



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ
DEPARTAMENTO DE MINAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

CONCENTRAÇÃO VIA JIGAGEM DO MINÉRIO DE FERRO DO DEPÓSITO DE
JAMBREIRO, GUANHÃES, MG

BIANCA ALVES VIEIRA

ORIENTADOR

LEANDRO HENRIQUE SANTOS

ARAXÁ
2016

Vieira, Bianca Alves

Concentração via jigagem do minério de ferro do depósito de Jambreiro, Guanhães, MG / Bianca Alves Vieira. – 2016.

-- f.; -- cm.

Orientador: Prof. Leandro Henrique Santos.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) -- Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2016

1. Jigagem. 2. Beneficiamento de minérios. I. Leandro Henrique Santos. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Concentração via jigagem do minério de ferro do depósito de Jambreiro, Guanhães, MG.

BIANCA ALVES VIEIRA

CONCENTRAÇÃO VIA JIGAGEM DO MINÉRIO DE FERRO DO DEPÓSITO DE
JAMBREIRO, GUANHÃES, MG

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Centro de Educação
tecnológica de Minas Gerais, Unidade
Araxá, como requisito parcial para obtenção
do título de Engenheiro de Minas.

Data de aprovação: ____/____/____

Banca Examinadora:

Prof. MSc. Leandro Henrique Santos – CEFET/ARAXA
Presidente da Banca Examinadora - Orientador

Prof^a. Dr^a. Michelly dos Santos Oliveira - CEFET/ARAXA

Prof. MSc. Douglas Geraldo Magalhães - CEFET/ARAXA

À minha afilhada Sofia Emanuelle Faria Silva.

AGRADECIMENTOS

Nenhuma batalha é vencida sozinha. No decorrer desta luta algumas pessoas estiveram ao meu lado e percorreram este caminho como verdadeiros soldados, estimulando para que eu buscasse a minha vitória e conquistasse o meu sonho.

Agradeço, primeiramente, a Deus, que me guia e me fortalece desde sempre.

Aos meus pais, Dayse Lúcia Alves e Jeovane Vieira Neiva, por me incentivarem a continuar e nunca desistir dos meus objetivos. Vocês sempre serão os meus motivos maiores de buscar ser sempre uma pessoa e um profissional melhor.

Ao Professor Me. Leandro Henrique Santos, meu orientador, pelo tempo dedicado no desenvolvimento deste trabalho, pela paciência e por não desistir, mesmo quando não se havia forças para continuar tentando.

Ao Professor Dr. Maurício Carneiro por ser o Professor da disciplina de TCC e por dedicar o seu tempo para nos mostrar os pontos de melhoria, garantindo um trabalho bem escrito e fundamentado.

A Professora Dr^a. Michelly dos Santos Oliveira por ser referência para todos os alunos e por acreditar na minha capacidade, sugerindo a realização de um trabalho em um equipamento nunca antes utilizado no CEFET-MG, unidade Araxá.

A todos os meus professores que dedicaram a transmitir umas das maiores virtudes que se pode ter: o conhecimento. Suas atitudes, ensinamentos, exemplos e incentivos colaboraram para que eu fosse além dos meus limites e medos. Hoje, sei que os melhores mestres não são aqueles que nos ensinaram as respostas, mas sim aqueles que nos ensinaram a questionar, a duvidar, a pensar e a sonhar.

Ao Técnico de Mineração do Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG, João Victor da Silva Alves, pela colaboração, paciência e por estar disposto a ajudar sempre que foi preciso. Você é uma das peças chave que garantiu o sucesso deste trabalho!

Ao meu companheiro de equipe, Carlos Eduardo Lopes, que através de sua competência e responsabilidade, esteve sempre presente em todos os momentos me ajudando na realização dos testes.

A todas as pessoas que, de alguma forma, me ajudaram na implementação do jigue e na realização deste trabalho. Cada um de vocês fizeram parte desta conquista, formando uma grande equipe.

As minhas companheiras Mariana Menezes, Rafaela Santos e Valéria Bananal, por estarem comigo desde o começo e por serem meu principal apoio nesta jornada. Juntas, seremos sempre o quarteto fantástico.

A todos os colaboradores do CEFET-MG, unidade Araxá, por contribuírem na minha formação.

A empresa *Centaurus Metals* Brasil Mineração por me proporcionar a oportunidade de desenvolver este trabalho, através das amostras cedidas.

Por fim, a cada um que fez parte deste pedaço da minha história, minha eterna gratidão.

Sua meta é ser o melhor do mundo naquilo que
você faz. Não existem alternativas. Vicente
Falconi.

