



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE MINAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA DE MINAS**

ARTUR CAIXETA BORGES

**CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO PROVENIENTE DO
DEPÓSITO JAMBREIRO DA REGIÃO DE GUANHÃES-MG VIA
MÉTODOS GRAVÍTICOS E MAGNÉTICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ARAXÁ
2015

ARTUR CAIXETA BORGES

**CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO PROVENIENTE DO
DEPÓSITO JAMBREIRO DA REGIÃO DE GUANHÃES-MG VIA
MÉTODOS GRAVÍTICOS E MAGNÉTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais /
Unidade – Araxá, como requisito parcial
para obtenção do título de Engenheiro de
Minas.

Orientador: Prof. Me. Leandro Henrique Santos

ARAXÁ
2015

ARTUR CAIXETA BORGES

**CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO PROVENIENTE DO
DEPÓSITO JAMBREIRO DA REGIÃO DE GUANHÃES-MG VIA
MÉTODOS GRAVÍTICOS E MAGNÉTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais /
Unidade – Araxá, como requisito parcial
para obtenção do título de Engenheiro de
Minas.

Data de aprovação: 11 / 08 / 2015

Banca Examinadora:



Me. Leandro Henrique dos Santos - Presidente da Banca Examinadora
Professor – CEFET-MG – Orientador



Dr^a. Michelly dos Santos Oliveira
Professora – CEFET-MG



Esp. Thales Prado Fontes
Professor – CEFET-MG

AGRADECIMENTOS

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e ao Departamento de Minas e Construção Civil, pela possibilidade de realização deste trabalho.

Ao professor Leandro Henrique Santos pela paciência e dedicação durante as orientações oferecidas.

Aos meus pais, Marcos e Júlia, e aos meus irmãos, Mário e Ricardo, pelo apoio e por sempre acreditarem em minha capacidade.

À Layane, minha companheira, pela paciência e carinho durante a realização deste estudo.

Finalmente, a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Diante do cenário atual, em que os teores encontrados nas jazidas de minério de ferro apresentam-se cada vez menores, o beneficiamento deste tipo de minério se apresenta como um desafio para indústria mineral. Logo, torna-se indispensável a pesquisa de novas trajetórias para o beneficiamento e adequação do minério marginal (de baixo teor de Fe e liberação em faixas granulométricas cada vez menores) às especificações do mercado. Dentre algumas possibilidades de beneficiamento pode-se destacar a concentração gravítica e a separação magnética. O estudo foi realizado segundo as seguintes etapas: seleção da amostra para realização dos testes, disponibilizada pela *Centaurus Metals*; homogeneização e análise granulométrica da amostra, visando conhecer a distribuição de tamanhos nesta; aplicação de testes de concentração, respeitando as operações unitárias e os equipamentos existentes no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG, Unidade Araxá-MG. Os testes realizados avaliam o efeito de algumas variáveis operacional, tendo como parâmetros de comparação a recuperação em massa, recuperação metalúrgica e teores de ferro no concentrado obtido. Os resultados conquistados no presente estudo permitem definir o melhor parâmetro operacional para obter expressiva eficiência na concentração do minério bruto. Assim, para ensaios de concentração gravítica, foi alcançado teor de 64,80% de ferro, recuperação metalúrgica de 76,77% e recuperação mássica de 40,67%. No entanto, para a operação de concentração via separação magnética, não foram obtidos resultados satisfatórios devido às características da amostra e limitações técnicas do Laboratório.

Palavras chaves: Minério de ferro. Concentração gravítica. Separação magnética.

ABSTRACT

In today's scenario, where the grades of the iron ore deposits have become increasingly lower the ore is not so rich in relation to the mineral of interest, as it shows a greater amount of gangue that need to be removed. Therefore, it is necessary searching for new methods of processing and adequacy of the marginal ore (low Fe grade and release in dwindling grain size fractions) in order to attend the market specifications. Among some possibilities for the iron ore concentration, we can highlight gravity concentration and magnetic separation. The study was performed according to the following steps: sample selection for the tests, provided by Centaurus Metals; homogenization and size classification of the sample, aiming to know its size distribution; execution of concentration tests, respecting the unitary concentration operations and the equipment existing in the mining laboratory at CEFET-MG Unidade Araxá. The performed tests evaluate some operational variables effects having as parameters of comparison mass recovery, metallurgical recovery and iron grades in the obtained concentrate. The results achieved in this study allow us to set the best operating parameter that provides significant efficiency in the concentration of iron ore. Thus, for the gravity concentration tests the most adequate test provided and iron grade of 64.80%, metallurgical recovery of 76.77%, and mass recovery of 40.67%. However, for magnetic separation the results were not consistent.

Keywords: Iron ore. Gravity concentration. Magnetic separation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 – Mapa com as ocorrências de minério de ferro nos estados Brasileiros	23
Figura 3.2 – Mapa com as localizações geográficas dos projetos de minério de ferro da região leste do estado de Minas Gerais.....	27
Figura 3.3 – Mesa Concentradora: (a) estratificação vertical entre os riffles, (b) arranjo das partículas ao longo dos riffles, (c) distribuição na mesa....	32
Figura 4.1 – Fluxograma do preparo das amostras de minério de ferro para os ensaios de concentração.	37
Figura 4.2 – Mesa Concentradora utilizada nos ensaios.....	40
Figura 4.3 – Separador Magnético Jones utilizado nos ensaios.	42
Figura 5.1 – Produtos ensaio 1: (a) Rejeito, (b) Concentrado.	47
Figura 5.2 – Produtos ensaio 2: (a) Rejeito, (b) Concentrado.	47
Figura 5.3 – Produtos ensaio 3: (a) Rejeito, (b) Concentrado.	48
Figura 5.4 – Aspecto visual durante o ensaio 5.....	49
Figura 5.5 – Aspecto visual durante o ensaio 6.....	50
Figura 5.6 – Aspecto visual durante o ensaio 7.....	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 – Evolução das reservas de minério de ferro (em milhões de toneladas) dos cinco países com as maiores reservas, entre 2000 e 2013.	18
Gráfico 3.2 – Evolução dos teores médios de ferro (em %) dos cinco países com as maiores reservas, entre 2000 e 2013.	19
Gráfico 3.3 – Indução magnética para diferentes espécies mineralógicas (a) ferromagnéticas, (b) paramagnéticas, (c) diamagnéticas.....	34
Gráfico 5.1 – Análise Granulométrica da alimentação dos testes de concentração..	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Principais características da hematita e da magnetita.....	16
Tabela 3.2 – Fórmula química e conteúdo teórico de ferro dos principais minerais portadores de ferro.....	17
Tabela 3.3 – Países com as maiores reserva de minério de ferro (em milhões de toneladas) e os respectivos teores médios de ferro (em %).	20
Tabela 3.4 – Capacidade de produção anual das principais empresas mineradoras em 2015 (em milhões de toneladas).	21
Tabela 3.5 – Mineralogia dos diferentes tipos composicionais de formações ferríferas.....	25
Tabela 3.6 – Significado do critério de concentração (CC)	30
Tabela 4.1 – Peneiras utilizadas durante a análise granulométrica.	38
Tabela 4.2 – Parâmetros variados nos ensaios de mesa concentradora.	40
Tabela 4.3 – Parâmetros variados nos ensaios de separação magnética.	43
Tabela 5.1 – Resultados da Análise Granulométrica.	44
Tabela 5.2 – Análise química do minério de ferro (ROM).	45
Tabela 5.3 – Resultados dos três primeiros ensaios em Mesa Concentradora.....	46
Tabela 5.4 – Resultados dos ensaios 4 e 5 em Mesa Concentradora.	48
Tabela 5.5 – Resultados dos ensaios 6 e 7 em Mesa Concentradora.	50
Tabela 5.6 – Resultados testes Separador Magnético.....	52
Tabela A.1 – Determinação da densidade média da amostra utilizada na alimentação.....	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo geral	14
2.2	Objetivos específicos.....	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1	Minério de Ferro	15
3.1.1	Geologia do minério de ferro.....	16
3.1.2	Panorama Mundial.....	18
3.1.3	Panorama Nacional	22
3.1.4	Quadrilátero Ferrífero	23
3.2	Projeto Jambreiro	25
3.3	Métodos de Concentração do Minério de Ferro	27
3.3.1	Concentração Gravítica	28
3.3.2	Separação Magnética	32
4	MATERIAIS E METODOLOGIA.....	36
4.1	Materiais	36
4.2	Origem e preparo da amostra.....	36
4.3	Análise Granulométrica	37
4.4	Caracterização Química da Amostra.....	38
4.5	Cálculos do Teor da Amostra	39
4.6	Testes em Mesa Concentradora	40
4.7	Testes no Separador Magnético.....	42
4.8	Teste Ideal.....	43
5	DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....	44
5.1	Análise Granulométrica	44
5.2	Caracterização do Minério de Ferro	45
5.3	Cálculo do Teor da Amostra	46
5.4	Testes em Mesa Concentradora	46
5.5	Teste no Separador Magnético	52
5.6	Teste Ideal.....	53

6 CONCLUSÃO	54
REFERÊNCIAS	56
APENDICE A – METODOLOGIA DE PICNÔMETRO	59

1 INTRODUÇÃO

O minério de ferro corresponde a um agregado de minerais a partir da qual pode ser obtido o metal ferro, matéria-prima essencial para a produção de aço. Na natureza, este metal pode ser encontrado na forma de óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos, sendo os óxidos a principal fonte para exploração industrial (MAEDA, 2014).

O Brasil apresenta grande destaque na produção mundial de minério de ferro, sendo considerado um dos maiores produtores mundiais. Dentre os estados brasileiros, Minas Gerais se destaca como o maior produtor deste recurso mineral, possuindo grandes reservas, principalmente na região do Quadrilátero Ferrífero (NASCIMENTO, 2010).

A estrutura física das plantas de beneficiamento mineral varia de acordo com as características do minério a ser tratado nesta. Para minérios de ferro de altos teores, as usinas se baseiam em operações de cominuição e classificação. Porém, para minérios mais pobres, apresentando liberação em granulometrias mais finas, são inseridas etapas de concentração, via rota composta por métodos gravíticos, magnéticos, além de flotação (NASCIMENTO, 2010).

Neste contexto se insere a concentração gravítica e a separação magnética. Nesta primeira técnica, a operação consiste na separação de partículas minerais de diferentes densidades, formas e tamanhos por ação da força da gravidade ou por forças centrífugas (LINS, 2004). Esta é uma técnica antiga, sendo que seus mecanismos são amplamente compreendidos nos dias atuais. Já para a separação magnética, a operação consiste na exploração das diferentes respostas dos minerais quando expostos a um campo magnético, garantindo às partículas trajetórias distintas no interior do equipamento (LUZ *et al.*, 2004).

O presente trabalho se dedicou ao estudo da viabilidade da concentração do minério de ferro de baixo teor, empregando-se as operações de concentração gravítica e separação magnética. Além disso, buscou-se avaliar e adequar os parâmetros operacionais para cada técnica. Assim, visa-se contribuir com

conhecimento técnico para a superação dos desafios de carência de teor nas reservas de minério de ferro, mantendo o atendimento às especificações do mercado, mesmo trabalhando com uma matéria primas de menor qualidade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a viabilidade da concentração de minério de ferro proveniente do Projeto Jambreiro, de responsabilidade da empresa *Centaurus Metals*, situado em Guanhães – MG via rota composta por separações gravítica e magnética, visando a obtenção de produtos com alto teor de ferro.

2.2 Objetivos específicos

- i. Analisar a influência das variáveis: inclinação da mesa, vazão de alimentação (porcentagem de sólidos) e vazão de água de diluição nos testes de separação gravítica, empregando mesa concentradora.
- ii. Analisar a influência das variáveis: massa da alimentação, intensidade de campo e porcentagem de sólidos nos testes de separação magnética, empregando separador tipo carrossel.
- iii. Julgar a viabilidade da rota de concentração empregando separações gravítica e magnética, considerando o efeito sinérgico das operações.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Minério de Ferro

O minério de ferro pode ser empregado na fabricação de diversos materiais, além da aplicação industrial. Entretanto, a maior parte do minério ferrífero produzido mundialmente se destina à indústria de aço. Esta última, sozinha, é responsável por mais de 97% do consumo deste minério (MAIA, 2011).

