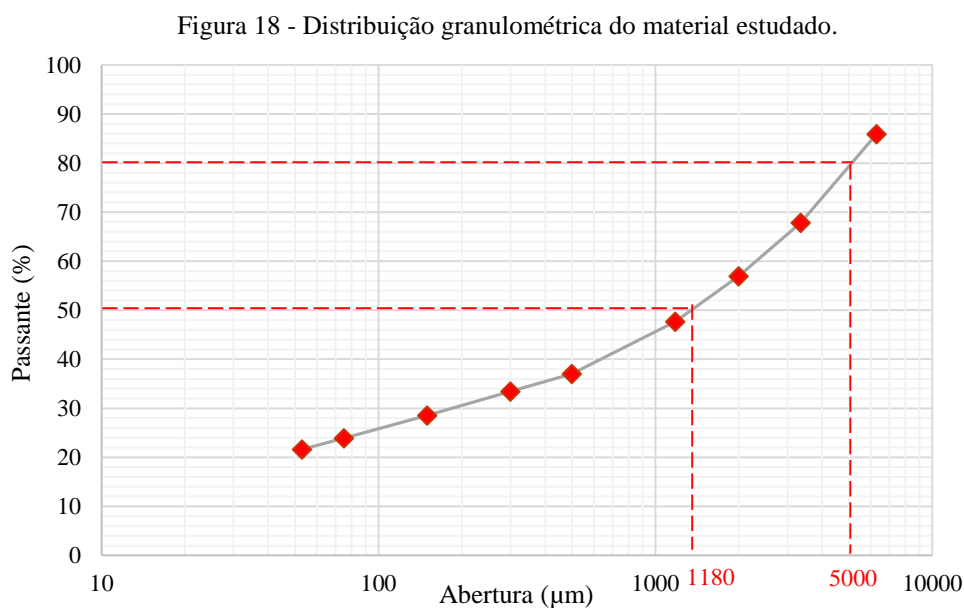
Figura 17 - Permeabilímetro de *Blaine*.



5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Análise granulométrica

A fim de se conhecer a distribuição de tamanho das partículas da pilha de estoque de minério hematítico, o peneiramento foi realizado com uma amostra do material recebido gerando a curva de distribuição granulométrica que é mostrada na Figura 18. A tabela com os valores das massas retidas em cada peneira se encontra no Apêndice A.



A curva revela a distribuição granulométrica de um material com 80 % de suas partículas abaixo de 5 mm. Portanto, é um material que realmente pode ser considerado um produto de britagem, estando de acordo com o fluxograma de beneficiamento empregado no local. As frações retidas em cada peneira foram então separadas, a fim de dar prosseguimento às análises seguintes com as mesmas.

Os resultados da distribuição granulométrica mostraram que, quando se trata de tamanho de partícula, cerca de 50 % da amostra está abaixo de 1,18 mm. Quanto à composição química, de acordo com a Tabela 6 abaixo, o maior teor de ferro (63,11 %) e o menor teor de sílica (4,85 %) da amostra se encontram na mesma faixa granulométrica, acima de 6,3 mm.

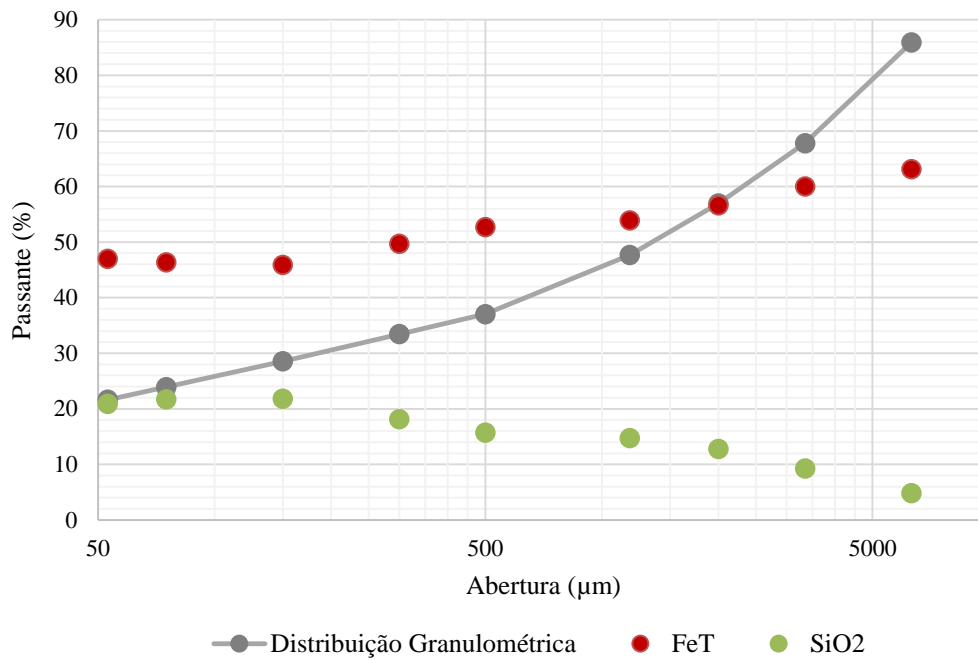
Tabela 6 - Resultados da análise granuloquímica.

Abertura	Massa Retida	Passante Acumulada	Conteúdo Magnetita	FeTotal	SiO ₂	Al ₂ O ₃	S	PPC
µm	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
6300	14,08	85,92	30,73	63,11	4,85	0,65	1,36	1,87
3350	18,13	67,80	31,20	59,98	9,27	1,78	0,89	1,50
2000	10,87	56,93	34,72	56,63	12,75	2,53	0,60	1,67
1180	9,26	47,67	31,40	53,88	14,75	3,11	1,41	2,57
500	10,62	37,05	29,19	52,67	15,70	3,24	2,12	3,01
300	3,61	33,44	26,48	49,67	18,15	3,58	3,20	4,04
150	4,89	28,55	26,33	45,92	21,80	4,55	2,50	3,71
75	4,65	23,90	26,18	46,35	21,70	4,57	1,74	3,05
53	2,28	21,62	27,82	46,99	20,90	4,37	1,11	2,34
-53	21,62	0,00	25,60	34,31	28,30	11,80	0,35	5,67
Amostra Original			27,41	50,51	16,35	4,42	1,510	3,35

Ao comparar o teor de ferro de todas as frações, é possível concluir que ele aumenta à medida que o tamanho das partículas se torna maior, o que sugere a necessidade de moagem para liberação das partículas de ferro nas frações mais grossas. Por outro lado, os maiores teores de sílica e óxido de alumínio estão na fração mais fina, abaixo de 0,053 mm. A análise granuloquímica completa do material se encontra no Apêndice B.

A Figura 19, com os teores de ferro e sílica relacionados à curva de distribuição granulométrica, revela que esses teores não apresentam diferenças drásticas ao longo da distribuição de tamanho. No entanto, é possível notar um crescimento no teor de sílica e uma redução do teor de ferro à medida que o tamanho das partículas se torna mais fino. Portanto, as frações mais grossas são mais ricas que as finas.