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho foi estudar a viabilidade de concentração de minério de baixo teor, proveniente do depósito do Jambreiro (Guanhães - MG) através de concentração gravítica, via jigagem. A metodologia consistiu nas atividades de peneiramento, homogeneização, quarteamento, análises granulométricas, ensaios de concentração no jigue MINERALMAQ, modelo JUST/16 1 e picnometria. As variáveis operacionais foram a granulometria, a taxa de alimentação e a profundidade da camada de fundo. Os resultados foram analisados em termos de teor de ferro, recuperação metalúrgica e recuperação mássica. Por meio de análise qualitativa, foi possível verificar que as variáveis com maior enriquecimento de ferro (43,03%) foram a granulometria mais fina (passante em 20#), empregando uma taxa de alimentação de 1632 g/min e volume de seixos correspondente a 72 mL (2 camadas de leito).

Palavras-chaves: Concentração gravítica, jigagem, minério de ferro.

ABSTRACT

The main objective of this work was to study the viability of concentration of low-grade ore from the Jambreiro's deposit (Guanhães - MG) through gravity separators, by jigging. The methodology consisted in screening, homogenization, quartering, particle size analysis, concentration tests in MINERALMAQ jig, model JUST / 16 1, and picnometry. The operating variables were the particle size, feed rate and depth of bed layer. The results were analyzed in terms of the iron grade, metal recovery and mass recovery. Through the qualitative analysis, can be checked the parameters that have obtained the greatest enrichment of iron (43.03%) were the finer particle size (through 20#), using a feed rate of 1632 g/min and volume to 72 mL (2 bed layers).

Keywords: Gravity separators, jigging, iron ore.

ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Distribuição das reservas brasileiras de minério de ferro.....	6
Figura 2.2 – Localização do depósito de Jambreiro	9
Figura 2.3 – Esquema simplificado de um jigüe.....	10
Figura 2.4 – Sedimentação retardada.....	11
Figura 2.5 – Aceleração diferencial inicial.....	12
Figura 2.6 – Consolidação intersticial.....	12
Figura 2.7 – Sequência dos mecanismos presente no jigüe.....	13
Figura 2.8 – Jigüe Harz.....	15
Figura 2.9 – Desenho esquemático do jigüe Baum.....	15
Figura 2.10 – Jigüe Jeffrey.....	16
Figura 2.11 – Jigüe Mc Nally.....	16
Figura 2.12 – Descarga do jigüe Allmineral.....	17
Figura 2.13 – Jigüe Batac.....	18
Figura 2.14 – Jigüe Denver.....	19
Figura 2.15 – Jigüe IHC-Cleveland.....	20
Figura 3.1 – Fluxograma geral dos procedimentos realizados.....	25
Figura 3.2 – Pilha alongada.....	26
Figura 3.3 – Pilha alongada dividida ao meio (logitudinalmente).....	26
Figura 3.4 – Pilha alongada dividida em espaçamentos equidistantes (transversalmente).....	26
Figura 3.5 – Ajustes realizados no jigüe.....	28
Figura 3.6 – Tela e seixos sobre o crivo.....	30
Figura 3.7 – Fluxo de água, à direita, e fluxo do material leve, à esquerda, na calha de descarga.....	30
Figura 3.8 – Material leve (rejeito) na bandeja metálica.....	31
Figura 3.9 – À direita, produto médio e, à esquerda, concentrado.....	31
Figura 4.1 – Análise granulométrica da amostra de minério de ferro compreendida na faixa granulométrica entre 8# e 20#.....	36
Figura 4.2 – Análise granulométrica da amostra de minério de ferro passante em 20#.....	37
Figura 4.3 – Comparação das massas dos rejeitos obtidos nos testes realizados ...	40

Figura 4.4 – Comparação das massas dos concentrados obtidos nos testes realizados.....	40
Figura 4.5 – Comparação dos teores de ferro no concentrado obtidos nos testes realizados.....	44
Figura 4.6 – Comparação das recuperações metalúrgicas normalizadas dos testes realizados.....	45
Figura 4.7 – Comparação das recuperações mássicas dos testes realizados.....	45
Figura 4.8 – Comparação das variáveis e resultados dos testes realizados para as amostras de minério de ferro compreendidas na faixa granulométrica entre 8# e 20#.	46
Figura 4.9 – Comparação das variáveis e resultados dos testes realizados para as amostras de minério de ferro passante em 20#	49

TABELAS

Tabela 2.1 – Fórmula química e conteúdo teórico de ferro (em%) dos principais minerais portadores de ferro.	4
Tabela 2.2 – Países com as maiores reservas de minério de ferro (em milhões de toneladas) e os respectivos teores médios de ferro (%).	5
Tabela 2.3 – Composição mineralógica dos principais tipos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero.	8
Tabela 2.4 – Tipos de jigues.	21
Tabela 3.1 – Série de peneiras utilizadas na análise granulométrica do minério de ferro compreendido na faixa granulométrica entre 8# e 20#.	27
Tabela 3.2 – Série de peneiras utilizadas na análise granulométrica do minério passante em 20#.	27
Tabela 3.3 – Variáveis operacionais utilizadas em cada teste.	28
Tabela 4.1 – Resultados em relação às massas obtidas para a alimentação e os produtos gerados nos testes realizados no jigues.	38
Tabela 4.2 – Resultados em relação ao agrupamento e homogeneização das massas do produto misto e do concentrado dos testes realizados.	39
Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de picnometria para a alimentação e os produtos obtidos nos testes realizados.	42
Tabela 4.4 – Teores, recuperações metalúrgicas e recuperações mássicas dos testes realizados.	43
Tabela 4.5 – Média dos resultados e variáveis dos testes realizados.	46