O ferro é o quarto elemento mais abundante da crosta terrestre, sendo raramente encontrado na natureza em sua forma elementar. Torna-se bastante comum encontrá-lo em compostos químicos, resultantes de processos inorgânicos. Diversos minerais apresentam o metal ferro como componente essencial em sua composição química. Dentre eles, podem ser destacados os óxidos, hidróxidos e oxihidróxicos, sendo que, os primeiros apresentam maiores concentrações (ROBERTO, 2010).

Dentre os principais minerais de ferro, podemos citar a hematita α (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4), goethita α (FeOOH), siderita (FeCO_3), pirita (FeS_2) e ilmenita (FeTiO_3). Outros elementos, tais como sílica, alumina, álcalis, e compostos de enxofre e fósforo são considerados impurezas (ALECRIM, 1982 *apud* NASCIMENTO, 2010). Os recursos de ferro considerados mais viáveis economicamente correspondem aos depósitos formados por minérios hematilíticos e magnetilíticos por apresentarem alto teor deste metal (MAIA, 2011). A Tabela 3.1 mostra uma comparação entre as características físico-químicas da hematita e magnetita.

Tabela 3.1 – Principais características da hematita e da magnetita.

CARACTERÍSTICAS	HEMATITA	MAGNETITA
Fórmula Química	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄ (FeO.Fe ₂ O ₃)
Susceptibilidade Magnética	Paramagnético	Ferromagnético
Estrutura Cristalina	HC	CFC, espinélioinvertido
Escala de Dureza (mohs)	5,5 - 6,5	5,5 - 6,5
Peso Específico (g/cm ³)	4,9 - 5,3	5,17 - 5,18
% Fe (máx)	69,94	72,36

Fonte: MAIA, 2011.

3.1.1 Geologia do minério de ferro

Os minérios de ferro são encontrados em formações geológicas denominadas formações ferríferas. De acordo com James (1954) e Gross (1965), citados por FERREIRA (2011), formações ferríferas são rochas sedimentares laminadas ou acomodadas, com origens químicas, compostas por minerais de ferro, com ou sem camadas intercaladas de quartzo ou carbonato.

O metal ferro está presente na composição de vários minerais. No entanto, apenas alguns deles são economicamente viáveis, seja pela quantidade de ferro na composição ou pela concentração e distribuição destes minerais nas rochas que constituem as formações de onde o mesmo pode ser extraído. Os minérios de ferro passíveis de exploração economicamente viável são classificados de acordo com a composição do mineral-minério a ser extraído. Desta forma, podem ser classificados em óxidos, carbonatos, silicatos e sulfetos. Dentre estes, os óxidos apresentam maior vantagem econômica para extração do metal (CARVALHO *et al.*, 2014). A Tabela 3.2 relaciona a fórmula química e conteúdo teórico de ferro para os principais minerais portadores deste metal.

Tabela 3.2 - Fórmula química e conteúdo teórico de ferro dos principais minerais portadores de ferro.

MINERAL	FÓRMULA QUÍMICA	CONTEÚDO TEÓRICO DE FERRO
Magnetita	Fe_3O_4	72,4
Hematita	Fe_2O_3	69,9
Goethita	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	62,9
Limonita	$2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	59,8
Ilmenita	FeTiO_3	36,8
Siderita	FeCO_3	48,2
Pirita	FeS_2	46,5
Pirrotita	$\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$	61,0

Fonte: USGS, 2013, *apud* CARVALHO *et al.*, 2014.

Geologicamente, os depósitos minério de ferro são divididos em cinco categorias. Dentre estas, a mais importante corresponde aos depósitos acamadados por formarem os grandes depósitos das Formações Ferríferas Bandadas (FFB) (CARVALHO *et al.*, 2014).

De acordo com Gross (1965), citado por ROBERTO (2010), as FFB's podem ser classificadas de acordo com ambiente de deposição e origem dos sedimentos. Ele propõe a subdivisão das formações ferríferas em três categorias: Algoma, Lago superior e Clinton Minette. A FFB tipo Algoma pode ser representada pelo subgrupo Rio das velhas, enquanto a do tipo Lago superior está relacionada ao subgrupo Minas, ambos no quadrilátero ferrífero. Já as formações do tipo Clinton Minette ocorrem no grupo Clinton, situado nos Estados Unidos.

Segundo James (1954), citado por FERREIRA (2011), formações ferríferas bandadas são rochas bandadas ou laminadas, com camadas que podem variar de milímetros a metros de espessura, intercaladas por camadas compostas por minerais de ferro, principalmente hematita e magnetita, de cherte¹ (quartzo) ou com camadas de silicatos e carbonatos de origem sedimentar diagenética ou seus equivalentes metamórficos.

¹ Rocha clara, constituída por sílica criptocristalina.

3.1.2 Panorama Mundial

Os cinco países com maior reserva de minério de ferro entre 2000 e 2013 são Austrália, Brasil, China, Índia e Rússia. Juntos, estes países respondem por 81% da produção mundial e 86% da produção de finos no ano de 2012. Os Gráficos 3.1 e 3.2 apresentam um comparativo das variações das reservas e dos teores de minério de ferro entre os anos de 2000 e 2013 para os cinco países com maiores reservas de minério de ferro do mundo. Verifica-se que neste período houve significativo aumento das reservas no Brasil e Austrália ao mesmo tempo em que houve redução de seus respectivos teores de minério de ferro (CARVALHO *et al.*, 2014).

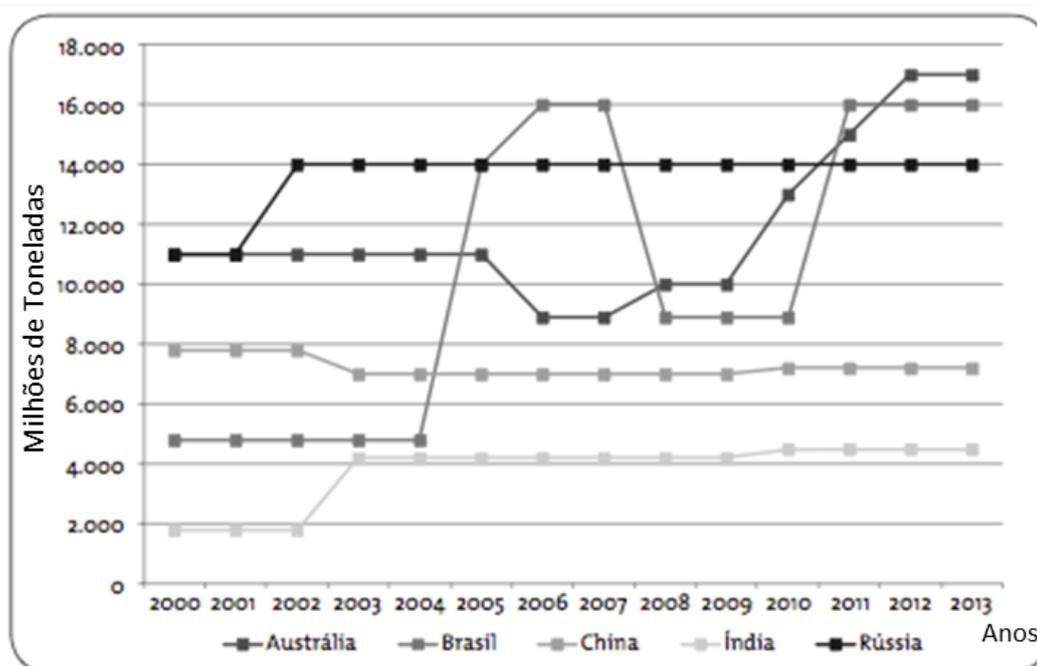


Gráfico 3.1 – Evolução das reservas de minério de ferro (em milhões de toneladas) dos cinco países com as maiores reservas, entre 2000 e 2013.

Fonte: USGS, 2013, *apud* CARVALHO *et al.*, 2014.

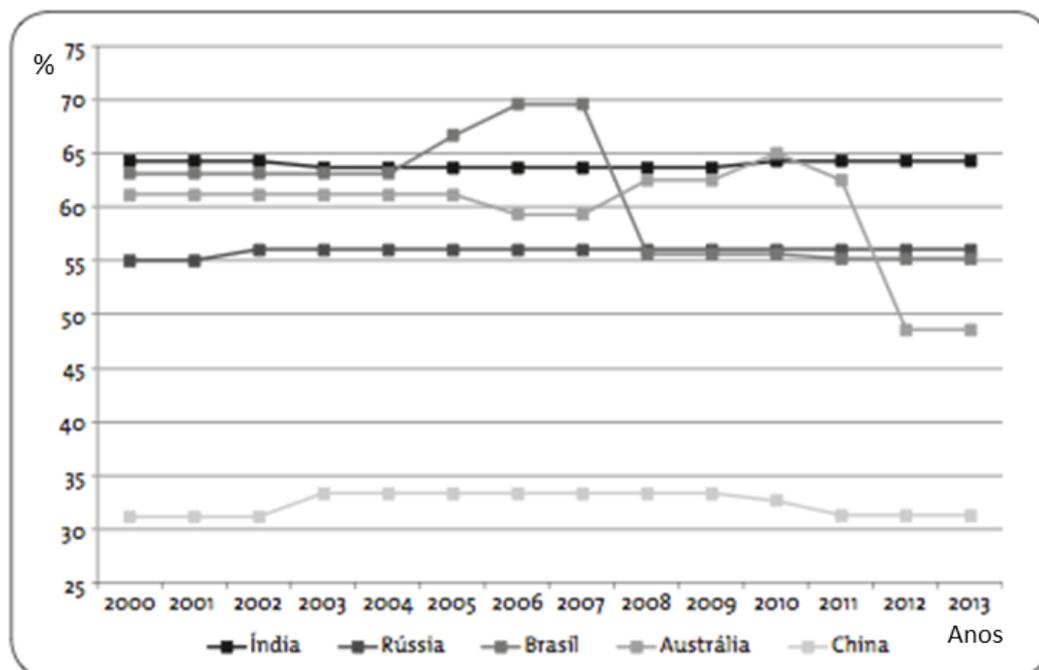


Gráfico 3.2 – Evolução dos teores médios de ferro (em %) dos cinco países com as maiores reservas, entre 2000 e 2013.

Fonte: USGS, 2013, *apud* CARVALHO *et al.*, 2014.

A Austrália conta com uma das maiores reservas de minério de ferro, principalmente na parte ocidental na região de Pilbara, onde pode ser observada grande abundância de minério granulado. A região vai continuar sendo responsável por quantidade significativa da produção ao longo dos próximos anos (CARVALHO *et al.*, 2014).

A Tabela 3.3 relaciona os países com as maiores reservas de ferro (em milhões de toneladas) e os respectivos teores médios de ferro (em%).

Tabela 3.3 - Países com as maiores reserva de minério de ferro (em milhões de toneladas) e os respectivos teores médios de ferro (em %).

PAÍS	RESERVAS (milhões de toneladas)	Fe (%)
Austrália	17.000	48,6
Brasil	16.000	55,2
Rússia	14.000	56,0
China	7.200	31,3
Índia	4.500	64,3
Venezuela	2.400	60,0
Canadá	2.300	36,5
Ucrânia	2.300	35,4
Suécia	2.200	62,9
Estados Unidos da América	2.100	30,4
Irã	1.400	56,0
Cazaquistão	900	36,0
Mauritânia	700	63,6
África do Sul	650	65,0
México	400	57,1
Total Mundo	80.050	48,2

Fonte: USGS, 2013, *apud* CARVALHO *et al.*, 2014.

Com relação à distribuição das ofertas por empresa, a Vale, Rio Tinto e BHP Billiton correspondem às três maiores empresas produtoras de minério de ferro. No ano de 2015, estas empresas juntas são responsáveis por cerca de 50% da produção mundial (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Capacidade de produção anual das principais empresas mineradoras em 2015 (em milhões de toneladas).