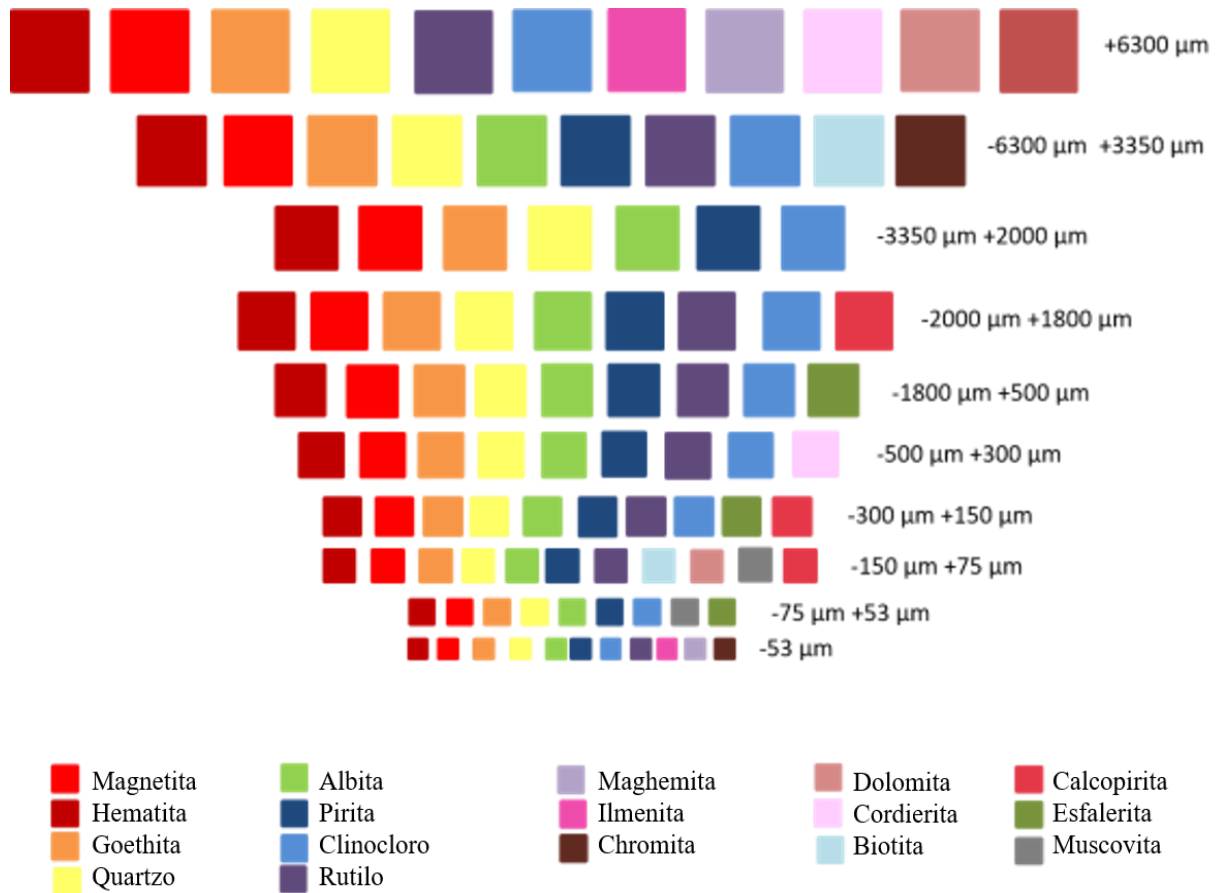
Figura 19 - Distribuição granulométrica do minério de ferro com os teores de ferro e sílica de cada fração retida.



5.2 Caracterização mineralógica

Os resultados obtidos a partir da análise qualitativa de Difração de raios X foram analisados adotando-se o *software* DIFFRAC.EVA, Bruker, que permite compatibilizar os picos gerados nos espectros de cada fração e os minerais listados em um banco de dados. Os minerais encontrados estão mostrados na Figura 20. É importante mencionar que se trata de um estudo qualitativo; portanto o percentual de cada mineral em cada fração não foi determinado. O número de minerais que compõem o minério é considerável. Os principais minerais, magnetita, hematita, quartzo, goethita e pirita, estão presentes em todas as frações. A presença de pirita em praticamente todas as frações explica o alto teor de enxofre determinado nos resultados de MEV/EDS, assim como o alumínio encontrado nessas mesmas análises, que também pode ser explicado pela presença de alguns silicatos contendo alumínio, como albita e clinocloro.

Figura 20 - Minerais determinados na Difração de raios X separados por fração retida (da mais grossa para a mais fina).



As frações representadas por cada linha de quadrados da Figura 15, foram as obtidas ainda pelo peneiramento a úmido realizado no início dos estudos. Em cada uma é possível visualizar os minerais presentes. Por exemplo, a fração mais fina, - 53 μm (primeira fila de quadrados de baixo para cima), apresenta uma maior diversidade de minerais, são eles: Hematita (Fe_2O_3), Magnetita (Fe_3O_4), Goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), Quartzo (SiO_2), Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Pirita (FeS_2), Clinocloro ($(\text{MgAl})_6(\text{OH})_8[(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}]$), Rutilo (TiO_2), Ilmenita (FeTiO_3), Maghemita ($\text{Fe}_{2,67}\text{O}_4$) e Chromita (FeCr_2O_4).

Outras frações mais grossas também apresentam diferentes minerais, tais como Dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, Cordierita $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Al}_3(\text{AlSi}_5\text{O}_{18})$, Biotita $\text{K}(\text{MgFeMn})_3(\text{OH}, \text{F})_2[\text{AlSiO}_{10}]$, Calcopirita (CuFeS_2), Esfalerita (ZnS) e Muscovita ($\text{KAl}_2(\text{OH}, \text{F})_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$).

5.3 Estudo de liberação

Uma abordagem rápida para quantificar a liberação foi empregada. O seu estudo foi executado em frações de duas faixas de tamanhos (- 106 + 75 μm) e (- 75 + 53 μm), primeiro, utilizando o material na sua granulometria original (Figura 21) e após a moagem (Figura 22):

Figura 21 - Frações (-106 +75 μm) e (-75 +53 μm) antes da moagem.

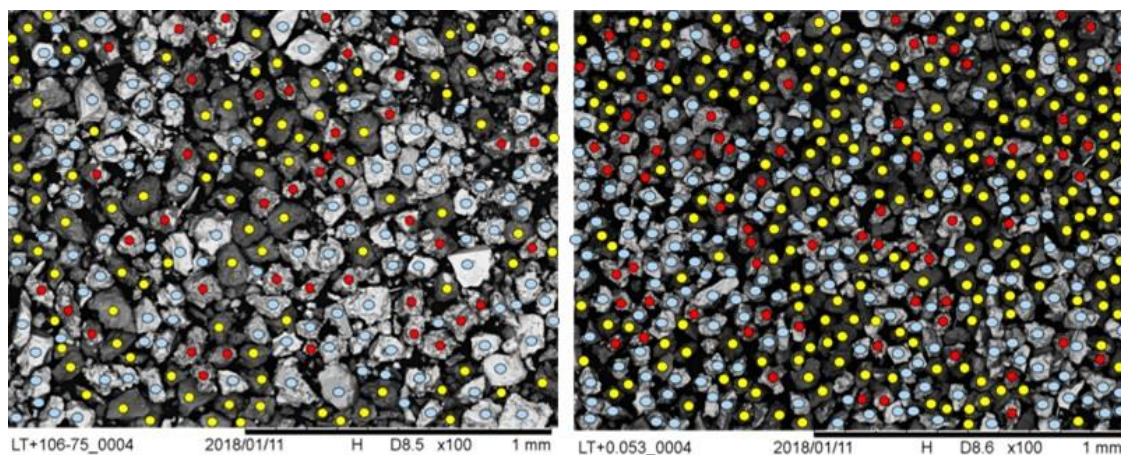


Figura 22 - Frações (-106 +75 μm) e (-75 +53 μm) depois da moagem.

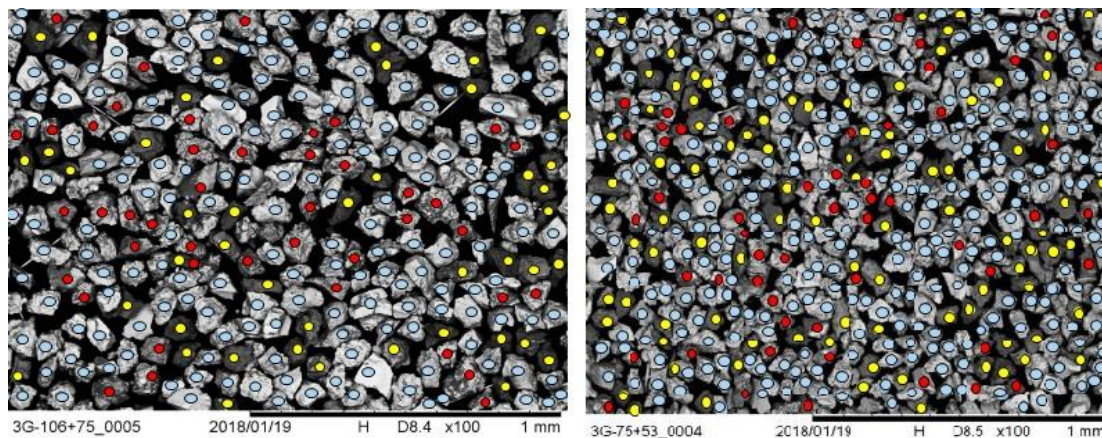


Tabela 7 - Resultados do estudo de liberação.

