



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ

AMÉLIA DE SOUZA CORREA

**ESTUDO DOS PARÂMETROS PARA CONCENTRAÇÃO
MAGNÉTICA DO MINÉRIO DE FERRO PROVENIENTE DA
MINA DE POSSE-MG**

ARAXÁ/MG

2018

AMÉLIA DE SOUZA CORREA

ESTUDO DOS PARÂMETROS PARA A CONCENTRAÇÃO
MAGNÉTICA DO MINÉRIO DE FERRO PROVENIENTE DA
MINA DE POSSE-MG

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 título de Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Tamiris Fonseca de Souza

ARAXÁ/MG

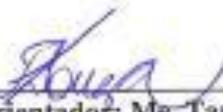
2018

AMÉLIA DE SOUZA CORREA

**ESTUDO DOS PARÂMETROS PARA CONCENTRAÇÃO
MAGNÉTICA DO MINÉRIO DE FERRO PROVENIENTE
DA MINA DE POSSE-MG**

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, 03 de dezembro de 2018.



Presidente e Orientador: Me. Tamiris Fonseca de Souza
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade
Araxá



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



Membro Titular: Me. Fábio de São José
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade
Araxá

DEDICATÓRIA

Ao tio João (em memória e com muita saudade),
por ter sido uma referência em minha vida.

AGRADECIMENTOS

À minha família, meus pais, Aureslinda e Edson, e a minha irmã Ana Clara por tudo que fazem por mim, pela força e apoio na realização deste trabalho.

À minha orientadora, professora Tamiris Fonseca pelo suporte e orientação durante a elaboração deste trabalho.

Ao professor Leandro Henrique Santos e ao professor Natal Pires por terem contribuindo tanto para minha formação e pelo suporte e sugestões.

Ao João Victor Alves e ao João Antônio por me ajudarem da forma mais competente na execução dos ensaios no laboratório.

Ao CEFET por possibilitar minha formação e todas às outras pessoas pela ajuda e sugestões a esse trabalho de conclusão de curso.

RESUMO

Com a redução da disponibilidade de minérios de ferro de alto teor associado à diminuição da granulometria de liberação, se faz necessário desenvolver operações de beneficiamento, visando o aproveitamento de recursos minerais de teores menos expressivos, proporcionando maior eficiência e menores custos associados à rota produtiva do bem em questão. Desse modo, a separação magnética de alta intensidade se posiciona de forma importante no beneficiamento de minérios de ferro, sendo vantajosa por não utilizar reagentes, como na flotação. A concentração magnética é aplicada tanto na recuperação de partículas ferromagnéticas quanto paramagnéticas, para uma faixa ampla de granulometria. Na fase de projeto de um empreendimento, é importante o estudo de métodos de separação magnética, de forma cautelosa, através de ensaios de bancada ou em escala piloto, focada na caracterização adequada do minério e da operação. Com este intuito, o presente trabalho consiste no estudo de parâmetros tipo de matriz de tela expandida, massa de sólidos na alimentação e granulometria do material objetivando concentrar um itabirito da região do Quadrilátero Ferrífero, no município de Caeté-MG. Além disso o trabalho analisa o impacto das variáveis sobre o teor de Fe no concentrado. O estudo avaliou duas granulometrias diferentes do minério, média (-150 +37 μ m) e fina (-37 μ m). Para a fração média, foi possível alcançar concentrado final com teor em cerca de 60% Fe, rejeito com 30% Fe, recuperação mássica e metalúrgica de 51% e 68%, respectivamente. Para a granulometria mais fina foi obtido concentrado com 61% de ferro, recuperação mássica e metalúrgica de 45% e 63%, respectivamente.

Palavras-chave: Concentração magnética. Itabirito. Matriz de tela expandida. Massa de alimentação. Granulometria de alimentação.

ABSTRACT

With the reduction of the availability of high-grade iron ores associated with the reduction of the release granulometry, it is necessary to develop beneficiation operations, aiming at the utilization of less expressive mineral resources, providing greater efficiency and lower costs associated to the productive route as well. In this way, the high intensity magnetic separation is important in the treatment of iron ores and is advantageous because it does not use reagents, as in flotation. The magnetic concentration is applied both to the recovery of ferromagnetic and paramagnetic particles, for a wide range of granulometry. In the design phase of an enterprise, it is important to study magnetic separation methods, in a cautious manner, through bench tests or pilot scale, focused on the proper characterization of the ore and the operation. Based on this, the present work consists of the study of parameters of type of expanded screen matrix, mass of solids in the feed and grain size of the material, aiming to concentrate an itabirite of the Quadrilátero Ferrífero region, in the municipality of Caeté-MG. Besides, this study analyzes the impact of the variables on the Fe content in the concentrate. The work evaluated two different granulometries of the ore, medium (-150 +37 μ m) and fine (-37 μ m). For the medium fraction, it was possible to reach final concentrate with a content of about 60% Fe, reject with 30% Fe, mass and metallurgical recovery of 51% and 68%, respectively. For the finer granulometry, concentrate was obtained with 61% iron, mass recovery and metallurgy of 45% and 63%, respectively.

Key words: Magnetic concentration. Itabirite. Expanded screen matrix. Power supply. Feed particle size.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais depósitos brasileiros de minério de ferro	15
Figura 2: Localização da Mina de Posse.....	16
Figura 3: Linhas de campo magnético	18
Figura 4: Indução magnética para diferentes minerais.....	19
Figura 5: Esquema do processo de separação magnética	19
Figura 6: Separador de rolos induzidos.....	20
Figura 7: Separador magnético de correias cruzadas.....	21
Figura 8: Separador magnético de tambor.....	21
Figura 9: Separador magnético de carrossel.....	22
Figura 10: Separador Eletromagnético de Carrossel modelo L-4.....	23
Figura 11: Partícula no campo magnético.....	24
Figura 12: Tipos de matrizes magnéticas.....	25
Figura 13: Fluxograma de preparação da amostra inicial	27
Figura 14: Homogeneização em pilha alongada	28
Figura 15: Picnômetros	30
Figura 16: Peneirador suspenso	31
Figura 17: Matrizes magnéticas utilizadas	34
Figura 18: Vista do separador magnético do CEFET	34
Figura 20: Curva granulométrica.....	39
Figura 21: Curva granulométrica da alimentação.....	40
Figura 22: Teste 1 para a fração média	41
Figura 23: Teste 3 para a fração média	42
Figura 24: Gráfico de efeitos principais para Fe no concentrado	43
Figura 25: Gráfico de interação para Fe no concentrado	44
Figura 26: Gráfico de efeito principais para recuperação mássica.....	45
Figura 27: Gráfico de interação para recuperação mássica.....	46
Figura 28: Otimizador de resposta	47
Figura 29: Teste 1 para a fração fina	49
Figura 30: Teste 2 para a fração fina	49
Figura 31: Teor de Fe no concentrado para os finos.....	50
Figura 32: Recuperação mássica para os finos	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Reservas e produção mundial.....	13
Tabela 2: As 10 maiores empresas produtoras de minério de ferro em 2017	14
Tabela 3: Peneiras utilizadas para análise granulométrica	31
Tabela 4: Parâmetros estudados	33
Tabela 5: Planejamento fatorial dos parâmetros	33
Tabela 6: Resultados de magnetita	37
Tabela 7: Resultados médios para a fração média	41
Tabela 8: Resultados para a fração fina.....	48
Tabela 9: Picnometria da alimentação	58
Tabela 10: Picnometria da fração média.....	58
Tabela 11: Picnometria da fração fina.....	58
Tabela 12: Picnometria concentrado do ensaio 1 fração média.....	59
Tabela 13: Picnometria concentrado do ensaio 1 (duplicata) fração média	59
Tabela 14: Picnometria concentrado do ensaio 2 fração média.....	59
Tabela 15: Picnometria concentrado do ensaio 2 (duplicata) fração média	59
Tabela 16: Picnometria concentrado do ensaio 3 fração média.....	60
Tabela 17: Picnometria concentrado do ensaio 3 (duplicata) fração média	60
Tabela 18: Picnometria concentrado do ensaio 5 fração média.....	60
Tabela 19: Picnometria concentrado do ensaio 5 (duplicata) fração média	61
Tabela 20: Picnometria concentrado do ensaio 6 fração média.....	61
Tabela 21: Picnometria concentrado do ensaio 6 (duplicata) fração média	61
Tabela 22: Picnometria concentrado do ensaio 1 fração fina.....	62
Tabela 23: Picnometria concentrado do ensaio 1 (duplicata) fração fina	62
Tabela 24: Picnometria concentrado do ensaio 2 fração fina.....	62
Tabela 25: Picnometria concentrado do ensaio 2 (duplicata) fração fina	63
Tabela 26: Picnometria concentrado do ensaio 3 fração fina.....	63
Tabela 27: Picnometria concentrado do ensaio 3 (duplicata) fração fina	63
Tabela 28: Análise granulométrica sem deslamagem.....	64
Tabela 29: Análise granulométrica posterior a deslamagem.....	64

SUMÁRIO

1	Introdução	10
2	Revisão bibliográfica	12
2.1	Generalidades	12
2.2	Reservas e produção de minério de ferro	13
2.3	Concentração de minério de ferro	16
2.4	Concentração magnética	17
2.5	Concentrador magnético a úmido de alta intensidade para laboratório	22
2.6	Estudo publicados sobre concentração magnética de minério de ferro	25
3	Metodologia	27
3.1	Preparação da amostra	27
3.2	Caracterização da amostra	29
4	Resultados e discussão	37
4.1	Caracterização da amostra	37
4.2	Análise Granulométrica	38
4.3	Ensaio de separação magnética	40
4.3.1	Ensaio de separação magnética da fração média	40
4.3.2	Ensaio de separação magnética da fração fina	47
5	Conclusão	53
	Referências Bibliográficas	54
	Apêndice A.1- Densidade e teor de ferro	58
	Apêndice A.2- Análise granulométrica	64

1 INTRODUÇÃO

As jazidas que contém minério de alto teor estão em fases de esgotamento e grande parte dessas ainda necessitam de etapas de beneficiamento mineral para reduzir a quantidade de impurezas. Esta realidade é a mesma para as jazidas de minério de ferro com teores baixos e alta quantidade de contaminantes, onde a etapas de concentração se fazem fundamentais para que o concentrado de ferro atinja as especificações de mercado. Dessa forma, o estudo de minérios itabiríticos tem ganhado espaço no mercado, mantendo o Brasil no ranking de reservas e produção de minério de ferro.

Os minérios de ferro itabiríticos são processados por gravimetria, flotação ou separação magnética de alto campo. Essas operações dependem das características físicas, químicas e aspectos geológicos dos minérios itabiríticos.

A concentração gravítica, uma das formas de processamento mineral mais antiga, se baseia na diferença de densidades, formas e tamanhos das partículas, sendo aplicada a minérios que são liberados em faixas granulométricas mais grossas.

A flotação é uma operação que explora as características físico-químicas de superfície das diferentes espécies minerais, naturais ou induzidas pelos reagentes químicos. Em razão do uso destes reagentes, a flotação é um método oneroso.

A concentração magnética é uma operação que explora a propriedade de susceptibilidade magnética natural dos minerais. Esta operação está em ascensão devido aos avanços científicos e técnicos da área aplicados ao beneficiamento mineral. No entanto, apesar do alto custo de investimento, possui custo operacional baixo e facilidade de uso e manuseio. Dessa forma, os separadores magnéticos de alta intensidade têm sido utilizados e estudados cada vez mais na aplicação de minérios com granulometrias mais finas e os rejeitos de flotação.

Dentro deste contexto, o presente trabalho visa analisar a viabilidade da concentração do minério do ferro itabirítico da Mina de Posse, localizada no município de Caeté-MG, via concentração magnética de alta intensidade a úmido.

Os objetivos específicos deste estudo foram avaliar a influência das variáveis granulometria do minério, tipo de matriz, quantidade de massa alimentada no teor de Fe do concentrado. Além disso, identificar, através da análise fatorial, quais dessas variáveis mais influenciaram nos resultados.

Este trabalho foi realizado de forma ordenada. No segundo capítulo está relatado a revisão bibliográfica, com os principais assuntos referentes ao minério de ferro estudado, mercado mundial e brasileiro e concentração magnética. No terceiro capítulo está exposta a metodologia adotada para os ensaios em escala de bancada com os procedimentos dos testes e caracterização das amostras. No quarto capítulo estão os resultados obtidos com os testes e a comparação destes com a bibliografia. O último capítulo revela a conclusão do trabalho, considerando os objetivos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas informações sobre o panorama econômico e os tipos de concentração aplicados ao minério de ferro. Ademais são apontados estudos referentes à operação de concentração magnética para o minério de ferro.

2.1 Generalidades

O ferro é um dos elementos mais abundantes da Terra, na proporção de 4,2%, superado apenas pelo oxigênio, silício e alumínio. Dentre todos os metais, o ferro é o mais explorado e o que está mais presente no cotidiano das pessoas. Apesar de fazer parte da composição de vários minerais, somente alguns destes são economicamente exploráveis, como por exemplo, a hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4), goethita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e limonita ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) (CARVALHO *et al.*, 2014).

Aproximadamente 99% do minério de ferro se destina à cadeia produtiva do aço e ferro fundido, além de outras aplicações como nas indústrias de ferro-ligas e cimento (Jesus, 2016). A China é responsável pela metade da produção mundial de aço, sendo um dos maiores consumidores de ferro (USGS, 2016).

No Brasil existem predominantemente dois tipos de minério de ferro, o hematítico e o itabirítico. No entanto, grande parcela da hematita no estado de Minas Gerais já foi extraída e a principal fonte de fornecimento de minério de ferro é o itabirito (Maia, 2011). A diferença entre os tipos de minério de ferro, não se baseia apenas no teor do metal, mas também no conteúdo mineral e textura. Segundo Carvalho *et al.* (2014), o minério hematítico é mais homogêneo e constituído predominantemente de hematita, caracterizando corpos minerais ricos em ferro, com teores superiores a 64%. Os itabiríticos são formados pela alternância entre camadas de óxido de ferro e sílica, podendo ser friáveis ou compactos e com teores entre 20 e 55% de ferro. Segundo Nascimento (2010), hematita, magnetita e quartzo são os principais minerais presentes nos itabiritos.

A hematita é um óxido de ferro, muito abundante na natureza, com cerca de 70% de ferro em sua estrutura. A hematita tem densidade variando entre 4,9 e 5,18 g/cm³,

podendo ser encontrada em várias cores, dependendo de granulometria e arranjo cristalino, como preto, marrom avermelhado e cinza.

A magnetita é também um óxido de ferro, apresentando forte magnetismo, que contém 72,4% de Fe e possui em sua estrutura Fe bivalente e trivalente, o que confere uma diferença eletromagnética quanto a outros óxidos de ferro. A densidade varia de 4,9 a 5,18 g/cm³, e cor preta com reflexos azulados.

O quartzo é um dos minerais mais abundantes na crosta terrestre, muito resistente a erosão e é o principal mineral de ganga associado aos minérios de ferro. O quartzo, cuja fórmula química é SiO₂, com 46,7% de silício e 53,3% de oxigênio, possui densidade 2,65g/cm³ e dureza 7,0, apresentando fratura conchoidal, forma dos cristais, transparência e cores variadas.

2.2. Reservas e produção de minério de ferro

As reservas mundiais de minério de ferro são de aproximadamente 190 bilhões de toneladas no ano de 2014 (DNPM, 2015). Os maiores produtores de minério de ferro são Austrália, Brasil e China, como mostrado na Tabela 1. O Brasil, possui reservas lavráveis com um teor médio de 49% de ferro, o que corresponde a cerca de 12% das reservas mundiais.