EMPRESA	PAÍS	CAPACIDADE (Mt/ano)
Vale Group	Brasil	523,0
Rio Tinto Group	Reino Unido	463,8
BHP Billiton Group	Austrália	395,4
Fortescue Metals Group	Austrália	95,6
Arcelor Mittal Group	Reino Unido	82,5
Na Ben Group	China	76,6
Anglo American Group	África do Sul	61,9
MetalloinvestGroup	Rússia	48,2
Metinvest Holding Group	Ucrânia	48,0
EvrastGroup	Rússia	47,7
LKAB Group	Suécia	47,3
Complejo Siderurgo	Venezuela	41,9
Cliffs Natural Resources	EUA	40,4
Shougang Beijing Group	China	40,1
NMDC Group	Índia	36,3
Imidro Group	Irã	35,8
CSN Group	Brasil	30,0
Atlas Iron	Austrália	28,0
US Steel Group	EUA	25,3
Poltavsky	Ucrânia	25,0
Capacidade Total		3041,3

Fonte: Adaptado de www.steelonthenet.com/plant.html- Acesso em: 26 jun. 2015.

Nas últimas décadas, o mercado do minério de ferro passou a ser visto como uma alternativa lucrativa, despertando o interesse de novos investidores. Isto se deu devido à influência do crescimento acelerado experimentado pela China neste período. No entanto, os novos adeptos ao mercado do minério de ferro enfrentaram bastantes dificuldades com relação à criação e desenvolvimento de novas minas,

além de dificuldades legais. Tal cenário dificultou a viabilização da operação das mesmas. Visto que a produção do aço se apresenta altamente dependente do mercado de minério de ferro, responsável por cerca de 90% do consumo do minério produzido, esta demanda tende a se manter nos próximos anos (CARVALHO *et al.*, 2014).

3.1.3 Panorama Nacional

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de minério de ferro, contando com uma das maiores reservas no mundo. Os minerais de ferro brasileiros apresentam elevado teor do metal e menores teores de componentes indesejados para os processos siderúrgicos (e.g. enxofre, alumínio, fósforo e carbonatos), o que torna esta indústria, no Brasil, uma das mais competitivas do mundo (CARVALHO *et al.*, 2014).

As principais regiões produtoras de minério de ferro no Brasil estão localizadas no Quadrilátero Ferrífero (MG), na província mineral de Carajás (PA) e na região de Corumbá (MS). Estas regiões são compostas por depósitos em rochas constituídas de formação ferríferas bandadas, denominados itabiritos (CARVALHO *et al.*, 2014). Os minérios itabiríticos, no entanto, apresentam qualidade inferior e precisam passar pela operação de flotação para atender as exigências das indústrias siderúrgicas. Já a hematita pode ser encontrada, principalmente, em Carajás. O minério extraído desta região possui maior teor de ferro (acima de 64%), não necessitando ser submetido à etapa de concentração (MAEDA, 2014).

Outros depósitos e ocorrências significantes de minério de ferro no país são encontrados no distrito da Bahia, depósitos de Serro/Morro do Pilar, depósito de Ponterinha, depósito do Amapá, depósito de Jurucutu, além de ocorrências em Tocantins, no Ceará, Bodoquena, Piauí e Maranhão (MAIA, 2011). A Figura 3.1 apresenta os estados brasileiros com maiores ocorrência de minério de ferro.

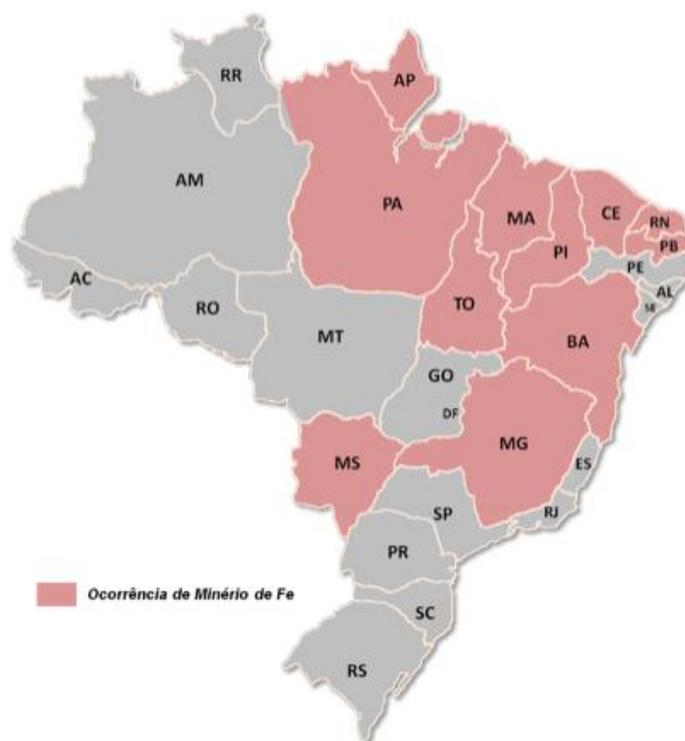


Figura 3.1 - Mapa com as ocorrências de minério de ferro nos estados Brasileiros.
Fonte: MAIA, 2011.

3.1.4 Quadrilátero Ferrífero

O Quadrilátero Ferrífero (QF) é uma região localizada na parte central do estado de Minas Gerais, com uma área de aproximadamente 8.000 km² na porção sudoeste do Cráton São Francisco (ALMEIDA, 1976, *apud* CHEMALE JUNIOR, 2013). Esta região apresenta arranjo grosseiramente quadrangular de sinclinais, onde afloram sedimentos plataformais do subgrupo Minas. Este subgrupo é formado pelos grupos Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará. As formações mais espessas do subgrupo Minas pertencem ao grupo Itabira, composto basicamente por itabiritos, dolomitos, além de metapelitos (DORR, 1969 *apud* ROSIÈRE, 2000).

Quanto à composição geológica, o Quadrilátero Ferrífero é constituído basicamente por três unidades litoestratigráficas. Estas correspondem aos gnaisses e migmatitos, *greenstonebelts* e rochas metassedimentares da idade proterozóica (ALKIMIM *et al.*, 1988 *apud* VARAJAO, 1991).

Na região do Quadrilátero Ferrífero podem ser encontrados dois tipos principais de minério de ferro, sendo estes o minério itabirítico e o minério hematítico (de alto teor). O minério itabirítico é formado por bandas intercaladas de óxido de ferro e sílica, com teores de ferro que variam de 20% a 55% de metal total. Este tipo de minério apresenta ampla aplicação nas indústrias siderúrgicas e de carvão. Em contrapartida, os minérios hematíticos apresentam composição mais homogênea, sendo compostos predominantemente por hematita, apresentando elevados teores de ferro (superiores a 64%). As reservas de hematita, em sua grande parte, já foram bastante exploradas, restando o itabirito como principal fonte de extração de minério de ferro (CARVALHO *et al.*, 2014).

Os depósitos encontrados nesta região são do tipo Lago superior e apresentam rochas quartzosas (itabiritos), compostas por óxido de ferro e alguns carbonatos e silicatos na composição (ALECRIM, 1982 *apud* NASCIMENTO, 2010). Os itabiritos são formações ferríferas bandadas metamórficas que, por sua vez, diferem da definição proposta, baseada nas FFB's de depósitos sedimentares (ROSIMÈRE, 2000).

Estudos realizados no ano de 2003 mostraram que o minério de ferro da região do Quadrilátero Ferrífero também apresentava uma ocorrência considerável de goethita com variações da morfologia, textura e composição mineralógica. (BRANDÃO e SANTOS, 2003 *apud* NASCIMENTO, 2010).

A mineralogia dos diferentes tipos composicionais de formações ferríferas pode ser observada na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Mineralogia dos diferentes tipos composicionais de formações ferríferas

TIPOS DE FORMAÇÃO FERRÍFERA	COMPONENTES MINERALÓGICOS PRINCIPAIS	COMPONENTES ACESSÓRIOS
Itabirito comum	Hematita, martita, kenomagnetita, quartzo.	Clorita, sericita, dolomita, ferroana, caolinita, cianita, Óxidos de Mn, sulfetos, apatita, pirofilita.
Itabirito dolomítico	Martita, hematita, kenomagnetita, dolomita ferroana.	Calcita, grunerita-cummingtonita, clorita, stilpnomelana, biotita, tremolita, actinolita, quartzo (chert), sulfetos, pirofilita.
Itabirito anfibolítico	Martita, hematita, kenomagnetita, maghemita, grunerita-cummingtonita, tremolita, actinolita, quartzo.	Carbonato, talco, dolomita ferroana, egirina, biotita, Mg-riebeckita, kupferita, sulfetos.
Hematita - filito	Hematita, sericita.	Quartzo, clorita.
Filitopiritoso	Pirita, matéria carbonosa	

Fonte: PIRES, 1995 *apud* ROSIÈRE e JÚNIOR, 2000.

3.2 Projeto Jambreiro

Guanhães é um município mineiro, situado na região leste do estado, conhecido como Vale do Rio Doce. Sua população corresponde a aproximadamente 31.266 habitantes, segundo Censo 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O município possui projeto para construção de um pólo industrial para exploração de minério de ferro, já que foram descobertas e licenciadas nove minas na região, até o momento. Dentre estas, inclui-se São João Evangelista, Guanhães e Viginópolis. Guanhães se apresenta como a cidade pólo da micro-região. Devido ao minério encontrado nesta região, muitas empresas têm se instalados no local. Dentre estas empresas interessadas na região, podemos citar a empresa australiana *Centaurus Metals*. A primeira mina a ser explorada corresponde à mina de

Jambreiro, recebendo investimento de 300 milhões de reais da empresa (SEIXAS, 2013).

O depósito de Jambreiro localiza-se a, aproximadamente, 20 km da cidade de Guanhões. Este depósito é composto por formações ferríferas bandadas relativamente homogêneas, com teores de ferro que variam de 25 a 35%, constituídos por grãos médios e grossos, composto por bandas milimétricas de hematita alternadas com bandas de espessura mais finas de quartzo. A empresa *Centaurus Metals* se encontra em processo de implantação do Projeto Jambreiro. Este projeto apresenta capacidade nominal de 2 milhões de toneladas por ano, sendo que os recursos medidos, indicados e inferidos somam 116,5 Mt, com teor médio de 26,8% de ferro (IBRAM, 2014).

A *Centaurus Metals* também realizou investimentos no Projeto Candonga, situado a cerca de 33km do Projeto Jambreiro. Visando aumentar seus recursos, em 2013 a empresa australiana anunciou o aumento dos recursos para o minério de ferro em Candonga para 11,9 milhões de toneladas, com teor médio de 43% de ferro. Deste total, 9,1 milhões de toneladas correspondem à mineração de itabirito friável com 43,8% de ferro, além de 880 toneladas compostas por mineralização de itabirito com 58,6% de ferro. Segundo o diretor administrativo da empresa, os investimentos aumentaram os recursos de componentes friáveis da *Centaurus Metals* em mais de 89 milhões de toneladas. Os aumentos dos recursos do Candonga fortalecem o potencial de crescimento do Projeto Jambreiro, onde foram identificadas mineralização de itabirito friável (IBRAM, 2013).

A Figura 3.2 apresenta a localização geográfica da região de Guanhões com as respectivas áreas de abrangência dos projetos de minério de ferro da região, ressaltando-se os projetos de minério de ferro de Jambreiro e o Candonga.