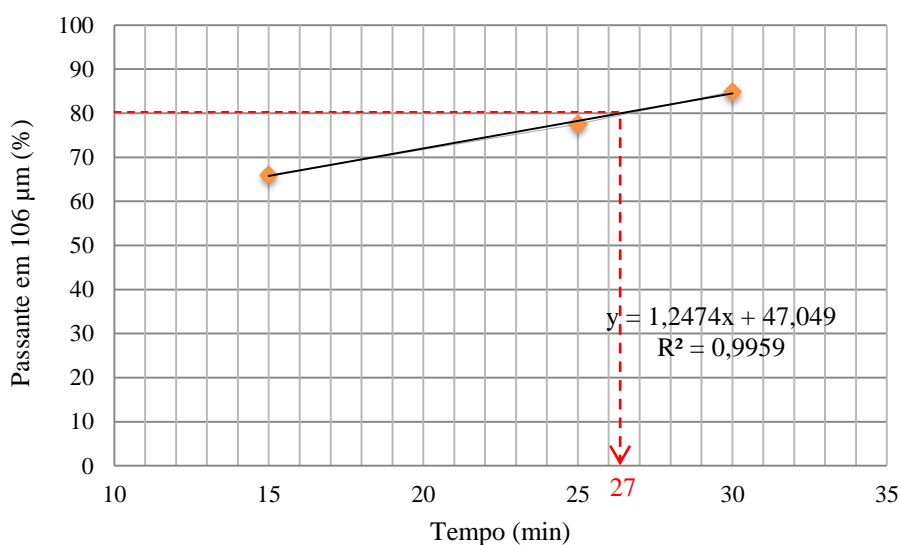
Partículas	ANTES da moagem		DEPOIS da moagem	
	(-106 + 75 μm)	(- 75 + 53 μm)	(-106 + 75 μm)	(- 75 + 53 μm)
Minerais de ferro ○	124 unidades	196 unidades	190 unidades	325 unidades
Ganga ●	95 unidades	198 unidades	44 unidades	95 unidades
Mistas ●	46 unidades	70 unidades	43 unidades	54 unidades
Total	265 unidades	464 unidades	277 unidades	474 unidades
Grau de liberação	73%	74%	81%	86%

Pelos resultados do estudo de liberação por contagem de pontos (Método de Gaudin), pode-se perceber que, embora esteja-se comparando os graus de liberação de frações com a mesma faixa granulométrica, a liberação, que por sua vez é calculada com base nas espécies de mineral úteis individualizadas, se demonstra maior nas frações que passaram por moagem. Pois, tal operação, ao reduzir a granulometria do minério, também atua individualizando as espécies minerais, aumentando assim o grau de liberação do material.

5.4 Cinética de moagem

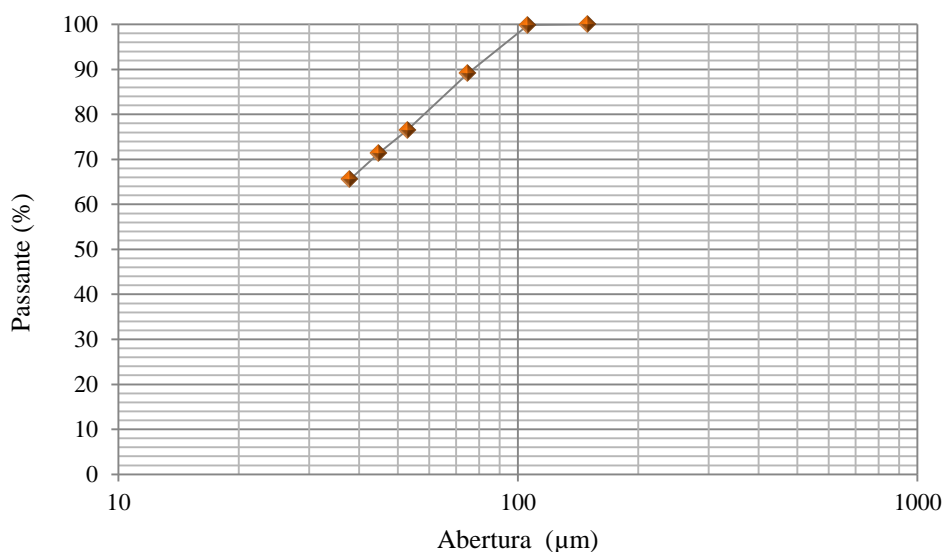
A Figura 23 da cinética de moagem foi construída com base nos resultados de três ensaios. Isso porque a terceira moagem já alcançou cerca de 85 % do material passante em 106 µm, com um tempo correspondente de 30 minutos. O gráfico revela que, para atingir 80 % de material passante no tamanho de liberação definido, são necessários 27 minutos de moagem.

Figura 23 - Cinética de moagem.



Após a moagem, a fim de verificar sua eficiência, a distribuição granulométrica do material moído (Figura 24) foi determinada por peneiramento a úmido adotando-se as seguintes peneiras: 150 µm, 106 µm, 75 µm, 53 µm, 45 µm e 38 µm. A tabela com os valores de sua distribuição granulométrica pode ser encontrada no Apêndice C.

Figura 24 - Distribuição granulométrica do material moído (peneiramento a úmido).

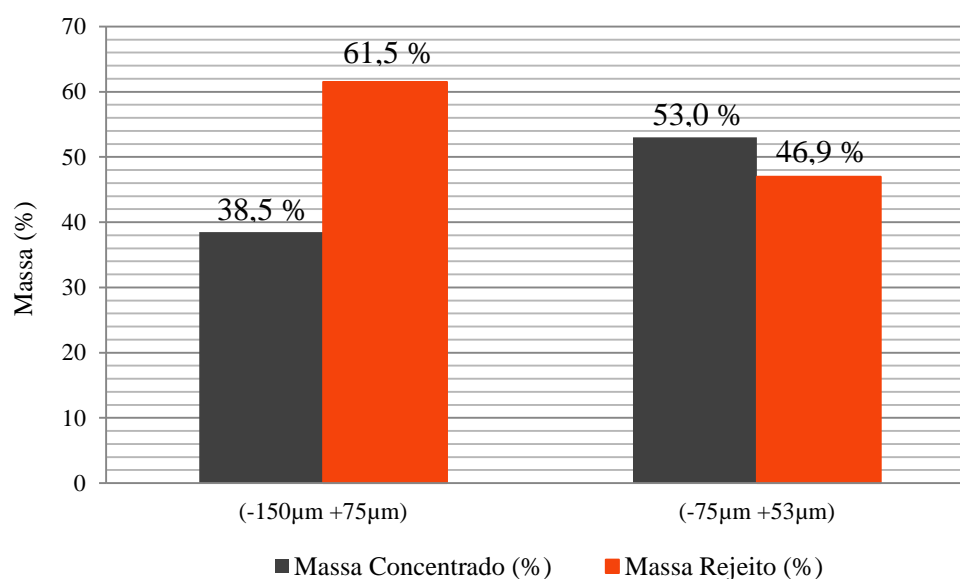


A curva revela que 100% do material está abaixo do tamanho de liberação, 106 μm , e ainda que 80 % disso se encontra abaixo de 60 μm .

5.5 Tubo Davis

Os resultados apresentados pelo Tubo Davis (Figura 25), adotando uma intensidade de campo magnético de 1000 Gauss, mostraram que, para se obter uma recuperação de partículas com alta susceptibilidade magnética, como a magnetita, é necessário realizar uma separação magnética primária em WHIMS adotando um campo magnético de 1500 Gauss. Utilizando-se esse campo, é possível obter uma boa recuperação para um primeiro estágio de concentração. Embora, para conseguir uma melhor recuperação, seja necessário aumentar o campo magnético em um segundo estágio, a fim de recuperar as partículas com menor susceptibilidade magnética, como a hematita.

Figura 25 - Produtos do Tubo Davis em um campo magnético de 1000 Gauss.



No entanto, aumentar demais o campo magnético no segundo estágio pode promover o arraste de partículas mistas para o concentrado, o que por um lado aumentará a recuperação mássica, mas, por outro, diminuirá o teor do concentrado. Portanto, é necessário estabelecer valores apropriados de campo magnético para cada estágio nos testes posteriores, a fim de se obter bons resultados.

