



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

LUIS FERNANDO MOTA BONTEMPO

**RECUPERAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO ATRAVÉS DA
CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA VISANDO A OBTENÇÃO DE *PELLET FEED***

ARAXÁ - MG

2017

LUIS FERNANDO MOTA BONTEMPO

**RECUPERAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO ATRAVÉS DA
CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA VISANDO A OBTENÇÃO DE *PELLET FEED***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Douglas G. Magalhães

ARAXÁ - MG

2017

LUIS FERNANDO MOTA BONTEMPO

**RECUPERAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO ATRAVÉS DA
CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA VISANDO A OBTENÇÃO DE *PELLET FEED***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Araxá, 20 de junho de 2017.

Presidente e Orientador: Prof. Me. Douglas Geraldo Magalhães
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG - Unidade Araxá

Membro Titular: Prof. Me. Leandro Henrique dos Santos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG - Unidade Araxá

Membro Titular: Prof. Dra. Michelly dos Santos Oliveira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG - Unidade Araxá

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho, em especial:

Ao professor Douglas Geraldo Magalhães pela orientação;

À professora Michelly dos Santos Oliveira pelo auxílio, sugestões e esclarecimentos;

Ao técnico João Victor da Silva Alves pelo suporte durante a realização dos testes laboratoriais;

À Larissa Moreira Lopes pela disponibilização das amostras;

À minha companheira Marina Martins pelo carinho, apoio e paciência durante a realização deste trabalho.

*A mente que se abre a uma nova ideia
jamais volta ao seu tamanho inicial.*

Albert Einstein

RESUMO

O aumento da produção de minério de ferro e a exploração de jazidas com teores cada vez menores gerou um aumento na produção de rejeitos. Atualmente as empresas vêm adotando medidas com o objetivo de otimizar as operações de concentração, visando recuperar a máxima quantidade do metal de interesse e, conseqüentemente, reduzir o volume de rejeito lançado nas barragens. O presente trabalho propôs avaliar a viabilidade da recuperação do ferro presente no rejeito final da empresa Minerita Minérios Itaúna Ltda por meio da concentração magnética de alta intensidade a úmido em escala de bancada. Foi avaliada a influência das variáveis porcentagens de sólidos da polpa e volume de água de lavagem na operação. Testes exploratórios de concentração magnética foram realizados para determinar os melhores parâmetros operacionais do separador magnético. Posteriormente, foram executados ensaios de concentração magnética, em etapas *rougher* e *cleaner* visando a obtenção de um concentrado com teor correspondente ao *pellet feed*. A etapa *rougher* foi realizada utilizando-se uma amostra com 2,59% de ferro, porcentagem de sólidos de 40% e 250 mL de água de lavagem, onde foi obtido um concentrado com 13,99% de ferro, que serviu de alimentação para a etapa *cleaner*. Utilizando-se uma porcentagem de sólidos de 20% e 500 mL de água de lavagem nesta etapa, obteve-se um concentrado final com 68,8% de ferro. Este concentrado está dentro das especificações do mercado e pode ser blendado aos atuais produtos da empresa ou até mesmo se tornar um novo produto. Observou-se que o aumento da porcentagem de sólidos provocou uma redução do teor de ferro do concentrado, já o aumento da água de lavagem proporcionou um aumento no teor de ferro do concentrado.

Palavras-chave: Concentração magnética. Rejeito. Minério de ferro. Porcentagem de sólidos. Volume de água de lavagem.

ABSTRACT

The increase in the iron ore production and the exploitation of deposits with smaller and smaller contents generated an increase in the production of tailings. Currently the companies have been adopting measures with the objective of optimizing the concentration processes, aiming to remove the maximum quantity of the metal of interest and, consequently, to reduce the volume of tailings deposited in the dams. The present work proposed to evaluate the viability of the recovery of the iron present in the final tailings of the company Minerita Minérios Itaúna Ltda by means of the high intensity magnetic concentration to the humid in bench scale. The influence of the variables pulp solids percentages and wash water volume on the operation was evaluated. Exploratory tests of magnetic concentration were performed to determine the best operational parameters of the magnetic separator. Subsequently, magnetic concentration tests were carried out in rougher and cleaner stages in order to obtain a concentrate with a content corresponding to the pellet feed. The rougher stage was performed using a 2.59% iron sample, 40% solids percentage and 250 mL wash water, where a concentrate of 13.99% iron was obtained, which served as feed for the step cleaner. Using a 20% solids percentage and 500 mL wash water at this stage, a final concentrate of 68.8% iron was obtained. This concentrate is within the specifications of the market and can be blended into the company's current products or even become a new product. It was observed that the increase in the solids percentage caused a reduction of the iron content of the concentrate, while the increase of the washing water provided an increase in the iron content of the concentrate.

Keywords: Magnetic concentration. Tailing. Iron ore. Percent solids. Washing water volume.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Hematita	14
Figura 2.2 - Magnetita.	14
Figura 2.3 - Países detentores das maiores reservas mundiais de ferro.....	15
Figura 2.4 - Principais países produtores de minério de ferro.	15
Figura 2.5 - Estados brasileiros com ocorrência de minério de ferro.....	16
Figura 2.6 - Estados detentores das maiores reservas de ferro no Brasil	17
Figura 2.7 - Distribuição da produção de minério de ferro pelos estados brasileiros	17
Figura 2.8 - Principais produtos de minério de ferro produzidos pela CSN	18
Figura 2.9 - Indução magnética para minerais (a) ferromagnéticos, (b) paramagnéticos e (c) diamagnéticos em função da intensidade do campo magnético	21
Figura 2.10 - (a) Campo magnético uniforme e (b) convergente, apresentando o gradiente de campo.....	22
Figura 2.11 - Diagrama apresentando as principais características, classificação e aplicações dos separadores magnéticos.....	23
Figura 2.12 - Vista geral de um separador magnético de carrossel usado em escala laboratorial.....	24
Figura 2.13 - Montagem das matrizes de forma intercalada	25
Figura 2.14 - (a) Vista frontal e (b) vista lateral do conjunto de alimentação	25
Figura 3.1 - Fluxograma indicando as etapas de preparação das amostras.	26
Figura 3.2 - Etapas do teste de picnometria.	29
Figura 3.3 - Vista geral do separador magnético.....	31
Figura 3.4 - Amostra utilizada na preparação das polpas	32
Figura 4.1 - Curva granulométrica da amostra de alimentação do separador magnético	35
Figura 4.2 - Gráfico de porcentagem de ferro no concentrado vs. recuperação mássica	36
Figura 4.3 - Gráfico da variação dos efeitos principais.....	38
Figura 4.4 - Gráfico da interação dos efeitos principais.....	39
Figura 4.5 – Fluxograma detalhando as etapas rougher e cleaner	41
Figura 4.6 – Comparação entre as amostras de alimentação e produtos de cada etapa de concentração	42

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 2.1 - Principais características da hematita e magnetita.....	13
Quadro 3.1 - Série de peneiras utilizadas na análise granulométrica.....	27
Quadro 3.2 - Variáveis e níveis estudados.....	30
Quadro 3.3 - Matriz do planejamento.	30
Quadro 4.1 - Distribuição granulométrica da amostra de alimentação do separador magnético.....	34
Quadro 4.2 - Resultados do teste de picnometria.	35
Quadro 4.3 - Resultados dos ensaios de concentração magnética.....	37
Quadro 4.4 - Resultados da etapa cleaner.....	37
Quadro 4.5 - Teste de planejamento experimental: porcentagem de Fe no concentrado	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	Minério de Ferro.....	13
2.1.1	Cenário Mundial.....	14
2.1.2	Cenário Nacional	15
2.2	Concentração de Minério de Ferro	18
2.3	Concentração Magnética	20
2.4	Concentrador Magnético de Alta Intensidade à Úmido de Carrossel.....	24
3	METODOLOGIA	26
3.1	Origem e Preparação da Amostra	26
3.2	Análise Granulométrica	27
3.3	Cálculo do Teor da Amostra	28
3.4	Planejamento Experimental	30
3.5	Ensaio de Concentração Magnética.....	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
4.1	Análise Granulométrica	34
4.2	Cálculo do Teor da Amostra	35
4.3	Ensaio de Concentração Magnética.....	36
4.4	Análise Estatística dos Ensaio de Concentração Magnética	38
4.5	Ensaio de Concentração Magnética Visando a Obtenção de Pellet Feed .	40
5	CONCLUSÕES.....	43
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

O ferro é um dos elementos mais abundantes da litosfera, onde entra na proporção de 4,2% (WALDE, 1986). As reservas mundiais de minério de ferro totalizam 190 bilhões de toneladas e a produção mundial em 2014 foi estimada em 3,2 bilhões de toneladas. O Brasil ocupa uma posição mundial de destaque tanto como detentor de reservas (11,9%) como produtor (12,8%). Dentre os estados brasileiros, Minas Gerais se destaca como o maior produtor de minério de ferro, possuindo grandes reservas, principalmente na região do Quadrilátero Ferrífero (JESUS, 2016).

A maior parte do minério de ferro produzido se destina à indústria siderúrgica para a produção de aço. O restante da produção é destinado a outros ramos da indústria, como a cimenteira (MAIA, 2011). A siderurgia requer um produto com teor de ferro acima de 64% (LOPES; LIMA, 2009).

A concentração de minério de ferro pode ser efetuada através de métodos gravíticos, concentração magnética e flotação. Neste contexto se insere a concentração magnética, que é utilizada quando a propriedade diferenciadora consiste na forma como os minerais respondem ao campo magnético e, desta forma, separa os minerais magnéticos dos não-magnéticos (REIS *et al*, 2015).

O aumento da produção de minério de ferro, em decorrência da alta demanda mundial e da exaustão das jazidas de altos teores, acarretou em um aumento na geração de rejeitos. Entretanto, essa tendência no aumento da produção de rejeitos se confronta com as dificuldades impostas pelos órgãos ambientais para o licenciamento de novas áreas para deposição desses rejeitos. Além disso, existe a preocupação dos órgãos ambientais quanto aos possíveis danos associados às barragens de rejeito.

Diante deste cenário, a maior recuperação de hematita visa maximizar a vida útil das reservas, além de contribuir para a redução dos impactos ambientais gerados pela deposição de rejeitos, diminuindo a quantidade de resíduos dispostos no meio ambiente, aumentando a vida útil das barragens e minimizando a área de impacto de futuras barragens.

O presente trabalho propõe avaliar a viabilidade da recuperação do ferro presente no rejeito da empresa Minerita Minérios Itaúna Ltda, proveniente do Quadrilátero Ferrífero, via concentração magnética de alta intensidade a úmido, visando a obtenção de *pellet feed*.

Os objetivos específicos deste trabalho foram avaliar a influência das variáveis porcentagem de sólidos da polpa e volume de água de lavagem na eficiência do processo de concentração magnética e analisar a interação entre as variáveis em estudo através do planejamento fatorial.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este tópico apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre os aspectos gerais do minério de ferro e seus principais métodos de concentração, com um enfoque na concentração magnética.

2.1 Minério de Ferro

Durante a evolução geológica, as formações ferríferas sofreram alterações mineralógicas e modificações texturais. Sua abundância e capacidade de oxidar ou reduzir conforme o ambiente proporcionou aos minerais portadores de ferro uma ampla diversidade de formas (HENRIQUES, 2012). As jazidas de minério de ferro têm ampla distribuição na Terra e podem ser encontradas em todas as épocas geológicas (WALDE, 1986).

Aproximadamente 300 minerais têm ferro como componente essencial, mas somente os óxidos apresentam grandes concentrações e são considerados economicamente exploráveis. O ferro nativo raramente é encontrado na natureza (WALDE, 1986).