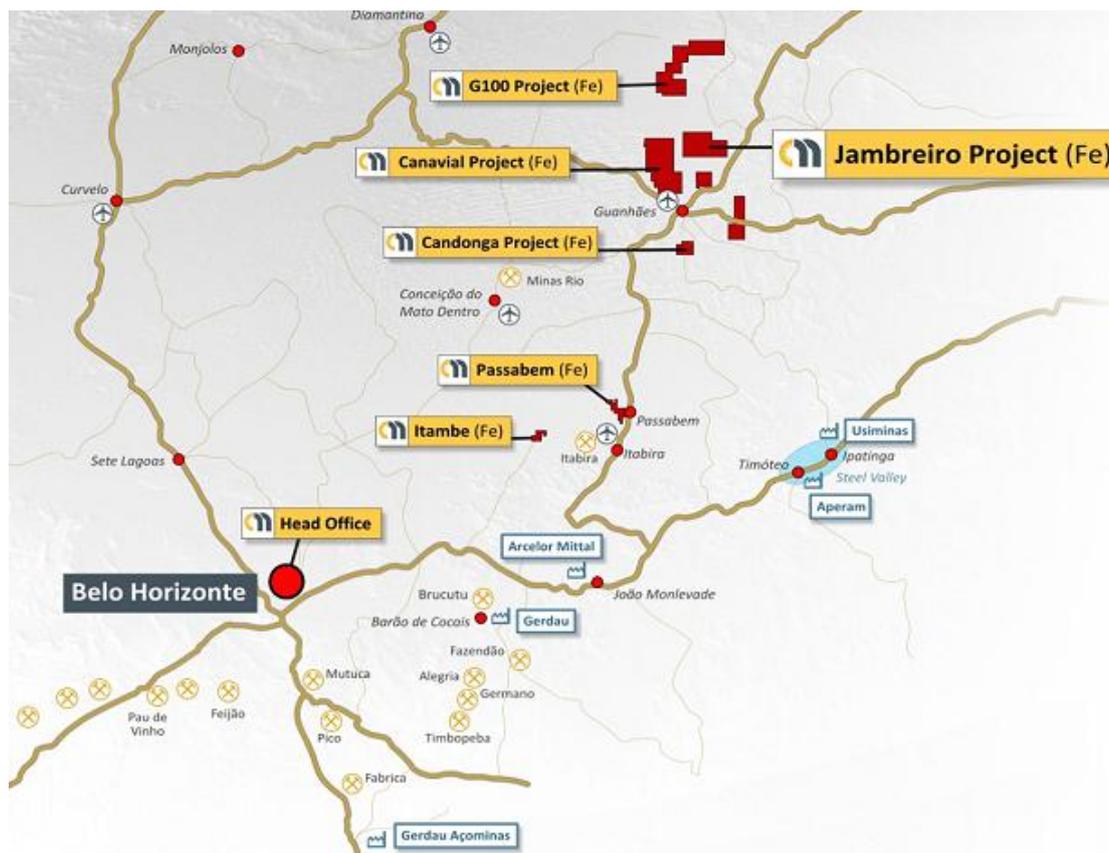


Figura 3.2 – Mapa com as localizações geográficas dos projetos de minério de ferro da região leste do estado de Minas Gerais.

Fonte: <http://www.centaurus.com.au/> - Acesso em: 26 jun. 2015.

3.3 Métodos de Concentração do Minério de Ferro

O beneficiamento ou processamento das rochas portadoras do minério de ferro devem respeitar as propriedades físicas e químicas dos minérios envolvidos. O processo se apresenta flexível, podendo ter diversas configurações (FERREIRA, 2011). Com o objetivo de alcançar os teores de minérios pré-estabelecidos e atender às exigências do mercado quanto a especificações e qualidade dos produtos, as empresas produtoras utilizam cada vez mais métodos diversificados no processamento deste minério (ROBERTO, 2010).

Para se concentrar o minério de ferro, primeiramente, faz-se necessário considerar a faixa granulométrica do material. Em função disto, são utilizados métodos específicos para o processamento de granulados, *sinter feed* e *pellet feed*. Para o material granulado, o beneficiamento visa à retirada impurezas causadas pela

diluição da lavra que incorpora material estéril ao *run of mine* (ROM). Quando se deseja proceder à concentração de minérios finos e superfinos, busca-se essencialmente a remoção de minerais de ganga presentes no próprio minério (ROBERTO, 2010).

Na concentração de minério de ferro podem ser utilizados vários métodos, além da combinação entre eles. As características físicas, químicas e mineralógicas do minério influenciam a etapa de definição do método a ser empregado na concentração deste. São empregados métodos de cominuição, classificação e deslamagem para a concentração de minérios de ferro que apresentem alto teor. Pode ser feito o uso de operações de concentração (e.g. flotação) quando o minério apresentar baixo teor, visando aumentar a proporção de ferro neste minério, e ao mesmo tempo reduzir os teores de SiO_2 , Al_2O_3 (NASCIMENTO, 2010).

Foram realizados estudos para escolha de um método de concentração mais apropriado ao processamento dos minérios de ferro no Brasil, especialmente os minérios de granulometria fina. Analisando o cenário operacional no qual o quartzo pode ser liberado como mineral de ganga, concluiu-se que o método mais indicado seria a flotação. Quando ocorre a presença de magnetita no formato de cristais intercrescidos em grãos de hematita, a recomendação ideal corresponde à concentração via uma etapa composta somente por operação de separação magnética ou com o uso de uma combinação entre separação magnética e flotação. Os estudos mostram que a presença de gipsita e/ou caulinita intervém em todos os processos de concentração (gravítico, magnético e flotação) (ARAÚJO *et al.*, 2003 *apud* NASCIMENTO, 2010).

3.3.1 Concentração Gravítica

A concentração gravítica se apresenta como uma das mais antigas formas de processamento mineral. A técnica corresponde a uma operação que faz uso da força da gravidade ou força centrífuga para separar partículas com diferentes propriedades, tais como densidade, tamanho de grão e forma (LUZ *et al.*, 2004).

Os principais mecanismos envolvidos no processo de concentração gravítica são (LUZ *et al.*, 2004):

- Aceleração diferencial: As partículas podem sofrer seguidas acelerações (e desacelerações) por sofrerem interferência das paredes do concentrador ou de outras partículas do concentrado gravítico. Assim, a partícula pode mover-se apenas por distância e tempo curtos até que pare, ou seja, desviada por uma superfície ou por outra partícula.
- Sedimentação retardada: Durante a queda livre em um fluido, uma partícula é acelerada, até certo tempo, pela ação da gravidade, aumentando sua velocidade até alcançar um valor máximo, permanecendo constante a partir de então. Em granulometria grosseira, a separação de um determinado par de minerais, é realizada em intervalos de tempo mais longos. Já em granulometria fina, o intervalo é menor, para uma separação mais eficiente.
- Consolidação intersticial: As partículas grossas de um ou mais minerais formam interstícios entre elas que proporcionam liberdade de movimentação das partículas finas nos vazios formados.
- Velocidade diferencial em escoamento laminar: Quando uma película de água flui sobre uma superfície lisa e inclinada, na condição de fluxo laminar, a distribuição de velocidade é parabólica, alcança seu valor máximo na interface do fluido com o ar e é nula na superfície.
- Ação das forças de cisalhamento: Durante a ação de forças cisalhantes sobre partículas, desenvolvem-se pressões podendo resultar na segregação das partículas. Assim, provoca-se uma estratificação vertical.

O critério de concentração (CC) pode ser empregado com o objetivo de se avaliar a possibilidade de se proceder à separação entre determinados minerais por meio de operações de separação gravítica, não considerando o fator de forma das partículas dos minerais (TAGART, 1945 *apud* LUZ *et al.*, 2004). A equação abaixo define a expressão para se obter o valor do critério de concentração para uma dada operação de concentração gravítica:

$$CC = FRF \cdot \frac{(\rho p - 1)}{(\rho l - 1)}$$

Onde: ρ_p - corresponde à densidade dos minerais pesados, presentes na alimentação (dada em g/cm^3), enquanto ρ_l se relaciona à densidade dos minerais leves (dada em g/cm^3). Esta expressão pode ser empregada considerando a densidade da água igual a $1,0 \text{ g/cm}^3$.

Incluindo o efeito da forma das partículas a serem separadas, acrescenta-se o fator de razão forma (FRF) multiplicado ao critério de concentração. Este fator que é obtido através do quociente entre os fatores de sedimentação dos minerais pesados e leves (TAGART, 1945 *apud* LUZ *et al.*, 2004).

A Tabela 3.6 apresenta a relação entre a viabilidade de se proceder a uma operação via separação gravítica em função do critério de concentração, obtido pela equação anterior (TAGART, 1945 *apud* LUZ *et al.*, 2004).

Tabela 3.6 - Significado do critério de concentração (CC)

CC	SIGNIFICADO
> 2,5	Separação eficiente até 74 μm
2,5 - 1,75	Separação eficiente até 147 μm
1,75 - 1,50	Separação possível até 1400 μm , porém difícil
1,70 - 1,20	Separação possível até 6000 μm , porém difícil

Fonte: TAGART, 1945 *apud* LUZ *et al.*, 2004.

De acordo com os dados da Tabela 3.6, percebe-se a dificuldade de realizar uma separação eficiente quando é utilizado frações abaixo de 74 μm . Este critério é baseado apenas em equipamentos que operam sobre ação da força da gravidade, assim, com a introdução da força centrífuga, ocorre a ampliação nas chances de uma separação mais condizente com matérias finos e superfinos (LUZ *et al.*, 2004).

A Mesa Concentradora (ou Mesa Vibratória/Oscilatória) corresponde a um dos equipamentos amplamente utilizados durante a operação de concentração via separação gravítica. Este equipamento é geralmente empregado em laboratórios para testes preliminares de concentração (FERREIRA, 2011).

Ela é constituída por um deque de madeira revestido com material de alto coeficiente de fricção, inclinado, parcialmente coberto por ressaltos e submetido a um movimento assimétrico na direção dos ressaltos. A operação e os mecanismos de separação atuante na mesa concentradora podem ser mais bem entendidos se dividirmos em duas regiões: a parte com *riffles* e a região lisa (LUZ *et al.*, 2004).

Na região com *riffles*, a alimentação é realizada transversalmente a estes. Assim, as partículas minerais sofrem o efeito do movimento assimétrico, que resulta no movimento das partículas para frente. A estratificação das partículas entre os *riffles* é gerada pelo movimento assimétrico e pela turbulência da polpa. Os minerais de maior densidade e menor granulometria ficam mais próximos à superfície, em relação aos demais. Esta segregação está relacionada ao mecanismo de sedimentação retardada e consolidação intersticial, representados nas Figuras 3.3(a) e 3.3(b), respectivamente (LUZ *et al.*, 2004).

A alimentação e o fluxo de água de lavagem transversal arrastam as camadas superiores sobre os *riffles*, que ao longo de seu comprimento, diminuem a altura. Assim, gradativamente, as partículas finas e pesadas entram em contato com o filme de água de lavagem. Por fim, a concentração final, tem lugar na parte lisa da mesa, onde ocorre o espalhamento dos minerais, conforme apresentado na Figura 3.3(c). Este fenômeno se apresenta como resultante do movimento assimétrico na direção dos *riffles* e da velocidade diferencial em escoamento laminar na parte lisa (LUZ *et al.*, 2004).

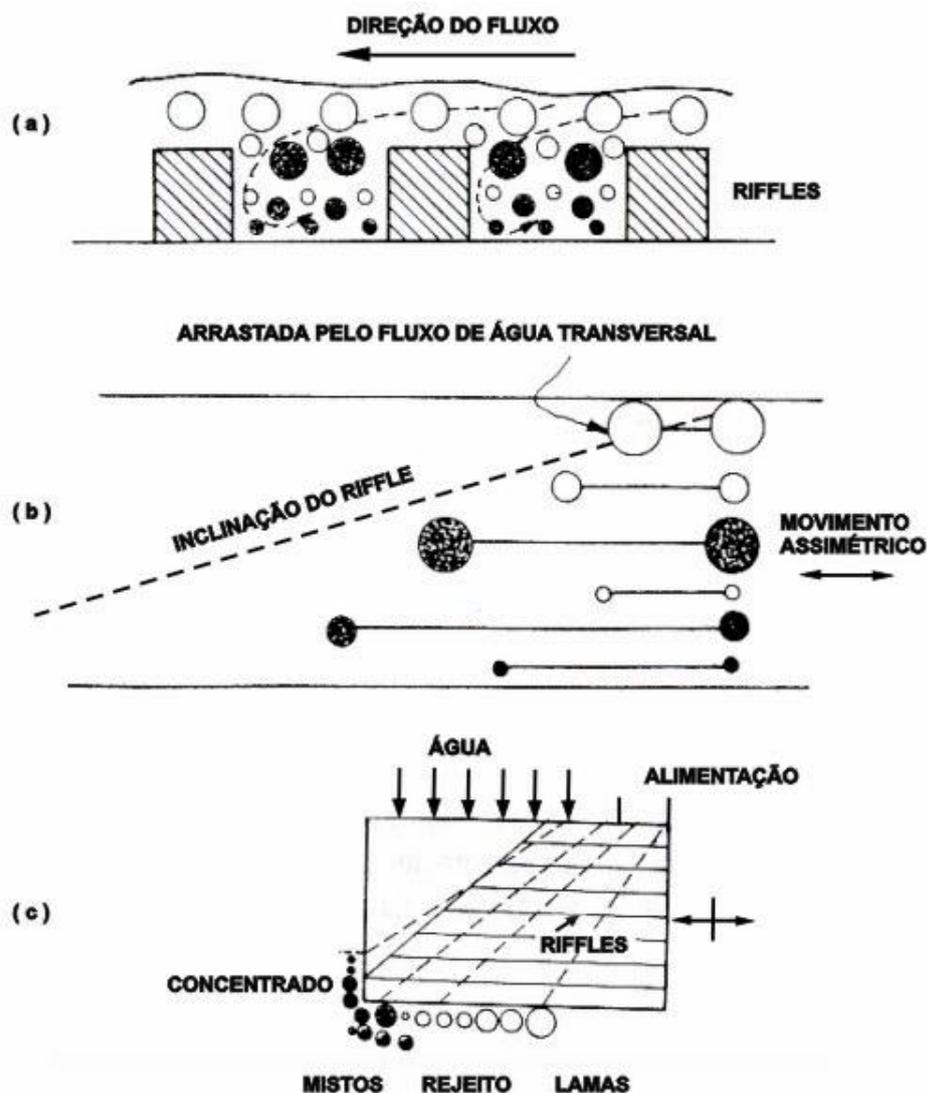


Figura 3.3 – Mesa Concentradora: (a) estratificação vertical entre os riffles, (b) arranjo das partículas ao longo dos riffles, (c) distribuição na mesa.
Fonte: LUZ *et al.*, 2004.