Tabela 1: Reservas e produção mundial

Países	Reservas	Produção (10 ³ t)		
	(10 ⁶ t)	2013 ^(e)	2014 ^(e)	(%)
Brasil	22.565	386.270	411.783	12,8
China	23.000	1.450.000	1.500.000	46,6
Austrália	53.000	609.000	660.000	20,5
Índia	8.100	150.000	150.000	4,7
Rússia	2.5000	105.000	105.000	3,3
Ucrânia	6.500	82.000	82.000	2,5
Outros países	51.835	327.730	311.217	9,7
TOTAL	190.000	3.110.000	3.220.000	100

Fonte: Adaptado de DNPM (2015); (e) dados estimados, exceto Brasil

Em 2017, as empresas Vale, Rio Tinto e BHP Billinton foram as maiores produtoras de minério de ferro, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2: As 10 maiores empresas produtoras de minério de ferro em 2017

Empresa	Base	Capacidade (Mt/ano)	Produção (%)
Vale	Brasil	540	14,2
Rio Tinto	Reino Unido	466,3	12,2
BHP Billinton	Austrália	408,6	10,7
Fortescue	Austrália	217,7	5,7
ArcelorMittal	Reino Unido	109,2	2,9
Anglo American	África do Sul	83,7	2,2
Imidro	Irã	60,7	1,6
Anshan Ferro & Aço	China	58,9	1,5
Matalloinvest	Rússia	53,9	1,4
LKAB	Suécia	49,6	1,3

Fonte: Adaptado de Steelonthenet, 2017

Conforme Carvalho *et al.* (2014), em solo brasileiro as principais regiões produtoras de minério de ferro, envolvem o Quadrilátero Ferrífero (MG), a Província Mineral de Carajás (PA) e a região de Corumbá (MS), que contêm depósitos em rochas de formações ferríferas bandadas (FFB), também chamados de itabiritos. Maia (2011), ainda revela outros depósitos importantes de minério de ferro no Brasil, como o depósito de Disitrito Bahia (BA), Jurucutu (RN) e Amapá (AP). Em Minas Gerais, os depósitos de Morro do Pilar e Conceição do Mato Dentro e a Região de Porteirinha também são importantes, conforme estudo de Roberto (2010), como apresentado na Figura 1.

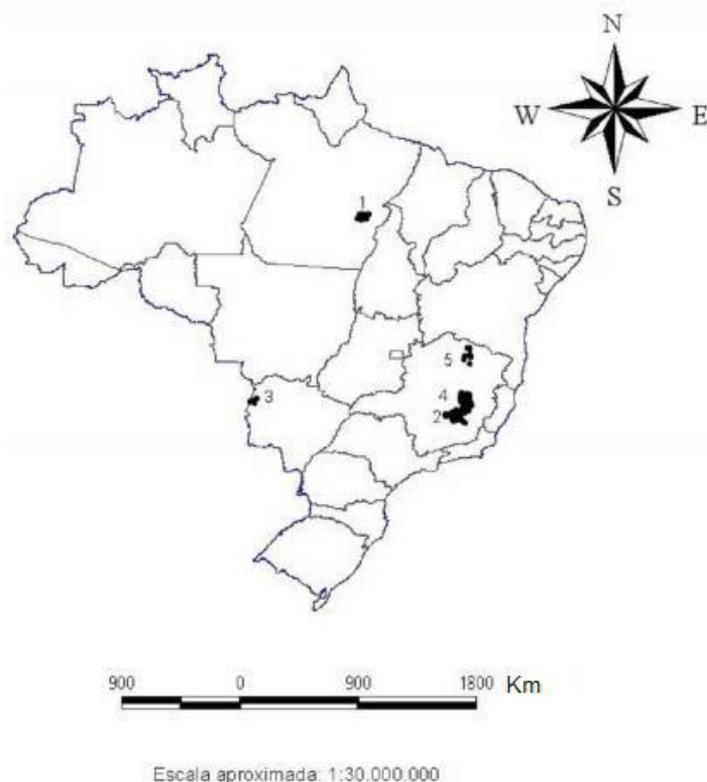


Figura 1: Principais depósitos brasileiros de minério de ferro

Serra de Carajás (1), Quadrilátero Ferrífero (2), Corumbá (3), Morro do Pilar e Conceição do Mato Dentro (4), Região de Porteirinha (5)

Fonte: Adaptado de Roberto, 2010

A produção brasileira, de acordo com o DNPM (2015), referente ao ano 2014 atingiu 411,8 milhões de toneladas. Os principais estados produtores são Minas Gerais (68,4%), Pará (29,2%) e Mato Grosso (1,2%). A VALE S/A, Samarco e a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) foram as maiores empresas produtoras, respondendo por 84,5% da produção nacional.

O itabirito a ser estudado neste trabalho é proveniente da Mina de Posse, da empresa Crusader do Brasil Mineração. A mina de Posse está localizada em Posse, município de Caeté-MG. O empreendimento está localizado a margem direita da BR-381 (Rodovia Fernão Dias), conforme a Figura 2.



Figura 2: Localização da Mina de Posse

Fonte: Parecer Único Supram

De acordo com as especificações da empresa Crusader no Parecer Único da SUPRAM, são considerados como minério os blocos contidos na cava, nas litologias Itabirito Ricos, Compacto ou Friável. O desmonte é feito mecanicamente, por ser um minério friável, sem a necessidade da utilização de explosivos. O carregamento é efetuado por carregadeiras de porte médio e transporte por caminhões basculantes.

2.3 Concentração de minério de ferro

A concentração de minério de ferro pode ser realizada através de separação magnética, concentração gravítica e flotação, podendo ser desenvolvidas de várias formas, configurações e combinações de maneira a atender as exigências de mercado. As características físicas, químicas e mineralógicas do minério diferenciam os métodos e rotas de concentração (NASCIMENTO, 2010).

Segundo Ferreira (2011), o tratamento de minérios de ferro de alto teor envolve etapas de cominuição, classificação e deslamagem. Os minérios de baixo teor de ferro e granulometria mais grossa envolvem também as operações de cominuição e

concentração, como a flotação e a concentração gravítica. Os minérios de ferro com granulometria mais fina utilizam os separadores magnéticos de alta intensidade e a flotação catiônica para a concentração.

Araújo *et al.*, (2003) estudaram a seleção de métodos de concentração mais apropriados para os diferentes minérios de ferro no Brasil. Os autores revelaram que quando em presença de quartzo liberado (principal ganga), mostra-se a flotação como a operação mais recomendada para a concentração de minérios de ferro. A magnetita presente na forma de grãos intercrescidos em grãos de hematita indica a concentração por separação magnética ou a combinação dessa com a flotação. Já a presença de gibsita e/ou caulinita interfere em todos os métodos de concentração, como o gravítico, magnético e flotação.

2.4 Concentração magnética

O campo magnético é uma variável importante da concentração magnética, visto que a separação dos materiais ocorre quando estes são submetidos a este campo. Por isso, é importante entender como o campo magnético é formado, entendendo as características do magnetismo.

O magnetismo é ramo da física que estuda os materiais magnéticos, capazes de repelir ou atrair outros materiais. No caso de um ímã, este não apresenta as mesmas características ao longo de seu comprimento, porém nas extremidades ocorre uma concentração de forças magnéticas de atração ou repulsão. Estas extremidades são chamadas de pólos magnéticos, pólo norte de onde as linhas emergem e o pólo sul, por onde chegam. A Figura 3 ilustra as linhas de fluxo ou de indução que formam o campo magnético. Pode ser observado que as linhas atravessam o ímã e formam curvas fechadas e o campo é mais forte onde as linhas estão mais próximas umas das outras (HALLIDAY *et al.*, 2007).

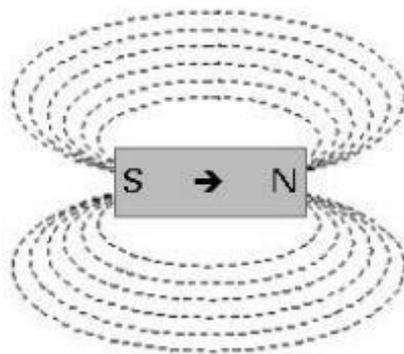


Figura 3: Linhas de campo magnético

Fonte: Adaptado de Pimenta (2014)

A separação magnética é um método consagrado no beneficiamento de minérios, de acordo com Sampaio e Luz (2004), tanto para concentração quanto purificação de substâncias minerais. O método explora a diferença de susceptibilidade magnética natural dos minerais quando expostos ao campo magnético induzido. Sampaio *et al.* (2007), registram que a atração magnética de um mineral, ao ser submetido a um campo magnético, depende de sua composição química, devido a sua forma de ocorrência nos depósitos minerais.

Para Chaves (2013), nas últimas décadas o desenvolvimento de novos materiais gerou um melhor conhecimento dos fenômenos magnéticos e abriu portas para concentração magnética. Para Sampaio *et al.* (2007), os avanços na fabricação de novos equipamentos e na ciência dos materiais desenvolveram campos magnéticos mais elevados, diversificando a separação magnética no tratamento de minérios.

De acordo com o comportamento das partículas minerais e às forças magnéticas que atuam sobre elas, as partículas são classificadas em três classes, como mostra a Figura 4. Observa-se que os minerais ferromagnéticos apresentam resposta rápida à indução magnética, sendo fortemente atraídos pelo campo magnético, como no caso da magnetita. As partículas minerais paramagnéticas, como a hematita, apresentam uma resposta menos acentuada, sendo fracamente atraídos pelo campo magnético. Já nos minerais diamagnéticos, como o quartzo, que são repelidos por um campo magnético, a relação entre indução e campo induzido decresce linearmente.

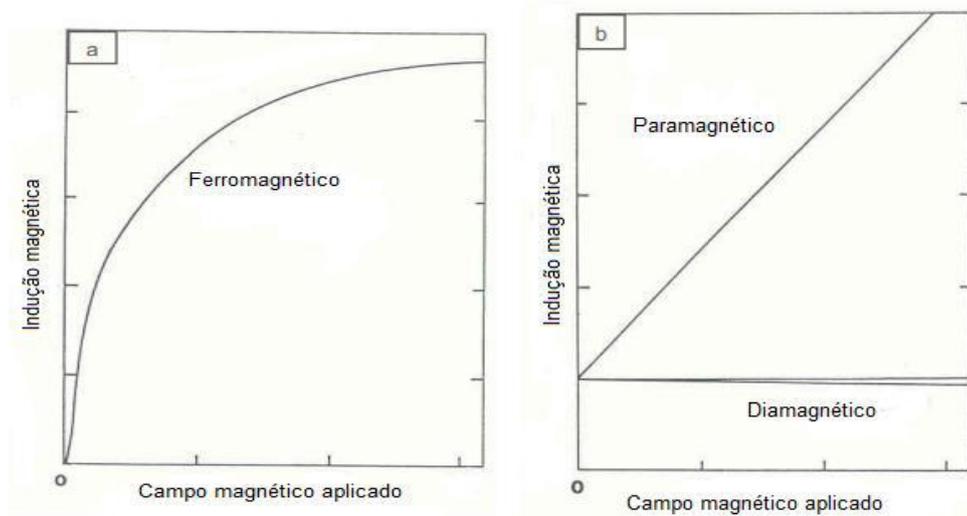


Figura 4: Indução magnética para diferentes minerais. (a) ferromagnéticas, (b) paramagnéticas e diamagnéticas

Fonte: Sampaio e Luz, 2004

Em um separador magnético várias forças atuam sobre a partícula, de forma que estas podem se somar ou competir entre si, sendo estas: gravidade, arraste hidrodinâmico, inércia e até mesmo forças superficiais entre partículas, como ilustrado na Figura 5.

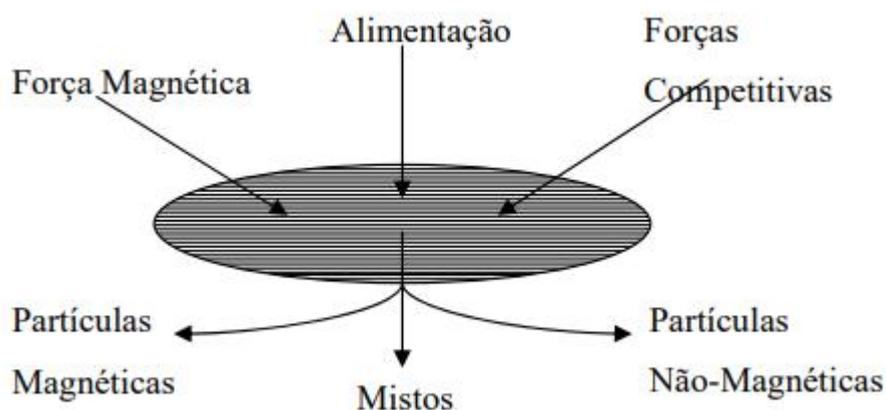


Figura 5: Esquema do processo de separação magnética

Fonte: Silva, 2008

De forma geral, a separação magnética pode ser feita a seco ou a úmido. Conforme Sampaio e Luz (2004), o método a seco é usado para granulometrias grosseiras e a úmido geralmente para as mais finas. Os separadores podem operar com campos magnéticos de baixa ou alta intensidade e/ou gradientes altos e baixos (SILVA, 2008).

Conforme Maia (2011), os separadores podem ser de tambor, de rolos induzidos, correias cruzadas, carrossel e outros.

O separador magnético de rolos induzidos é utilizado na separação a seco. O fluxo de partículas ocorre bem centralizado no topo do separador onde as partículas passam pela distância entre o eletroímã e o polo e são desviadas da sua rota pela ação do campo magnético. As partículas magnéticas são atraídas pelo rotor e coletadas. Já as partículas não magnéticas seguem para um segundo rotor e assim sucessivamente para os rotores seguintes, como ilustra o esquema da Figura 6 (SAMPAIO E LUZ, 2004).

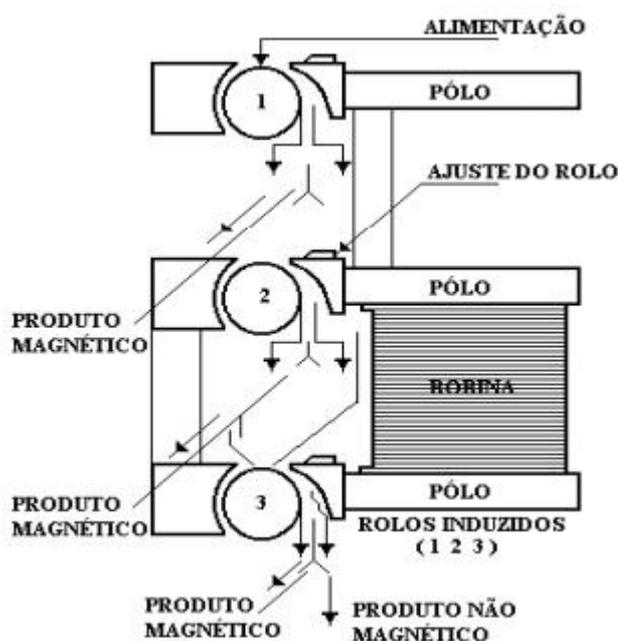


Figura 6: Separador de rolos induzidos

Fonte: Sampaio e Luz, 2004

O separador de correias cruzadas, também utilizado em separações magnéticas a seco, representado na Figura 7, consiste de um transportador de correia plana, que é a correia principal, e passa entre os pólos paralelos de dois eletroímãs. Uma outra correia, a secundária, é perpendicular a principal, e é responsável pela convergência do campo (SAMPAIO E LUZ, 2004).