ABREVIATURAS E SIGLAS

%MM – porcentagem de mineral minério;
A – massa de sólidos da alimentação;
a – teor da alimentação;
C – massa de sólidos do concentrado;
c – teor do concentrado;
 C_f – massa de sólidos do concentrado final;
 c_f – teor do concentrado final;
CV – coeficiente de variação;
D – duplicata;
 d_{50} – diâmetro das partículas passantes em 50%;
 d_{80} – diâmetro das partículas passantes em 80%;
 d_a – densidade da água;
 d_g – densidade da ganga;
 d_M – densidade do minério;
 d_{mm} – densidade do mineral minério;
 d_s – densidade dos sólidos;
Fe – ferro;
FFB – formação ferrífera bandada;
H – hidrogênio;
M – massa de sólidos do produto misto;
M1 – massa do picnômetro;
M2 – somatório das massas do picnômetro e amostra;
M3 – somatório das massas do picnômetro, amostra e água;
M4 – somatório das massas do picnômetro e água;
MG – Minas Gerais;
Mn – manganês;
Ms – massa da amostra;
MS – Mato Grosso do Sul;
N – normal;
O – oxigênio;
PA – Pará;
R – massa de sólidos do rejeito;
 R_{mas} – recuperação mássica;
 R_{met} – recuperação metalúrgica;
 R_{Nmet} – recuperação metalúrgica normalizada;
S – enxofre;
SW – sudoeste;
T – triplicata;
Ti – titânio;
Va – volume da água;
Vp – volume do picnômetro;
Vs – volume da amostra.

SÍMBOLOS

– mesh;
% - porcentagem;
°C – grau Celsius;
cm³ - centímetro cúbico;
g – grama;
h – hora;
kg – quilo;
km – quilômetro;
m – metro;
min – minuto;
mL – mililitro;
mm – milímetro;
Mt – milhões de toneladas.

Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	Apresentação	1
1.2.	Justificativa	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo Geral	2
1.2.2	Objetivos Específicos	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Minério de Ferro.....	3
2.2.1	Aspectos Gerais	3
2.2.2	Panorama Mundial	4
2.2.3	Panorama Nacional	4
2.3	Quadrilátero Ferrífero	6
2.4	Guanhães - MG	7
2.5	Separação Gravítica	8
2.5.1	Jigagem.....	9
2.5.2	Jigagem do Minério de Ferro	20
3	MATERIAIS E METODOLOGIA	23
3.1	Materiais	23
3.2	Obtenção e Preparação das Amostras.....	24
3.3	Análises Granulométricas.....	26
3.4	Testes de jigagem.....	27
3.5	Picnometria	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1	Análises Granulométricas.....	36
4.2	Testes de Jigagem	37
5	CONCLUSÃO.....	52
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	53
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação

Este é o Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas do CEFET/ARAXA da aluna Bianca Alves Vieira sob a orientação do Prof. MSc. Leandro Henrique Santos, desenvolvido no Departamento de Minas e Construção Civil, no âmbito das disciplinas TTC I e II, ministrada pelo Prof. Dr. Maurício Antônio Carneiro. O material de estudo foi o mineiro de ferro de baixo teor proveniente do depósito do Jambreiro (Guanhães - MG).

1.2. Justificativa

O Brasil é um dos maiores produtores de minério de ferro do mundo, possuindo depósitos de elevados teores, associado a menores teores de elementos indesejados para processos siderúrgicos, como enxofre, alumínio, fósforo e carbonatos (Carvalho *et al.* 2014).

O Quadrilátero Ferrífero, situado no estado de Minas Gerais, possui uma das principais concentrações de minério de ferro do Brasil e, por isso, é uma das regiões mais importantes do país.

Para os minérios de ferro de altos teores, as operações de beneficiamento se baseiam apenas em cominuição e classificação. Entretanto, para minérios de baixos teores, é necessário inserir etapas de concentração, por métodos gravíticos, magnéticos ou flotação (Nascimento 2010).

A concentração gravítica realiza a separação das partículas minerais por meio das diferenças de densidades e destaca-se pela simplicidade relativa dos processos, não utilização de reagentes e por produzirem pouca poluição quando comparados com os demais métodos (Wills 2006).

Dentre os métodos de concentração gravítica tem-se a jigagem, que consiste em separar as partículas através da repetida expansão e compactação vertical de um leito pelo movimento pulsante da água, resultando na estratificação do leito em camadas de densidades crescentes do topo até a base (Sampaio & Tavares 2005).