3.3.2 Separação Magnética

A separação magnética é um método bastante utilizado na concentração de minerais. A técnica pode ser empregada em função das diferentes respostas dos minerais quando expostos a um campo magnético. Susceptibilidade magnética pode ser definida como a característica que um material apresenta em resposta à submissão deste a um campo magnético. Assim, os minerais podem ser classificados em duas categorias: os que são atraídos e os que são repelidos pelo campo magnético. Os atraídos fortemente são classificados como minerais ferromagnéticos, os atraídos fracamente ou não atraídos são classificados como

paramagnéticos, e os repelidos pelo campo magnético são classificados diamagnéticos (LUZ *et al.*, 2004).

A separação magnética pode ser realizada tanto a seco como a úmido, sendo que para minerais de uma granulometria mais grosseira recomenda-se a utilização, em geral, do método a seco. Já para minerais de granulometria mais fina, a recomendação indica o emprego do método a úmido (LUZ *et al.*, 2004).

Nos equipamentos utilizados durante a operação de concentração via separação magnética, os minerais diamagnéticos são repelidos pelo campo magnético, enquanto os minerais paramagnéticos ou ferromagnéticos são fortemente atraídos pelo campo magnético dependendo da intensidade do mesmo. Os equipamentos podem ser selecionados conforme a necessidade do trabalho. Os campos magnéticos podem ser de baixa, média e alta intensidade. Neste caso, a susceptibilidade magnética do mineral corresponde à propriedade diferenciadora do sistema (FERREIRA, 2011).

O Gráfico 3.3 apresenta, para diferentes espécies mineralógicas, a indução magnética em função da intensidade de campo aplicado. Cabe ressaltar aqui que os minerais da curva a (ferromagnéticos) apresentam resposta rápida da indução magnética em relação ao campo aplicado. Já na curva b (paramagnéticos), isso também ocorre, no entanto, de forma menos acentuada. No último caso, curva c (diamagnéticos), a indução magnética apresenta valor negativo, evidenciando a repulsão sofrida pelas partículas quando imersas no campo magnético (LUZ *et al.*, 2004).

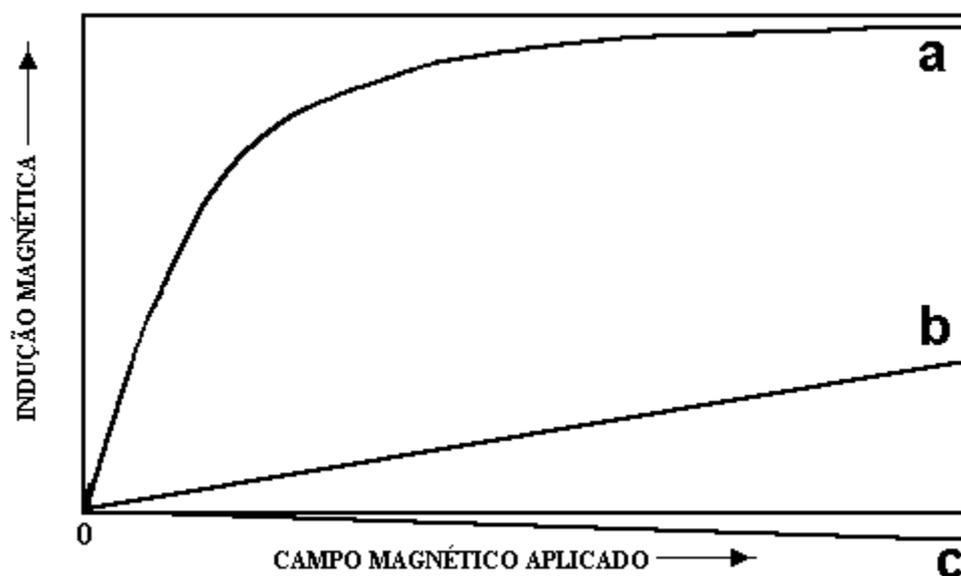


Gráfico 3.3 – Indução magnética para diferentes espécies mineralógicas (a) ferromagnéticas, (b) paramagnéticas, (c) diamagnéticas.

Fonte: LUZ *et al.*, 2004.

O equipamento denominado Separador Jones corresponde a um separador magnético a úmido de alta intensidade amplamente empregado na prática laboratorial. Apresentando um sistema de matrizes e uma alta eficiência de separação para faixas granulométricas mais finas, o Separador Jones fornece resultados superiores quando comparado aos demais equipamentos. Este equipamento apresenta aplicação recomendada para a separação de minerais paramagnéticos, devido a sua operação ser executada empregando campos magnéticos de alta intensidade (LAWER, 1974; LAWER, 1985; JAIN, 1987 *apud* LUZ *et al.*, 2004).

A aplicação do Separador Jones não é totalmente indicada para minerais ferromagnéticos, uma vez que a alta intensidade do equipamento e a alta susceptibilidade magnética destes minerais promoveria intensa adesão destes minerais às matrizes, dificultando a remoção destas partículas magnéticas da matriz do separador, mesmo utilizando pressões de 40 a 50 psi para a alimentação da água de lavagem (LUZ *et al.*, 2004).

A operação é constituída por dois níveis de placas trabalhando simultaneamente. As matrizes magnéticas são compostas por placas alocadas paralelamente entre si,

apresentando estrias. A alimentação da polpa é executada nas placas sob a ação do campo magnético que atrai as partículas paramagnéticas para sua superfície, ao passo que as partículas não magnéticas são recolhidas na parte inferior do equipamento. Posteriormente, a fração magnética é coletada com o auxílio de um jato de água com baixa pressão e com o campo magnético desligado. (ARAUJO, 2007; PAPINI, 2010 *apud* FERREIRA, 2011).

4 MATERIAIS E METODOLOGIA

4.1 Materiais

Durante os ensaios realizados no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG Unidade Araxá, os materiais utilizados foram:

- Amostra de minério de ferro;
- Balança semi-analítica;
- Bandejas;
- Béquer;
- Cronômetro;
- Provetas;
- Picetas;
- Picnômetro;
- Quarteador Jones;
- Peneiras;
- Peneirador;
- Mesa vibratória;
- Separador Magnético Carrocel

4.2 Origem e preparo da amostra

Durante a execução deste trabalho, foram empregadas amostras de minério de ferro proveniente do Projeto Jambreiro, localizado no município de Guanhães – MG, fornecidas pela empresa *Centaurus Metals*. Toda etapa de preparação desta amostra foi realizada no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG Unidade Araxá. Esta etapa inclui várias operações até o resultado de sub-amostras representativas em relação ao lote inicial.

A amostra foi utilizada nos testes de mesa concentradora e separador magnético carrocel, que tiveram por objetivo aperfeiçoar os parâmetros operacionais de concentração da hematita em relação ao quartzo. A Figura 4.1 apresenta o fluxograma de preparo das amostras de minério de ferro para os ensaios de concentração.

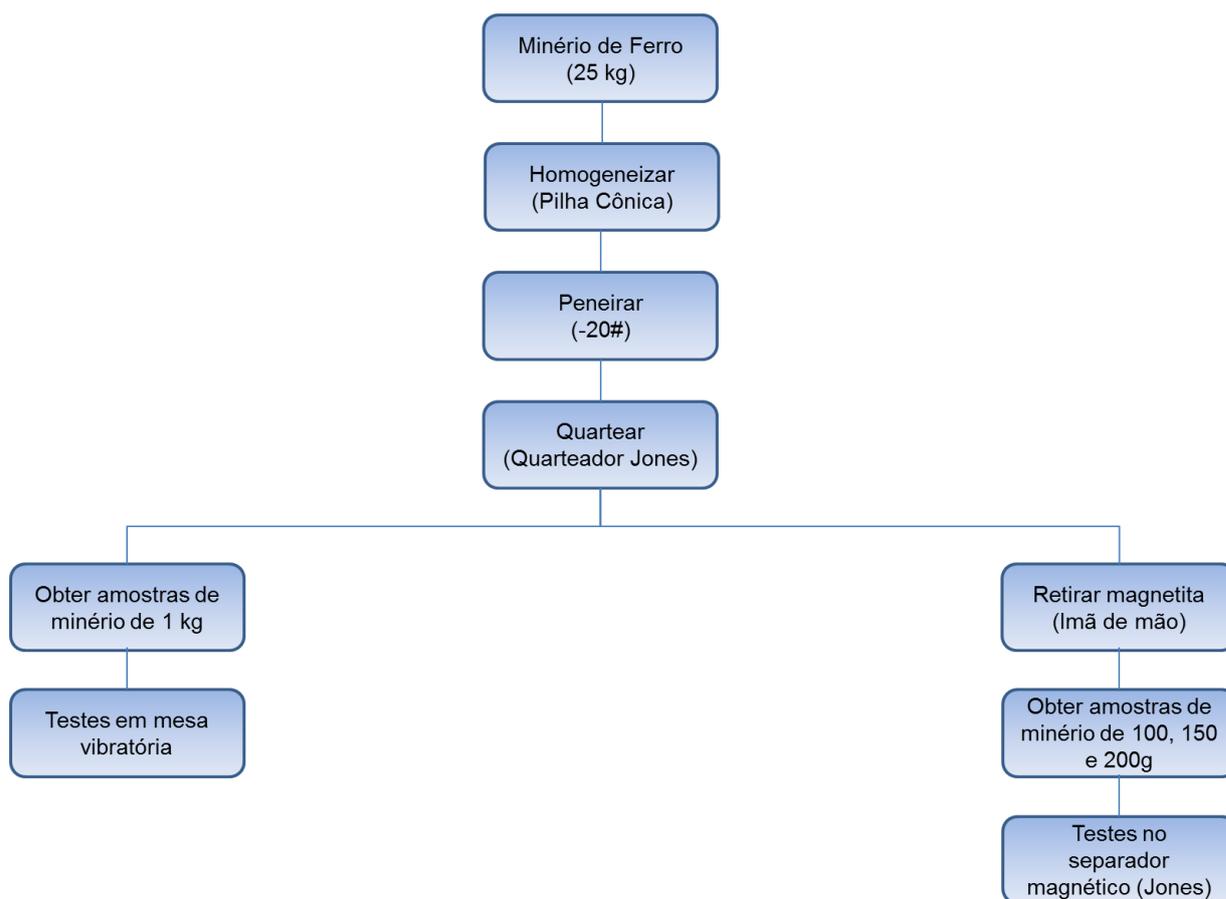


Figura 4.1 – Fluxograma do preparo das amostras de minério de ferro para os ensaios de concentração.

Cabe ressaltar que a faixa granulométrica utilizada (abaixo de 1 mm) apresenta boa liberação mineral e a diferença de densidade entre as espécies (hematita e quartzo) constituintes do minério de ferro potencializam as operações de concentração gravítica. Ainda, operações de separação magnética visam aumentar o nível de pureza do concentrado obtido.