5.6 WHIMS

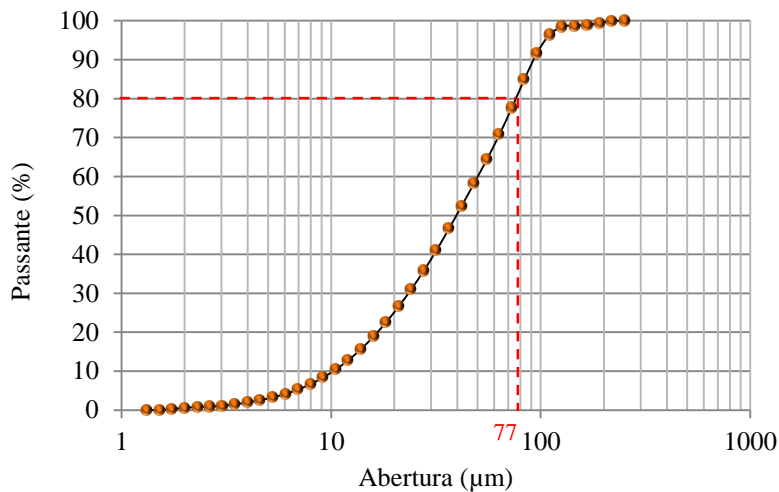
Os resultados obtidos pela realização dos testes WHIMS com o material abaixo de 106 µm são mostrados na Tabela 8. Primeiramente, é imprescindível enfatizar que os termos “*Rougher*”, “*Scavenger*”, “*Cleaner*” e “*Recleaner*” estão relacionados aos concentrados provenientes destas respectivas etapas. Observando os resultados das análises químicas, percebe-se que o teor de ferro aumenta adicionando o estágio *Cleaner*. Ao mesmo tempo, o conteúdo de sílica diminui à medida que o teor de ferro se torna mais alto. É interessante destacar os teores de ferro dos concentrados das etapas *Scavenger* no teste 1 e nos testes 2.1 e 2.2, por serem inferiores ao teor de ferro da própria alimentação, que é de 48,6 %.

Tabela 8 - Resultados dos testes no WHIMS.

Teste	Campo Magn. (Gauss)	Produtos	Massa	FeTotal	SiO ₂	Al ₂ O ₃	S	PPC	Rec.Met.Fe T
			(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Teste 1	1500	Conc. Rougher	50,25	64,08	6,12	1,40	0,22	0,28	72,05
	9000	Conc. Scavenger	13,89	44,38	20,30	6,13	0,89	5,37	13,79
		Rejeito	35,86	17,64	40,80	12,05	2,64	9,48	14,15
Teste 2.1	1500	Conc. Cleaner	51,78	66,19	3,83	0,64	0,08	-0,40	70,99
	9000	Conc. Scavenger	13,71	45,37	19,55	5,78	0,55	5,05	12,88
		Rejeito	34,52	22,55	42,10	12,20	2,71	7,43	16,12
Teste 2.2	1500	Conc. Cleaner	50,77	65,80	4,07	0,72	0,08	-0,38	70,87
	9000	Conc. Scavenger	13,08	44,42	20,30	6,38	0,54	5,37	12,32
		Rejeito	36,15	21,92	41,70	12,30	2,55	7,39	16,81
Teste 3.1	1500	Conc. Recleaner	53,75	65,87	3,46	0,56	0,05	-0,35	71,71
	6000	Conc. Scavenger	4,91	52,08	14,25	3,65	0,67	4,70	5,18
		Rejeito	41,34	27,60	36,60	10,70	3,01	7,52	23,11
Teste 3.2	1500	Conc. Recleaner	53,21	67,06	3,56	0,56	0,05	-0,35	71,95
	6000	Conc. Scavenger	4,88	51,13	15,25	3,79	0,60	4,54	5,04
		Rejeito	41,90	27,24	36,40	10,80	2,53	7,45	23,01
Alimentação Recalculada				48,59	18,65	5,22	1,13	3,13	-

Este fato pode ser explicado pelo forte campo magnético (9000 Gauss) que está promovendo o arraste de partículas mistas para o concentrado, diminuindo proporcionalmente o seu teor de Ferro Total. Esta situação foi contornada diminuindo-se o campo magnético nos ensaios 3.1 e 3.2 para 6000 Gauss como pode ser comprovado pelo teor de ferro dos concentrados *Scavenger*, que por sua vez são superiores ao teor de ferro da alimentação. É possível concluir que o WHIMS é um método adequado para concentrar o minério hematítico. A distribuição granulométrica do concentrado *Recleaner* é mostrada na Figura 26 e os resultados da análise química completa podem ser encontrados no Apêndice D.

Figura 26 - Distribuição granulométrica do concentrado *Recleaner*.



5.7 Determinação de superfície específica pelo Método de *Blaine*

Os resultados dos testes de *Blaine* realizados com a alimentação (abaixo de 106 μm) utilizada na separação magnética de alta intensidade e do seu concentrado são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados de superfície específica pelo Método de *Blaine*.

Material	<i>Blaine</i> (cm ² /g)
Material moído (Alimentação)	3495,54
Concentrado <i>Recleaner</i>	1197,02

A queda considerável nos resultados pode ser atribuída ao fato do WHIMS, além de concentrar, possuir uma ação deslamadora sobre a alimentação. Pois, o campo magnético atrai as partículas magnéticas mais grossas para concentrado, fazendo com que sua superfície específica média se torne muito menor quando comparada à superfície específica da alimentação, que por sua vez possui grande quantidade de partículas finas e, conseqüentemente, maior superfície específica.

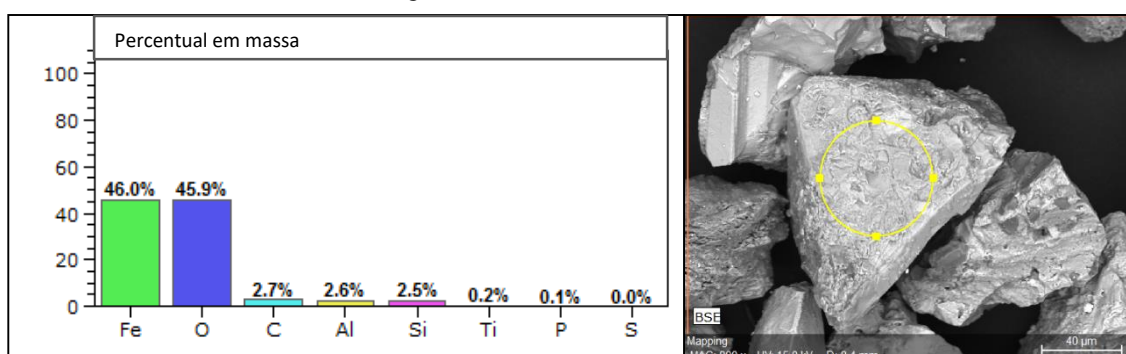
5.8 MEV / EDS (Microscopia Eletrônica de Varredura)

As imagens obtidas pelo sistema MEV/EDS são mostradas nas próximas figuras. Pela quantificação dos elementos revelada nos gráficos que acompanham cada imagem, é possível fazer uma suposição acerca do mineral que está sendo analisado pelo sistema. Além disso, alguns outros aspectos como a liberação e partículas circunvizinhas à partícula em questão também podem ser observados.

- **Análise do minério através do MEV/EDS após a moagem**

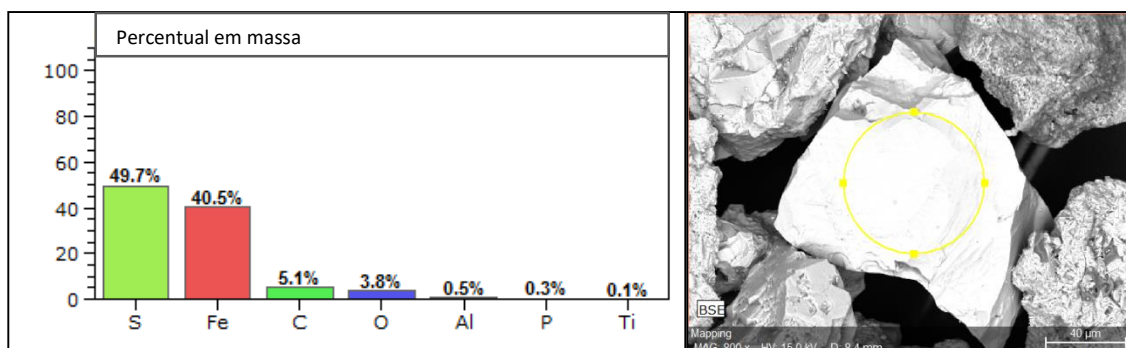
As imagens foram feitas a partir do material moído usado como alimentação para realizar os testes de separação magnética na fase de concentração. O material está abaixo de 106 μm , tamanho no qual foi possível obter um grau de liberação de mais de 80 %.