Os fatores que podem influenciar na escolha do método de concentração são as características físicas, químicas e mineralógicas do minério, além dos custos envolvidos no processo.

Através da utilização da concentração gravítica, este trabalho teve como objetivo efetuar ensaios em um jigge MINERALMAQ, modelo JUST/16 1, no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG, unidade Araxá.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho visou estudar a viabilidade de concentração de minério de baixo teor, proveniente do depósito do Jambreiro (Guanhães - MG) através de concentração gravítica, via jigagem.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar as adaptações necessárias no jigge para garantir o seu correto funcionamento;
- Avaliar a influência da variável granulometria da alimentação nos testes de jigagem para o minério de ferro;
- Avaliar a influência da variável taxa de alimentação nos testes de jigagem para o minério de ferro;
- Avaliar a influência da variável camada de fundo nos testes de jigagem para o minério de ferro.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Minério de Ferro

2.2.1 *Aspectos Gerais*

O elemento químico ferro, representado pelo símbolo Fe, corresponde a um metal de transição e possui massa atômica 56. Em temperatura ambiente encontra-se no estado sólido e possui característica ferromagnética, ou seja, este metal apresenta alta capacidade de interagir quando imerso em um campo magnético.

A utilização do ferro abrange principalmente a produção do aço no setor siderúrgico, que corresponde à liga metálica fundamental para a produção de ferramentas, máquinas, veículos de transporte, elementos estruturais e outras diversas aplicações (Nascimento 2010).

O ferro é o quarto elemento mais abundante da crosta terrestre, sendo o segundo entre os elementos metálicos. Este metal pode ser encontrado comumente em compostos químicos, resultantes de processos inorgânicos. Diversos minerais apresentam o ferro como componente essencial em sua composição química, dentre eles, os óxidos, hidróxidos e oxihidróxicos (Roberto 2010).

Os minérios de ferro economicamente explorados podem ser classificados de acordo com a composição química do mineral fornecedor do elemento metálico. Assim, podem ser divididos em óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos (Takehara 2004). Os principais minerais portadores e seus respectivos teores de ferro são mostrados na Tabela 2.1.

Os depósitos de ferro de maior viabilidade econômica correspondem aos formados por minérios hematíticos e magnetíticos por apresentarem alto teor do metal de interesse (Maia 2011).

2.2.2 Panorama Mundial

Os países que apresentavam maiores reservas de minério de ferro entre 2000 e 2013 são Austrália, Brasil, Rússia, China e Índia (Tabela 2.2), correspondendo a 81% da produção mundial e 86% da produção de finos no ano de 2012 (Carvalho *et al.* 2014).

Tabela 2.1 – Fórmula química e conteúdo teórico de ferro (em %) dos principais minerais portadores de ferro adaptado segundo Carvalho *et al.* (2014).

Mineral	Fórmula química	Teor 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
Pirrotita	$\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$	61,0
Limonita	$2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	59,8
Siderita	FeCO_3	48,2
Pirita	FeS_2	46,5
Ilmenita	FeTiO_3	36,8

O mercado de minério de ferro foi influenciado pelo crescimento acelerado experimentado pelo mundo, principalmente na última década, impulsionado pela ascensão da China. Este cenário contribuiu expressivamente para este recurso se tornar produto altamente lucrativo. Entretanto, esse mercado se mostra altamente dependente da indústria siderúrgica, que representa mais de 90% da demanda (Carvalho *et al.* 2014).

Vale, Rio Tinto e BHP Billiton correspondem às empresas de destaque expressivo no mercado, uma vez que concentravam cerca de 50% da capacidade mundial de produção de minério de ferro em agosto de 2012 (Carvalho *et al.* 2014).

2.2.3 Panorama Nacional

O Brasil possui 7,2% das reservas mundiais de minério de ferro, o que lhe garante o quinto lugar entre os países detentores de maiores quantidades deste minério. Em relação ao metal contido nestas reservas, o país destaca no cenário

mundial devido ao alto teor de ferro. O teor do metal nas reservas nacionais gira em torno de 50% a 60% nos minérios itabiríticos, além de 60% a 69% nos minérios hematíticos (Barcelos 2010).

De acordo com Lopes (2009), as reservas medidas e indicadas de minério de ferro no Brasil alcançaram 26 bilhões de toneladas em um quadro, correspondendo a 7% das reservas mundiais (370 bilhões de toneladas). A distribuição regional das reservas pode ser observada na Figura 2.1.

Tabela 2.2 – Países com as maiores reservas de minério de ferro (em milhões de toneladas) e os respectivos teores médios de ferro (%) segundo USGS (2013).

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	64,6
África do Sul	650	65,0
México	400	57,1
Total mundo	80.050	48,2

Os minérios de ferros explorados para fins comerciais correspondem ao minério itabirítico, minério hematítico e canga. Segundo Carvalho *et al.* (2014), os minérios ferríferos brasileiros possuem alto teor de ferro e quantidades pequenas de elementos indesejados nos processos siderúrgicos (e.g. enxofre, alumínio, fósforo e carbonatos).