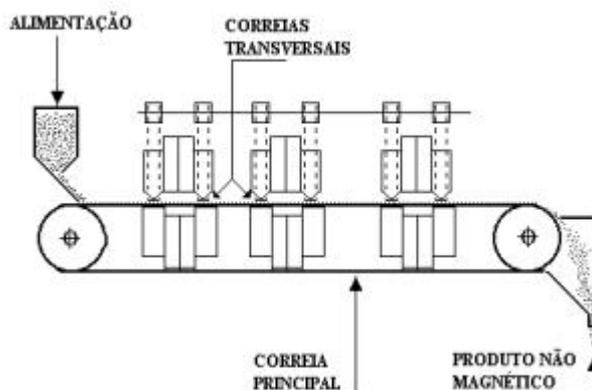


Figura 7: Separador magnético de correias cruzadas

Fonte: Sampaio *et al.*, 2007

De acordo com Chaves (2013), os separadores de tambor de baixa intensidade a úmido, como mostra a Figura 8, consistem na alimentação de uma polpa no tambor que gira e tem em seu interior um setor com ímãs. As partículas magnéticas são atraídas a superfície do tambor pelo campo magnético e as partículas não magnéticas continuam seu caminho até serem descarregadas.

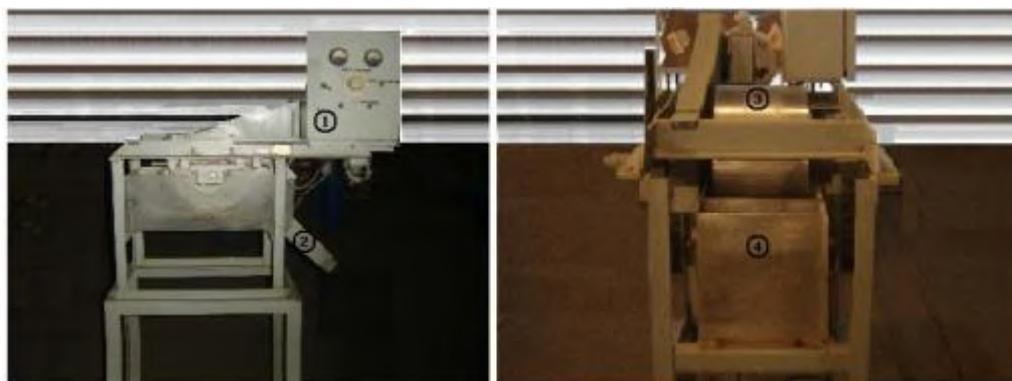


Figura 8: Separador magnético de tambor

Fonte: Sampaio *et al.*, 2007

Na Figura 9 está representado o separador de carrossel, utilizado em operações a úmido de alta intensidade e para circuito contínuo. A alimentação do separador é realizada no anel giratório, próximo ao eletroímã. As partículas magnéticas são atraídas e ficam presas às placas, enquanto as partículas não magnéticas passam direto e são descarregadas.

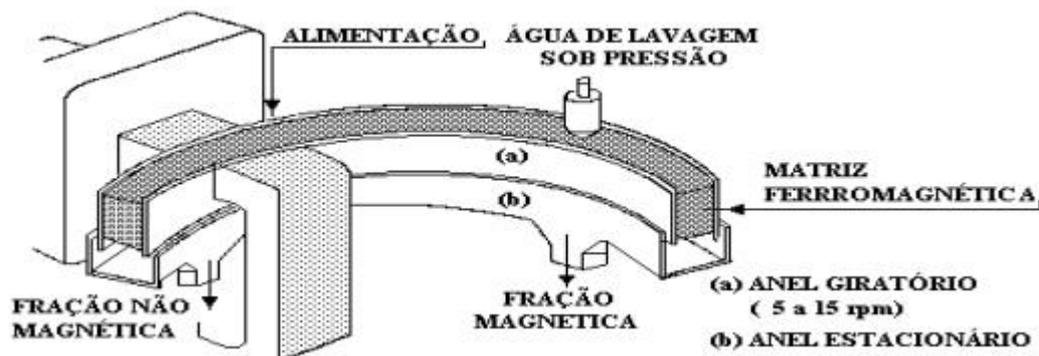


Figura 9: Separador magnético de carrossel.

Fonte: Sampaio *et al.*, 2007

2.5 Concentrador magnético a úmido de alta intensidade para laboratório

Os separadores de laboratório são equipamentos práticos e versáteis, que promovem resultados confiáveis a baixo custo, apesar de tratarem pequenas quantidades de material (SAMPAIO *et al.*, 2007).

A fabricação do separador Jones, que é um separador magnético de laboratório, representa um advento do desenvolvimento da separação magnética. Possui vantagens significativas devido ao sistema de matrizes e a eficiência na separação de faixas granulométricas finas. No entanto, se restringe a minerais paramagnéticos, pois opera com alta intensidade (SAMPAIO E LUZ, 2004).

O campo magnético do separador Jones é gerado por bobinas eletromagnéticas, onde estão situadas as matrizes ferromagnéticas que promovem um elevado campo por onde o minério passa. Pela ação do campo magnético as partículas paramagnéticas são capturadas nas matrizes.

A Figura 10 representa um esquema do separador tipo Carrossel usado em laboratório. A primeira fase compreende a escolha da matriz onde um elevado campo magnético é aplicado. As partículas então captadas nas matrizes são lavadas por um fluxo de água de baixa pressão (SAMPAIO *et al.*, 2007).

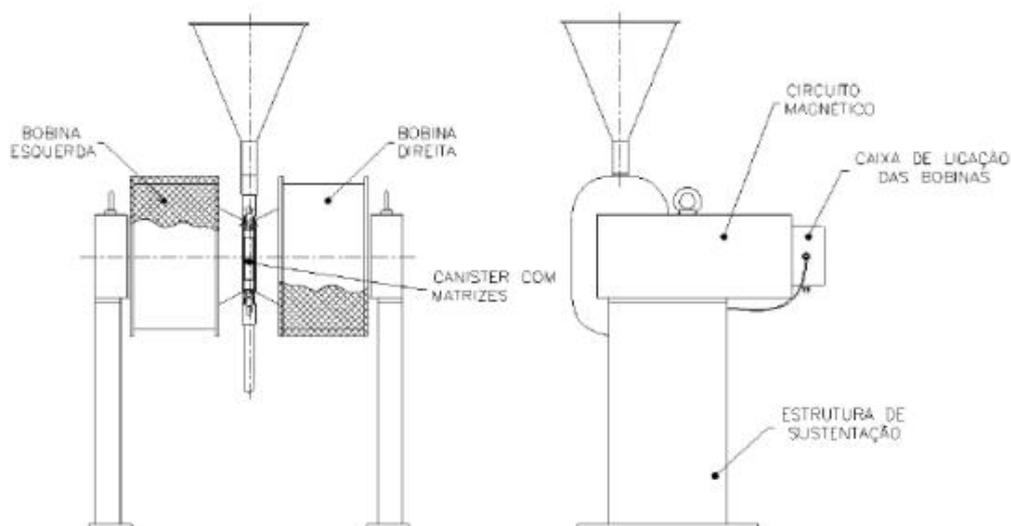


Figura 10: Separador Eletromagnético de Carrossel modelo L-4

Fonte: INBRAS, 2013

O desenvolvimento do separador magnético de alto gradiente proposto por Jones, baseado no conceito da combinação de campo magnético de alta intensidade com as matrizes magnéticas entre os polos magnéticos, aumentaram largamente a aplicação da concentração magnética para partículas finas na polpa (GE *et al.*, 2017).

Dessa forma, as matrizes desempenham papel importante na separação magnética. Diferentes tipos de matriz têm sido utilizados para diferentes aplicações, como bolas, chapas ranhuradas, metais expandidos, malha tecida e lãs de aço inoxidável (Li e Watson, 1994). De acordo com Ge *et al.*, (2017), as matrizes podem influenciar significativamente na capacidade, na eficiência e nos custos de operação.

Na presença de campo magnético perturbado, as partículas paramagnéticas e ferromagnéticas podem ser capturadas pela matriz ao passarem por ela, como mostra a Figura 11. Além do mais, as partículas magnéticas capturadas nas superfícies da matriz podem ser retiradas, lavando-se a matriz, quando o campo magnético é cessado (Ge *et al.*, 2017). A distribuição do campo e seu gradiente dependem do material, tamanho, disposição e arranjo dos elementos da matriz.

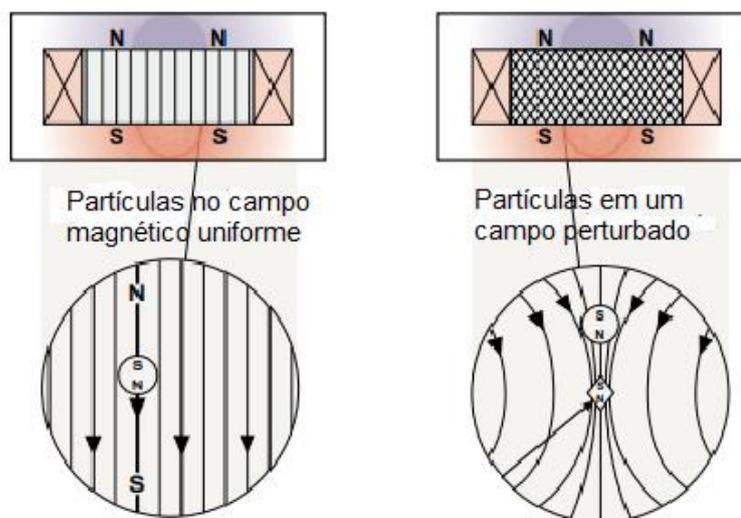


Figura 11: Partícula no campo magnético

Fonte: Adaptado de Metso, 2015

Quanto à geometria, uma matriz deve ter eficiência máxima de coleta, grande área de captura por volume, gradiente de campo suficiente e mínima resistência ao fluxo de polpa, sendo que estas propriedades são sensíveis às condições geométricas de forma, tamanho e enchimento. Desse modo, a escolha correta da matriz para uma separação magnética seletiva deve avaliar a distribuição de granulometria das partículas a serem separadas e o tamanho da abertura da matriz. Por um lado, a força magnética deve ser forte o suficiente para capturar as partículas magnéticas, e pelo outro lado, não deve ser forte demais para causar o entupimento da matriz e o arraste mecânico das partículas não magnéticas para a fração magnética (GE *et al.*, 2017).

Para a matriz de lã de aço (Figura 12-A), as fibras são orientadas aleatoriamente e comprimidas a uma densidade alta para fornecer múltiplas regiões de alto gradiente de campo magnético. As matrizes de metal expandido (Figura 12-B), segundo Ge *et al.* (2017), possuem grades em forma de diamante e a área de coleta efetiva é maior que a de placas ranhuradas e bolas. Geralmente as matrizes são formadas por planos perpendiculares à direção do fluxo, os planos paralelos são uma exceção. O arranjo perpendicular permite a recuperação de partículas ferromagnéticas e reduz o arraste de materiais não magnéticos. Já a matriz de placas ranhuradas (Figura 12-C), por terem dentes triangulares conseguem reunir as linhas do campo magnético e aumentar sua intensidade. Já a matriz de bola é bastante regular e uniforme em sua

estrutura, no entanto, este tipo de matriz não é popular em aplicações comerciais, pois a curvatura esférica das bolas é relativamente pequena, resultando em um gradiente de campo limitado e numa área de captura efetiva pequena.

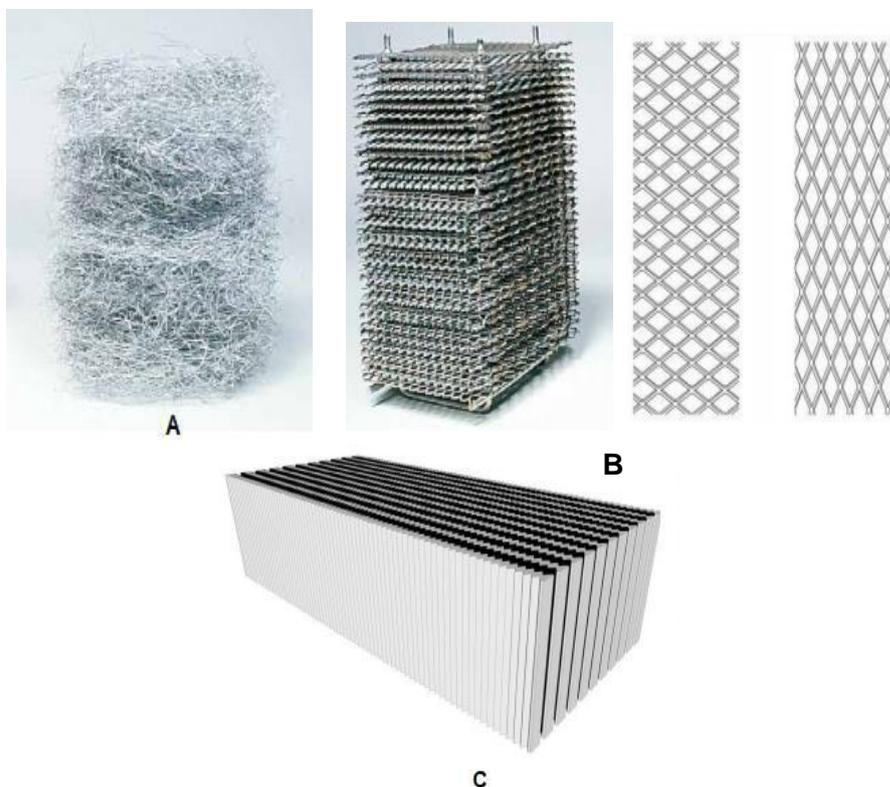


Figura 12: Tipos de matrizes magnéticas

Fonte: Metso (2015), Ge *et al.*, (2017) e Inbras (2013)

2.6 Estudo publicados sobre concentração magnética de minério de ferro

Silva e Luz (2013) trabalharam com a concentração magnética de hematita em lamelas espessadas em valores de porcentagem de sólidos na polpa de alimentação entre 25 e 45%, gerando um concentrado com 59,44% de Fe e 62,62% de recuperação metalúrgica. Bontempo (2017), testando um rejeito de minério de ferro no mesmo equipamento deste trabalho obteve melhores resultados de concentração magnética com polpa a 20% de sólidos.

Segundo Seifelnassr *et al.* (2013), quando a granulometria está abaixo de 150 μm a liberação dos minérios de ferro é superior a 90%. Dessa forma, a granulometria do

teste deve estar próxima a este valor. Peres *et al.* (2007) revelam que para a concentração magnética a úmido de alta intensidade uma faixa mais abrangente de granulometria é aplicável, de 20 a 500 μm . Reis *et al.* (2015) obtiveram resultados significativos de concentração de minério de ferro goethítico trabalhando com uma faixa granulométrica de 53 μm a 147 μm , chegando a condições de 68,7% de recuperação mássica e 80,54% de recuperação metalúrgica.

Conforme Sampaio *et al.* (2004), a faixa de campo magnético de 500 a 5000 Gauss (G) é aplicada a minerais ferromagnéticos, como a magnetita. Já a faixa de campo compreendida entre 10.000 e 18.000 G é aplicada a minerais como a hematita, que são paramagnéticos. Bontempo (2017) obteve viabilidade em concentrar minério de ferro via separação magnética utilizando o campo magnético máximo de 10.430G, obtendo um concentrado com 68,8% de ferro. Sobre a água de lavagem o mesmo autor afirma que uma maior quantidade de água de lavagem provoca um aumento no teor de ferro do concentrado.