Figura 27- Análise de MEV/EDS.



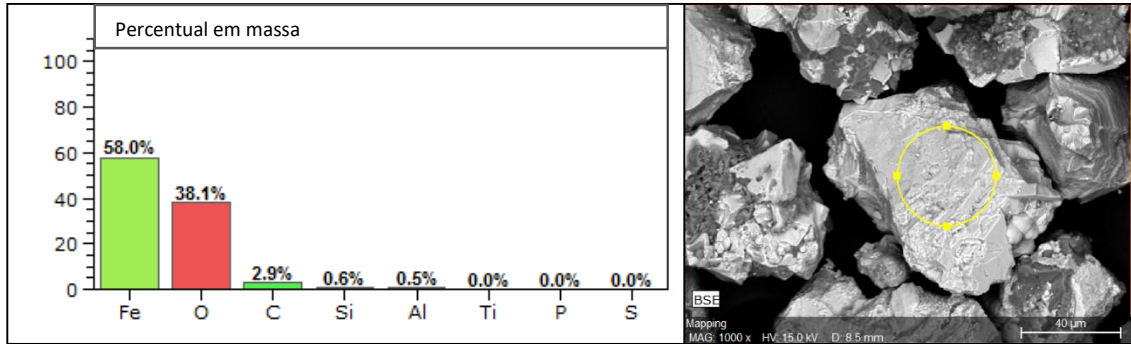
Exemplo de uma partícula livre de um mineral de Fe (provavelmente magnetita) do material moído (P_{80} de 106 μm) usado como alimentação na separação magnética (Figura 27).

Figura 28 - Análise de MEV/EDS.



Exemplo de uma partícula de pirita bem liberada na alimentação da separação magnética, após a moagem a um P_{80} de 106 μm (Figura 28).

Figura 29 - Análise de MEV/EDS.

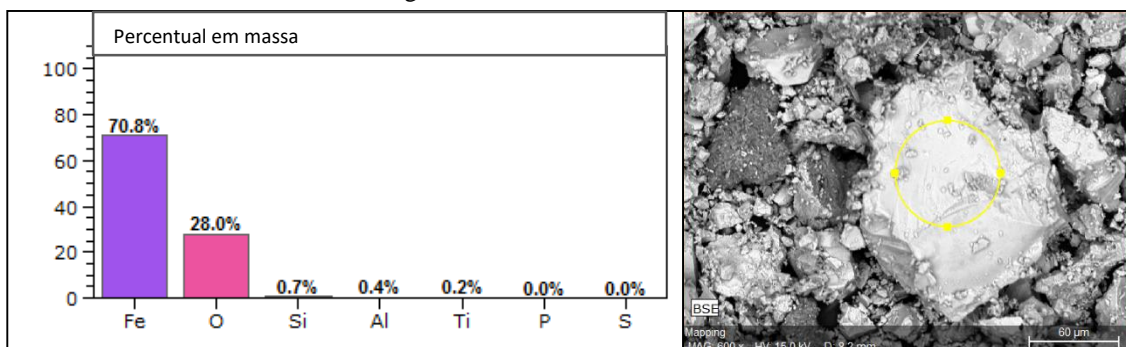


Outro exemplo de uma partícula livre de Fe do material moído (P₈₀ de 106 µm) usado como alimentação da separação magnética. Esta partícula, especificamente, parece estar bem liberada, embora haja partículas mistas em torno da partícula analisada (Figura 29).

- **Análise de produtos do WHIMS através do MEV/EDS**

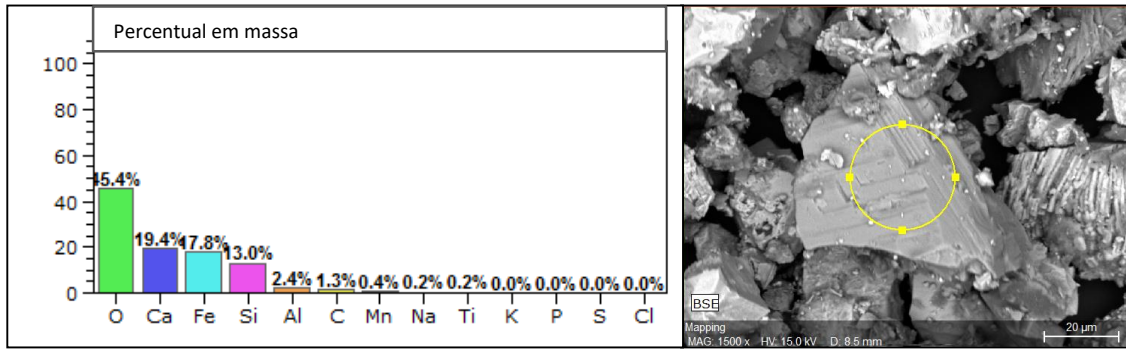
As próximas figuras referem-se aos produtos obtidos pela separação magnética de alta intensidade. As análises estão mostrando produtos magnéticos e não-magnéticos obtidos a partir dos estágios *Cleaner* e *Scavenger*. A Figura 30, por exemplo, representa uma partícula de mineral de ferro que é analisada por EDS. Como a imagem é uma BSE (obtida por elétrons retroespalhados), a cor cinza claro representa um alto peso atômico. Portanto, a maioria das partículas nesta figura não é de ganga, estando de acordo com o esperado.

Figura 30 - Análise de MEV/EDS.



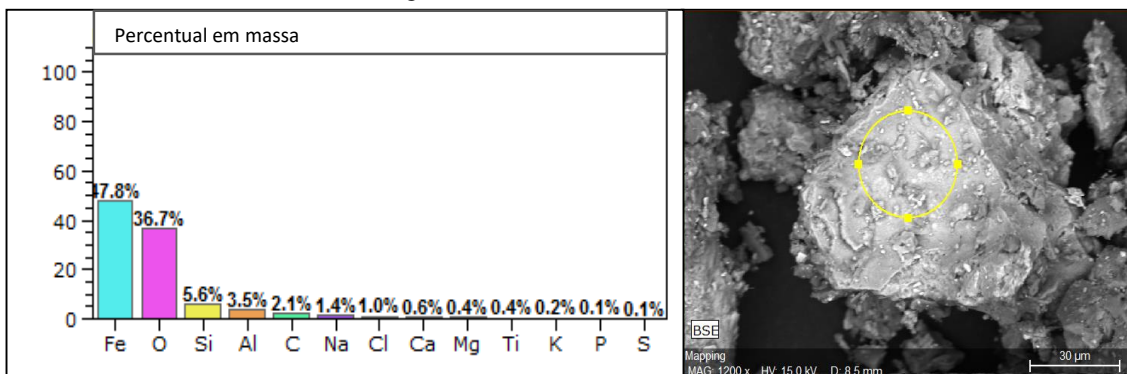
Exemplo de uma partícula de mineral de Fe no concentrado final, proveniente de um estágio *Cleaner*. Podem também serem observadas algumas partículas livres de ganga (Figura 30).

Figura 31 - Análise de MEV/EDS.



Exemplo de uma partícula livre de ganga no concentrado obtida no estágio *Scavenger* da separação magnética. Os altos teores de sílica e alumínio sugerem que pode se tratar de clinocloro, um silicato portador de alumínio (Figura 31).

Figura 32 - Análise de MEV/EDS.



De acordo com o alto teor de ferro, assim como de sílica e alumínio, essa partícula pode ser um exemplo de partícula mista (Figura 32). Pertence a um rejeito obtido com um estágio *Scavenger* da separação magnética. A presença de uma partícula mista nos rejeitos é indesejada, uma vez que significa a perda de ferro para os rejeitos. Tal problema só poderia ser resolvido por meio do aumento no tempo de moagem, o que também não é interessante devido a grande quantidade de finos gerada e ao aumento dos custos na cominuição.

5.9 Rotas de processamento propostas

Os resultados dos testes laboratoriais levaram a propor duas possibilidades de rotas de processamento, apresentadas nas Figuras 33 e 34, de acordo com a prioridade: alto teor de ferro no concentrado ou recuperação mássica.