Os principais minerais que contêm ferro em sua composição química e de maior importância para a mineração são a hematita (figura 2.1) e a magnetita (figura 2.2). O quadro 2.1 apresenta uma comparação entre as principais características físico-químicas desses minerais de acordo com Dana e Hurlbut (1974).

Quadro 2.1 - Principais características da hematita e magnetita.

Características	Hematita	Magnetita
Fórmula química	Fe_2O_3	Fe_3O_4
Susceptibilidade magnética	Paramagnético	Ferromagnético
Densidade (g/cm^3)	4,9 – 5,3	5,17 – 5,18
Escala de dureza (mohs)	5,5 – 6,5	5,5 – 6,5
Traço	Avermelhado	Preto
% Fe (máx.)	70	72,4

Fonte – DANA; HURLBUT (1974).



Figura 2.1 - Hematita (Laboratório de Mineralogia - CEFET-MG Campus Araxá).



Figura 2.2 - Magnetita (Laboratório de Mineralogia - CEFET-MG Campus Araxá).

2.1.1 Cenário Mundial

Em 2014 as reservas mundiais de minério de ferro foram estimadas em 190 bilhões de toneladas. A produção mundial no mesmo ano foi de 3,2 bilhões de toneladas (JESUS, 2016). As figuras 2.3 e 2.4 apresentam, respectivamente, a distribuição das reservas e a produção mundial de minério de ferro em 2014, de acordo com Jesus (2016).

Reservas Mundiais de Minério de Ferro

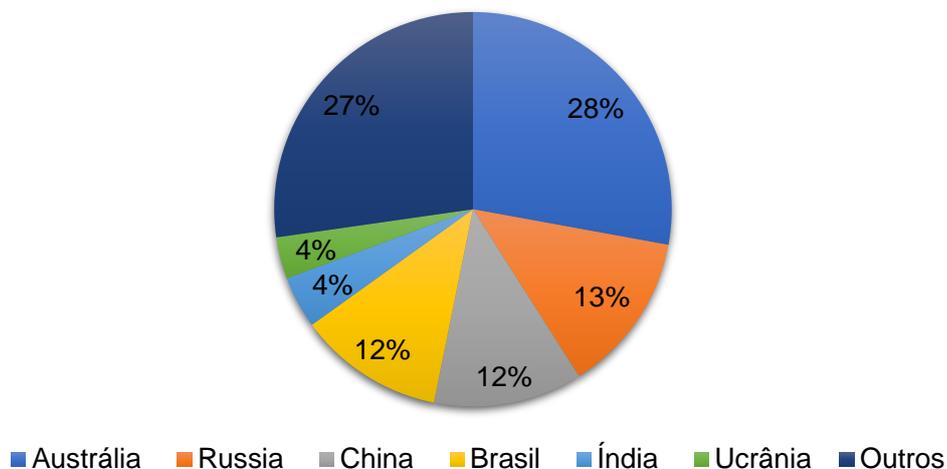


Figura 2.3 - Países detentores das maiores reservas mundiais de ferro (JESUS, 2016).

Produção Mundial de Minério de Ferro

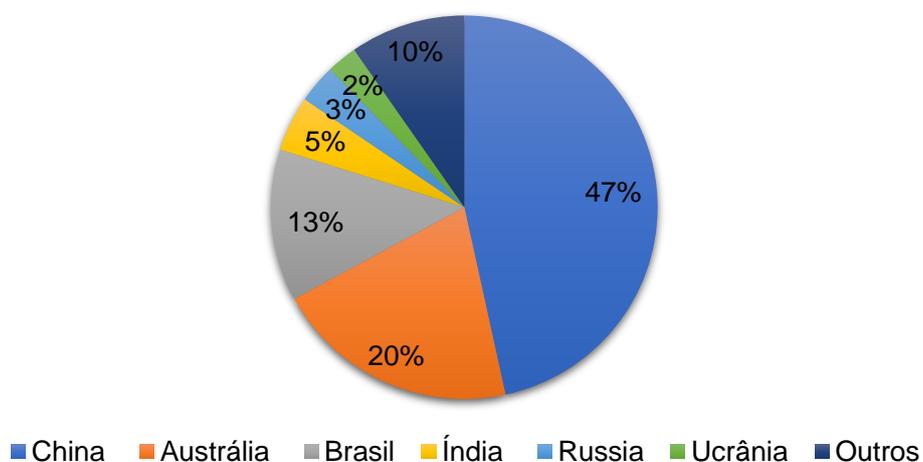


Figura 2.4 - Principais países produtores de minério de ferro (JESUS, 2016).

2.1.2 Cenário Nacional

As reservas medidas e indicadas de minério de ferro no Brasil em 2014 alcançaram 22,5 bilhões de toneladas, representando 11,9% das reservas mundiais. No mesmo ano o Brasil foi o terceiro maior produtor mundial, alcançando uma produção de 411,8 milhões de toneladas (12,8% da produção mundial) (JESUS, 2016).

Há ocorrência de minério de ferro em vários estados brasileiros, mas somente Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Pará apresentam reservas significativas. A figura 2.5 indica os estados brasileiros onde há ocorrência de minério de ferro, de acordo com Maia (2011).

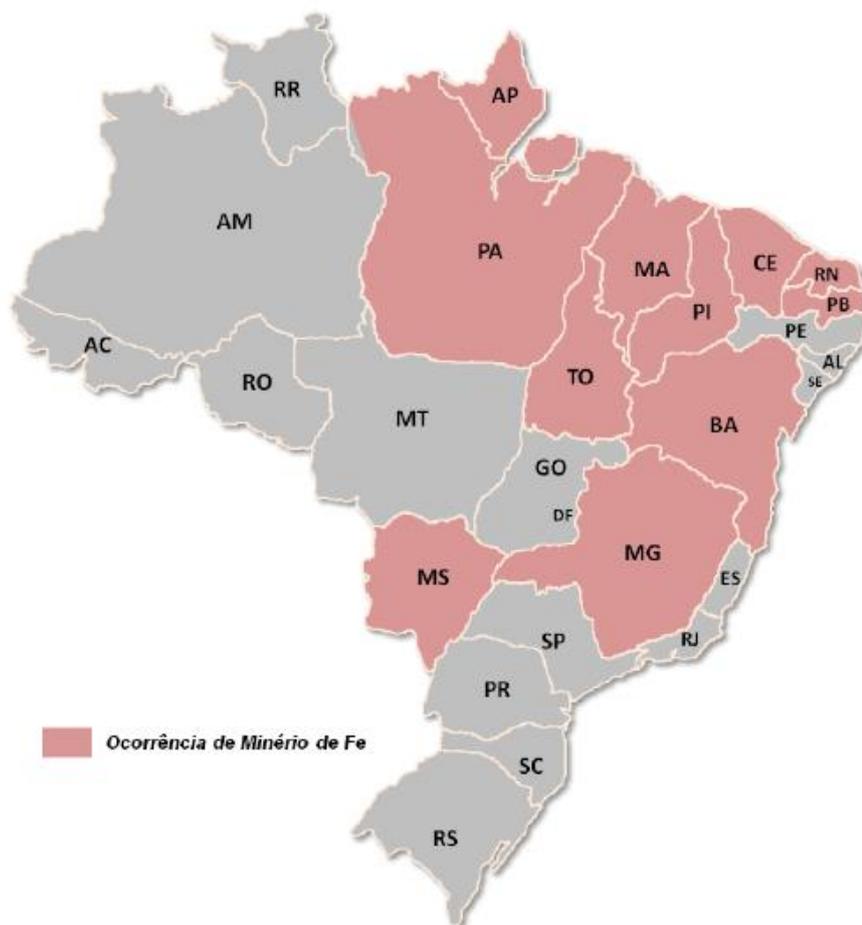


Figura 2.5 - Estados brasileiros com ocorrência de minério de ferro (MAIA, 2011).

Existem predominantemente dois tipos de minério de ferro no Brasil: o hematítico, predominante no Pará, com teor médio de 64,8% de ferro e o itabirítico, em Minas Gerais, com teor médio de 46,3% de ferro (JESUS, 2016).

As figuras 2.6 e 2.7 apresentam, respectivamente, os estados detentores das maiores reservas de minério de ferro no Brasil e a distribuição da produção pelos estados brasileiros de acordo com Jesus (2016).

Reservas Brasileiras de Minério de Ferro

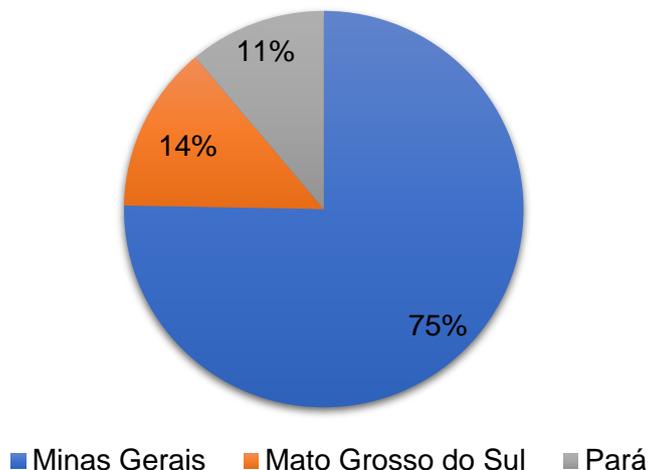


Figura 2.6 - Estados detentores das maiores reservas de ferro no Brasil (JESUS, 2016).

Produção Nacional de Minério de Ferro

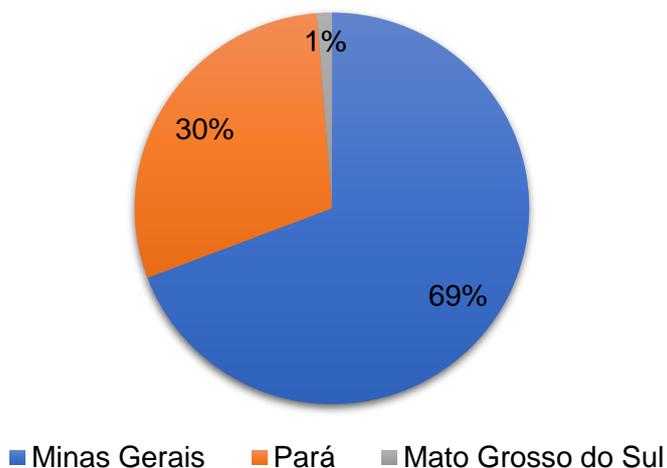


Figura 2.7 - Distribuição da produção de minério de ferro pelos estados brasileiros (JESUS, 2016).

Em 2014, as principais empresas produtoras de minério de ferro no Brasil foram a VALE S/A, Samarco Mineração S/A e Companhia Siderúrgica Nacional – CSN. Juntas essas empresas respondem por 84,5% da produção nacional (JESUS, 2016).

A produção brasileira no mesmo ano, por tipo de produto, se dividiu em granulados (10%) e finos (90%), sendo estes distribuídos na maior parte entre *sinter feed* (64,8%) e *pellet feed* (24,9%) (JESUS, 2016).

De acordo com a CSN (2016), o minério de ferro granulado possui granulometria entre 50 e 6,3 mm, o sinter feed entre 6,3 e 0,150 mm e o pellet feed menor que 0,150 mm. A figura 2.8 apresenta os principais produtos de minério de ferro produzidos pela empresa.



Figura 2.8 - Principais produtos de minério de ferro produzidos pela CSN (CSN, 2016).