No Brasil, as principais regiões produtoras de minério de ferro são o Quadrilátero Ferrífero (MG), a Província Mineral de Carajás (PA) e a região de

Corumbá (MS), contendo depósitos em rochas constituintes de Formações Ferríferas Bandadas (FFB).

Outros depósitos ferríferos de expressiva importância nacional podem ser encontrados no distrito da Bahia, Serro/Morro do Pilar, Porteirinha, Amapá, Jurucutu, Tocantins, Ceará, Bodoquena, Piauí e Maranhão (Maia 2011).

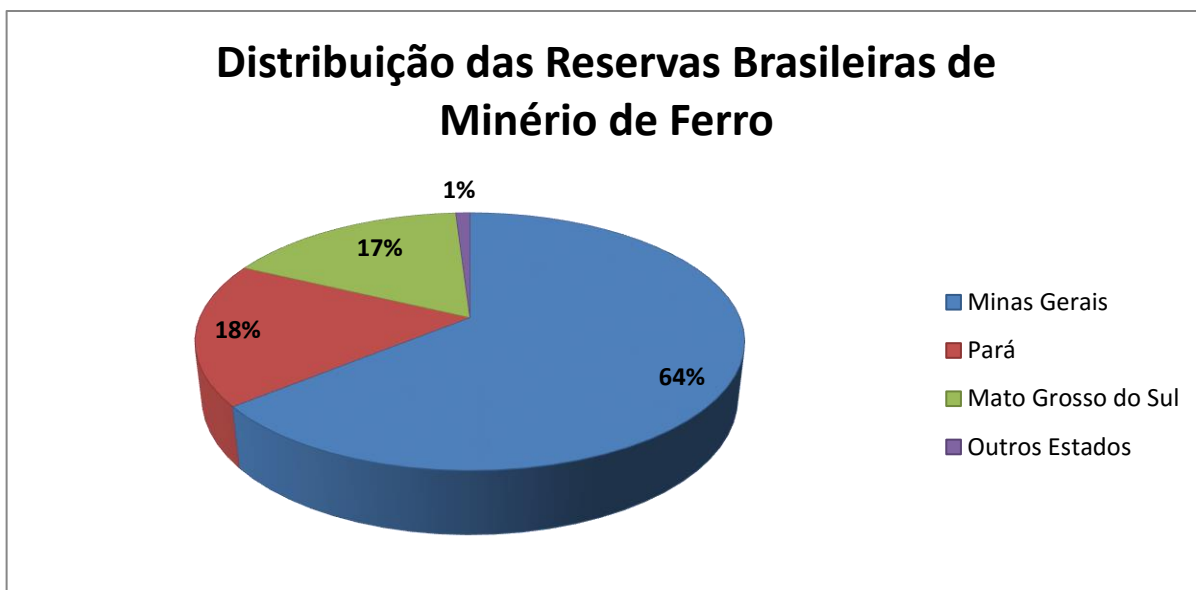


Figura 2.1 – Distribuição das reservas brasileiras de minério de ferro, de acordo com Barcelos (2010).

2.3 Quadrilátero Ferrífero

O Quadrilátero Ferrífero está situado na parte central do estado de Minas Gerais e destaca-se como uma região de grande concentração das reservas de minério de ferro. Nessa região, os depósitos são do tipo Lago Superior, e apresentam rochas quartzosas contendo óxido de ferro com alguns carbonatos e silicatos, denominados de itabiritos (Alecrim 1982 *apud* Nascimento 2010).

No Quadrilátero Ferrífero, o minério de Ferro pode ser dividido, basicamente, em minérios do tipo itabirítico e hematítico, ambos de alto teor. Esses minérios podem ser classificados de acordo com a composição mineralógica e textura que apresentam. O minério itabirítico é definido pelos bandamentos de óxidos de ferro e sílica, de espessuras que variam de milimétricas a centimétricas,

apresentando teores de ferro que podem variar de 20% a 55%. Já o minério hematítico apresenta composição mais homogênea, sendo constituídos pelo mineral hematita, com teores superiores a 64%. Estes são encontrados na forma de lentes imersas nas camadas de itabirito (Carvalho *et al.* 2014).

A Tabela 2.3 apresenta os principais tipos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, juntamente com a composição mineralógica de cada um destes (Nascimento 2010).

2.4 Guanhães - MG

O depósito de Jambreiro (Figura 2.2) localiza-se no terreno gnáissico-granítico do Complexo de Guanhães, embasamento da Faixa Araçuaí, a cerca de 20 km da cidade de Guanhães, no estado de Minas Gerais. O depósito possui aproximadamente 128 Mt de minério. Existe um enorme dobramento reclinado, na formação média do grupo de Guanhães, com um plano axial e mergulho para a direção SW, em que ocorre a formação ferrífera bandada (FFB).