4.3 Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi realizada com uma massa inicial de 250 gramas. Em seguida, a massa retida foi pesada após o peneiramento com duração de 15 minutos. Na Tabela 4.1 está apresentada a série de peneiras utilizadas durante as análises.

Tabela 4.1 – Peneiras utilizadas durante a análise granulométrica.

ABERTURA (mm)	MESH (peneira)
0,841	20#
0,354	45#
0,212	60#
0,150	100#
0,104	150#
0,074	200#
Fundo	-200#

4.4 Caracterização Química da Amostra

A amostra inicial (ROM) foi enviada para Belo Horizonte ao Laboratório do CEFET-MG Campus I para a realização da caracterização química. Esta que foi realizada através do método de Fluorescência de raios X, que se mostra bastante versátil. Isso ocorre devido ao fato do método ser aplicável em diversas amostras, incluindo as de estado sólido e líquido (SKOOG *et al.* 2009).

A Fluorescência de raios X fundamenta-se, basicamente, na produção e detecção de raios X, radiações eletromagnéticas de alta frequência com comprimento de onda na faixa de 0,003 a 3nm, característicos, produzidos pelo fenômeno fotoelétrico. Com a incidência da radiação eletromagnética, pode-se resultar na absorção, emissão ou espalhamento da radiação após a interação com os elementos constituintes da amostra (SKOOG *et al.*, 2009).

Portanto, de forma resumida, a Fluorescência de raios X é composta por três etapas: excitação dos elementos que compõem a amostra, dispersão dos raios X característicos emitidos pela amostra e detecção/quantificação destes raios pelo equipamento (SANTOS *et. al* 2013).

4.5 Cálculos do Teor da Amostra

Os cálculos do teor da amostra foram realizados tanto para o minério utilizado na alimentação quanto para todos os concentrados obtidos durante os ensaios de concentração.

Primeiramente, foram necessários os cálculos da densidade da amostra com o auxílio da técnica de picnometria (Apêndice A).

Em seguida, o teor da amostra foi definido, considerando que a amostra é constituída basicamente por dois minerais, hematita e quartzo, de acordo com a fórmula:

$$\%MM = \frac{d_{mm} \cdot (d_m - d_g)}{d_m \cdot (d_{mm} - d_g)}$$

Onde:

%MM: porcentagem mineral minério;

d_{mm} : densidade do mineral minério (hematita), considerada 5,30 g/cm³;

d_m : densidade do minério, obtida por picnômetro;

d_g : densidade da ganga (quartzo), considerada 2,65 g/cm³.

4.6 Testes em Mesa Concentradora

Os ensaios em mesa concentradora (Figura 4.2) foram realizados no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG Unidade Araxá.



Figura 4.2 – Mesa Concentradora utilizada nos ensaios.

A concentração gravítica do minério de ferro foi executada visando verificar a influência de diversas variáveis operacionais do equipamento com o intuito de aperfeiçoar e definir os melhores parâmetros de concentração para o minério em estudo. Dentre os parâmetros destaca-se: a inclinação da mesa, taxa de alimentação do minério e vazão de água de diluição. A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros utilizados para a realização dos ensaios de mesa concentradora.

Tabela 4.2 – Parâmetros variados nos ensaios de mesa concentradora.

ENSAIO	INCLINAÇÃO (°)	ALIMENTAÇÃO (kg/h)	ÁGUA DE DILUIÇÃO (L/h)
1	1	30,534	78,998
2	3	30,534	78,998
3	5	30,534	78,998
4	5	3,081	78,998
5	5	104,400	78,998
6	5	30,534	57,020
7	5	30,534	119,170

Todos os ensaios em mesa vibratória foram realizados de acordo com o procedimento descrito a seguir:

- i. Pesou-se uma amostra de 1 kg.
- ii. Regulou-se a inclinação.
- iii. Regulou-se a alimentação.
- iv. Regulou-se a água de diluição.
- v. Iniciou-se o teste quando a mesa estava completamente coberta pela lâmina d'água.
- vi. Concentrou-se todo minério, aproximadamente 10 minutos (até exaustão da alimentação).
- vii. Recolheram-se as bandejas de concentrado e rejeito, separadamente.
- viii. Secou-se cada fração que posteriormente foi pesada.
- ix. Definiu-se a densidade do sólido através de cálculos de picnometria.
- x. Obteve-se o teor do concentrado através do peso específico.

Os três primeiros ensaios foram realizados variando a inclinação da mesa e mantendo constante a taxa de alimentação e a vazão de água de diluição. O objetivo foi definir a melhor inclinação operacional mantendo as outras variáveis constantes em valores intermediários.

Os ensaios 4 e 5, já com a melhor inclinação definida seguiram os mesmos procedimentos citados. Porém, neste caso, variou-se a taxa de alimentação, mantendo constante a inclinação da mesa e vazão de água de diluição.

Por último, com a inclinação e a taxa de alimentação ideal já definida, variaram-se os valores de vazão da água de diluição. Assim, definiu-se a melhor condição operacional da mesa concentradora para o minério de ferro em estudo.

4.7 Testes no Separador Magnético

Os ensaios no separador magnético (Figura 4.3) foram realizados no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG Unidade Araxá.



Figura 4.3 – Separador Magnético Jones utilizado nos ensaios.

A concentração magnética do minério foi realizada para verificar a influência das diversas variáveis operacionais do equipamento com o intuito de aperfeiçoar e definir os melhores parâmetros de concentração para o minério em estudo. Dentre os parâmetros destaca-se: a massa da alimentação, a intensidade do campo e a porcentagem de sólidos. A Tabela 4.3 apresenta os parâmetros utilizados para realização dos ensaios no separador magnético

Tabela 4.3 – Parâmetros variados nos ensaios de separação magnética.

ENSAIO	ALIMENTAÇÃO (g)	CORRENTE (A)	ÁGUA DE LAVAGEM (L)	% DE SÓLIDOS
1	100	8	1,5	6,25
2	150	8	1,5	9,09
3	200	8	1,5	11,76
4	100	19	1,5	6,25
5	150	19	1,5	9,09
6	200	19	1,5	11,76

Todos os ensaios no separador magnéticos do tipo Jones, foram realizados de acordo com os procedimentos descritos a seguir:

- i. Pesou-se a amostra com a respectiva massa do teste.
- ii. Preparou-se a polpa com 70% da água de lavagem.
- iii. Regulou-se a intensidade do campo magnético.
- iv. Concentrou-se todo o minério, aproximadamente 5 minutos.
- v. Lavou-se a matriz magnética com o restante da água de lavagem.
- vi. Recolheu-se o balde do rejeito (não magnético).
- vii. Desligou-se o campo magnético.
- viii. Lavou-se a matriz magnética e obteve-se o concentrado (magnético).
- ix. Secou-se cada fração que posteriormente foi pesada.

4.8 Teste Ideal

Após a realização de todos os ensaios, os melhores parâmetros operacionais de cada equipamento foram determinados. Sendo assim, separou-se uma nova amostra, em que o minério foi submetido novamente à concentração em mesa concentradora, empregando-se as condições ideais obtidas nos testes anteriores. Em seguida, como uma etapa de *cleaner*, o concentrado da mesa concentradora, foi submetido à concentração magnética, empregando-se as condições ideais obtidas nos testes anteriores.

O concentrado final foi secado, sendo que seu teor foi obtido pela técnica de picnometria, através de seu peso específico.

5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

5.1 Análise Granulométrica

Os dados obtidos na análise granulométrica estão apresentados na Tabela 5.1, no Gráfico 5.1 a distribuição granulométrica da amostrado de minério de ferro.

Tabela 5.1 – Resultados da Análise Granulométrica.

Abertura (mm)	Mesh (peneira)	Retido (g)	Retido (%)	Retido Acum. (%)	Passante Acum. (%)
0,841	20#	0,68	0,27	0,27	99,73
0,354	45#	146,78	58,94	59,21	40,79
0,212	65#	57,35	23,03	82,24	17,76
0,15	100#	26,3	10,56	92,80	7,20
0,104	150#	8,5	3,41	96,21	3,79
0,074	200#	4,77	1,92	98,13	1,87
FUNDO	-200	4,65	1,87	100,00	0,00
TOTAL		249,03	100,00		

Pode-se observar na Tabela 5.1 que a maior parte do minério de ferro (58,94%) encontra-se retido na peneira de 45# e apenas 0,27% retido na peneira de 20#. Além disso, nota-se baixa quantidade de partículas passante em 200#, obtendo apenas 1,87% em relação à amostra inicial.

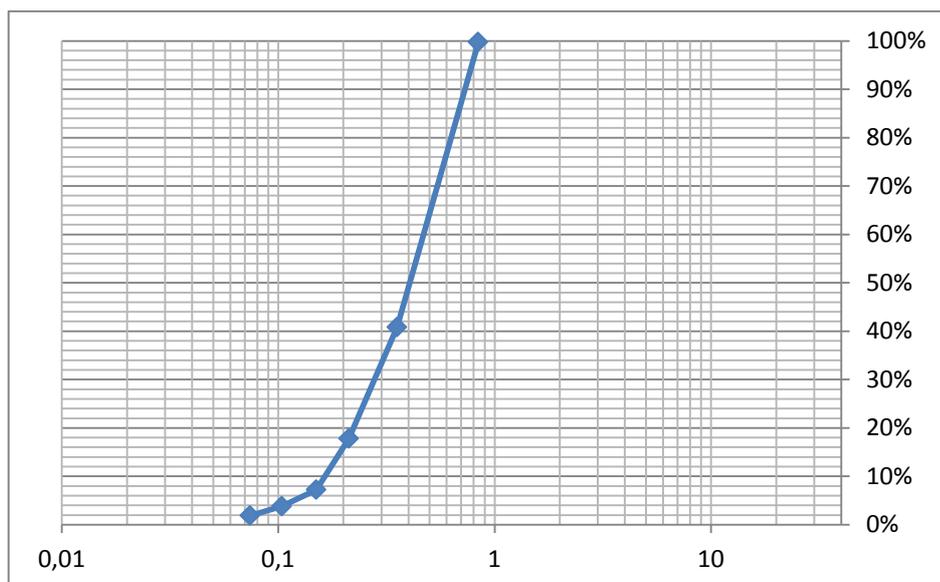


Gráfico 5.1 – Análise Granulométrica da alimentação dos testes de concentração.

5.2 Caracterização do Minério de Ferro

A Tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos na análise química.

Tabela 5.2 – Análise química do minério de ferro (ROM).

MINERAL	TEOR (%)
SiO ₂	52,330
Fe ₂ O ₃	46,461
SO ₃	0,607
K ₂ O	0,309
CaO	0,223
Mno	0,061

Para a análise química pode-se verificar o alto teor de SiO₂ (52,33%) por se tratar do principal constituinte do minério de ferro. O mineral minério, hematita, apresenta teor de 46,46%, assim, o teor de ferro (32,47%) encontra-se dentro do esperado e divulgado pela empresa, que variam de 25 a 35%.

5.3 Cálculo do Teor da Amostra

Utilizou-se a análise química apenas como comparativo entre os valores de teor da alimentação. O valor do teor utilizado para o minério da alimentação calculado, e obteve-se um valor de 49,11% de hematita (34,33% de Fe). Portanto, o teor encontra-se próximo do apresentado pela análise química (46,46%). Esta pequena diferença pode ser justificada, durante os estudos, por considerar-se apenas o quartzo e a hematita como constituintes do minério, sem a presença de outros contaminantes.

Assim, com este comparativo entre o teor da análise química e o teor calculado para alimentação dos testes, nota-se que a utilização da picnometria, em função do cálculo dos teores dos concentrados, não resultará em grandes prejuízos para o estudo. Além disso, destaca-se a dificuldade logística e o tempo para realização das análises químicas, visto que, estas são realizadas em Belo Horizonte.

5.4 Testes em Mesa Concentradora

A Tabela 5.3 apresenta os valores obtidos na separação em mesa concentradora, para os três primeiros ensaios, em que, variou-se apenas a inclinação da mesa.

Tabela 5.3 – Resultados dos três primeiros ensaios em Mesa Concentradora.