Conforme Sampaio *et al.* (2007), a massa alimentada no separador magnético de alta intensidade a úmido de bancada não deve superior a 200g.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos experimentais que incluem a preparação e caracterização das amostras, além dos ensaios de concentração magnética.

3.1 Preparação da amostra

Para a execução deste trabalho foi utilizada uma amostra de minério de ferro proveniente da Mina de Posse localizada no município de Caeté-MG, fornecida pela empresa Crusader do Brasil Mineração. As etapas de preparação das amostras foram realizadas no Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) do CEFET-MG, Unidade Araxá, cuja sequência de execução está organizada no fluxograma da Figura 13.

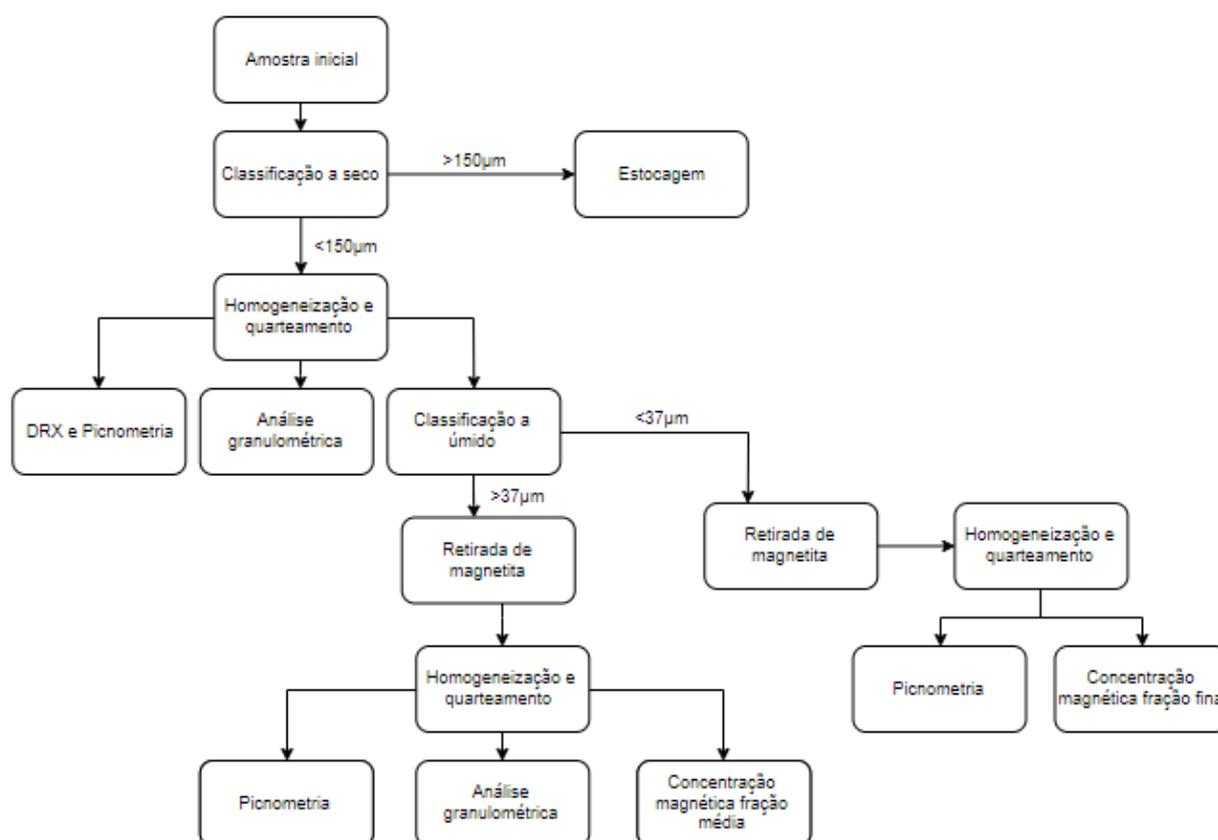


Figura 13: Fluxograma de preparação da amostra inicial

Inicialmente uma amostra de 30 kg passou por um corte de granulometria a seco, utilizando uma peneira com abertura de $150\mu\text{m}$ (100#). De acordo com Seiffessner *et al.* (2013), a liberação do minério de ferro é superior a 90% para granulometria abaixo de $150\mu\text{m}$. Ademais, Peres *et al.* (2007) afirmam que a concentração magnética a úmido de alta intensidade pode ocorrer em uma faixa abrangente de granulometria variando de 20 a $500\mu\text{m}$.

O *oversize* foi estocado e o *undersize* foi homogeneizado e quarteado em pilha alongada, como na Figura 14. Retirou-se alíquotas para os ensaios de caracterização, picnometria, análise granulométrica e análise mineralógica via difração de raio-X (DRX).

Em seguida, o material foi classificado a úmido em uma peneira de $37\mu\text{m}$ (400#). A classificação do material teve como objetivo adequar a granulometria da amostra. O material (*oversize*) seguiu para a retirada de magnetita em separador magnético de escala laboratorial, modelo L-4 da INBRAS. O campo magnético utilizado foi de 1000 Gauss, que é um campo de baixa intensidade, garantindo assim apenas a retirada de magnetita.

O *oversize* foi então homogeneizado e quarteado, retirando-se alíquotas para picnometria, análise granulométrica e ensaios de concentração magnética da fração média. O *undersize* do peneiramento a úmido, passou por uma etapa de separação magnética de baixo campo para a retirada de magnetita, foi homogeneizado e quarteado posteriormente, retirando-se alíquotas para a picnometria e para os ensaios de concentração magnética da fração fina.



Figura 14: Homogeneização em pilha alongada

3.2 Caracterização da amostra

A análise mineralógica por difração de raio-x foi realizada no equipamento da marca Shimadzu, modelo XRD-7000, do Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG Campus I, em Belo Horizonte.

A picnometria foi realizada em triplicata para a determinação da massa específica das amostras. Esta foi calculada através da Equação 1.

$$ds = \frac{(A2)-(A1)}{(A4+A2)-(A3+A1)} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

ds: Densidade do sólido;

A1: Massa do picnômetro;

A2: Massa do picnômetro + Amostra;

A3: Massa do picnômetro + Amostra + Água;

A4: Massa do picnômetro + Água.

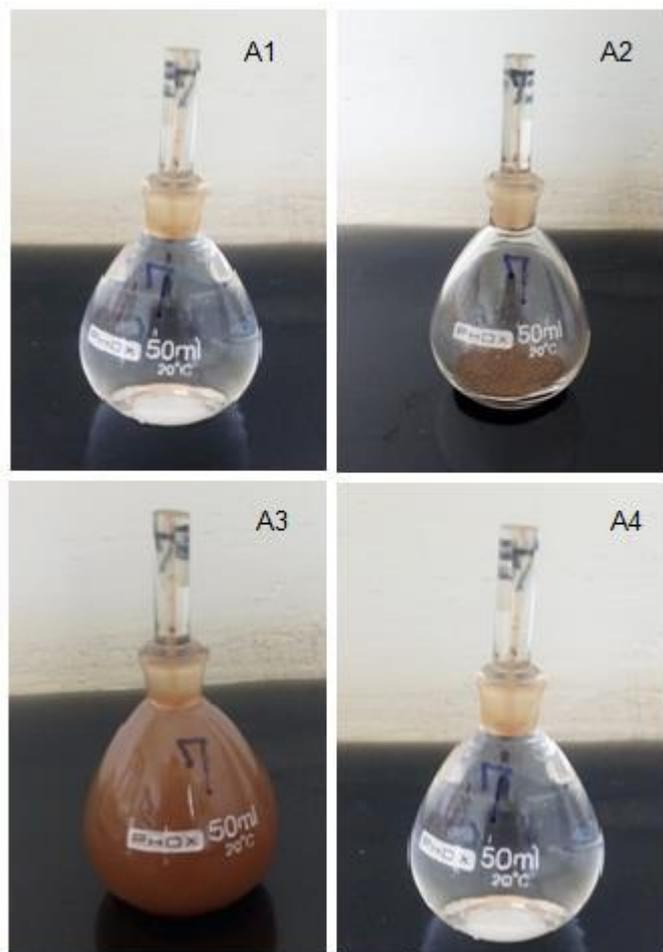


Figura 15: Picnômetros

A análise granulométrica da alimentação foi realizada por peneiramento a úmido em peneirador suspenso, marca CDC e modelo PV-08, utilizando as peneiras da série *Tyler*, como mostra a Figura 16 e a Tabela 3. A massa inicial alimentada foi de cerca de 200g. Cessado o peneiramento, o material passante na última peneira e o retido em cada peneira foram secos em estufa a 100°C e pesados para a confecção das curvas de distribuição granulométrica.



Figura 16: Peneirador suspenso

Tabela 3: Peneiras utilizadas para análise granulométrica

Malha (#)	Malha (μm)
100	150
115	125
150	104
170	90
200	74
270	53
325	45
400	37
-400	-37

3.3 Ensaios de concentração magnética

Os ensaios de concentração magnética foram realizados em duplicata com o intuito de analisar o efeito das variáveis massa de sólidos na alimentação, tipo de matriz e

granulometria da alimentação sobre o teor de ferro no concentrado e obter as melhores condições operacionais para recuperar ferro das amostras.

Em relação aos testes de concentração magnética a úmido de alta intensidade, os parâmetros adotados para os ensaios foram: polpa com 20% de sólidos, campo magnético fixo em 10.430 Gauss e volume de água de lavagem igual a dois litros.

O volume de água de lavagem utilizado de 2L é justificado pelos testes exploratórios, que foram realizados com o intuito de se determinar os melhores parâmetros para os ensaios.

De acordo com testes preliminares também realizados para este trabalho, observou-se a viabilidade de se alimentar uma polpa com 20% de sólidos.

Os parâmetros variáveis foram massa de sólidos da alimentação, tipos de matrizes e granulometria das amostras. Para a massa de alimentação, foram efetuados testes com 100 e 200g de amostra. Durante os ensaios foram avaliadas três matrizes de tela expandida: abertura EXP 5B (fina), EXP 6 e 14 Mesh. Os ensaios foram desenvolvidos para duas faixas granulométricas distintas, sendo uma chamada de granulometria média, que variava de 37 a 150 μ m, e outra denominada fina, para os ensaios que apresentavam amostras com tamanho abaixo de 37 μ m. Os parâmetros fixos e variáveis foram baseados nas melhores condições apresentadas na revisão de literatura e em estudos preliminares, como o caso da água de lavagem e porcentagem de sólidos.

A melhor condição de massa da alimentação revelada pelos resultados dos ensaios para a fração média foi utilizada nos ensaios para a fração de granulometria mais fina. Os três tipos de matrizes foram utilizados nos ensaios para ambas as granulometrias.

Na Tabela 4 são apresentadas as variáveis estudadas e na Tabela 5 estão dispostos os ensaios de acordo com o planejamento fatorial realizado no *software* estatístico Minitab®, para o material na granulometria entre 37 e 150 μ m, chamado de fração média.

Tabela 4: Parâmetros estudados

Variáveis		Níveis		
		1	2	3
A	Massa alimentação (g)	100	200	-
B	Tipo matriz	5B	6	14 mesh

Tabela 5: Planejamento fatorial dos parâmetros

Ensaio	Alimentação	Matriz
1	1	1
2	1	2
3	1	3
4	2	1
5	2	2
6	2	3

As matrizes, segundo o fabricante do separador magnético, INBRAS, são de tela expandida e estão, disponíveis no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG, Unidade Araxá. São elas:

- i) EXP 5B (fina): granulometria abaixo de 150 μ m
- ii) EXP 6: granulometria abaixo de 150 μ m
- iii) 14 Mesh: granulometria abaixo de 105 μ m

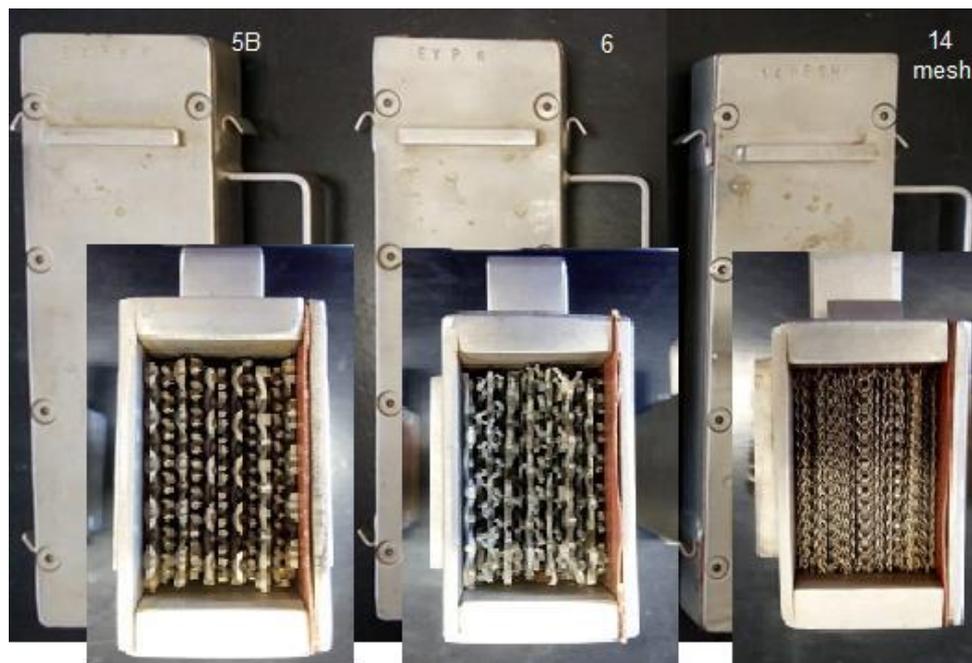


Figura 17: Matrizes magnéticas utilizadas

Da esquerda para a direita: matriz 5B, matriz 6 e matriz 14 mesh

Os ensaios foram realizados em um separador magnético de escala laboratorial, modelo L-4 da INBRAS, como mostra a Figura 18. Os testes foram realizados em ordem aleatória gerada pelo *software* estatístico Minitab®, para se minimizar os possíveis erros de execução dos testes.



Figura 18: Vista do separador magnético do CEFET

Os ensaios no separador foram realizados segundo os seguintes procedimentos:

- i) Pesou-se a amostra de minério a ser utilizada;
- ii) Mediu-se 2L de água de lavagem;
- iii) Preparou-se a polpa com 20% de sólidos, agitando-a em um béquer;
- iv) Inseriu-se a matriz no *canister* do separador magnético;
- v) Colocou-se um balde limpo abaixo da descarga do separador, para recolher a fração diamagnética;
- vi) Ligou-se o equipamento, ajustando a intensidade do campo no máximo (10430G);
- vii) Agitou-se a polpa e esta foi introduzida diretamente na matriz;
- viii) Em seguida, lavou-se o béquer, limpando-o com a água de lavagem;
- ix) Colocou-se o restante da água de lavagem;
- x) Retirou-se o balde com o rejeito (fração diamagnética) e colocou-se outro para a coleta da fração magnética;
- xi) Cessou-se o campo magnético e com um jato de água limpou-se a matriz para retirada da fração magnética;
- xii) Os produtos foram secos em estufa a 100°C e depois pesados, para os cálculos de recuperações mássica e metalúrgica;
- xiii) Realizou-se a picnometria de todos os produtos secos para posterior cálculo de teor de ferro.