O corpo Tigre possui comprimento de 1,5 km e larguras de 40 a 80 metros, o flanco sudoeste apresenta maior homogeneidade e continuidade. O flanco nordeste se apresenta sedimentado, gerando dois corpos menores denominados Cruzeiros e Galo (Silva *et al.* 2014).

Os corpos enriquecidos de anfibólio e dolomita, além de algumas partes xistosas ricas em muscovita ocorrem nas formações ferríferas bandadas (FFB). Essas formações são homogêneas, apresentando teor médio de ferro de 25% a 35%. Podem ser observados grãos de granulometria média a grosseira, com bandas milimétricas de hematita e baixas quantidades de magnetita alternada com finas bandas de quartzo (Silva *et al.* 2014).

Ainda segundo Silva *et al.* (2014), a formação ferrífera bandada friável apresenta tal característica devido ao intemperismo, sendo encontrada a uma profundidade de 60 a 80 m. Este tipo de minério é passível de sofrer concentração

eficiente, através de operações unitárias de beneficiamento mineral (e.g. classificação, separação gravimétrica e separação magnética).

Tabela 2.3 – Composição mineralógica dos principais tipos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero segundo Rosière et al. (1993).

Tipos de Minério	Componentes Principais		Acessórios**
Itabirito comum	Bandas claras	Quartzo	Hematita, Clorita, Sericita, Dolomita, Pirofilita, Óxido de Mn
	Bandas escuras	Óxidos de Fe*	Sericita, Quartzo, Pirofilita
Itabirito dolomíticos	Bandas claras	Dolomita	Quartzo, Óxido de Fe*, Pirofilita, Talco, Óxido de Mn
	Bandas escuras	Óxidos de Fe*	Quartzo, Dolomita, Óxido de Mn
Itabirito anfibolítico	Bandas claras	Tremolita/Actinolita, Hornblenda, Grunerita	Quartzo, Dolomita, Óxido de Fe*
	Bandas escuras	Óxidos de Fe*	Quartzo, Dolomita, Anfibólio
Minério de alto teor	Hematita		Magnetita, Quartzo, Pirofilita

*Hematita é o mineral-minério dominante. Magnetita aparece subordinadamente.

**Fosfatos de ferro podem ocorrer em todos os tipos. Sulfetos estão ocasionalmente presentes.

A reserva lavrável estimada pode chegar a aproximadamente de 48,5 Mt possuindo um teor médio de 28,1% de ferro, sendo que estes dados são referentes e restritos à zona intemperizada (Silva *et al.* 2014).

2.5 Separação Gravítica

Os métodos de separação gravítica consistem em segregar espécies minerais devido à diferença entre os pesos específicos apresentados por estas, através da força da gravidade e da resistência à queda oferecida pelo meio, de acordo com as propriedades dos fluidos (e.g. água, líquido denso, ou mistura de um líquido e partículas sólidas em suspensão; Gaudin 1939 *apud* Barcelos 2010).

A separação gravítica pode ser dividida em quatro grupos: operações de jigagem, operações de meio denso, operações de separação em lâmina d'água e operações centrífugas (Chaves & Chaves-Filho 2013).



Figura 2.2 – Localização do depósito de Jambreiro, de acordo com Silva et al. (2014).

Ainda de acordo com Chaves & Chaves-Filho (2013), as vantagens dos métodos densitários são: *capex* por tonelada mais baixa; não utilização de produtos químicos; impacto ambiental relativamente pequeno, exceto pela disposição de lamas. Porém o principal fator limitante da técnica corresponde ao elevado consumo de água, sendo indispensáveis projetos para sua recirculação.

Os métodos de concentração gravítica têm sido reavaliados devido ao aumento de custos com a utilização de reagentes na flotação, à simplicidade relativa das operações, além de produzirem pouca poluição quando comparados com os outros métodos (Wills 2006).

A escolha do processo a ser utilizado depende da granulometria de liberação e da distribuição das partículas segundo sua densidade (Barcelos 2010).

2.5.1 Jigagem

A jigagem corresponde à operação unitária de beneficiamento mais antiga e mais barata. A prática do seu princípio de funcionamento data de cerca de 4000

anos atrás, sendo a técnica objeto de constante desenvolvimento (Chaves & Chaves-Filho 2013).

2.5.1.1 Princípio de Funcionamento

A operação de jigagem consiste em uma separação hidráulica de acordo com a expansão e a contração de um leito de partículas pelo movimento pulsante da água. O resultado obtido corresponde a estratificação do leito, isto é, a separação das partículas em camadas de diferentes densidades crescentes desde o topo até a base (Sampaio & Tavares 2005). A Figura 2.3 mostra um esquema simplificado de um jigue.