ENSAIO	INCLINAÇÃO (°)	TEOR DE HEMATITA (%)	REC. MASSA (%)
1	1	54,73 (38,25 Fe)	99,84
2	3	68,26 (47,73 Fe)	80,19
3	5	92,71 (64,80 Fe)	40,67

Os altos valores de recuperação mássica dos ensaios 1 e 2, não refletem na qualidade do processo, visto que, não foi possível o cálculo da recuperação metalúrgica, o que é evidenciado pela Figura 5.1 e 5.2. A Figura 5.1 representa o baixo valor de ferro (38,25%) encontrado e grande contaminação de quartzo no concentrado, assim como, a diferença de massa entre os produtos, refletindo em uma recuperação mássica muito alta (99,84%).

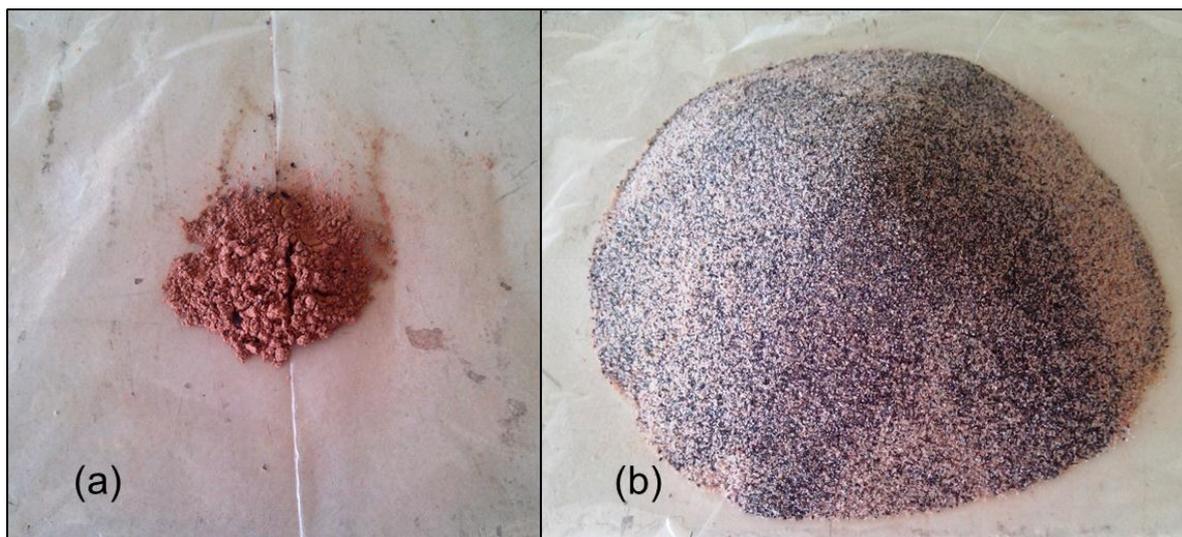


Figura 5.1 – Produtos ensaio 1: (a) Rejeito, (b) Concentrado.

Já a Figura 5.2 apresenta uma melhora em relação ao teor de ferro (47,73%) no concentrado, porém, ainda com contaminações de quartzo visíveis. A recuperação mássica (80,19%) tem uma queda, representando uma melhora na distribuição das massas em relação ao ensaio 1, mas, o que não se reflete em um bom ensaio.

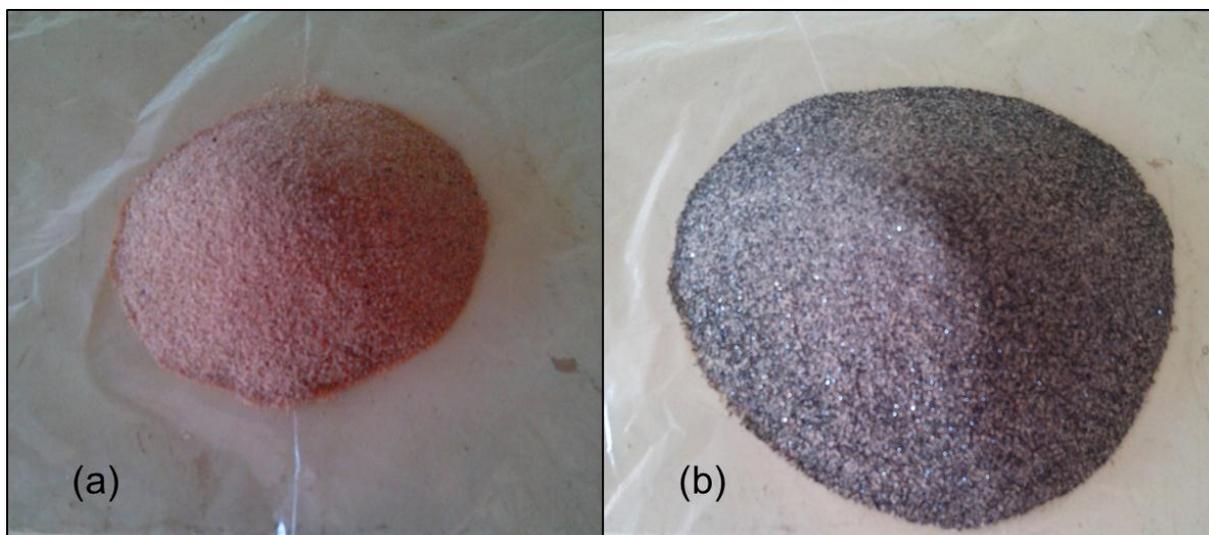


Figura 5.2 – Produtos ensaio 2: (a) Rejeito, (b) Concentrado.

Por outro lado, o ensaio 3 apresentou-se com resultados satisfatórios, já que, a recuperação mássica (40,67%) mostra-se boa em relação ao baixo teor de hematita na alimentação (49,11%). Acrescenta-se também, o alto valor do teor de hematita (92,71%) no concentrado, que favorece uma alta recuperação metalúrgica de 76,77% e um concentrado com alta pureza (64,80% de Fe), como é apresentado na Figura 5.3.

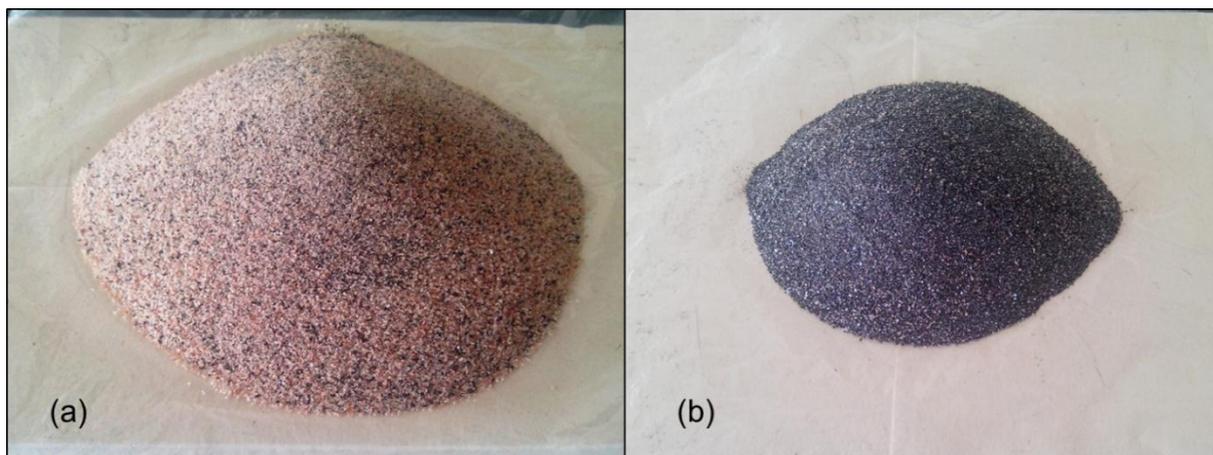


Figura 5.3 – Produtos ensaio 3: (a) Rejeito, (b) Concentrado.

Em relação a variável explorada, nota-se que a maior inclinação (5°) apresentou melhores resultados, o que favoreceu a estratificação do material durante a operação em função da diferença de densidade.

Os resultados dos ensaios 4 e 5, nos quais, variaram os valores da taxa de alimentação, estão presentes na Tabela 5.4. Destaca-se que os valores utilizados para a taxa de alimentação são o valor mínimo e o máximo, visto que, o valor intermediário já foi testado nos três primeiros ensaios.

Tabela 5.4 – Resultados dos ensaios 4 e 5 em Mesa Concentradora.

ENSAIO	TAXA DE ALIMENTAÇÃO (kg/h)	TEOR DE HEMATITA (%)	REC. MASSA (%)	REC. MET. (%)
3	30,53	92,71 (64,80 Fe)	40,67	76,77
4	3,08	-	-	-
5	104,40	95,51% (66,76 Fe)	9,93	19,30

Diante do exposto, observa-se que o ensaio 4 foi descartado, visto que, durante a operação, praticamente nenhuma massa foi verificada na bandeja do concentrado. Isto se deve à baixa taxa de alimentação. Logo, as partículas eram arrastadas pela água de lavagem para o rejeito.

Já no ensaio 5, mesmo aumentando a taxa de alimentação e com um grande teor de ferro (66,76%) no concentrado, este ensaio não foi condizente. Isso ocorreu, já que, tanto a recuperação mássica (9,93%) quanto a recuperação metalúrgica (19,30%) apresentaram valores baixos. Acrescentando ainda que, com o uso do maior valor de taxa de alimentação estipulado (104,40 kg/h), a mesa concentradora sofreu uma sobrecarregada de material. Ou seja, a alimentação estava acima da sua capacidade, como é apresentado na Figura 5.4. Houve grande acúmulo de material na região central na mesa, que propiciou um maior tempo de ensaio e pouco material no concentrado.



Figura 5.4 – Aspecto visual durante o ensaio 5.

Devido à variação dos valores da taxa de alimentação, nota-se que o valor intermediário (30,53 kg/h), representa os melhores resultados. Isto porque, valores menores e maiores não apresentaram resultados satisfatórios, tanto para recuperação mássica quanto para a recuperação metalúrgica.

A Tabela 5.5 apresenta os resultados dos ensaios 6 e 7, em que, foram variados os valores de vazão da água de diluição. Destaca-se que os valores utilizados para a vazão da água de diluição são: o valor mínimo e o máximo, visto que, o valor intermediário já foi apresentado nos ensaios anteriores.

Tabela 5.5 – Resultados dos ensaios 6 e 7 em Mesa Concentradora.

ENSAIO	ÁGUA DE DILUIÇÃO (L/h)	TEOR DE HEMATITA (%)	REC. MASSA (%)	REC. MET. (%)
3	78,99	92,71 (64,80 Fe)	40,67	76,77
6	57,02	95,13 (66,49 Fe)	12,55	24,32
7	119,01	94,30 (65,92 Fe)	40,20	77,19

Os resultados obtidos para o ensaio 6, remetem um alto teor no concentrado de ferro (66,49%). Porém, valores baixos para recuperação mássica (12,55%) e metalúrgica (24,32%). Isso se deve ao fato que, para um valor baixo na água de diluição, a mesa concentradora também acumulou grande quantidade de material na região central do equipamento (Figura 5.5) devido à deficiência de água de diluição. Assim, foi observado expressivo aumento no tempo de execução do ensaio, além de um concentrado com grande pureza. Entretanto, não foram alcançadas recuperações mássica e metalúrgica significativas.

**Figura 5.5**–Aspecto visual durante o ensaio 6.

Por último, o ensaio 7, também apresentou resultados satisfatórios e bem parecidos com o ensaio 3. A única variável que difere entre os dois testes foi o aumento da água de diluição. Assim, o nível de pureza no concentrado (65,92% de Fe) e a recuperação metalúrgica (77,19%) experimentaram sutil aumento, enquanto, para a recuperação mássica (40,20%), foi observada uma sensível redução. A Figura 5.6, apresenta a mesa concentradora durante o ensaio 7. Nota-se que o corte entre o

concentrado e o rejeito ocorre de maneira contínua, sem material acumulado na região central do equipamento. Não obstante, nota-se também pequena perda de hematita na direção da bandeja do rejeito.



Figura 5.6 – Aspecto visual durante o ensaio 7.