Figura 33 - Fluxograma de beneficiamento com foco na qualidade do concentrado final.

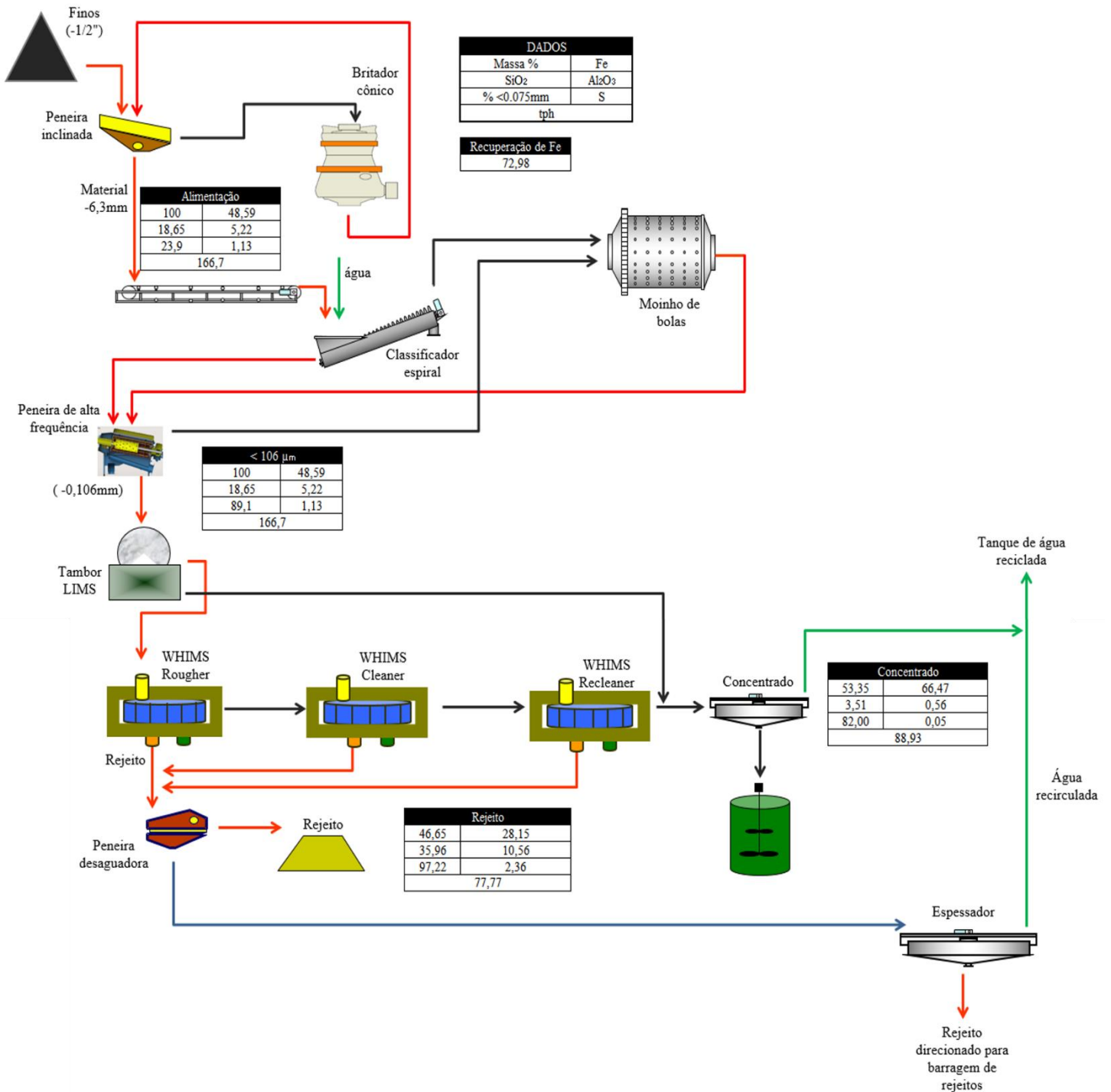
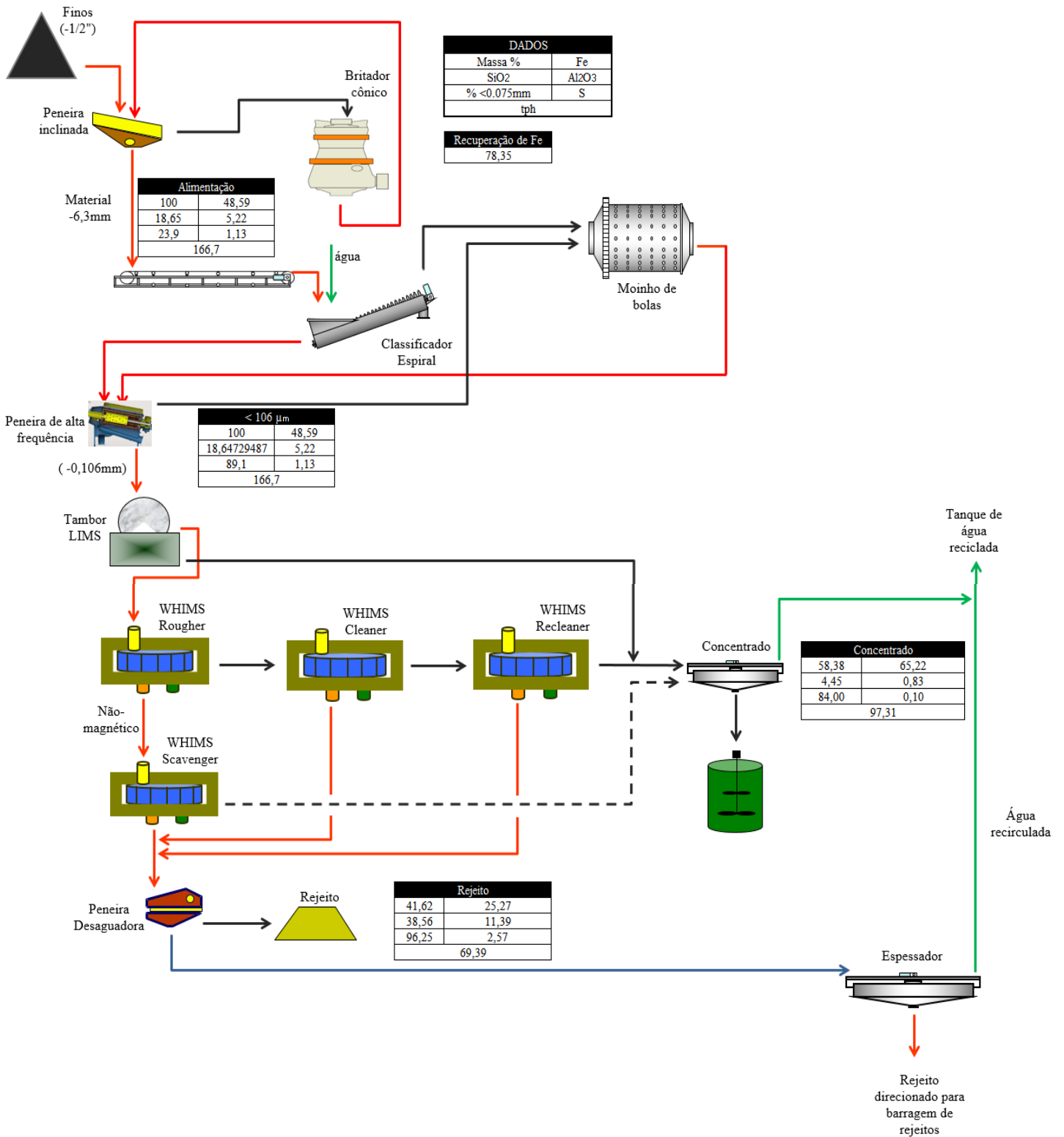


Figura 34 - Fluxograma de beneficiamento com foco na recuperação mássica.