2.2 Concentração de Minério de Ferro

Com a exaustão das jazidas de minérios de ferro de altos teores torna-se necessária a utilização de métodos de concentração para obtenção de produtos que atendam às especificações da indústria siderúrgica, principal consumidora de concentrados de minério de ferro, cujos teores mínimos de ferro são da ordem de 64% (LOPES; LIMA, 2009).

Devido às diferenças de densidade, de susceptibilidade magnética e de propriedade superficial induzida entre os minerais de ferro e os minerais de ganga, especialmente o quartzo, a concentração de minério de ferro pode ser efetuada através de métodos gravíticos, concentração magnética e flotação (ARAUJO *et al*, 2003). Esses métodos podem ser empregados de maneira separada ou combinados, o que ocorre de maneira mais usual (CABRAL; PERES, 2011).

O critério para a seleção do método de concentração mais adequado a ser aplicado inclui uma série de parâmetros. Entre eles podem ser destacados o teor do minério, o teor do concentrado que se deseja obter, a malha de liberação, o tamanho do grão, os fatores econômicos, os efeitos sobre a pelotização, a composição química do minério e, principalmente, a mineralogia dos minerais de ferro e ganga (LOPES, 2009 *apud* HOUOT, 1982).

O minério de ferro silicatado é o mais simples de se concentrar, sendo normalmente beneficiado através de uma combinação de métodos gravíticos (fração granulométrica mais grosseira), concentração magnética (granulometria intermediária) e flotação reversa (produção de *pellet feed*) (CABRAL; PERES, 2011).

A concentração gravítica corresponde à operação onde partículas de diferentes densidades, tamanhos e formas são separadas umas das outras por ação da força de gravidade ou por forças centrífugas (LINS, 2010). Os métodos gravíticos mais utilizados na concentração de minério de ferro são separação em meio denso, jigues e concentradores espirais (LOPES, 2009).

A flotação é um dos métodos de concentração mais utilizado na concentração de minério de ferro. A separação é feita em uma suspensão em água, onde o mineral-minério é separado do mineral de ganga através da exploração das propriedades de superfície das espécies minerais que compõe o sistema (MONTE; PERES, 2010). As principais plantas de processamento de minério de ferro no Brasil operam por meio da flotação catiônica reversa, com o emprego de aminas como coletor para o quartzo e amido de milho gelatinizado usado como depressor do óxido de ferro. Porém, a flotação aniônica direta pode ser uma alternativa interessante na concentração de minérios de ferro com baixo teor e na recuperação de materiais depositados em barragens de rejeito (ARAUJO *et al*, 2006).

A concentração magnética é empregada quando a propriedade diferenciadora consiste na forma como os minerais respondem ao campo magnético e, desta forma, separa os minerais magnéticos (ferromagnéticos e paramagnéticos) dos não-magnéticos (diamagnéticos) (REIS *et al*, 2015). Uma das maiores vantagens da concentração magnética quando comparada à flotação é que na concentração magnética não há uso de reagentes químicos. Na concentração de minério de ferro, a combinação de concentração magnética de baixa intensidade com alta intensidade é justificada pela presença de magnetita no corpo de minério a ser concentrado (QUEIROZ, 2008).

2.3 Concentração Magnética

A concentração magnética é uma operação unitária de baixo custo e alta eficiência, consagrada na área de concentração de minérios. A propriedade que determina o comportamento de um mineral quando submetido à ação de um campo magnético é chamada de susceptibilidade magnética (SAMPAIO *et al*, 2010).

Com base nessa propriedade os minerais são classificados em duas categorias: os que são atraídos pelo campo magnético e os que são repelidos por ele. No primeiro caso, têm-se os minerais ferromagnéticos, que são fortemente atraídos pelo campo magnético, onde o exemplo mais conhecido é a magnetita, e os paramagnéticos, que são fracamente atraídos, onde o exemplo clássico é a hematita. Já os minerais que possuem susceptibilidade magnética negativa e são repelidos pelo campo magnético são chamados de diamagnéticos, onde destacam-se o quartzo, a calcita, a barita, a fluorita, a esfalerita, entre outros (SAMPAIO *et al*, 2010).

A concentração magnética está relacionada com o comportamento das partículas minerais submetidas a um campo magnético e às forças magnéticas que atuam sobre elas (SAMPAIO *et al*, 2010).

A operação de separação magnética baseia-se na força de interação entre o campo magnético e um dipolo magnético. Quando submetida a um campo magnético, a partícula fica magnetizada. Essa magnetização induz à formação dos dipolos magnéticos nas extremidades da partícula, que fica orientada ao longo das linhas de magnetização. A intensidade desse dipolo varia de acordo com as características de cada partícula (GOMES, 2009).

Os minerais paramagnéticos apresentam elétrons desemparelhados nos orbitais moleculares. Uma molécula com elétrons desemparelhados apresenta apenas um número quântico spin, consistindo um dipolo magnético (ROSENBLUM; BROWNFIELD, 2000).

Já os minerais diamagnéticos apresentam elétrons emparelhados nos orbitais moleculares. Uma molécula com dois elétrons emparelhados possui dois elétrons nos orbitais moleculares, sendo assim, o dipolo magnético caracterizado pelo spin de cada

um dos elétrons se anula, uma vez que apresentam orientação oposta (ROSENBLUM; BROWNFIELD, 2000).

Nos minerais ferromagnéticos, os dipolos magnéticos existentes apresentam a mesma orientação (ROSENBLUM; BROWNFIELD, 2000).

As forças atuantes em uma partícula submetida a um campo magnético em uma separação a úmido são a força magnética, força da gravidade, força de arraste hidrodinâmico e forças interpartículas (GOMES, 2009).

A figura 2.9 mostra a indução magnética em função da intensidade de campo para os minerais (a) ferromagnéticos, (b) paramagnéticos e (c) diamagnéticos. Os minerais ferromagnéticos apresentam resposta rápida da indução magnética com o campo. Nos minerais paramagnéticos isso ocorre de maneira menos acentuada. Já para os minerais diamagnéticos a indução magnética apresenta valor negativo (SAMPAIO *et al*, 2010).

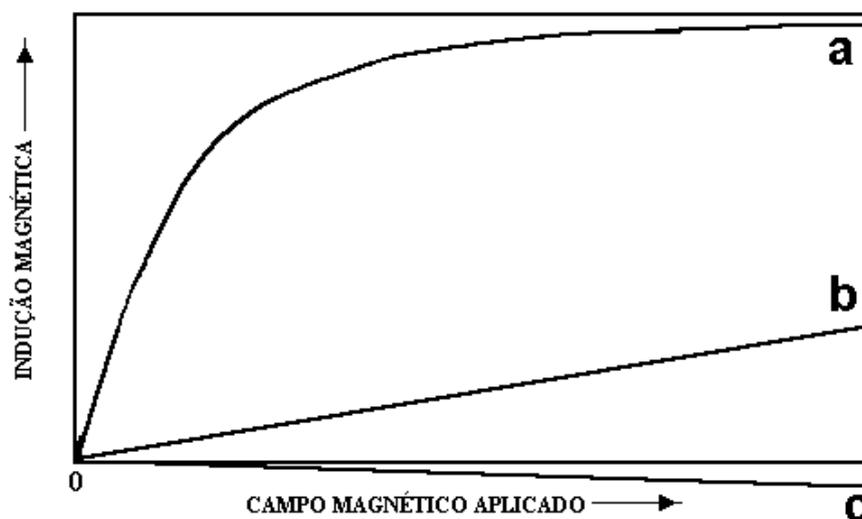


Figura 2.9 - Indução magnética para minerais (a) ferromagnéticos, (b) paramagnéticos e (c) diamagnéticos em função da intensidade do campo magnético (SAMPAIO *et al*, 2010).

Os principais responsáveis pelo processo de separação são o campo magnético e o gradiente. A intensidade do campo refere-se ao número de linhas de fluxo que passa por uma determinada área. Já o gradiente de campo descreve a convergência ou divergência das linhas de fluxo (SAMPAIO *et al*, 2010).

A figura 2.10 ilustra um campo uniforme (a), onde a força resultante sobre a partícula é nula, e um campo magnético convergente (b), onde o fluxo das linhas apresenta um gradiente de campo, o que promove o movimento das partículas.

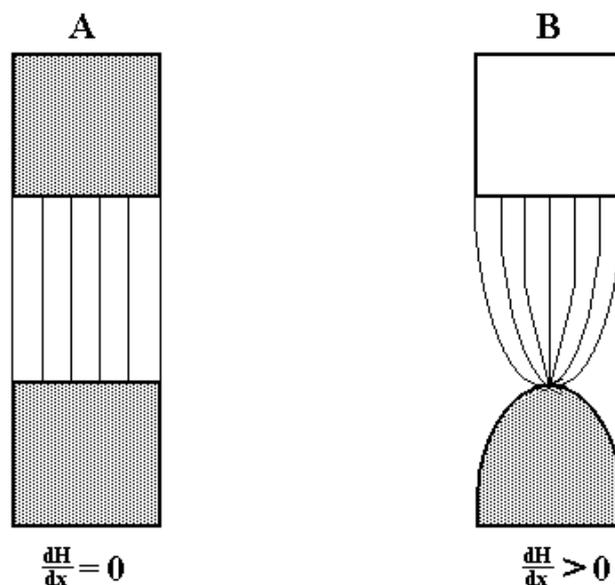


Figura 2.10 - (a) Campo magnético uniforme e (b) convergente, apresentando o gradiente de campo (SAMPAIO *et al*, 2010).

O gradiente pode ser produzido através da construção de um polo de eletroímã com área bem menor que a do polo oposto ou através do uso de matrizes entre os polos do eletroímã (SAMPAIO *et al*, 2010).

As matrizes são responsáveis por aumentar o gradiente, produzindo sítios com campo de alta intensidade em seu interior. Os modelos mais utilizados são esferas, hastes, placas ranhuradas, grades, lâ de aço etc. A matriz deve ser escolhida de tal modo que melhor se ajuste as características do minério (SAMPAIO *et al*, 2010).

A concentração magnética pode ser feita tanto a seco quanto a úmido. O método a seco é usado geralmente para granulometrias grosseiras, enquanto o método a úmido é usado para aquelas mais finas (SAMPAIO *et al*, 2010).

De acordo com Gomes (2009), na concentração magnética de minério de ferro, os equipamentos mais utilizados são o concentrador magnético de tambor, o concentrador magnético de alta intensidade tipo Jones e o concentrador magnético de alto gradiente.

A figura 2.11 mostra como os principais equipamentos utilizados na concentração magnética são classificados de acordo com as características de campo de indução, o meio utilizado e suas aplicações.