Foram calculados os teores de Fe, considerando que a amostra é constituída basicamente por hematita e quartzo. O teor de ferro nas amostras foi determinado pela Equação 2.

$$\%H = \frac{dH.(dM-dQ)}{dM.(dH-dQ)} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

%H: porcentagem de hematita;

dH: densidade da hematita, considerada 5,30 g/cm³;

dM: densidade do minério, obtida por picnômetro;

dQ: densidade do quartzo, considerada 2,65 g/cm³.

Segundo Borges (2015), a caracterização química realizada pelos cálculos de picnometria se mostram bastante eficiente, baseado no valor do teor de hematita que

o autor obteve por picnometria, de cerca de 49% e pela análise de fluorescência de raios X (FRX) de cerca de 46% para o minério estudado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados da caracterização das amostras, bem como os resultados obtidos nos testes de concentração magnética.

4.1 Caracterização da amostra

A fração de magnetita retirada pelo separador magnético em baixa intensidade está apresentada na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados de magnetita

Magnetita (g)	73,72
Massa total (g)	13000
% magnetita	0,57

Através do difratograma da amostra, Figura 19, é possível identificar picos característicos de quartzo, hematita, magnetita e minerais filossilicatos. Este resultado da difração de raio-x era esperado, uma vez que o minério em estudo é itabirítico, contendo basicamente hematita e quartzo e baixa quantidade de magnetita como pode ser observado na Tabela 6.

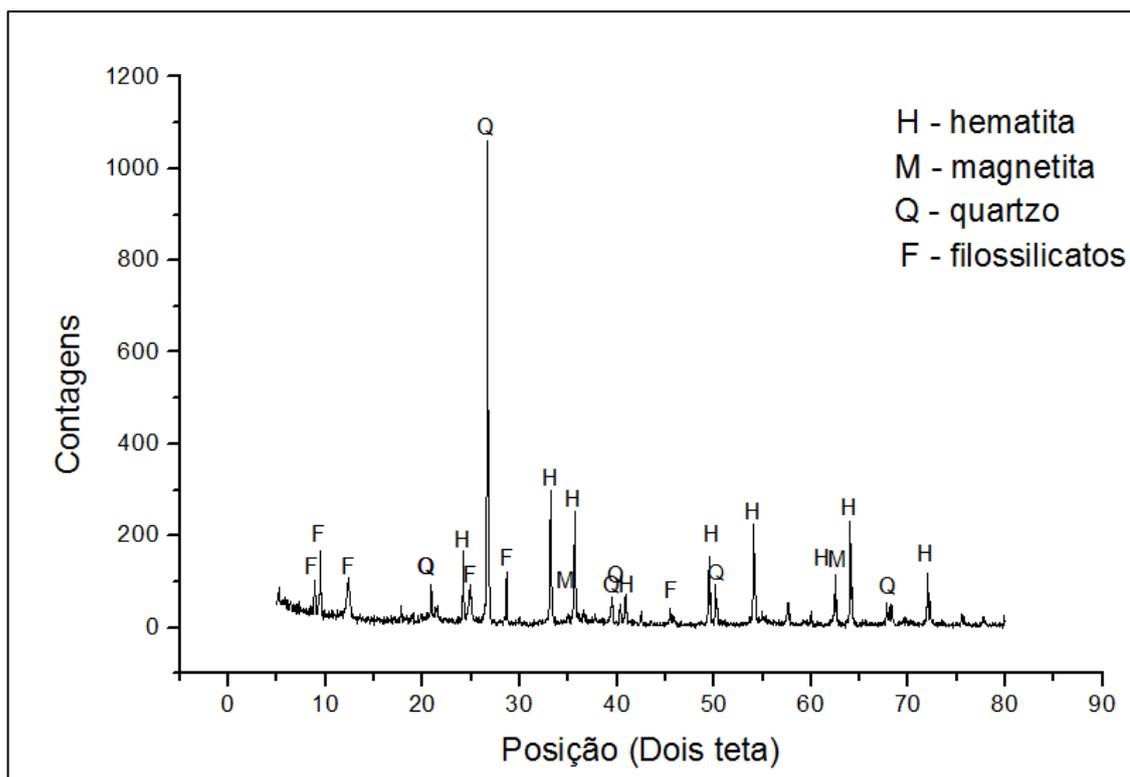


Figura 19: Resultados de DRX

Para o cálculo de densidade e teor de ferro da amostra seguiu-se o procedimento descrito no item 3.2. No Apêndice A.1 está a exemplificação do cálculo, em que é possível observar baixa dispersão nos resultados, caracterizado pelo coeficiente de variação (CV) menor que 5%, para os testes de picnometria em triplicata.

A massa específica da amostra inicial era de $3,92\text{g/cm}^3$, da fração média $3,91\text{ g/cm}^3$ e fina $3,86\text{g/cm}^3$. O teor médio de ferro da fração média foi de 45,36% e da fração fina de 43,89%.

4.2 Análise Granulométrica

A Figura 20 apresenta a análise granulométrica da alimentação realizada por peneiramento a úmido, revelando um d_{80} de cerca de $95\mu\text{m}$, sem a etapa de deslamagem. Alimentado com uma massa inicial de 221g, ao fim do peneiramento a massa total era de 220g, resultando em 0,79% de perda de massa, que pode ser considerada insignificante, pois é inferior a 5%. Outra informação, é que a amostra apresenta 18% de partículas abaixo da granulometria de $37\mu\text{m}$ (400#), como

detalhado no Apêndice A.2, o que poderia prejudicar os testes de concentração magnética. Dessa forma, optou-se por deslamar o material e separá-los em duas frações para os ensaios de fração média e fração fina.

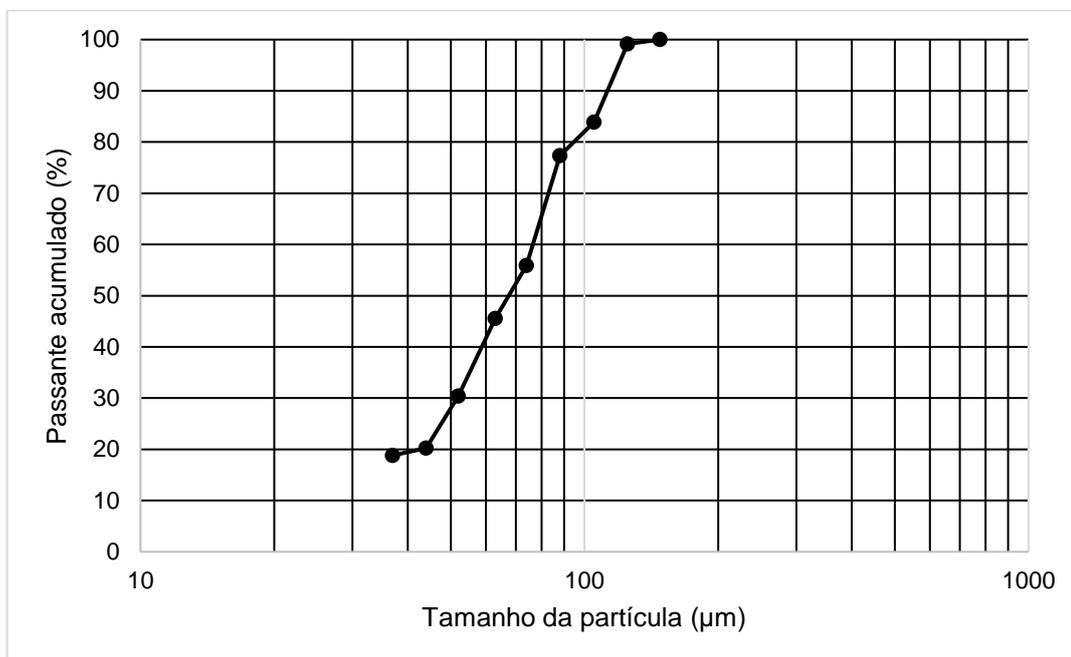


Figura 20: Curva granulométrica

A Figura 21 apresenta a análise granulométrica da alimentação, após a etapa de deslamagem, realizada por peneiramento a úmido. Alimentado com uma massa inicial de 202,73g, ao fim do peneiramento a massa total era de 199,02g, resultando em 1,83% de perda. Esta perda pode ser considerada baixa pois é inferior a 5%. Outra informação, é que a amostra apresenta 7,89% de partículas abaixo de 37µm (400#), como apresenta o Apêndice A.2. Dessa maneira, a concentração magnética da amostra se torna possível, de acordo com a fração granulométrica proposta por Peres *et al.* (2007). Pela Figura 21 é possível observar d_{80} igual a 103 µm.

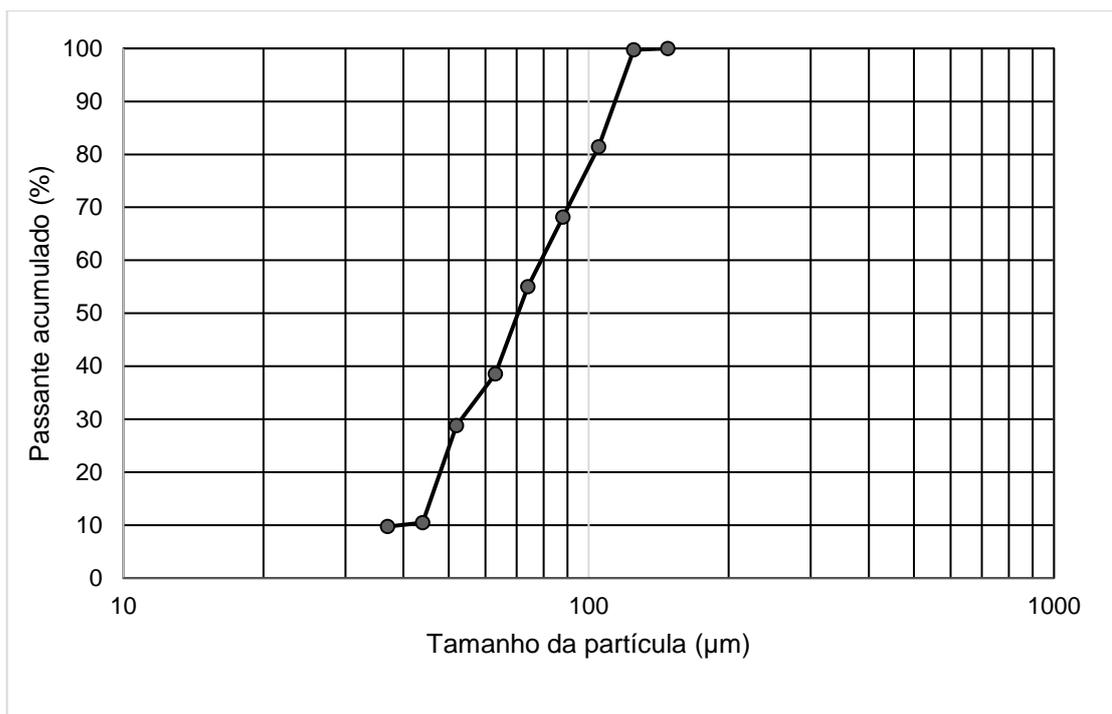


Figura 21: Curva granulométrica da alimentação

4.3 Ensaios de separação magnética

Nesta seção estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios para a concentração magnética das frações média e fina.

4.3.1. Ensaios de separação magnética da fração média

Foram realizados 6 testes em duplicata no separador magnético, com a alteração dos parâmetros estudados, de acordo com a Tabela 7. O teor de ferro da alimentação da fração média estudada foi de 45,36%.

Após os ensaios, foram obtidas as massas do concentrado e do rejeito. Em seguida, por picnometria, foi obtida a massa específica de cada produto e conseqüentemente o teor de ferro do concentrado, teor de ferro do rejeito, e as recuperações mássicas e metalúrgicas, que estão detalhadas no Apêndice A.1.

Tabela 7: Resultados médios para a fração média

Ensaio	Alim. (g)	Matriz	Teor Fe con. (%)	Teor Fe rej. (%)	Rec. más. (%)	Rec. met. (%)
1		5B (1)	63,24	37,77	28,85	40,43
2	100	6 (2)	61,37	38,29	29,56	40,21
3	(1)	14 mesh (3)	59,86	29,68	51,15	67,86
4		5B (1)	63,19	37,51	29,63	41,50
5	200	6 (2)	63,13	38,72	26,20	36,67
6	(2)	14 mesh (3)	56,53	33,69	50,02	62,68

(1) representa o nível 1, (2) o nível 2 e (3) o nível 3

Na Figura 22, está representado o teste 1, utilizando massa de sólidos na alimentação de 100g e a matriz de tela expandida 5B, e na Figura 23 está representado o teste 3, com a matriz 14 mesh. Pelas figuras é possível observar a diferença de cor entre os produtos obtidos (concentrado e rejeito) e a quantidade de massa final de cada produto em ambas as figuras apresentadas.

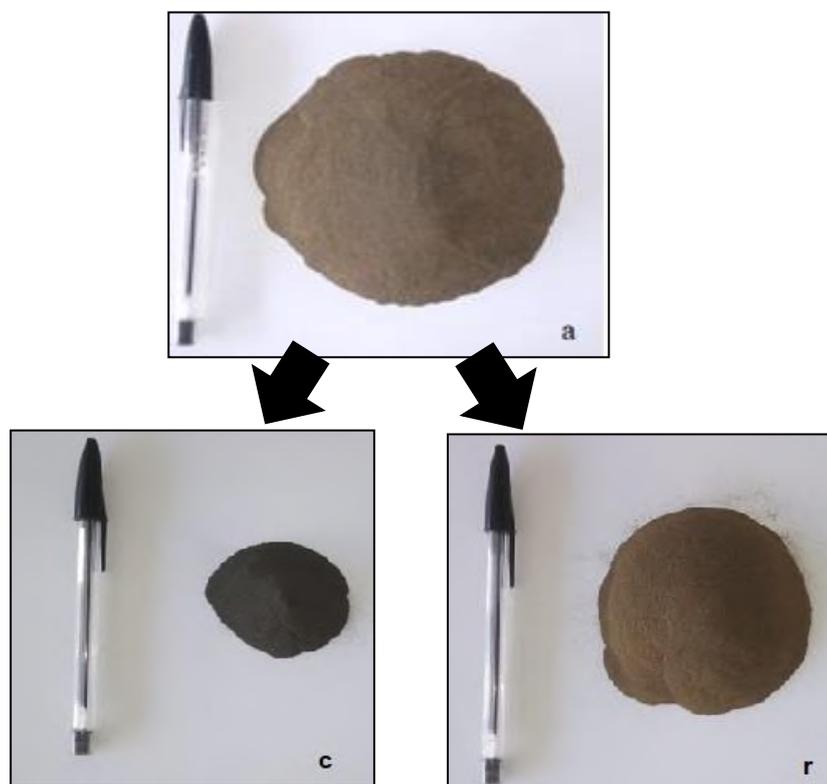


Figura 22: Teste 1 para a fração média

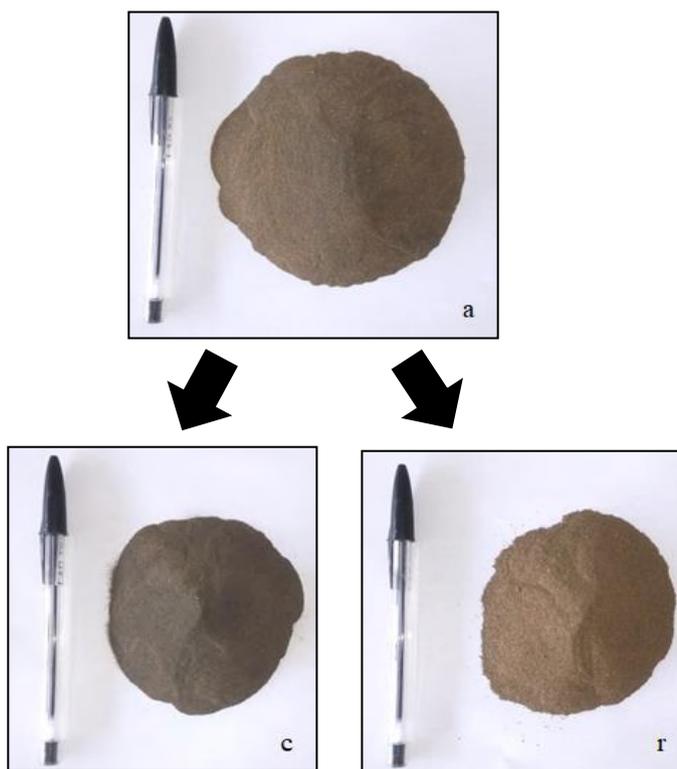


Figura 23: Teste 3 para a fração média

Examinando a variável massa de alimentação na Figura 24, observa-se uma diminuição do teor de Fe no concentrado ao passar do nível 1 para o 2. Esta variável teve menor significância no teor de ferro no concentrado.