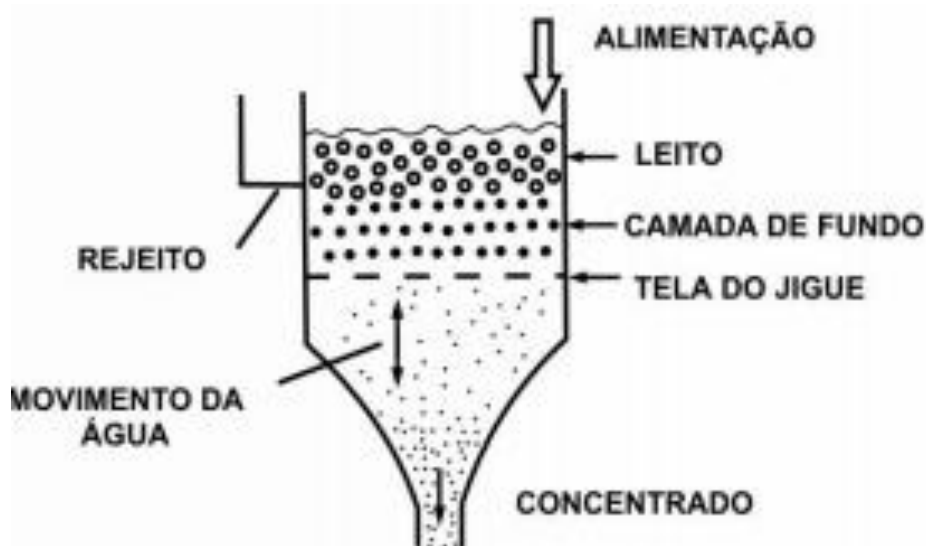


Figura 2.3 – Esquema simplificado de um jigue (Lins 2010).

O princípio de funcionamento de um jigue pode ser ilustrado através do uso de uma peneira de laboratório com certa quantidade de minerais heterogêneos sobre a mesma. Através da imersão da peneira no interior de balde com água, oscilando-a em movimentos verticais, resultará na separação das partículas de forma que as maiores e mais densas se depositam primeiro, enquanto as partículas menores e leves depositaram no topo. Os jigues comerciais realizam a mesma operação, entretanto, em grande escala (Kelly & Spottiswood 1982 *apud* Barcelos 2010).

O jigge é alimentado por uma de suas extremidades. A água presente na polpa da alimentação é chamada de água hidráulica e possui a função de transportar o minério através do equipamento. Já a água injetada para acertar o ciclo de jigagem é chamada de água *hutch* ou água de fundo (Chaves & Chaves-Filho 2013).

Os efeitos que contribuem para a estratificação nos jigues são: classificação por queda retardada, aceleração diferencial no início da queda e consolidação intersticial no fim da queda (Gaudin 1939 *apud* Barcelos 2010).

A classificação por queda retardada ocorre no momento em que as partículas em sedimentação chocam-se umas com as outras, alterando o regime de queda livre. Através deste mecanismo as partículas maiores e mais pesadas irão depositar primeiro, e as menores e mais leves acima delas, conforme Figura 2.4 (Wills 1992).



Figura 2.4 – Sedimentação retardada (Wills 1992).

A aceleração diferencial no início da queda ocorre porque as partículas estão em constantes acelerações e desacelerações, já que uma partícula imersa em meio fluido está sujeita, além de seu peso, a uma reação devido à massa do líquido deslocado (empuxo) e a uma resistência do meio ao movimento da partícula. Como apresentado na Figura 2.5, pode-se verificar que este mecanismo depende da densidade da partícula (Barcelos 2010).

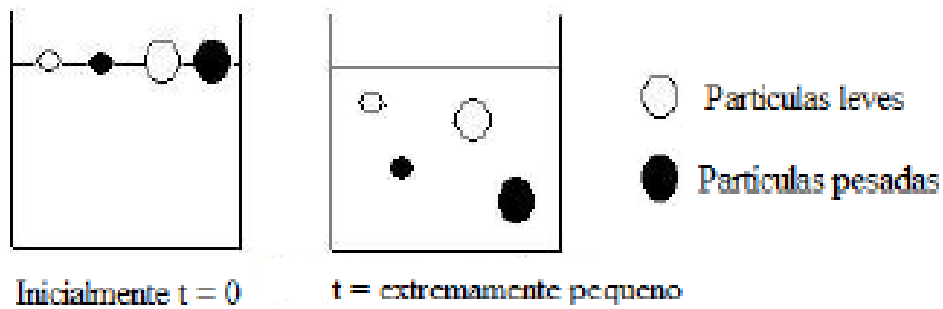


Figura 2.5 – Aceleração diferencial inicial (Wills 1992).

A consolidação intersticial observada no fim da queda ocorre devido às diferentes partículas não percorrem a mesma distância. Existe um espaço de tempo em que as partículas pequenas depositam-se sobre o um leito de partículas grossas e, posteriormente, depositam-se nos interstícios entre as partículas grossas, conforme mostrado na Figura 2.6 (Barcelos 2010).