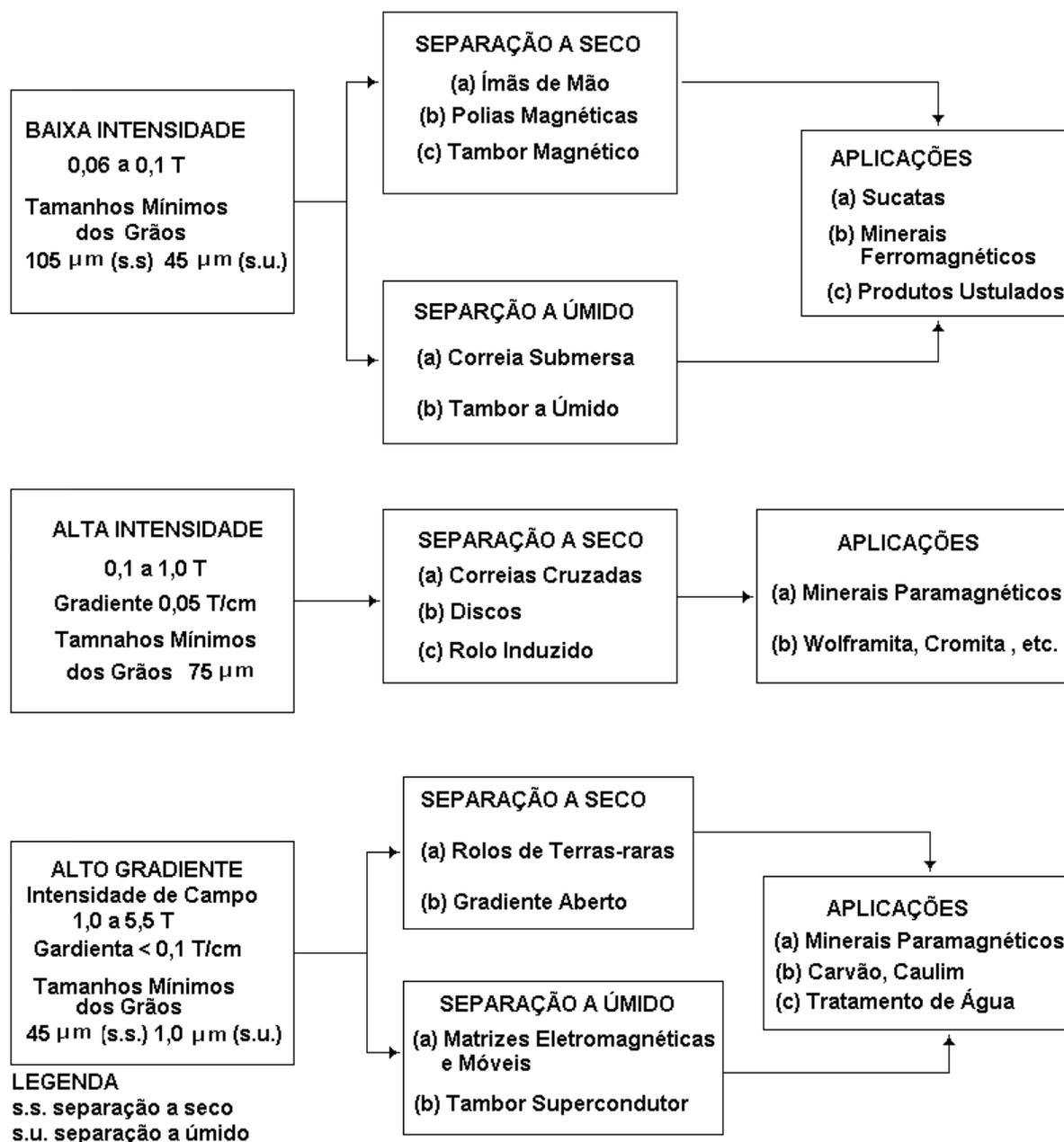


Figura 2.11 - Diagrama apresentando as principais características, classificação e aplicações dos separadores magnéticos (SAMPAIO *et al.*, 2010).

2.4 Concentrador Magnético de Alta Intensidade à Úmido de Carrossel

O desenvolvimento da separação magnética tomou grandes dimensões com o surgimento das matrizes ferromagnéticas e, como consequência, a fabricação do separador de carrossel. O sistema de matrizes e a grande eficiência da separação nas faixas granulométricas mais finas proporcionaram vantagens significativas, quando comparado aos demais equipamentos. Porém, sua aplicação, devido à operação com alta intensidade restringe-se aos minerais paramagnéticos (SAMPAIO *et al*, 2010).

O concentrador magnético de carrossel usado em escala laboratorial trabalha com campo magnético de alta intensidade produzido pelas bobinas eletromagnéticas. O circuito magnético, além de estruturar o equipamento, tem a função de conduzir o campo magnético gerado pelas bobinas para a região onde é instalado o *canister* (estrutura onde são acomodadas as matrizes). A figura 2.12 ilustra as principais partes de um separador magnético de carrossel usado em escala laboratorial (INBRAS, 2013).

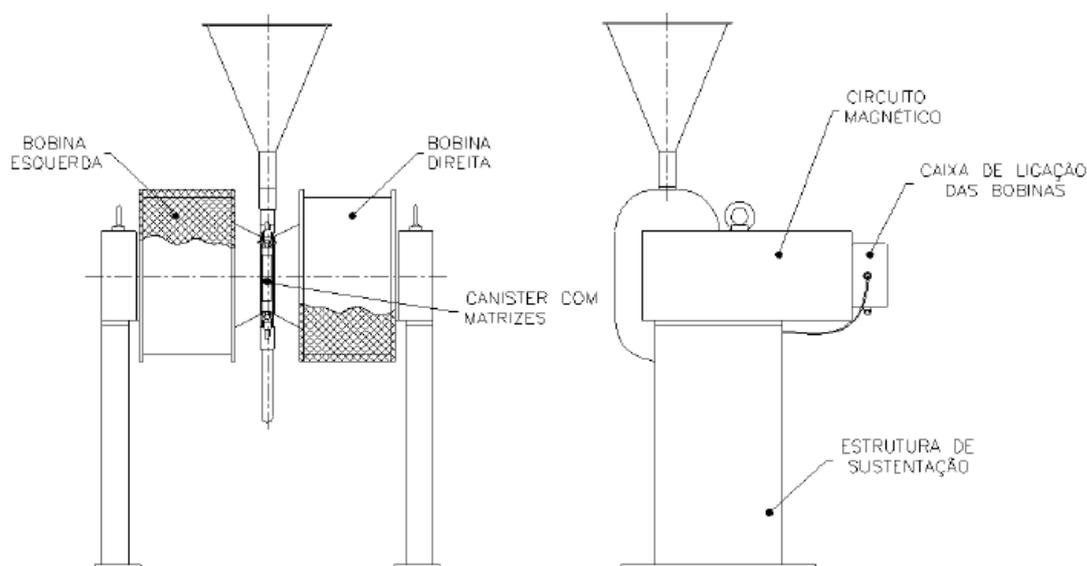


Figura 2.12 - Vista geral de um separador magnético de carrossel usado em escala laboratorial (INBRAS, 2013).

As matrizes têm a função de amplificar o gradiente do campo na região entre os polos onde ocorre a separação magnética. As matrizes são um conjunto de telas, montadas de forma intercalada (uma na vertical e uma na horizontal, conforme é mostrado na figura 2.13), de modo que a passagem do material fique reduzida. A matriz utilizada

deve ter o *gap* (abertura) de no mínimo 2,5 vezes o *top size* do minério (INBRAS, 2013).

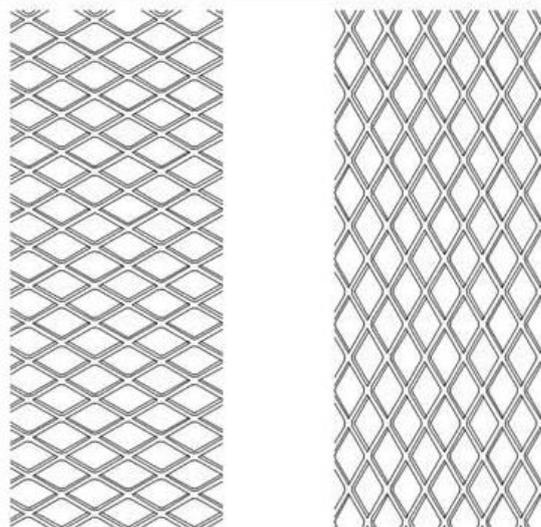


Figura 2.13 - Montagem das matrizes de forma intercalada (INBRAS, 2013).

O conjunto de alimentação, ilustrado na figura 2.14, é composto por um silo de alimentação de polpa, o *canister* com matrizes e o duto de descarga. A polpa é alimentada no silo de alimentação e passa pelas matrizes montadas no interior do *canister*. As partículas paramagnéticas são atraídas para a superfície das matrizes, podendo ser removidas posteriormente por um jato de água com baixa pressão. A fração não-magnética é coletada pelo duto de descarga (INBRAS, 2013).

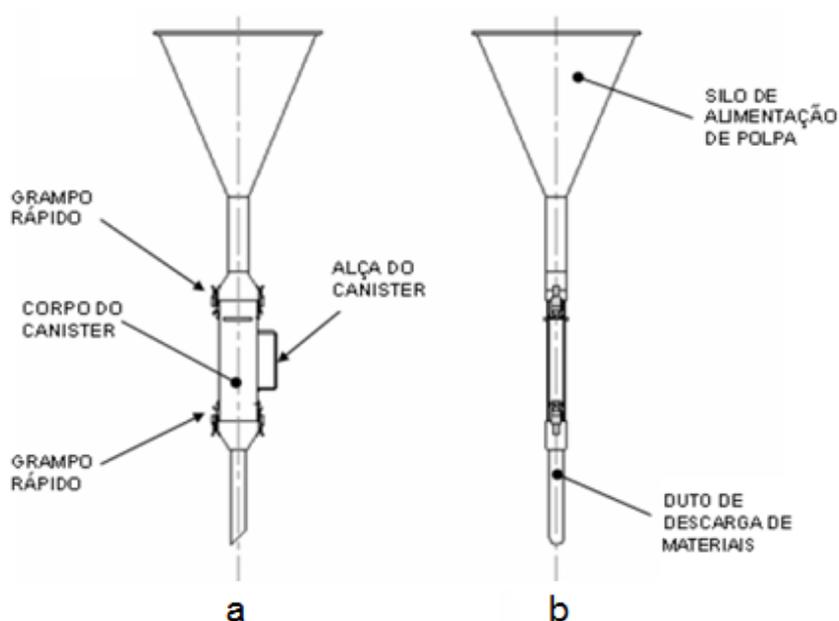


Figura 2.14 - (a) Vista frontal e (b) vista lateral do conjunto de alimentação (INBRAS, 2013).

3 METODOLOGIA

Os procedimentos experimentais incluem a preparação e caracterização das amostras e os ensaios de concentração magnética de alta intensidade a úmido, realizados em escala laboratorial. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG - Unidade Araxá.

3.1 Origem e Preparação da Amostra

Para a realização deste trabalho foram utilizadas amostras de rejeito de minério de ferro provenientes do Quadrilátero Ferrífero, no município de Itatiaiuçu - MG, fornecidas pela empresa Minerita Minérios Itaúna Ltda. A operação de beneficiamento da empresa compreende as etapas de britagem, classificação, ciclonagem, concentração gravimétrica, concentração magnética e deslamagem. No estudo foram utilizadas amostras de rejeito de minério de ferro coletadas na alimentação do espessador.

Realizou-se a homogeneização e o quarteamento da amostra de 32 kg através de pilha cônica, onde foram separadas e ensacadas alíquotas de 1 kg. As amostras foram então separadas para os testes de picnometria, análise granulométrica, ensaios de concentração e arquivo, como é ilustrado na figura 3.1.