Este resultado corrobora com a INBRAS (2013), em que o aumento da massa de sólidos na alimentação, afeta a capacidade do separador magnético, diminuindo a precisão da separação magnética, fazendo com que as partículas não magnéticas fiquem presas a matriz. Dessa forma, o aumento da massa de sólidos alimentada, prejudica o teor de ferro no concentrado e tende a aumentar a recuperação mássica.

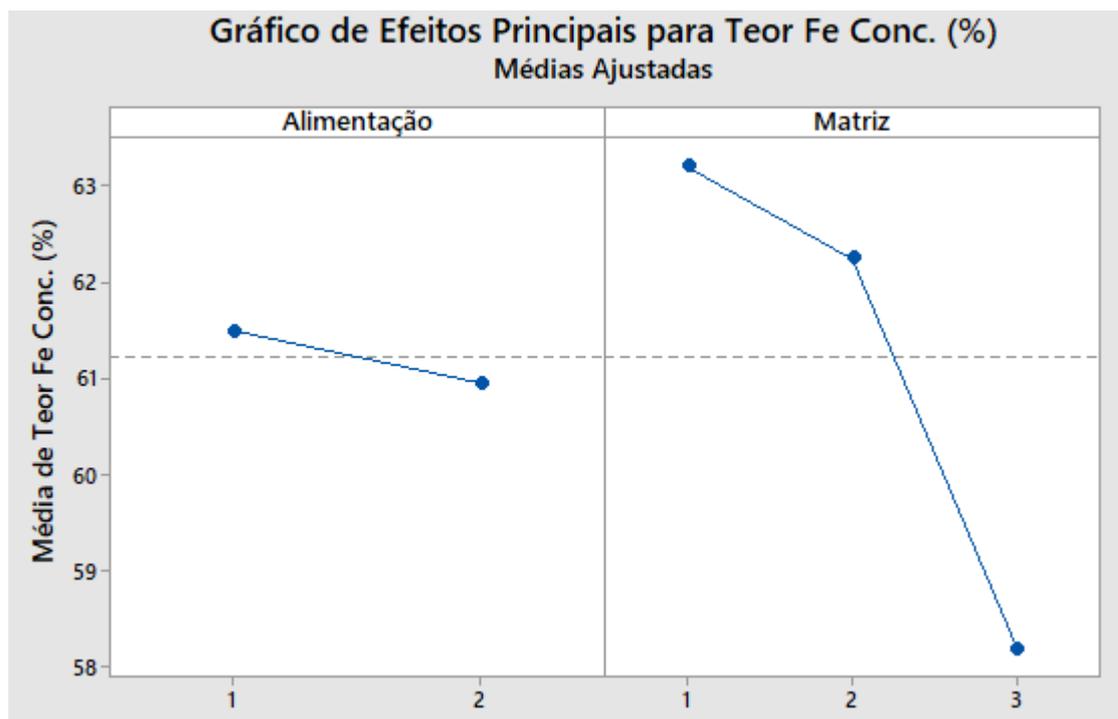


Figura 24: Gráfico de efeitos principais para Fe no concentrado

Ao analisar o efeito da variável tipo de matriz através da Figura 24, observa-se que esta variável apresenta um efeito significativo sobre o teor de ferro no concentrado. O teor de ferro reduz quando sai do nível 1 para o 3. Dessa forma a matriz 14 mesh que possui menor abertura de tela apresentou a menor média de teor de Fe no concentrado e a matriz 5B o melhor resultado, seguida pela matriz 6.

Este resultado comprova o que Silva (2014) propôs, que quanto maior a abertura da tela da matriz maior é o teor de ferro no concentrado para uma mesma intensidade campo magnético aplicado. Matrizes mais fechadas, de menores aberturas, facilitam o aprisionamento de partículas não magnéticas, desfavorecendo o teor do metal no concentrado magnético.

A diferença entre o teor de ferro no concentrado para a matriz 5B (nível 1) e a matriz 6 (nível 2) é pequena, mas existente. Esta diferença, apesar de ambas serem utilizadas para materiais com granulometrias abaixo de $150\ \mu\text{m}$ (100#) pode estar associada ao fato de que a tela das matrizes seja trançada de forma distinta, influenciando no gradiente do campo magnético e consequentemente na recuperação do metal. Além disso, a matriz 14 mesh não era a mais indicada pelo fabricante do

equipamento, o que também influencia nos baixos resultados de teor de ferro no concentrado.

A Figura 25 traz o gráfico de interação entre as variáveis massa de sólidos na alimentação e tipo de matriz. Neste gráfico, as retas que se cruzam indicam a presença de interação entre as variáveis, ou seja, o efeito da variável massa de alimentação depende dos tipos de matrizes estudados. Esta interação pode ser observada entre as duas variáveis analisadas, pois as retas se interceptam no intervalo estudado ou tendem a se cruzar no prolongamento destas, em outros intervalos.

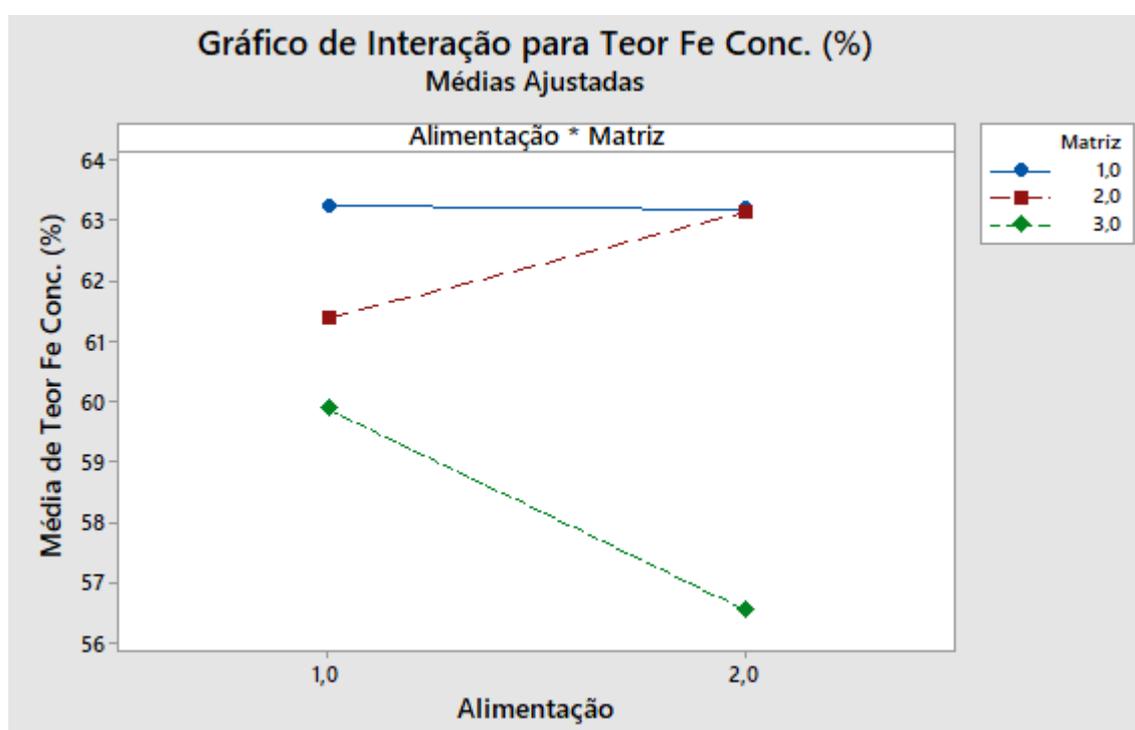


Figura 25: Gráfico de interação para Fe no concentrado

A Figura 26 apresenta o gráfico de efeitos para a recuperação mássica. Analisando a variável massa de sólidos na alimentação pode-se observar que esta variável foi a que menos influenciou na recuperação mássica, apresentando ligeiro decréscimo, ao passar do nível 1 para o nível 2.

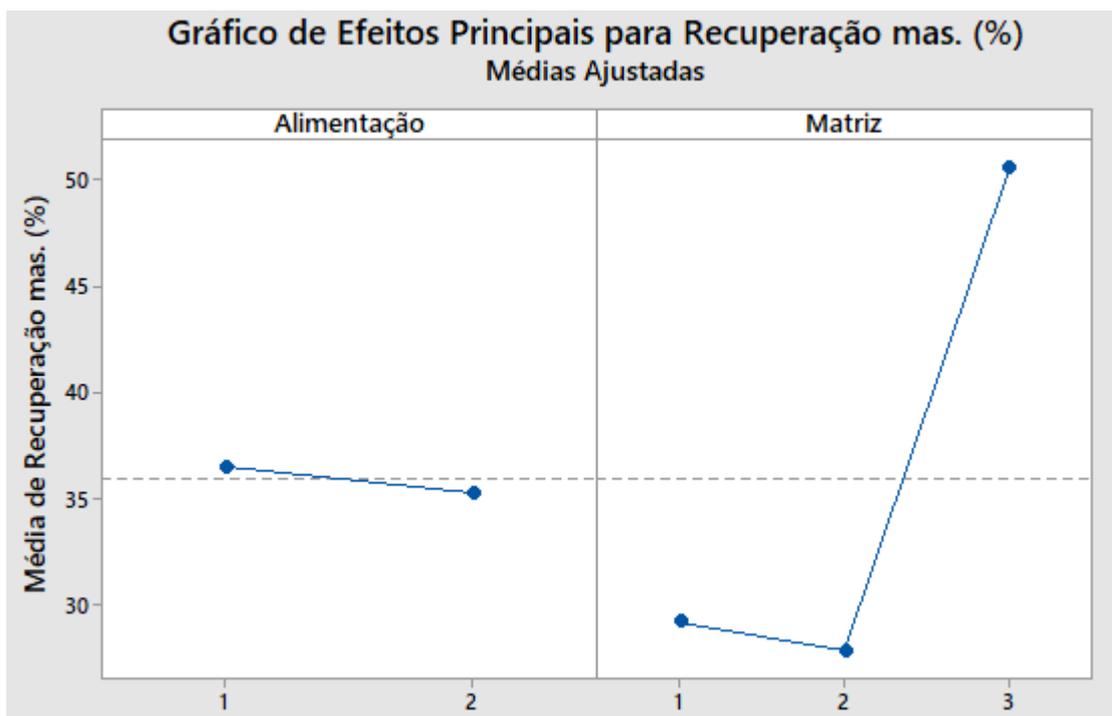


Figura 26: Gráfico de efeito principais para recuperação mássica

A variável tipo de matriz apresenta um resultado significativo na recuperação mássica, como mostra a Figura 26. Esta reduz a recuperação quando sai do nível 1 em direção ao 2, e depois aumenta a recuperação do nível 2 para o 3.

Este resultado está de acordo com o que Gonzaga (2014) apresenta, ou seja, quanto maior a abertura das telas menor a recuperação mássica, devido ao arraste de partículas que vão constituir a fração não magnética. Por isso, a matriz do nível 3, do tipo 14 mesh que é mais fechada, apresenta maior média de recuperação mássica. Já as matrizes 5B e 6 dos níveis 1 e 2, respectivamente, apresentam menores recuperações mássicas.

O gráfico de efeitos principais para a recuperação metalúrgica, apresentado na Figura 27, revela que a massa de alimentação é a variável que menos influencia nos resultados de recuperação metalúrgica, embora apresente leve decréscimo ao passar do nível 1 (100g) para o nível 2 (200g).

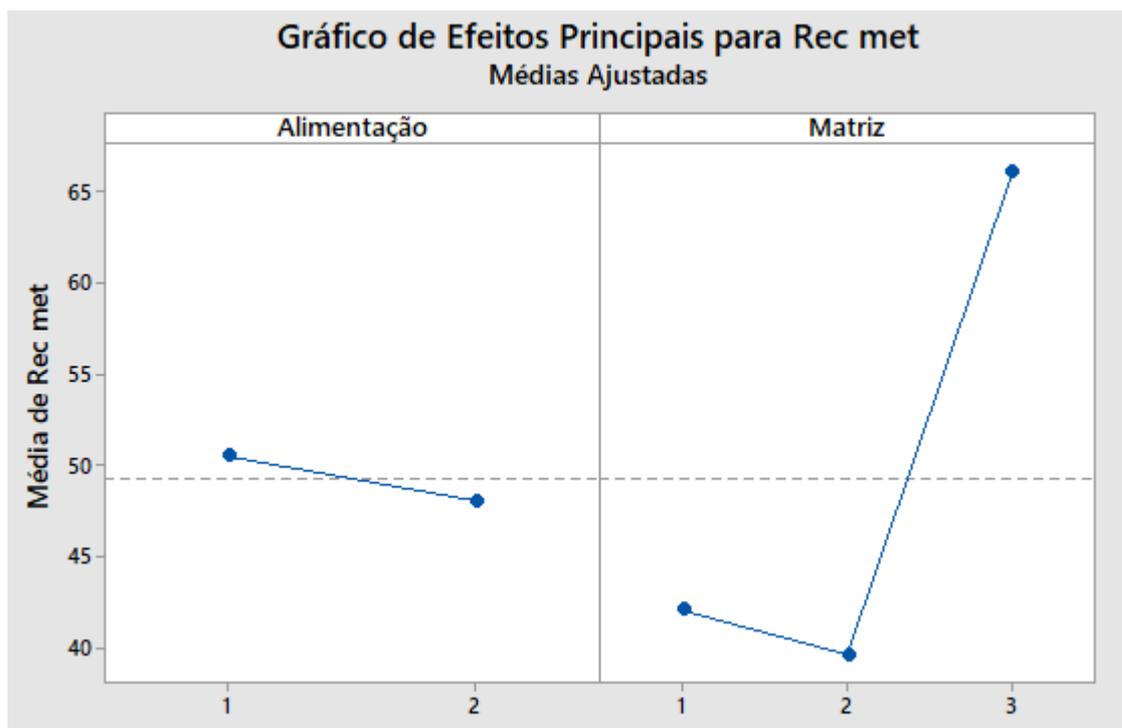


Figura 27: Gráfico de efeitos principais para recuperação metalúrgica

A variável tipo de matriz, influencia de forma significativa nos resultados de recuperação metalúrgica, conforme a Figura 27. Dessa forma, observa-se que a matriz 14 mesh (nível 3) apresenta maior média de recuperação metalúrgica, seguida pela matriz EXP 5B e posteriormente a matriz EXP 6.