Portanto, diante dos resultados obtidos na concentração gravítica, nota-se que os ensaios 3 e 7 foram os mais condizentes. Devido à grande semelhança entre os resultados, o ensaio 3 se destacou, visto que, este apresenta menor gasto de água durante a operação em relação ao ensaio 7. A água de diluição era a única variável que se diferia entre estes ensaios.

5.5 Teste no Separador Magnético

A Tabela 5.6 apresenta os valores obtidos na separação do minério de ferro, utilizando o separador magnético carrossel com alimentação a úmido. Variaram-se os valores de massa de alimentação, 100, 150 e 200g aproximadamente. A intensidade do campo magnético foi mantida em 8 ampéres para os três primeiros ensaios, e 19 ampéres para os três ensaios finais.

Tabela 5.6 – Resultados dos testes no separador magnético.

ENSAIO	ALIMENTAÇÃO (g)	CONCENTRADO (g)	REJEITO (g)	REC. MASSA (%)
1	103,47	3,95	99,52	3,82
2	153,49	4,06	149,43	2,65
3	203,59	4,50	199,09	2,21
4	105,29	8,65	96,64	8,22
5	153,72	11,40	142,32	7,42
6	203,03	10,50	192,53	5,17

Observa-se que com o aumento da intensidade do campo magnético houve um aumento na recuperação mássica do processo. Contudo, o valor alcançado se mostrou muito pouco significativo.

Nota-se também que, com o aumento da massa da alimentação ocorre uma diminuição na recuperação mássica, que já se encontrava baixa e não era esperado.

Portanto, todos os ensaios apresentaram resultados insatisfatórios, com baixa recuperação mássica mesmo com o aumento da intensidade do campo magnético. Reforça-se ainda que, os teores dos concentrados e a recuperação metalúrgica dos ensaios não foram calculados, uma vez que, não se justifica o cálculo destes parâmetros, para estes ensaios, que apresentaram resultados pouco consideráveis.

Reforça-se ainda, a limitação do equipamento em atingir um elevado campo magnético, visto que, o valor máximo possível é de 10.430 Gauss. Esse valor que está dentro do especificado para separação magnética da hematita, entre 10.000 – 18.000 Gauss (LUZ *et al.*, 2004). Porém, seria viável o uso de um campo magnético maior do que o utilizado em prol do aprimoramento do ensaio.

5.6 Teste Ideal

O teste ideal é o fechamento do ciclo operacional, em que, consiste na melhor rota de concentração utilizando os parâmetros com resultados apropriados de acordo com os ensaios realizados em mesa concentradora e, como etapa *cleaner*, separador magnético com objetivo de purificação do concentrado.

Portanto, nota-se, para os resultados de concentração gravítica, que o ensaio 3 obteve os melhores parâmetros operacionais. Este que apresenta menor gasto de água durante a operação em relação ao ensaio 7, sendo a água de diluição a única variável que se diferia entre estes ensaios.

Já em separação magnética, não foi possível definir parâmetros ideais de operação, visto que, dentre os ensaios realizados, nenhum apresentou resultados satisfatórios.

Assim, o fechamento do ciclo operacional, que seria a rota *rougher/cleaner* empregando os dois equipamentos, nas condições operacionais ótimas, com o foco em um concentrado de alta pureza, foi inviabilizado.

Vale ressaltar que, até o presente momento, foram executados testes de concentração gravítica pela empresa, empregando-se espirais concentradoras. Nestes testes foram alcançados resultados mais satisfatórios em relação ao presente estudo. Para recuperação mássica, foi atingido o valor de 40%, aproximadamente. Segundo nomenclatura adotada para os testes, o concentrado fino (abaixo de 1mm) foi atingido teor de ferro igual a 66%. Já para o concentrado grosso (entre 8mm e 1mm), o teor de ferro alcançou 58%.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo teve o propósito de avaliar a concentração do minério de ferro via rota de separação gravítica e magnética, visando à obtenção de um concentrado com alto teor de hematita. Assim, avaliaram-se os efeitos causados pela variação dos parâmetros operacionais. Diante disso, a partir dos resultados obtidos, algumas conclusões podem ser tomadas.

A caracterização química do minério feita por cálculos de picnometria mostrou-se eficiente. Tal afirmativa pode ser feita baseando-se no fato de que o valor do teor de hematita obtido por picnometria (49,11%) aproximou-se bastante do obtido pela análise química via Fluorescência de raios X (46,46%) do minério utilizado na alimentação.

Dentre os ensaios realizados na mesa concentradora foi obtido um concentrado com 64,90% de ferro. Neste concentrado, foi obtida uma massa total de 393,04 g (40,67% em relação à massa inicial). A eficiência do uso da mesa concentradora se deve principalmente pela grande diferença de densidade entre as espécies constituintes da amostra, hematita e quartzo, que provocaram uma recuperação metalúrgica de 76,77%. Utilizou-se como parâmetro operacional a maior inclinação (5°), além da taxa de alimentação (30,534 kg/h) e água de diluição (78,998 L/h) com valores intermediários. Lembrando que, até o presente momento este minério não havia sido submetido a nenhum teste de separação em mesa concentradora. A partir de testes em espirais concentradoras, foi atingida recuperação mássica de 40%. Para o concentrado fino (abaixo de 1mm) foi atingido teor de ferro igual a 66%. Já para o concentrado grosso (entre 8mm e 1mm), o teor de ferro alcançou 58%.

A separação magnética mostrou-se ineficiente na concentração da hematita em relação ao quartzo, uma vez que foram obtidas massas muito pequenas no concentrado e conseqüentemente baixíssimas recuperações mássicas, atingindo valor máximo de 8,22% para este parâmetro. Observa-se que, mesmo com um grande aumento da amperagem, os ensaios obtiveram resultados pouco significativos, visto que, o maior campo magnético possível de alcançar-se com o equipamento é de 10.430 Gauss que está dentro das especificações necessárias

para a separação da hematita, entre 10.000 a 18.000 Gauss. Sugere-se o uso de outro separador magnético que possibilita um aumento no campo magnético utilizado, buscando um aperfeiçoamento operacional.

A realização do teste ideal e obtenção de um concentrado de alto teor foi inviabilizada, uma vez que a separação magnética mostrou-se insatisfatória. Definiram-se apenas parâmetros viáveis de operação para os ensaios na mesa concentradora.

Assim, o estudo realizado se mostra eficiente apenas para concentração gravítica, uma vez que o resultado obtido atendeu às expectativas. Porém, para a separação magnética torna-se necessário o estudo de novos parâmetros operacionais. Sugere-se ainda, a adição de uma etapa de *cleaner* na concentração gravítica, visando a purificação do concentrado de ferro.

REFERÊNCIAS

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

CENTAURUS METALS. **Location Map**. Disponível em: <<http://www.centaurus.com.au/>>. Acesso em: 26 de jun. 2015.

CHEMALE JUNIOR, F., TAKEHARA, L. **Minério de ferro: geologia e geometalurgia**. São Paulo: Edgar Blücher, 2013.

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

IBRAM. **Notícias de Mineração Brasil**. *Centaurus* Aumenta Recursos de Projeto de Ferro Candonga. 2013.

IBRAM. **Notícias de Mineração Brasil**. *Centaurus* Recebe Três Concessões de Lavra Para Projeto Jambreiro. 2014.

KING, J. **Steel Plant Information**. Disponível em: <<http://www.steelonthenet.com/plant.html>> Acesso em: 26 jun. 2015.

LINS, F.A.F. **Concentração gravítica**. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2004. Cap. 6. P. 241-268.

LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; ALMEIDA, S.L.M. **Tratamento de Minérios**. 4. Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004.

MAEDA, J.M.M. **Estudo de caracterização mineral e de reagentes na flotação de minério de ferro**. 2014. 46 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

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

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

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

ROSIÈRE, C.A.; JÚNIOR, F.C. **Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero ferrífero – uma visão geral e discussão**. Geonomos. Belo Horizonte. v. 8, n. 2, p. 27-43, 2000.

SANTOS, E.S.; GAMA, E.M.; FRANÇA, R.S.; SOUZA, A.S.; MATOS, R.P. **Espectrometria de fluorescência de raios-X na determinação de espécies químicas**. Enciclopédia Biosfera. Bahia. v. 9, p. 3413-3432, 2013.

SEIXAS, F.T. **Prefeitura de Guanhães**, 29 abr. 2013. Disponível em: <<http://www.guanhaes.mg.gov.br/noticias/121-gabinete-prefeito/185-prefeito-ladinho-concede-entrevista-ao-diario-do-rio-doce>>. Acesso em: 26 jun. 2015.

SKOOG, D.A.; HOLLER, F.J.; NIEMAN, T. A. **Princípios de Análise Instrumental**, 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, p. 31-36; p. 317-342, 2009.

VARAJAO, C.A.C. A Questão da Correlação das Superfícies de Erosão do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geociências**, v.21(2), p.138-145, 1991.

APENDICE A – METODOLOGIA DE PICNÔMETRO

O picnômetro é um dos métodos utilizados para o cálculo de densidades dos sólidos. É necessário o auxílio de uma balança de precisão, de no mínimo duas casas decimais. Além disso, para assegurar que o procedimento foi realizado corretamente, as determinações das densidades foram feitas três vezes para cada amostra, e por fim, efetuou-se a média desses três valores calculados.

Para calcular a densidade da amostra de minério de ferro, foi utilizada uma amostra representativa da original, com base na equação:

$$ds = \frac{(A2) - (A1)}{(A4 + A2) - (A1 + A3)}$$

Onde:

ds=densidade dos sólidos;

A1=massa do picnômetro(obtida no procedimento (i), abaixo);

A2=massa do picnômetro + amostra;

A3=massa do picnômetro + amostra + água;

A4=massa do picnômetro + água.

Todas as densidades calculadas foram realizadas de acordo com o procedimento descrito a seguir:

- (i) Pesar o picnômetro vazio, previamente limpo e seco, em estufa, a 100°C e resfriado em dessecador.
- (ii) Encher o picnômetro com água até transbordar, secar a água que molha a superfície externa do mesmo e, em seguida, pesar o picnômetro com água.
- (iii) A diferença entre os pesos do picnômetro com água e sem água é a massa de água utilizada. Sabendo o volume de água colocada no picnômetro pode-se determinar a densidade da água ou de outro líquido utilizado.
- (iv) Adiciona-se a amostra de minério de ferro no picnômetro e, em seguida, pesa-se todo o conjunto, obtendo-se o valor de A2. A massa da amostra é determinada pela diferença entre a massa do picnômetro com minério de ferro e sem minério de ferro (vazio), informação obtida no item (i).

(v) A massa de água adicionada ao picnômetro com amostra é determinada pela diferença entre a massa do picnômetro com minério de ferro e água (A3) e massa do picnômetro com minério de ferro (A2).

(vi) O volume de água adicionado é obtido pela relação entre a densidade da água (obtida em iii) e a massa de água adicionada no picnômetro (obtida em v).

(vii) O volume do minério de ferro é determinado pela diferença entre o volume total do picnômetro e o volume de água adicionada (obtida em vi).

(viii) A densidade do minério de ferro é obtida pela relação entre a massa de minério de ferro (obtida em iv) e o volume de minério de ferro (obtido em vii).

A seguir, na Tabela A.1, um exemplo prático da determinação da densidade da amostra utilizada na alimentação dos ensaios de concentração:

Tabela A.1 – Determinação da densidade média da amostra utilizada na alimentação.

TESTES DE PICNOMETRIA			
Alimentação	Teste 1	Teste 2	Teste 3
Mpic. Seco (g)	31,81	31,36	29,50
Mpic. + amostra (g)	34,52	34,97	31,78
Mpic. + amostra + água (g)	83,64	84,60	82,12
Mpic. + água (g)	81,71	82,04	80,50
Volume do picnômetro (cm ³)	49,71		
Msólido (g)	2,71	3,61	2,28
(Mpic. + água) - Mpic. Seco (g)	49,90	50,68	51,00
Dens.água (g/cm ³)	1,00	1,02	1,03
(Mpic. + amostra + água) - (Mpic. + amostra) (g)	49,12	49,63	50,34
Volume de água (cm ³)	48,93	48,68	49,06
Volume de sólidos (cm ³)	0,78	1,03	0,64
Densidade do sólido (g/cm ³)	3,49	3,51	3,54
Densidade média do sólido (g/cm ³)	3,51		