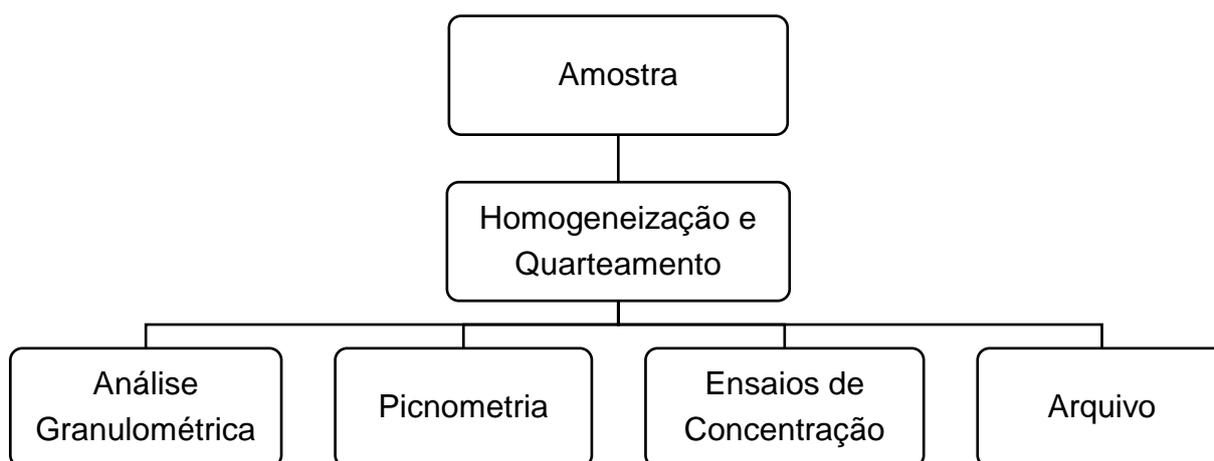


Figura 3.1 - Fluxograma indicando as etapas de preparação das amostras.

3.2 Análise Granulométrica

Para determinar o tamanho das partículas que compõem a amostra foi realizado um peneiramento a úmido, utilizando uma amostra de 200 g. As peneiras utilizadas são das marcas Bronzinox e Granutest, com 20 cm de diâmetro e 7 cm de altura. O quadro 3.1 apresenta a série de peneiras utilizadas na análise.

Quadro 3.1 - Série de peneiras utilizadas na análise granulométrica.

Abertura (mm)	Malha (# ¹)
0,500	35
0,210	70
0,149	100
0,105	150
0,074	200
0,053	270
0,044	325
0,037	400

Foi utilizado um peneirador suspenso da marca CDC, modelo PV-08 e encerrou-se o peneiramento quando foram observadas simultaneamente as seguintes condições (SAMPAIO; SILVA, 2007):

- i. A água coletada na saída, através de um balde, encontrava-se tão limpa quanto a água adicionada na entrada;
- ii. Quando não eram mais encontradas partículas de minério passantes na peneira de menor abertura.

Após a secagem, pesou-se a massa retida em cada peneira para a construção da curva granulométrica. Através da curva granulométrica foi possível observar um parâmetro importante denominado d_{80} , que corresponde à abertura da peneira na qual 80% das partículas passaram por ela.

¹ # - Mesh.

3.3 Cálculo do Teor da Amostra

Foram realizados testes de picnometria para determinar o teor de ferro tanto da alimentação quanto dos produtos obtidos nos ensaios de concentração. O teste de picnometria é um dos métodos mais utilizados para determinar a densidade de um material.

Os testes de picnometria foram realizados de acordo com os seguintes procedimentos:

- i. Pesou-se o picnômetro vazio (figura 3.2 a), previamente limpo e seco, obtendo-se o valor A_1 ;
- ii. Adicionou-se a amostra ao picnômetro e em seguida pesou-se o conjunto (figura 3.2 b), obtendo-se o valor A_2 ;
- iii. Adicionou-se água ao picnômetro com a amostra e em seguida pesou-se o novo conjunto (figura 3.2 c), obtendo-se o valor A_3 ;
- iv. Lavou-se o picnômetro, adicionou-se água até transbordar e em seguida pesou-se o conjunto (figura 3.2 d), obtendo-se o valor A_4 ;
- v. A densidade da amostra foi determinada substituindo-se os valores A_1 , A_2 , A_3 e A_4 na equação 3.1;

$$ds = \frac{(A_2) - (A_1)}{(A_4 + A_2) - (A_3 + A_1)} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde:

ds : Densidade do sólido;

A_1 : Massa do picnômetro;

A_2 : Massa do picnômetro + Amostra;

A_3 : Massa do picnômetro + Amostra + Água;

A_4 : Massa do picnômetro + Água.

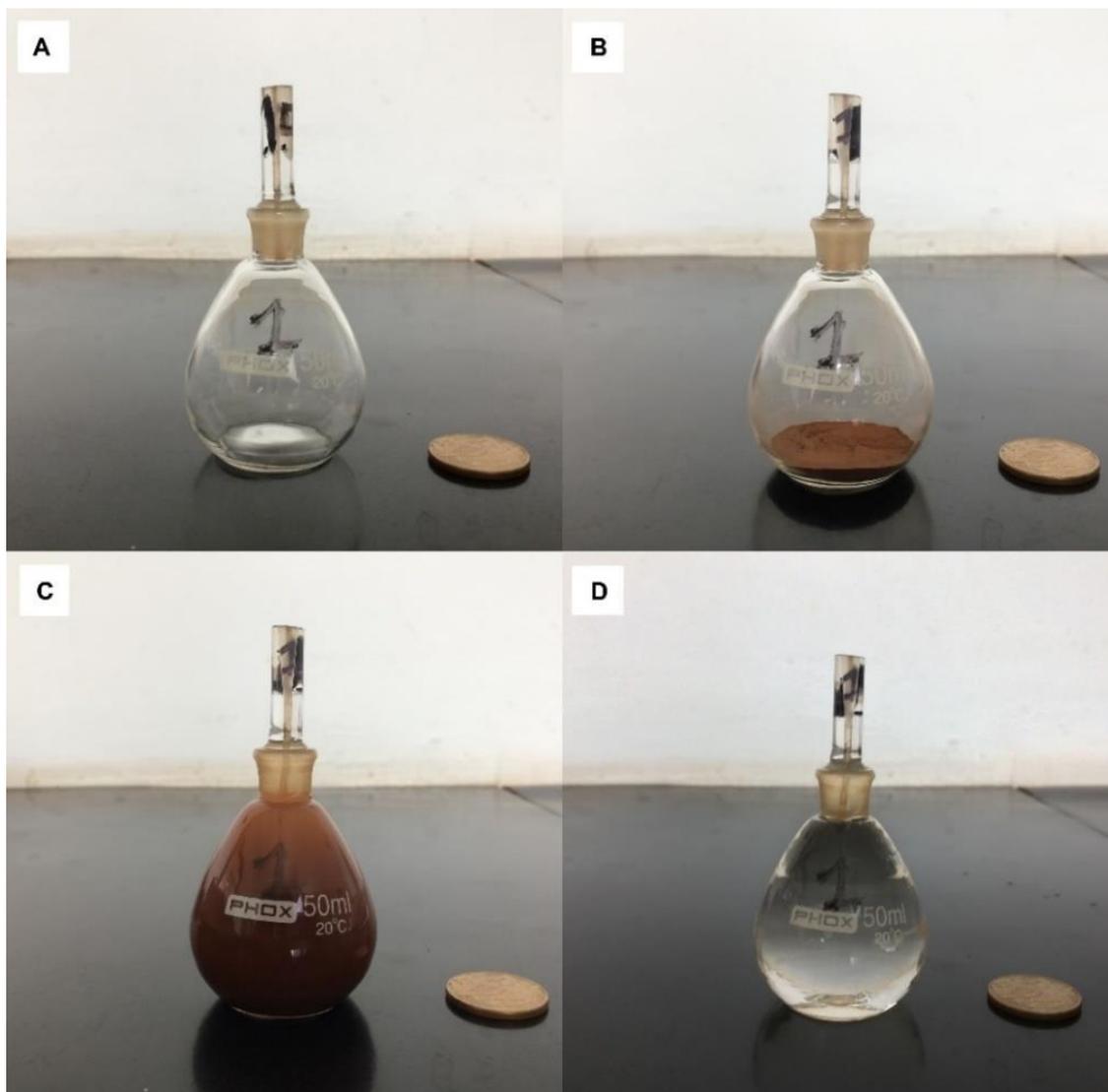


Figura 3.2 - Etapas do teste de picnometria.

Considerando que a amostra é constituída basicamente por dois minerais, hematita e quartzo, calculou-se seu teor com base na equação 3.2:

$$\%MM = \frac{d_{mm} \times (d_m - d_g)}{d_m \times (d_{mm} - d_g)} \quad (3.2)$$

Onde:

$\%MM$: Porcentagem de mineral-minério;

d_{mm} : Densidade do mineral-minério (Hematita = 5,30 g/cm³);

d_m : Densidade do sólido (Obtida através da picnometria);

d_g : Densidade da ganga (Quartzo = 2,65 g/cm³).

3.4 Planejamento Experimental

Os ensaios de concentração magnética foram realizados com o objetivo de analisar o comportamento das variáveis porcentagem de sólidos (em massa) da polpa de rejeito e volume de água de lavagem, a fim de definir os melhores parâmetros operacionais do separador magnético para a recuperação do ferro presente na amostra de rejeito.

O planejamento das condições experimentais deste estudo foi realizado através de técnicas do planejamento fatorial à três níveis para a porcentagem de sólidos da polpa (A) e à dois níveis para o volume de água de lavagem (B). As variáveis e os níveis estudados são mostrados no quadro 3.2 e a matriz do planejamento é apresentada no quadro 3.3.

Quadro 3.2 - Variáveis e níveis estudados.

Variáveis		Níveis		
		1	2	3
A	% Sólidos	10	20	40
B	H ₂ O Lavagem (mL)	250	500	

Quadro 3.3 - Matriz do planejamento.

Ensaio	A	B
1	1	1
2	1	2
3	2	1
4	2	2
5	3	1
6	3	2

Posteriormente, com base nos melhores parâmetros obtidos nos testes exploratórios, foram realizados ensaios de concentração magnética em etapas *rougher* e *cleaner* com o objetivo de se obter um concentrado que atingisse as especificações de teor do mercado.

3.5 Ensaios de Concentração Magnética

Utilizou-se nos testes um separador magnético de escala laboratorial, modelo L-4, fabricado pela INBRAS, ilustrado na figura 3.4.

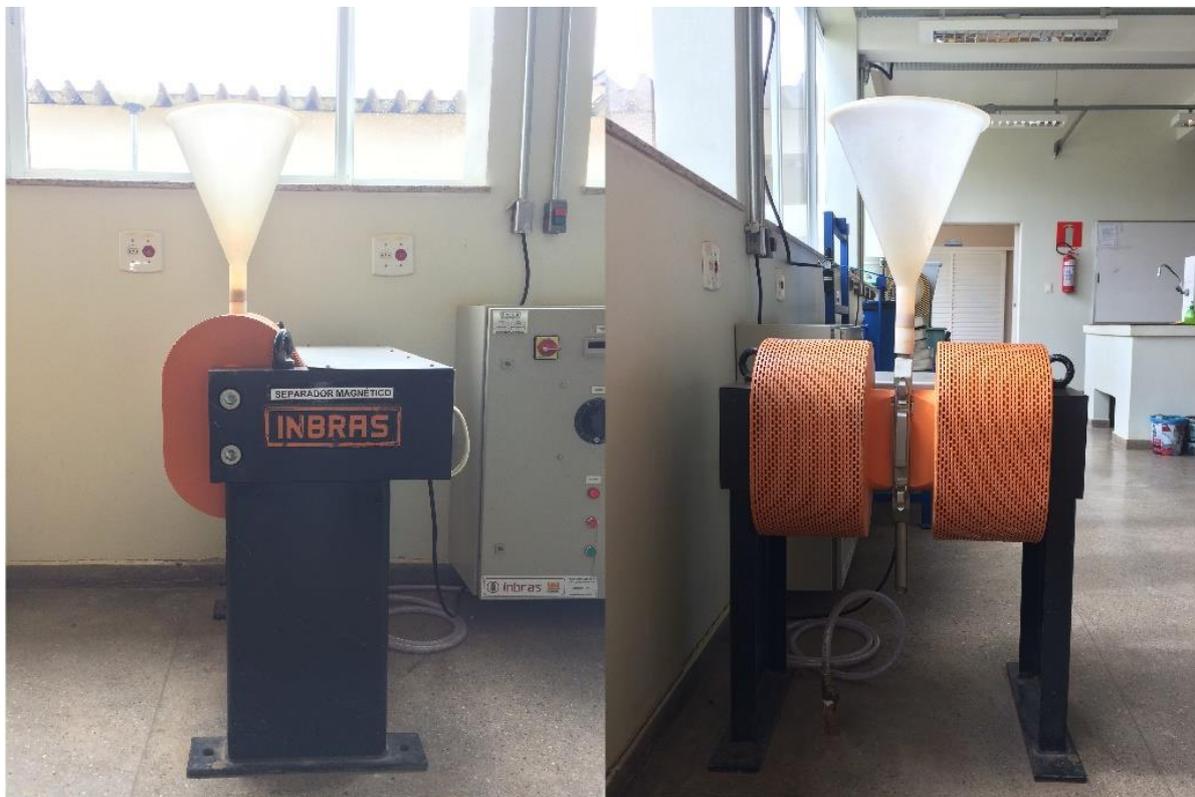


Figura 3.3 - Vista geral do separador magnético.