Este resultado corrobora com Chen *et al.* (2009), que propuseram que matrizes de menores aberturas promovem consideráveis aumentos de recuperação metalúrgica.

Conforme o índice Platts (2018), a especificação de mercado para o minério de ferro deve atender as seguintes exigências de teor: 66% de Fe, 5% de SiO₂, 0,75% de Al₂O₃, menos de 0,03% de P e menos de 0,05% de S. A partir desses dados do índice Platts e analisando a Tabela 10, observa-se que as condições analisadas ainda não seriam suficientes para atender as especificações de mercado, quanto ao teor de ferro no concentrado. No entanto, os teores atingidos nos ensaios estão pouco abaixo do especificado, de forma que algumas modificações podem ser realizadas nos parâmetros avaliados ou até mesmo uma etapa de limpeza (*cleaner*) para os concentrados, para se elevar o teor de ferro no concentrado.

A Figura 28 representa o gráfico de otimização de respostas para os ensaios no separador magnético. Nesta otimização, os objetivos eram maximizar o teor de ferro no concentrado aliado a maior recuperação mássica. O gráfico apresenta que a máxima recuperação mássica é de cerca 51% para um teor de ferro do concentrado de aproximadamente 60%. Estes resultados são obtidos no cenário com massa de sólidos na alimentação de 100g (nível 1) para a matriz 14 mesh (nível 3).

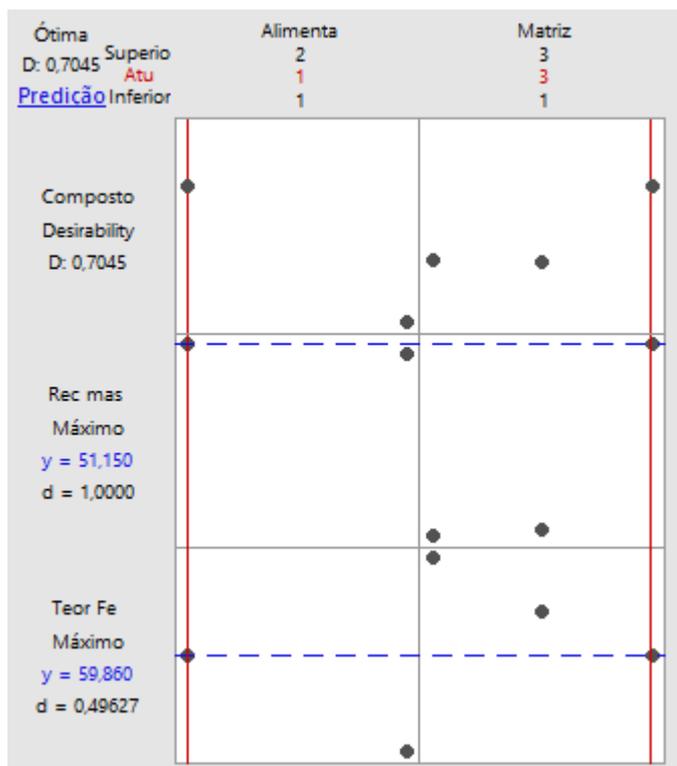


Figura 28: Otimizador de resposta

4.3.2 Ensaios de separação magnética da fração fina

Durante esta etapa foram realizados 3 ensaios em duplicata, que foram realizados de acordo com o melhor resultado de massa de alimentação para fração granulométrica média, 100g de alimentação e os três tipos de matriz, 5B, 6 e 14 mesh. A massa de 100g de alimentação, apesar da variação pouco significativa foi ligeiramente melhor que a de 200g, justificando a aplicação dessa menor quantidade de massa nos ensaios para a fração fina.

Ao final de cada teste obteve-se a massa de concentrado e rejeito. Através de picnometria, obteve-se a massa específica da alimentação e dos produtos para o

cálculo de teor de ferro na alimentação (43,89%), no concentrado e no rejeito, para posteriores cálculos de recuperações mássica e metalúrgica. Os resultados estão dispostos na Tabela 8.

Tabela 8: Resultados para a fração fina

Ensaio	Matriz	Teor Fe conc. (%)	Recuperação mássica (%)	Recuperação metalúrgica (%)
1	5B	62,66	16,17	23,05
2	6	60,55	13,83	19,17
3	14 mesh	61,15	44,92	62,60

A Figura 29, apresenta uma imagem do teste 1, em que se utilizou a matriz 5B. Na Figura 30 há uma imagem do teste 2, com a matriz 6. Na imagem (a) tem-se a massa alimentada de 100 gramas, em (c), a massa de concentrado e em (r) a massa de rejeito, representando a baixa recuperação mássica obtidas nestes ensaios.

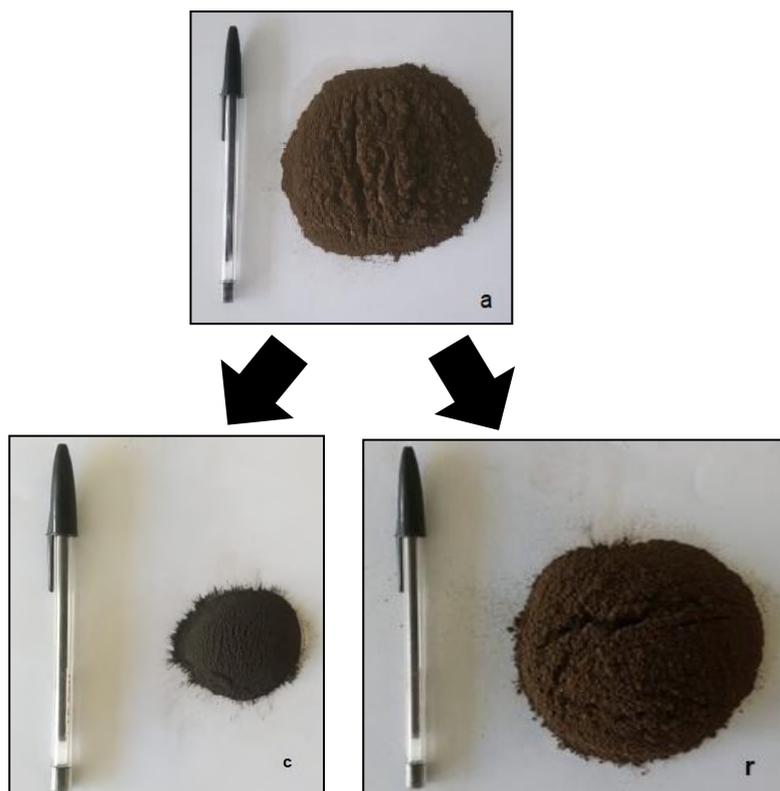


Figura 29: Teste 1 para a fração fina

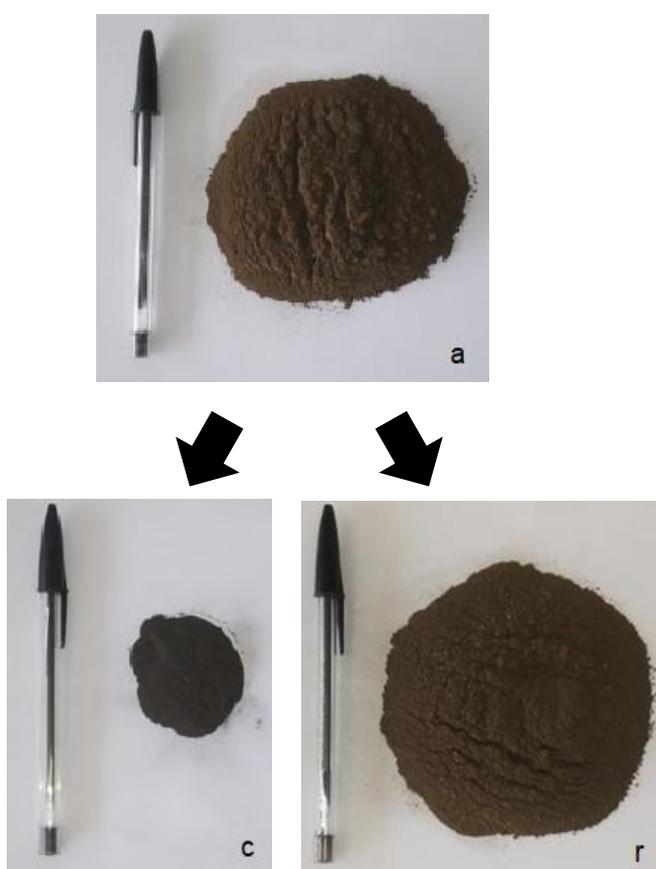


Figura 30: Teste 2 para a fração fina

De acordo com a análise dos resultados (Figura 31), a matriz 5B teve a maior média de teor de Fe no concentrado, apesar de não ser a mais indicada para esta faixa granulométrica segundo o fabricante, seguida pela matriz 14 mesh e pela matriz 6. Este resultado difere do que propôs Silva (2014), em que matrizes com menores aberturas desfavorecem o teor de Fe no concentrado. Para as matrizes 5B e 6, apesar de terem mesma abertura a diferença do teor de Fe no concentrado é pequena, mas existente o que pode ser explicado pela distinção entre o rearranjo da matriz.

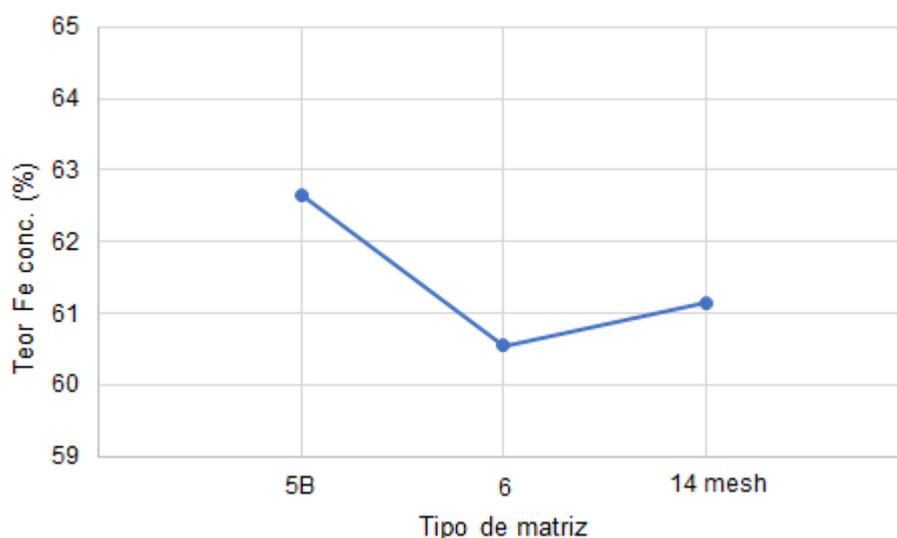


Figura 31: Teor de Fe no concentrado para os finos

Quanto aos resultados para a recuperação mássica (Figura 32), pode ser observado que a matriz mais fina (14 mesh) obteve melhor resultado de recuperação mássica, seguida pela matriz 5B e depois 6. Este resultado está de acordo com Gonzaga (2014), quanto mais fechada a matriz maior a recuperação mássica, já que as partículas não magnéticas podem ficar retidas entre a malha da matriz, indo constituir o concentrado. Para as matrizes 5B e 6, que tem mesma abertura, a diferença entre as recuperações mássicas não é expressiva.

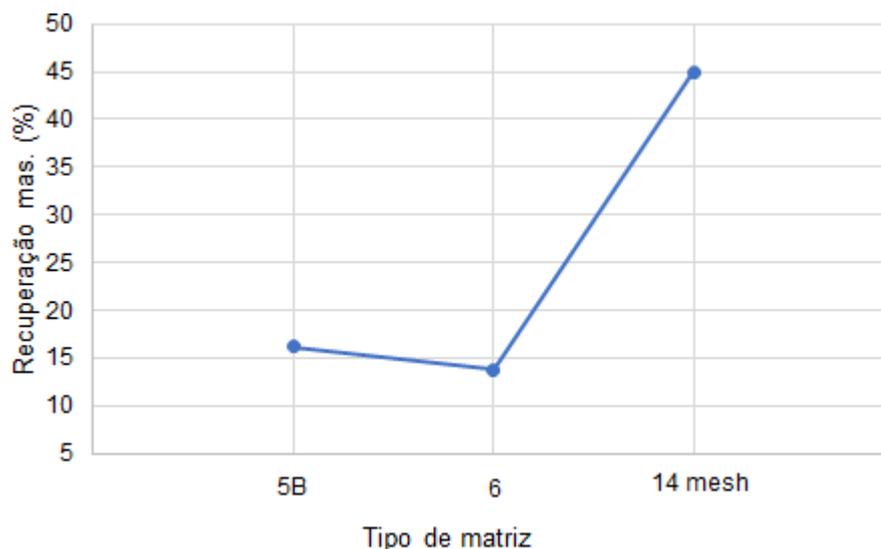


Figura 32: Recuperação mássica para os finos

Ainda de acordo com Platts (2018), para a especificação de mercado, com teor ferro igual a 66%, e analisando a Tabela 13, os resultados também não satisfazem o especificado quanto ao teor de Fe para o material fino. Algumas modificações também podem ser aplicadas a esta faixa granulométrica como uma etapa de limpeza do concentrado ou a mudança de parâmetros estudados.

Comparando a fração média e a fração fina, observa-se o teor de ferro no concentrado na fração média para a matriz EXP 5B é maior que 63%, para a EXP 6 de mais de 62% e de cerca de 58% para matriz 14 mesh. Já para a fração fina a EXP 5B possui média de teor de Fe no concentrado de quase 63%, a EXP 6 de 60,5% e a matriz 14 mesh de 61%. Estes dados revelam que a matriz 14 mesh é a mais indicada para granulometrias mais finas, por apresentar melhor resultado de teor de ferro no concentrado, assim como propõe o fabricante INBRAS. Já as matrizes EXP 5B e 6, tiveram pouca divergência nos resultados de teor de ferro para as diferentes granulometrias.

Para a média de recuperação mássica, a fração com granulometria média apresentou para a matriz EXP 5B cerca de 30% de recuperação, para EXP 6 aproximadamente 25% e para a matriz 14 mesh 50% de recuperação mássica. Já para a faixa granulométrica fina, os resultados de recuperação mássica são bastante inferiores. Para a matriz EXP 5B, obteve-se 15% de recuperação, 13% com a matriz EXP 6 e 45% de recuperação mássica para a matriz 14 mesh. Estes resultados comprovam a

dificuldade da separação magnética para partículas de granulometria muito finas, conforme estudou Silva (2014), isto é, para partículas de mesma susceptibilidade magnética, quanto menor o tamanho das partículas, menor é a recuperação da fração magnética.

5 CONCLUSÃO

O propósito deste estudo era avaliar os parâmetros massa da alimentação, granulometria da alimentação e tipo de matriz para concentrar minério de ferro itabirítico, utilizando o separador magnético, para atingir a maior recuperação mássica e o maior teor de ferro no concentrado.

Os ensaios no separador magnético foram realizados em duplicata e os de picnometria em triplicata, revelando valores próximos, expresso pelo coeficiente de variação menor que 5%, reafirmando a representatividade dos ensaios.

A análise de difração de raio-X mostrou a presença dos minerais hematita, quartzo, filossilicatos e magnetita. A massa específica da amostra inicial era de $3,9\text{g/cm}^3$, já as massas específicas da fração média e fina foram, respectivamente $3,91\text{g/cm}^3$ e $3,86\text{g/cm}^3$ apresentando teor médio de ferro de 45,36% para a fração média e 43,89 para a fração fina.