Ambos fluxogramas utilizam o mesmo processo de concentração, no entanto, a diferença consiste na etapa *Scavenger*, que pode ser adicionada ou não. No primeiro fluxograma, priorizando o teor no concentrado, ou em outras palavras, a qualidade do produto final, a etapa *Scavenger* não existe; portanto, o processo consiste apenas em estágios *Rougher*, *Cleaner* e *Recleaner*. Este processo eleva o teor de ferro do minério de 48,59 % da alimentação, para 66,47 % no concentrado final produzido, obtendo uma recuperação de ferro em torno de 73 %. Ao mesmo tempo, este primeiro fluxograma possibilita a obtenção de baixo teor de sílica e contaminantes no produto final. Esta produção de concentrado de alto teor deve ser avaliada em caso de implementação, pois ao mesmo tempo implica uma diminuição da recuperação mássica.

No segundo fluxograma proposto, que prioriza a recuperação mássica, a etapa *Scavenger*, dessa vez presente, leva a obtenção de um concentrado mais pobre, que é incorporado ao concentrado de alta qualidade obtido pela etapa *Recleaner*. Essa mistura de diferentes concentrados traz benefícios como o aumento da recuperação mássica no concentrado final (58,38 %) e também da recuperação metalúrgica (78,35 %). No entanto, há uma leve diminuição do teor de ferro, 65,22 %, em comparação ao primeiro fluxograma (66,47 %), assim como um aumento do teor de sílica e outros contaminantes, como o enxofre e a alumina.

Ambos os fluxogramas demonstraram não apenas um aumento considerável do teor de ferro usando WHIMS, mas também uma redução significativa no teor de sílica e outros contaminantes como o enxofre, que são todos indesejáveis em processos metalúrgicos subsequentes.

6. CONCLUSÃO

A caracterização tecnológica do minério de ferro que compõe as pilhas de estoque demonstrou que o 80 % do material se encontra abaixo de 5 mm e que o mesmo apresenta um d_{50} de 1,18 mm. Os principais minerais constituintes do material são magnetita, hematita, quartzo, goethita e pirita. A pirita é a principal responsável pelo alto teor de enxofre, um dos contaminantes do minério em estudo, enquanto a albita e o clinoclóro, minerais que também compõem o minério, são responsáveis pelo alumínio presente.

Como essas pilhas de estoque já apresentam um teor de ferro considerável, um fluxograma complexo para concentrar o minério hematítico não é necessário. Ao submeter este minério em uma moagem a uma malha de moagem (MOG) de 106 μm é possível obter um concentrado de alta qualidade com 73 % de recuperação de Fe por um fluxograma de processamento que priorize o teor (66,47 % de teor de ferro) ou uma recuperação de metalúrgica em torno de 78 % por meio de um fluxograma de processamento priorizando a recuperação mássica (65,22 % de teor de ferro).

Ambos os concentrados obtidos com os fluxogramas de processamento propostos apresentam níveis de enxofre consideravelmente menores em comparação aos da alimentação, com uma redução de enxofre superior a 95%. No entanto, se esses concentrados forem usados na pelletização, provavelmente será necessária uma moagem adicional, uma vez que seu valor de superfície específica não está na faixa adequada para esta aplicação.

O fluxograma com foco na recuperação mássica é o que apresenta maior viabilidade econômica. Pois, o fluxograma que prioriza o teor do concentrado final, mesmo que ofereça um produto de melhor qualidade, tal produto não poderá ter outra aplicação que não seja a mesma do *pellet feed* proveniente do primeiro fluxograma. Isso porque sua qualidade não é suficientemente superior de forma a atender outro tipo de aplicação como na fabricação de pelotas para redução direta, por exemplo (cuja exigência está por volta de 67,8% de ferro), aumentando assim seu valor de mercado. Logo, uma vez que a qualidade dos concentrados não é um fator decisivo, a escolha permanece sobre a rota de processamento cuja recuperação mássica é maior.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ArcelorMittal. **Davis Tube Procedures**, MMP. Maizières-lès-Metz, 2018.
- ArcelorMittal. **Loss-On-Ignition Standard Operating Procedure**, MMP. Maizières-lès-Metz, 2013.
- ArcelorMittal. **Mining R&D Presentation**, MMP. Maizières-lès-Metz, 2018.
- ArcelorMittal. **Modo operativo Permeabilimetre de Blaine**, MMP. Maizières-lès-Metz, 2015.
- ArcelorMittal. **Satmagan Procedimentos**, MMP. Maizières-lès-Metz, 2015.
- AUGUSTO, K. S. **Identificação automática do grau de maturação de pelotas de minério de ferro**. 2012. 183 f. Dissertação de mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- BRANDÃO, P. et al. Caracterização Mineralógica e Tecnológica. In: VALADÃO, G.E.S.; ARAUJO, A.C. (Org.). **Introdução ao Tratamento de Minérios**. Editora UFMG. Belo Horizonte, 2012.
- Bruker**. 2017. Disponível em: <https://www.bruker.com..> Acesso em: fevereiro de 2018.
- Carbolite-Gero**. 2017. Disponível em: <http://www.carbolite-gero.com/products/ovens/industrial-ovens/lgp-large-general-purpose-ovens/function-features/>. Acesso em: janeiro de 2018.
- Eltra GmbH**. 2017. Disponível em: <http://www.eltra.com/products/chs-analyzers/cs-800/function-features/>. Acesso em: fevereiro de 2018.
- Gilson Company**, 2018. Disponível em <https://www.globalgilson.com/gilson-universal-sample-splitters>. Acesso em: fevereiro de 2018.
- GÓES, M. A. C.; LUZ, A. B.; POSSA, M. V. Amostragem. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. (Org.). **Tratamento de Minérios**. 4 edição. Rio de Janeiro, CETEM-MCT. 2004.
- GONZAGA, L. M. **Separação magnética a úmido de minérios de ferro itabiríticos**. 2014. 163 f. Dissertação de mestrado – UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.
- Gustavson Associates. **Technical Report on ArcelorMittal's Las Truchas Mineral Deposits**. Lazaro Cardenas, 2017.
- LIMA, J. L. **Las Truchas Low Grade Haematitic Stockpiles: A study about the amenability to concentration**. Relatório de estágio – Maizières-lès-Metz, 2017.

NEUMANN, R. et al. **Caracterização Mineralógica de Minérios Parte II**. p.92-93. Tratamento de Minérios, 5 ed. Rio de Janeiro 2010.

PAULA, N. N. **Estudos de correlação entre concentração magnética em escala de bancada, piloto e industrial**. 2014. 103 f. Dissertação de mestrado – UFMG, Belo Horizonte – MG, 2014.

PERES, A.; SALUM, M.; VALADÃO, G.; ARAUJO, A. C. Métodos de Concentração. In: VALADÃO, G.E.S.; ARAUJO, A.C. (Org.). **Introdução ao Tratamento de Minérios**. Editora UFMG. Belo Horizonte, 2012.

PETTY, M. C. **Molecular electronics – From Principles to Practice**. School of Engineering and Centre for Molecular and Nanoscale Electronics, Durham University, UK. 2007.

Rapiscan Systems. 2017. Disponível em: https://www.rapiscansystems.com/en/products/industrial_mining/productssatmagan_135. Acesso em: janeiro de 2018.

Retsch. 2017. Disponível em: <http://www.retsch.com/products/milling/ball-mills/mixer-mill-mm-400/function-features/>. Acesso em: janeiro de 2018.

SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C.; BRAGA, P. F. **Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais**. Rio de Janeiro : CETEM. 2007.

SAMPAIO, J. A.; SILVA, F. A. Análise Granulométrica por Peneiramento. In: SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C.; BRAGA, P. F. (Org.). **Tratamento de Minérios: Práticas laboratoriais** (pp. 55-72). Rio de Janeiro: CETEM. 2007.

SILVA, J. P. M. **Aplicação de separação magnética de alta intensidade (WHIMS) no beneficiamento de itabiritos pobres**. 2014. 129 f. Dissertação de mestrado – UFMG, Belo Horizonte – MG, 2014.

SILVA, M. B. **Separação magnética de ultrafinos hematíticos**. 2012. 281 f. Dissertação de mestrado – UFOP, Ouro Preto – MG, 2012.

VALADÃO, G.; MONTENEGRO, L.; GALERY, R. Balanço de Materiais. In: VALADÃO, G.E.S.; ARAUJO, A.C. (Org.). **Introdução ao Tratamento de Minérios**. Editora UFMG. Belo Horizonte, 2012.

WILLS, B.; NAPIER-MUNN, T. **Wills' Mineral Processing Technology**. Oxford: Butterworth-Heinemann. 2006.

APÊNDICES

Apêndice A

Tabela A - Distribuição granulométrica do material estudado.