Os ensaios de concentração foram realizados em duplicata. Juntou-se a massa dos dois testes e obteve-se uma massa média. Somou-se a massa dos dois testes de modo a gerar material suficiente para fazer os testes de picnometria, além de proporcionar resultados mais confiáveis.

A matriz usada no separador magnético foi uma matriz de tela expandida, indicada para granulometrias abaixo de 150 #, fornecida pelo próprio fabricante do separador magnético. Não foi possível usar as demais matrizes, com aberturas maiores, disponíveis no laboratório pois, por se tratar de partículas ultrafinas, a massa retida nessas matrizes foi desprezível.

O campo magnético utilizado foi de 10.430 G². A hematita é um mineral fracamente magnético e requer um campo entre 10.000 e 18.000 G para sua separação (SAMPAIO et al, 2010). Já o separador magnético disponível no laboratório alcança um campo magnético máximo de 10.430 G, portanto não houve variação na intensidade do campo magnético, pois não é justificável trabalhar com o campo abaixo de 10.000 G.

Foram utilizados 100 g de sólido na preparação das polpas para alimentação do separador magnético, sendo o indicado pelo fabricante entre 50 e 150 g. A amostra utilizada na preparação das polpas está representada na figura 3.3.



Figura 3.4 - Amostra utilizada na preparação das polpas.

Os ensaios foram realizados de acordo com os seguintes procedimentos:

- i. Pesou-se a amostra de minério a ser processada;
- ii. Preparou-se a polpa;
- iii. Pesou-se a água de lavagem;
- iv. Colocou-se um balde limpo abaixo do duto de descarga do concentrador para coleta do rejeito (não magnético);

² G - Gauss.

- v. Ligou-se o equipamento e ajustou-se o campo magnético no valor máximo;
- vi. A polpa foi agitada e introduzida lentamente no silo de alimentação;
- vii. Esperou-se até que toda a polpa fosse alimentada e adicionou-se a água de lavagem;
- viii. Retirou-se o balde com o rejeito e colocou-se outro recipiente para a coleta do concentrado (magnético);
- ix. Desligou-se o campo magnético e com um jato d'água direcionado para as matrizes removeu-se as partículas que ficaram presas, direcionando-as para o recipiente de coleta do concentrado;
- x. Os produtos foram levados para estufa e posteriormente pesados.

Realizou-se a análise estatística dos ensaios de concentração magnética utilizando-se o software *Minitab 17 Statistical Software*, com o objetivo de determinar o comportamento das variáveis porcentagem de sólidos da polpa e volume de água de lavagem no processo.

Posteriormente, utilizando-se as melhores condições de operação obtidas nos testes exploratórios (definidas pela análise estatística do planejamento experimental), realizou-se ensaios de concentração magnética em etapas *rougher* e *cleaner* visando a produção de um concentrado final que atendesse às especificações de teor do mercado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico são apresentados os resultados das análises de caracterização da amostra e dos ensaios de concentração magnética realizados.

4.1 Análise Granulométrica

Através do peneiramento a úmido da massa de 200 g pôde-se fazer a distribuição granulométrica da amostra de alimentação do separador magnético. Os resultados são apresentados no quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Distribuição granulométrica da amostra de alimentação do separador magnético.

Abertura (mm)	Malha (#)	Massa Retida (g)	% Retido Simples	% Retido Acumulado	% Passante Acumulado
0,500	35	0,00	0,00	0,00	100,00
0,210	70	0,19	0,10	0,10	99,90
0,149	100	0,73	0,38	0,48	99,52
0,105	150	4,38	2,29	2,77	97,23
0,074	200	13,73	7,17	9,94	90,06
0,053	270	24,94	13,03	22,97	77,03
0,044	325	25,43	13,28	36,25	63,75
0,037	400	23,59	12,32	48,57	51,43
-0,037	-400	98,46	51,43	100,00	0,00
Total		191,45	100,00		

Observou-se uma perda mássica de 4,27% da amostra inicial. Outra observação importante é que 51,43% das partículas apresentaram granulometria menor que 0,037 mm.

A partir da distribuição granulométrica, foi construída a curva de distribuição granulométrica da alimentação, representada pela figura 4.1, apresentando d_{80} de aproximadamente 0,057 mm.

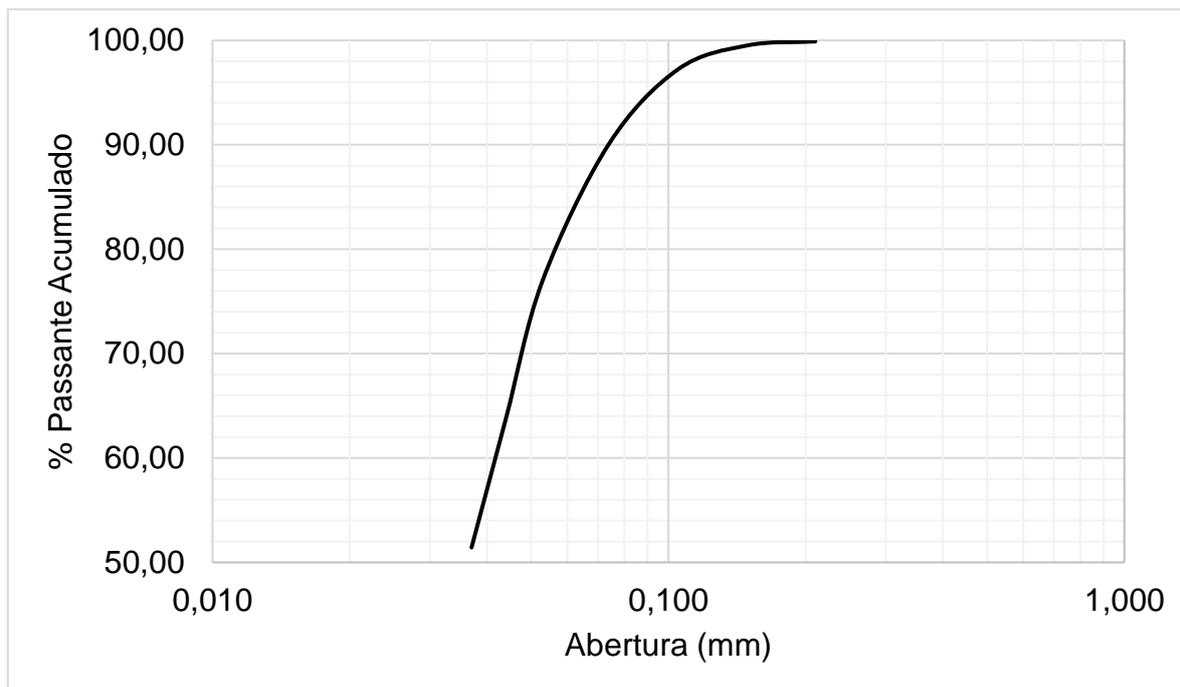


Figura 4.1 - Curva granulométrica da amostra de alimentação do separador magnético.

4.2 Cálculo do Teor da Amostra

Para garantir a confiabilidade dos resultados os testes de picnometria foram realizados em triplicata. Os resultados são apresentados no quadro 4.2. A partir dos testes de picnometria adotou-se uma densidade média para a amostra de rejeito de minério de ferro de $2,70 \text{ g/cm}^3$, sendo esta a alimentação dos ensaios de concentração magnética.

Quadro 4.2 - Resultados do teste de picnometria.

	Teste 1	Teste 2	Teste 3
Massa do Picnômetro (g)	30,68	30,37	30,80
Massa do Picnômetro + Amostra (g)	34,70	33,84	34,12
Massa do Picnômetro + Amostra + Água (g)	83,54	83,29	83,76
Massa do Picnômetro + Água (g)	81,02	81,10	81,66
Densidade do Sólido (g/cm^3)	2,68	2,71	2,72
Densidade Média do Sólido (g/cm^3)	2,70		

A partir da densidade do sólido foi possível determinar o teor de hematita presente na amostra. Utilizando a equação 3.2 obteve-se que o teor de hematita presente no material é igual a 3,70%.

Sabendo-se que a hematita é constituída por cerca de 70% de ferro, conclui-se que a amostra de rejeito que alimenta o separador magnético possui 2,59% de ferro. Este teor de ferro muito baixo já era esperado, já que o material em estudo se trata de uma amostra de rejeito.

4.3 Ensaio de Concentração Magnética

Os testes exploratórios de concentração magnética foram realizados com o objetivo de determinar as melhores condições operacionais do separador magnético. De acordo com o planejamento apresentado no quadro 3.3, foram variadas a porcentagem de sólidos da polpa e o volume de água de lavagem. Os resultados obtidos nos ensaios de concentração magnética são apresentados no quadro 4.3.

Observou-se uma recuperação metalúrgica semelhante em todos os ensaios, cerca de 90%, porém, percebeu-se uma diminuição da recuperação mássica com o aumento do teor de ferro no concentrado, como é mostrado na figura 4.2.

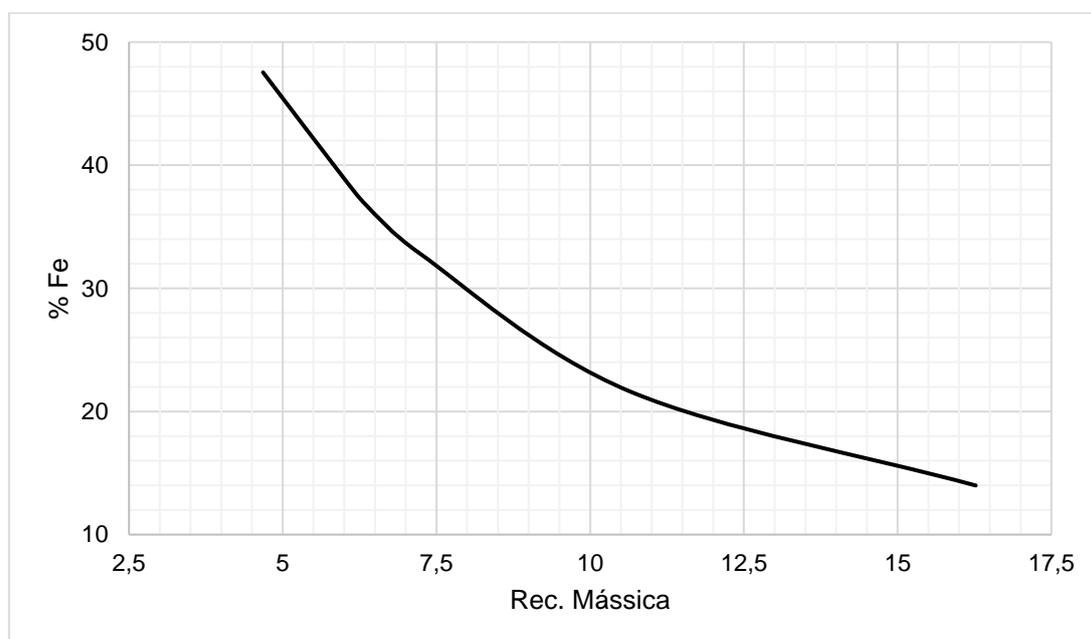


Figura 4.2 - Gráfico de porcentagem de ferro no concentrado vs. recuperação mássica.