Dentro dos parâmetros testados, a concentração magnética é aplicável a este minério de ferro itabirítico, chegando para a fração média a um concentrado final com cerca de 60% de ferro, rejeito a 30% de ferro, recuperação mássica e metalúrgica de aproximadamente 51% e 68%, respectivamente. Os parâmetros para se atingir estes resultados são 100g de massa de sólidos na alimentação e a matriz 14 mesh.

Com os testes para a fração fina, o melhor resultado foi também com a matriz 14 mesh, com recuperação mássica de 45% e teor de ferro no concentrado de aproximadamente 61%. Comparando as duas frações granulométricas, a fração média obteve melhores resultados de teor de ferro no concentrado e recuperação mássica do que a fração fina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, A.C.; AMARANTE, S.C.; SOUZA, C.C.; SILVA, R.R.R. **Ore mineralogy and its relevance for selection of concentration methods**. Mineral Processing and Extractive Metallurgy. Volume 112. 2003.

BONTEMPO, L.F.M; MAGALHÃES, D. G.; SANTOS, L. H.; OLIVEIRA, M.S. **Recuperação de rejeito de minério de ferro através de concentração magnética visando obtenção de pellet feed**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2017.

BORGES, C. B. **Concentração de minério de ferro proveniente do depósito Jambreiro da região de Guanhães-mg via métodos gravíticos e magnéticos**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2015.

CARVALHO, P.S.L., SILVA, M.M., ROCIO, M.A.R., MOSZKOWICZ, J. **Minério de Ferro**. 2014. BNDES Setorial, 39, 197-234.

CHAVES, A.P.; CHAVES FILHO, R.C. **Separação densitária**. São Paulo: Oficina de Textos. 1ª edição, 2013.

CHEN, L., XIONG, D., HUANG. H. **Pulsating high-gradient magnetic separation of fine hematite from tailings**. Minerals & Metallurgical Processing. 2009.

DNPM. **Sumário Mineral**. Disponível em: <<http://www.dnmp.gov.br/dnmp/sumarios/sumario-mineral-2015>>. Acesso em: maio de 2018.

FERREIRA, D.H.O. **Principais Etapas do Tratamento de Minérios Itabiríticos do Quadrilátero Ferrífero**. 2011. 50p. Monografia (Pós-Graduação). Belo Horizonte: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Minerais

GE W., ENCINAS A., ARAUJO E., SONG S. **Magnetic matrices used in high gradient magnetic separation (HGMS): A review**. Results in Physics, 2017, vol.7, pp. 4278-4286.

GONZAGA, L.M. **Separação magnética a úmido de minérios de ferro itabiríticos**. 2014. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais; Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. **Fundamentos de Física**. Volume 3 Eletromagnetismo, Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2007

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

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

LI, Z.; WATSON, J.H.P. The effect of the matrix shape on vortex magnetic separation. Miner. Eng. 1995.

MAIA, E.S. **Pelotização e Redução de Concentrado Magnetítico**. 2011. 144 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos, PUC-Rio, Rio de Janeiro. 2011.

METSO. High gradient magnetic separators. 2015. Disponível em:<https://www.metso.com/globalassets/saleshub/documents---episerver/hgms-brochure-en_lr.pdf>. Acesso em: 02 de nov. de 2018.

NASCIMENTO, D.R. **Flotação Aniônica de Minério de Ferro**. 2010. 116 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Minas de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

Parecer Único Supram Central nº 059/2013. PA COPAM: 12492/2008/003/2010.

PERES, A.E.C.; SALUM, M.J.G.; VALADÃO, G.E.S.; DE ARAÚJO, A.C. Métodos de concentração. In: Valadão, G.E.S.; De Araújo, A.C. Introdução ao tratamento de minérios. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. Cap. 6, p. 105-138.

PLATTS. Methodology and specifications guide: iron ore. [Internet] 2018. Disponível em:<https://www.spglobal.com/platts/plattscontent/_assets/_files/en/our-methodology/methodology-specifications/ironore.pdf>. Acesso em: 02 de novembro de 2018.

REIS, J.L.M., RAFAEL, G.S., DIAS, A.C., PEREIRA, C.A. 2015. **Concentração magnética de materiais goethíticos do Quadrilátero Ferrífero**. XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2015.

ROBERTO, J.B. **Influência dos Diversos Tipos Litológicos nas Operações de Concentração da Instalação de Beneficiamento de Brucutu**, 2010. 119p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Belo Horizonte, 2010.

SAMPAIO, J. A. E LUZ, A. B. **Separação magnética e eletrostática**. In: Luz, A. B.; Sampaio, J. A. e Almeida, S. L. M. (Ed.). Tratamento de Minérios. 4a ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004, p. 303-335.

SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A.; LUZ, A.B. **Ensaio de separação magnética e eletrostática**. In: Sampaio, J.A.; França, S.C.A.; Braga, P.F.A. Tratamento de minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. Cap. 18, p. 319-348.

SEIFELNASSR, A.A.S.; MOSLIM, E.M.; ABOUZEID, A.M. **Concentration of a Sudanese lowgrade iron ore**. International Journal of Mineral Processing. 2013.

SILVA, F.G.S. **Estudo da Recuperação de Metais Presentes na Escória de Aço Inox Fina por Beneficiamento Magnético**. 2008. 30-55p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia da URGs, Porto Alegre, 2008.

SILVA J.P.M. **Aplicação de separação magnética de alta intensidade (WHIMS) no beneficiamento de itabiritos pobres**. 2014. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas; Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SILVA, M. B. LUZ, J. A. M., 2013. **Magnetic scavenging of ultrafine hematite from itabirites**, Esc. Minas, Ouro Preto, 66(4), pp. 499-505.

STEELONTHENET. **Steel Plant Information**. Disponível em: <www.steelonthenet.com/plant.html>. Acesso em: de maio de 2018.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY; **Mineral commodity summaries**. 2016. Disponível em: <

https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_&_steel/#contacts.
Acesso em maio de 2018.

VIEIRA, M.G. **Produção de um pellet feed a partir da concentração do rejeito da flotação mecânica da SAMARCO**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

APÊNDICE A.1- DENSIDADE E TEOR DE FERRO

Tabela 9: Picnometria da alimentação

Amostra	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	ds (g/cm ³)	ds média (g/cm ³)	s(g/cm ³)	CV (%)	Teor Fe (%)
	30,77	35,7	85,28	81,6	3,98				
T1	29,72	34,42	83,67	80,15	3,98	3,92	0,11	2,76	45,36
	29,73	29,86	84,13	80,56	3,79				

Tabela 10: Picnometria da fração média

Amostra	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	ds (g/cm ³)	ds média (g/cm ³)	s(g/cm ³)	CV (%)	Teor Fe (%)
	31,87	35,06	84,57	82,21	3,84				
T1	30,79	33,66	83,74	81,59	3,99	3,91	0,07	1,88	45,12
	29,73	32,45	82,18	80,16	3,89				

Tabela 11: Picnometria da fração fina

Amostra	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	ds (g/cm ³)	ds média (g/cm ³)	s(g/cm ³)	CV (%)	Teor Fe (%)
	32,46	35,02	84,91	83,02	3,82				
T1	29,87	32,39	82,39	80,54	3,76	3,86	0,12	2,99	43,89
	30,78	33,21	83,41	81,59	3,98				

Tabela 12: Picnometria concentrado do ensaio 1 fração média

Amostra	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	ds (g/cm ³)	ds média (g/cm ³)	s(g/cm ³)	CV (%)	Teor Fe (%)
	32,44	35,54	85,49	83,01	5,00				
T1	29,89	33,11	83,1	80,53	4,95	4,93	0,09	1,74	64,75
	30,77	33,96	84,13	81,6	4,83				

Tabela 13: Picnometria concentrado do ensaio 1 (duplicata) fração média

Amostra	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	ds (g/cm ³)	ds média (g/cm ³)	s(g/cm ³)	CV (%)	Teor Fe (%)
	32,45	35,46	85,41	83,02	4,85				
T6	30,77	33,84	83,99	81,59	4,58	4,74	0,14	3,02	61,73
	29,73	32,99	82,72	80,14	4,79				

Tabela 14: Picnometria concentrado do ensaio 2 fração média

Amostra	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	ds (g/cm ³)	ds média (g/cm ³)	s(g/cm ³)	CV (%)	Teor Fe (%)
	32,45	35,7	85,58	83,01	4,78				
T2	30,77	33,92	84,09	81,59	4,85	4,81	0,03	0,7	62,87
	29,77	33,19	82,85	80,14	4,82				

Tabela 15: Picnometria concentrado do ensaio 2 (duplicata) fração média

Amostra	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	ds (g/cm ³)	ds média (g/cm ³)	s(g/cm ³)	CV (%)	Teor Fe (%)
	32,45	35,39	85,32	83,02	4,59				
T10	30,78	33,24	83,51	81,59	4,56	4,63	0,10	2,22	59,87
	29,74	33,16	82,84	80,14	4,75				

Tabela 16: Picnometria concentrado do ensaio 3 fração média

Amostra	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	ds (g/cm ³)	ds média (g/cm ³)	s(g/cm ³)	CV (%)	Teor Fe (%)
	32,47	35,12	85,11	83,02	4,73				
T9	30,8	33,71	83,9	81,59	4,85	4,79	0,06	1,24	62,55
	29,76	32,53	82,33	80,14	4,78				

Tabela 17: Picnometria concentrado do ensaio 3 (duplicata) fração média

Amostra	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	ds (g/cm ³)	ds média (g/cm ³)	s(g/cm ³)	CV (%)	Teor Fe (%)
	32,46	34,94	84,96	83,02	4,59				
T12	30,78	33,39	83,65	81,59	4,75	4,69	0,08	1,83	60,90
	29,72	33,13	82,83	80,14	4,74				

Tabela 18: Picnometria concentrado do ensaio 5 fração média

Amostra	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	ds (g/cm ³)	ds média (g/cm ³)	s(g/cm ³)	CV (%)	Teor Fe (%)
	32,45	35,6	85,53	83,01	5,00				
T3	30,79	32,59	83,03	81,59	5,00	5,08	0,14	2,80	65,20
	29,77	33,18	82,9	80,14	5,25				

Tabela 19: Picnometria concentrado do ensaio 5 (duplicata) fração média

Amostra	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	ds (g/cm ³)	ds média (g/cm ³)	s(g/cm ³)	CV (%)	Teor Fe (%)
	32,47	35,77	85,63	83,02	4,78				
T7	30,79	34,79	84,73	81,59	4,65	4,70	0,07	1,47	61,06
	29,73	33,1	82,79	80,14	4,68				

Tabela 20: Picnometria concentrado do ensaio 6 fração média

Amostras	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	ds (g/cm ³)	ds média (g/cm ³)	s(g/cm ³)	CV (%)	Teor Fe (%)
	32,46	35,44	85,37	83,02	4,73				
T5	30,79	34,85	84,82	81,59	4,89	4,86	0,12	2,52	63,66
	29,75	33,13	82,84	80,14	4,97				

Tabela 21: Picnometria concentrado do ensaio 6 (duplicata) fração média

Amostra	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	ds (g/cm ³)	ds média (g/cm ³)	s(g/cm ³)	CV (%)	Teor Fe (%)
	32,48	36,01	85,79	83,02	4,64				
T11	30,79	34,47	84,5	81,59	4,78	4,80	0,17	3,47	62,71
	29,75	33,88	83,44	80,14	4,98				

Tabela 22: Picnometria concentrado do ensaio 1 fração fina

Amostra	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	ds (g/cm³)	ds média (g/cm³)	s(g/cm³)	CV (%)	Teor Fe (%)
	32,46	34,41	84,59	83,02	5,13				
T1	29,87	32,39	82,52	80,54	4,67	4,92	0,24	4,80	64,59
	30,78	32,57	83,02	81,59	4,97				

Tabela 23: Picnometria concentrado do ensaio 1 (duplicata) fração fina

Amostra	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	ds (g/cm³)	ds média (g/cm³)	s(g/cm³)	CV (%)	Teor Fe (%)
	32,46	35,01	85,03	83,02	4,72				
T2	29,87	32,21	82,38	80,54	4,68	4,68	0,04	0,77	60,73
	30,78	33,71	83,89	81,59	4,65				

Tabela 24: Picnometria concentrado do ensaio 2 fração fina

Amostra	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	ds (g/cm³)	ds média (g/cm³)	s(g/cm³)	CV (%)	Teor Fe (%)
	32,46	35,52	85,45	83,02	4,86				
T3	29,87	33,36	83,28	80,54	4,65	4,70	0,14	3,07	61,06
	30,78	33,71	83,88	81,59	4,58				

Tabela 25: Picnometria concentrado do ensaio 2 (duplicata) fração fina

Amostra	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	ds (g/cm ³)	ds média (g/cm ³)	s(g/cm ³)	CV (%)	Teor Fe (%)
	32,46	35,05	85,07	83,02	4,80				
T6	29,87	31,79	82,03	80,54	4,47	4,67	0,18	3,82	60,56
	30,78	33,2	83,5	81,59	4,75				

Tabela 26: Picnometria concentrado do ensaio 3 fração fina

Amostra	A1(g)	A2(g)	A3(g)	A4 (g)	ds (g/cm ³)	ds média (g/cm ³)	s(g/cm ³)	CV (%)	Teor Fe (%)
	32,46	35,74	85,61	83,02	4,75				
T4	29,87	33,37	83,28	80,54	4,61	4,69	0,08	1,64	60,90
	30,78	33,75	83,93	81,59	4,71				

Tabela 27: Picnometria concentrado do ensaio 3 (duplicata) fração fina

Amostra	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	ds (g/cm ³)	ds média (g/cm ³)	s(g/cm ³)	CV (%)	Teor Fe (%)
	32,46	35,49	85,43	83,02	4,89				
T5	29,87	32,86	82,86	80,54	4,46	4,72	0,22	4,75	61,40
	30,78	34,62	84,63	81,59	4,80				

APÊNDICE A.2- ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Tabela 28: Análise granulométrica sem deslamagem

Malha (#)	Malha (mm)	Massa retida (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante acumulado (%)
100	0,148	0	0,00	0,00	100,00
115	0,125	1,88	0,85	0,85	99,15
150	0,105	33,83	15,25	16,10	83,90
170	0,088	14,59	6,58	22,68	77,32
200	0,074	47,48	21,41	44,08	55,92
230	0,063	22,96	10,35	54,44	45,56
270	0,052	33,56	15,13	69,57	30,43
325	0,044	22,65	10,21	79,78	20,22
400	0,037	3,1	1,40	81,18	18,82
-400	-0,037	40	18,03	99,21	0,79
Total (g)		220,05	99,21	Perda (%)	0,79

Tabela 29: Análise granulométrica posterior a deslamagem

Malha (#)	Malha (mm)	Massa retida (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante acumulado (%)
100	0,148	0	0,00	0,00	100,00
115	0,125	0,49	0,24	0,24	99,76
150	0,105	37,13	18,32	18,56	81,44
170	0,088	26,94	13,29	31,85	68,15
200	0,074	26,62	13,13	44,98	55,02
230	0,063	33,33	16,44	61,42	38,58
270	0,052	19,83	9,78	71,20	28,80
325	0,044	37,17	18,33	89,53	10,47
400	0,037	1,51	0,74	90,28	9,72
-400	-0,037	16	7,89	98,17	1,83
Total (g)		199,02	98,17	Perda (%)	1,83