Abertura (µm)	Massa Retida (g)	Massa Retida Acumulada (g)	% Retida Simples	% Retida Acumulada	% Acumulada passante
6300	288,40	288,40	14,08	14,08	85,92
3350	371,30	659,70	18,13	32,20	67,80
2000	222,60	882,30	10,87	43,07	56,93
1180	189,60	1071,90	9,26	52,33	47,67
500	217,60	1289,50	10,62	62,95	37,05
300	73,90	1363,40	3,61	66,56	33,44
150	100,20	1463,60	4,89	71,45	28,55
75	95,30	1270,50	4,65	76,10	23,90
53	46,70	1605,60	2,28	78,38	21,62
- 53	442,90	2048,50	21,62	100,00	0,00
Massa Total	2048,50		100,00		

Apêndice B

Tabela B - Análise granulométrica completa do material estudado.

Abertura	Massa	Massa	Satmagan	Resultados da Análise Química													
(μm)	(g)	(%)	(%)	Fe _t	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	P	Mn	Cu (ppm)	S	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
6300	288,40	14,08	30,73	63,11	9,54	4,85	0,65	1,00	0,24	0,05	0,042	0,05	280,00	1,36	0,03	0,04	1,87
3350	371,30	18,13	31,20	59,98	9,68	9,27	1,78	0,44	0,48	0,08	0,027	0,02	360,00	0,89	0,23	0,10	1,50
2000	222,60	10,87	34,72	56,63	10,77	12,75	2,53	0,72	0,57	0,12	0,033	0,08	510,00	0,60	0,41	0,22	1,67
1180	189,60	9,26	31,40	53,88	9,74	14,75	3,11	0,71	0,65	0,14	0,041	0,03	530,00	1,41	0,42	0,32	2,57
500	217,60	10,62	29,19	52,67	9,06	15,70	3,24	0,76	0,59	0,13	0,044	0,04	580,00	2,12	0,49	0,33	3,01
300	73,90	3,61	26,48	49,67	8,22	18,15	3,58	0,87	0,58	0,15	0,046	0,04	660,00	3,20	0,61	0,42	4,04
150	100,20	4,89	26,33	45,92	8,17	21,80	4,55	1,10	0,70	0,20	0,048	0,04	720,00	2,50	0,72	0,50	3,71
75	95,30	4,65	26,18	46,35	8,13	21,70	4,57	1,28	0,66	0,22	0,045	0,04	620,00	1,74	0,73	0,48	3,05
53	46,70	2,28	27,82	46,99	8,63	20,90	4,37	1,32	0,61	0,22	0,041	0,04	580,00	1,10	0,71	0,45	2,34
- 53	442,90	21,62	25,60	34,31	7,94	28,30	11,80	0,99	1,28	0,44	0,057	0,05	114,00	0,35	0,70	0,64	5,67
Amostra inicial	2048,50	100,00	27,41	50,51	8,51	16,35	4,42	0,86	0,75	0,18	0,040	0,05	590,00	1,51	0,43	0,32	3,35

Apêndice C

Tabela C – Distribuição granulométrica do material moído.

Distribuição granulométrica					
Tamanho de partícula		Massa retida	<i>Oversize</i>		<i>Undersize</i>
Peneira	Abertura	Massa	Simples	Acumulada	Passante
	(μm)	(g)	(%)	(%)	(%)
1	150	0,00	0,00	0,00	100,00
2	106	0,50	0,12	0,12	99,88
3	75	45,30	10,79	10,90	89,10
4	53	52,46	12,49	23,40	76,60
5	45	21,38	5,09	28,49	71,51
6	38	24,80	5,90	34,39	65,61
7	- 38	275,56	65,61	100,00	0,00
Total		420,00	100,00		

Apêndice D

Tabela D – Análise Química completa e resultados dos testes no WHIMS.

Amostra				Massa			Fe	Análise Química												
Série	Campo Magnético	Corrente Elétrica	Produto	Massa	Massa	Acumulada	Recuperação Metalúrgica	FeT	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	P	Mn	Na ₂ O	K ₂ O	S	LOI
	(Gauss)	(A)		(g)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Teste 1	1500	0,40	Rougher	19,90	50,25	50,25	72,05	64,08	11,45	6,12	1,40	0,50	0,31	0,09	0,024	0,03	0,10	0,09	0,22	0,28
	9000	2,80	Scavenger	5,50	13,89	64,14	13,79	44,38	2,32	20,30	6,13	1,60	0,95	0,26	0,073	0,06	0,40	0,35	0,89	5,37
			Rejeito	14,20	35,86	100,00	14,15	17,64	1,00	40,80	12,05	4,38	1,83	0,41	0,063	0,05	2,31	1,11	2,64	9,48
Alimentação Recalculada				39,60	100,00	-	100,00	44,69	6,43	20,53	5,88	2,04	0,94	0,23	0,040	0,04	0,04	0,50	1,18	4,29
Teste 2.1	1500	0,40	Cleaner	20,40	51,78	51,78	70,99	66,19	1,70	3,83	0,64	0,48	0,22	0,07	0,019	0,03	0,04	0,05	0,08	-0,40
	9000	2,80	Scavenger	5,40	13,71	65,48	12,88	45,37	2,62	19,55	5,78	1,95	0,93	0,26	0,072	0,06	0,37	0,33	0,55	5,05
			Rejeito	13,60	34,52	100,00	16,12	22,55	1,13	42,10	12,20	1,38	1,62	0,42	0,067	0,06	1,36	0,99	2,71	7,43
Alimentação Recalculada				39,40	100,00	-	100,00	48,27	7,32	19,19	5,33	0,99	0,80	0,22	0,040	0,04	0,04	0,41	1,05	3,05
Teste 2.2	1500	0,40	Cleaner	19,80	50,77	50,77	70,87	65,80	1,70	4,07	0,72	0,49	0,23	0,07	0,019	0,03	0,05	0,05	0,08	-0,38
	9000	2,80	Scavenger	5,10	13,08	63,85	12,32	44,42	2,08	20,30	6,38	1,77	0,97	0,28	0,076	0,06	0,40	0,36	0,54	5,37
			Rejeito	14,10	36,15	100,00	16,81	21,92	1,06	41,70	12,30	1,37	1,65	0,42	0,069	0,06	1,36	0,99	2,55	7,39
Alimentação Recalculada				39,00	100,00	-	100,00	47,14	7,10	19,80	5,65	0,98	0,84	0,22	0,040	0,04	0,04	0,43	1,03	3,18
Teste 3.1	1500	0,40	Recleaner	20,80	53,75	53,75	71,71	65,87	13,00	3,46	0,56	0,49	0,21	0,07	0,018	0,03	0,04	0,04	0,05	-0,35
	6000	1,60	Scavenger	1,90	4,91	58,66	5,18	52,08	1,86	14,25	3,65	0,81	0,52	0,20	0,055	0,04	0,25	0,24	0,67	4,70
			Rejeito	16,00	41,34	100,00	23,11	27,60	1,22	36,60	10,70	1,55	1,50	0,39	0,078	0,06	1,13	0,86	3,01	7,52
Alimentação Recalculada				38,70	100,00	-	100,00	49,37	7,58	17,69	4,90	0,94	0,76	0,21	0,040	0,04	0,04	0,39	1,30	3,15
Teste 3.2	1500	0,40	Recleaner	20,70	53,21	53,21	71,95	67,06	12,95	3,56	0,56	0,44	0,21	0,07	0,018	0,03	0,03	0,04	0,05	-0,35
	6000	1,60	Scavenger	1,90	4,88	58,10	5,04	51,13	1,51	15,25	3,79	0,86	0,53	0,21	0,057	0,04	0,27	0,26	0,60	4,54
			Rejeito	16,30	41,90	100,00	23,01	27,24	1,23	36,40	10,80	1,52	1,52	0,39	0,078	0,06	1,10	0,85	2,53	7,45
Alimentação Recalculada				38,90	100,00	-	100,00	49,60	7,48	17,89	5,01	0,91	0,77	0,21	0,050	0,04	0,05	0,39	1,12	3,16



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



Certifico que a aluna **Bárbara Dornelas de Assis**, autora do trabalho de conclusão de curso intitulado “**Caracterização tecnológica de uma pilha de estoque de minério hematítico para produção de um pellet feed**”, efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.

Prof. Dra. Érica Linhares Reis

Orientadora

Ouro Preto, 18 de fevereiro de 2019.