Quadro 4.3 - Resultados dos ensaios de concentração magnética.

Ensaio	% Sólidos	H ₂ O Lavagem (mL)	Concentrado (g)	Rejeito (g)	% Fe Concentrado	% Fe Rejeito	Perda Mássica (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
1	10	250	7,19	92,14	32,83	0,23	0,67	7,23	91,75
2	10	500	5,83	92,58	39,43	0,27	1,59	5,92	90,19
3	20	250	10,55	88,46	21,62	0,32	0,99	10,65	88,95
4	20	500	4,68	95,2	47,54	0,38	0,12	4,68	86
5	40	250	16,02	83,83	13,99	0,37	1,53	16,27	87,88
6	40	500	6,31	92,75	36,69	0,27	0,94	6,37	90,23

Quadro 4.4 - Resultados da etapa *cleaner*.

% Sólidos	H ₂ O Lavagem (mL)	Alimentação (g)	Concentrado (g)	Rejeito (g)	% Fe Concentrado	% Fe Rejeito	Perda Mássica (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
20	500	91,85	17,9	72,98	68,8	0,55	1,06	19,7	96,86

4.4 Análise Estatística dos Ensaio de Concentração Magnética

Utilizando o software *Minitab 17 Statistical Software* realizou-se a análise estatística do planejamento experimental, onde foi analisada cada variável e sua influência na porcentagem de ferro do concentrado. Os valores de porcentagem de ferro presente no concentrado para cada ensaio são apresentados no quadro 4.5.

Quadro 4.5 - Teste de planejamento experimental: Porcentagem de Fe no concentrado.

Ensaio	A	B	% Fe Concentrado
1	1	1	32,83
2	1	2	39,43
3	2	1	21,62
4	2	2	47,54
5	3	1	13,99
6	3	2	36,69

O gráfico de efeitos principais (figura 4.3) mostra como cada variável influencia no teor de ferro do concentrado.

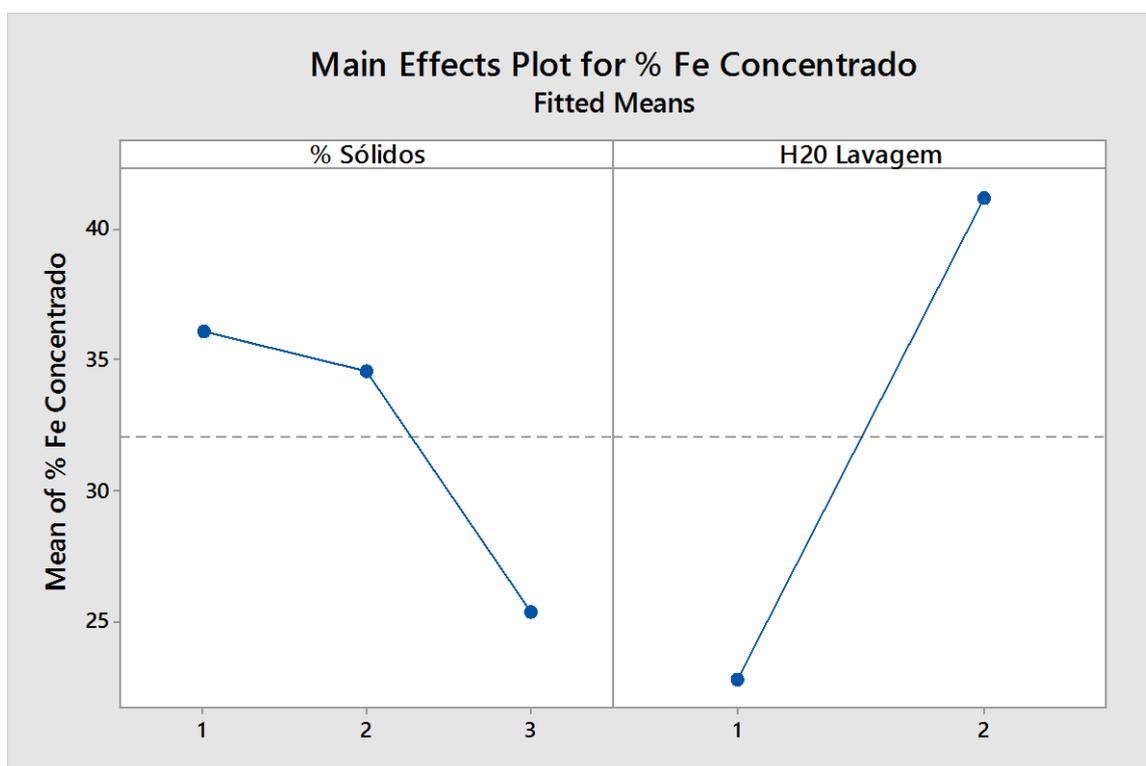


Figura 4.3 - Gráfico da variação dos efeitos principais.

A inclinação negativa do gráfico indica que, quando se passa do nível mínimo (1) para o nível máximo (3), há uma diminuição no teor de ferro do concentrado. Portanto, o aumento da porcentagem de sólidos provoca uma redução do teor de ferro do concentrado.

Já a inclinação positiva indica que, passando-se do nível mínimo (1) para o nível máximo (2), ocorre um aumento no teor de ferro no concentrado, o que mostra que o aumento do volume de água de lavagem provoca um aumento do teor de ferro do concentrado.

Porém, é de grande importância analisar a variação do teor de ferro no concentrado em função da interação entre a porcentagem de sólidos da polpa e o volume de água de lavagem. O gráfico de interações (figura 4.4) mostra o efeito simultâneo entre variáveis.

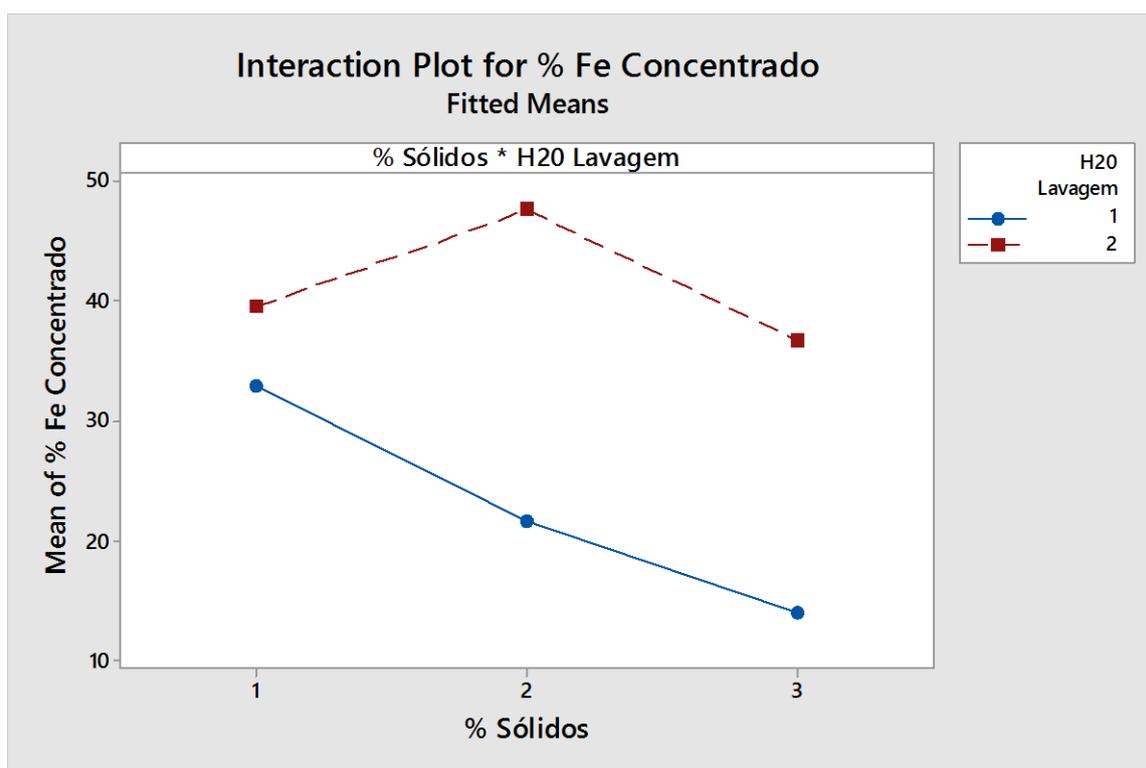


Figura 4.4 - Gráfico da interação dos efeitos principais.

Como as linhas não são paralelas, o gráfico mostra que há interação entre a porcentagem de sólidos da polpa e o volume de água de lavagem. Uma análise conjunta do efeito das variáveis leva à conclusão de que se tem uma maximização do

teor de ferro no concentrado utilizando o nível intermediário de porcentagem de sólidos (2) e o nível máximo do volume de água de lavagem (2).

Silva e Luz (2013) também observaram, em seu trabalho de concentração magnética de partículas ultrafinas de hematita, que o aumento da porcentagem de sólidos contribui positivamente no aumento do teor do concentrado até certo ponto, e que a partir de determinado valor há uma diminuição expressiva do teor de ferro. Uma possível explicação para o fenômeno é que para porcentagens de sólidos menores a polpa está tão diluída que algumas partículas paramagnéticas passam direto pela matriz. Já o aumento excessivo da porcentagem de sólidos ocasiona um aumento no número de partículas, fazendo com que partículas não magnéticas acabem retidas na matriz.

Provavelmente, com o aumento do volume de água de lavagem, as partículas não magnéticas que ficaram retidas na matriz foram arrastadas pela água, contribuindo para uma maior pureza do concentrado. Oliveira (2010) também observou, em seu trabalho de separação magnética com rejeito final de espirais concentradoras, um aumento no teor de ferro do concentrado decorrente do aumento do volume de água de lavagem.

4.5 Ensaio de Concentração Magnética Visando a Obtenção de *Pellet Feed*

Este trabalho teve como propósito obter um concentrado com teor de ferro acima de 64%, que é o indicado para a indústria siderúrgica. Como em nenhum dos seis ensaios de concentração este valor foi atingido, a operação de concentração magnética foi dividida em etapas *rougher* e *cleaner*, visando a obtenção de um concentrado que atendesse às especificações do mercado.

Na etapa *rougher* foram escolhidos os parâmetros usados no ensaio 5 para gerar material suficiente para alimentar o separador magnético, já que este foi o teste onde obteve-se a maior recuperação mássica e ao mesmo tempo uma alta recuperação metalúrgica. O concentrado da etapa *rougher* serviu de alimentação para a etapa *cleaner*.

A etapa *cleaner* foi realizada utilizando os parâmetros usados no ensaio 4, onde obteve-se o concentrado com maior teor de ferro, que é a proposta do trabalho. O quadro 4.4 apresenta os resultados obtidos na etapa *cleaner*, onde obteve-se um concentrado com 68,8% de ferro.

A figura 4.5 apresenta um fluxograma mostrando como foram realizados os ensaios de concentração magnética visando a obtenção de um concentrado final que atingisse às especificações de teor do mercado.

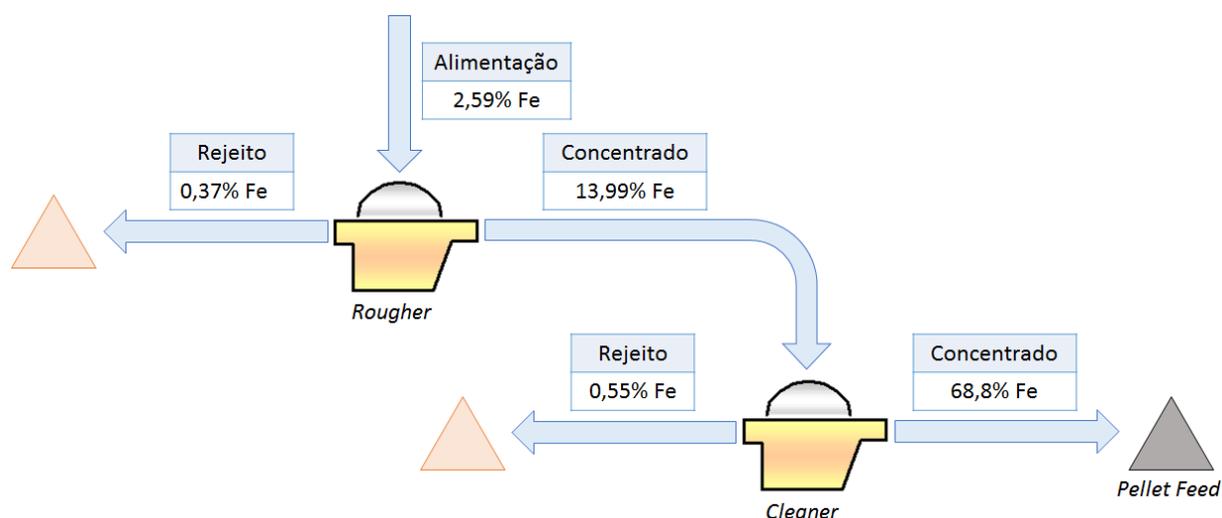


Figura 4.5 – Fluxograma detalhando as etapas *rougher* e *cleaner*.

A figura 4.6 mostra a amostra que alimentou a etapa *rougher*, com teor de ferro de 2,59%; o concentrado da etapa *rougher*, com teor de ferro de 13,99%, que serviu de alimentação para a etapa *cleaner*; e ainda os produtos obtidos na etapa *cleaner*, sendo o rejeito com teor de 0,55% e o concentrado com teor de 68,8%. Este concentrado encontra-se dentro das especificações do mercado e pode ser blendado aos atuais produtos da empresa ou até mesmo se tornar um novo produto.

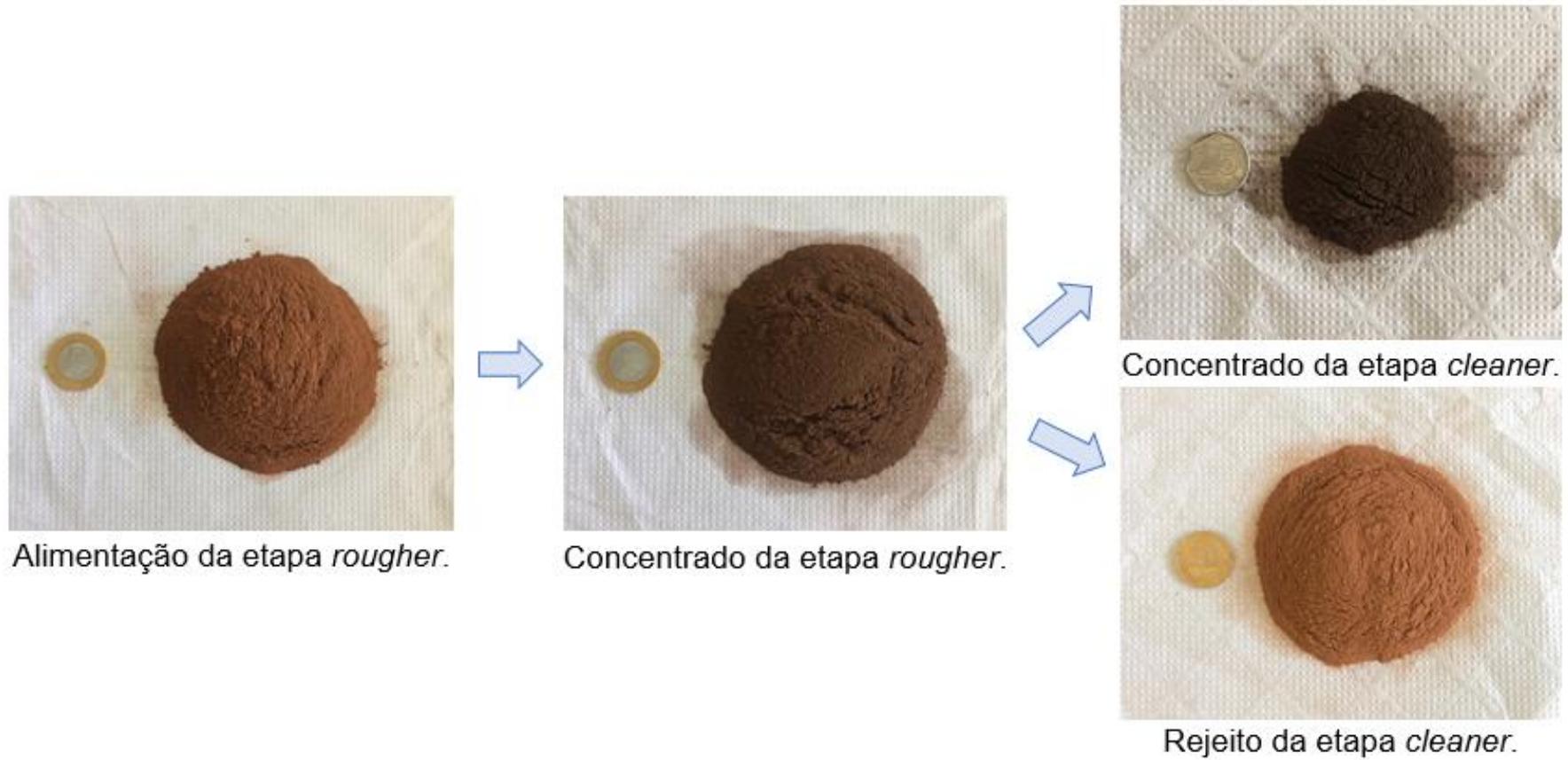


Figura 4.6 – Comparação entre as amostras de alimentação e produtos de cada etapa de concentração.

5 CONCLUSÕES

O trabalho mostrou ser viável a recuperação do rejeito de minério de ferro da empresa Minerita Minérios Itaúna Ltda através da concentração magnética por meio das etapas *rougher* e *cleaner*.

Nos testes preliminares a recuperação metalúrgica para todos os ensaios ficou próxima de 90%. Portanto, os parâmetros escolhidos para a realização da etapa *rougher* foram aqueles onde obteve-se uma maior recuperação mássica nos testes iniciais. Para essa etapa foi utilizada uma polpa com 40% de sólidos e 250 mL de água de lavagem.

Na etapa *cleaner* utilizou-se os parâmetros onde obteve-se o maior teor de ferro no concentrado nos testes preliminares. Utilizando-se uma polpa com 20% de sólidos e regulando-se a água de lavagem em 500 mL, obteve-se um concentrado final com 68,8% de ferro.

Pôde-se observar que o aumento da porcentagem de sólidos provocou um aumento na recuperação mássica e ao mesmo tempo uma diminuição no teor de ferro no concentrado. Já o aumento da água de lavagem resultou em um concentrado com maiores teores, porém ocorreu uma diminuição da recuperação mássica.

Através da análise da interação entre a porcentagem de sólidos da polpa e a água de lavagem, observou-se que os maiores teores de ferro no concentrado foram obtidos utilizando-se a porcentagem de sólidos intermediária (20%) e a água de lavagem máxima (500 mL).

REFERÊNCIAS

ARAUJO, A. C. Flotação de minérios de ferro. In: CHAVES, A. P. Org. *Flotação: O estado da arte no Brasil*. São Paulo: Signus, 2006. p. 317-329.

ARAUJO, A. C.; AMARANTE, S. C.; SOUZA, C. C.; SILVA, R. R. R. *Ore mineralogy and its relevance for selection of concentration methods in processing of brazilian iron ores*. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, v. 112, p.54-64, 2003.

CABRAL, A. S.; PERES, A. E. C. *Concentração magnética aplicada a minérios goethíticos*. XXIV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Salvador, 2011. 7 p.

CSN. *Minério de ferro*. 2016. Disponível em: http://www.csn.com.br/conteudo_pti.asp?idioma=0&tipo=61062&conta=45. Acesso em 08 de junho de 2017.

DANA, J. D.; HURLBUT, C. S. *Manual de mineralogia*. v. 1. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A, 1976. p. 312-315; 330-332.

GOMES, M. A. *Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro*. 2009. 77 p. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto. 2009.

HENRIQUES, A. B. *Caracterização e estudo das propriedades eletrocinéticas dos minerais de ferro: Hematita, goethita e magnetita*. 2012. 208 p. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2012.

INBRAS. *Separador Eletromagnético modelo L-4: Manual de Instrução, Operação e Manutenção*. Diadema - SP, 2013.

JESUS, C. A. G. *Sumário Mineral 2015*. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 2016. p. 66-67.

LINS, F. A. F. Concentração gravítica. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, FRANÇA, S. C. A. Eds. *Tratamento de minérios*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. p. 301-326.

LOPES, G. M. *Flotação direta de minério de ferro*. 2009. 176 p. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2009.

LOPES, G. M.; LIMA, R. M. F. *Flotação direta de minério de ferro com oleato de sódio*. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 62, n. 3, p. 323-329, 2009.

MAIA, E.S. *Pelotização e Redução de Concentrado Magnético*. 2011. 144 p. Dissertação de Mestrado do Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

MONTE, M. B. M.; PERES, A. E. C. Química de superfície na flotação. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, FRANÇA, S. C. A. Eds. *Tratamento de minérios*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. p. 399-461

OLIVEIRA, C. G. *Avaliação da separação magnética com rejeito final das espirais de Água Limpa*. 2010. 45 p. Monografia do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

QUEIROZ, L. A. *Caracterização de minérios da mina de Brucutu, VALE, focada na previsibilidade das operações de concentração mineral*. 2008. 430 p. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

REIS, J.L.M.; RAFAEL, G.S.; DIAS, A.C.; PEREIRA, C.A. *Concentração magnética de materiais goethíticos do quadrilátero ferrífero*. XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Poços de Caldas - MG, 2015. 9 p.

ROSENBLUM, S.; BROWNFELD, K. *Magnetic susceptibilities of minerals*. USGS Open-File Report 99-529, 2000. 38 p.

SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A. Separação magnética e eletrostática. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, FRANÇA, S. C. A. Eds. *Tratamento de minérios*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. p. 367-395.

SILVA, M. B.; LUZ, J. A. M. *Magnetic scavenging of ultrafine hematite from itabirites*. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 66, n. 4, p. 499-505, 2013.

WALDE, D. H. G. Geologia do ferro. In: SCHOBENHAUS, C., COELHO, C. E. S. *Principais depósitos minerais do Brasil*. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1986. p.3-6.