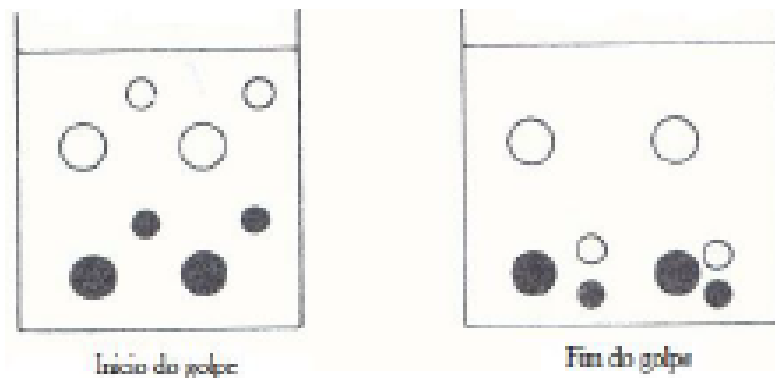


Figura 2.6 – Consolidação Intersticial (Wills 1992).

Portanto, é possível verificar a evolução dos mecanismos durante a estratificação no leito (Figura 2.7). Na operação de jigagem, quando o leito está expandido, a estratificação é essencialmente controlada por sedimentação retardada, sendo modificada por aceleração diferencial. Durante a compactação do leito, a estratificação passa a ser controlada pela consolidação intersticial (Barcelos 2010).

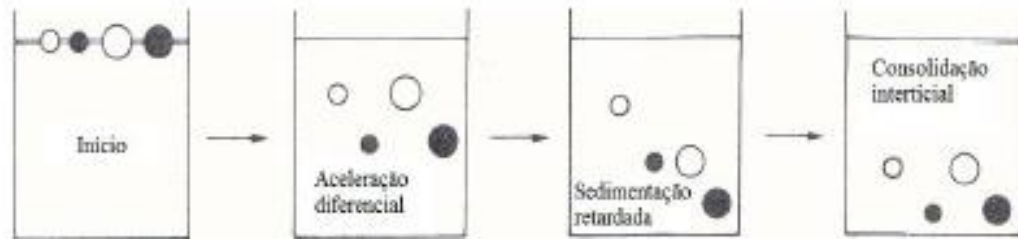


Figura 2.7– Sequência dos mecanismos presentes no jigge (Wills 1992).

Para aumentar a eficiência de separação do jigge, é comum serem empregadas várias câmaras em só um equipamento, cada qual com uma regulagem de pulsação diferente. De acordo com os ciclos de pulsação da água, o minério se separa em três camadas: as partículas leves por cima, as médias no meio e as pesadas por baixo (Chaves & Chaves-Filho 2013).

Para minérios de granulometrias menores, o mineral pesado atravessa o crivo sendo descarregado no fundo do jigge. Porém, para minérios de granulometrias grosseiras, torna-se necessária a regulagem da posição do septo de separação, de modo que o produto leve corra sobre o septo e o produto pesado descarregue por baixo dele (Chaves & Chaves-Filho 2013).

2.5.1.2 Variáveis Operacionais

As principais variáveis operacionais de um jigge são: água de processo, porcentagem de sólidos na alimentação, granulometria da alimentação, camada de fundo, profundidade do leito, amplitude e frequência das pulsações, taxa de alimentação e ciclo de jigagem (Barcelos 2010). Neste trabalho serão destacadas as seguintes variáveis: granulometria da alimentação, taxa de alimentação e extensão da camada de fundo.

Segundo Sampaio & Tavares (2005), a ação dos mecanismos de separação que atuam durante a operação de jigagem faz com que a influência da granulometria seja muito pequena quando comparado a outros processos de concentração gravítica. Entretanto, quanto maior a granulometria da alimentação, maior será a vazão da arca necessária, uma vez que as partículas grossas sedimentam mais rapidamente (Burt 1984 *apud* Barcelos 2010).

Da mesma forma, com um aumento da taxa de alimentação, maior vazão da arca será necessária, uma vez que as partículas se sedimentaram mais rapidamente.

As partículas da camada de fundo devem ser densas o suficiente para depositar junto ao crivo e leves o suficiente para dilatar durante a impulsão, já que a camada de fundo controla a taxa com que as partículas finas densas conseguem penetrar e percolar através do leito e do crivo, em direção ao fundo da arca. O tamanho deve ser uniforme e maior que a abertura do crivo, de forma a permitir a consolidação intersticial. Em geral, quanto mais densa e mais espessa for a camada de leito, menor será a recuperação do produto denso e maior será a perda de partículas grossas no produto leve (Barcelos 2010).

2.5.1.3 *Tipos de jiques*

O primeiro jique mecânico a ser empregado foi o Harz (Figura 2.8), desenvolvido na região mineira do Harz, situada na Alemanha. O minério é alimentado por uma extremidade do equipamento, sendo estratificado sobre o crivo pelos impulsos ascendentes e descendentes alternados do pistão. Ao atingir a extremidade de descarga, o minério se apresenta separado em camadas diferentes densidades (Chaves & Chaves-Filho 2013).

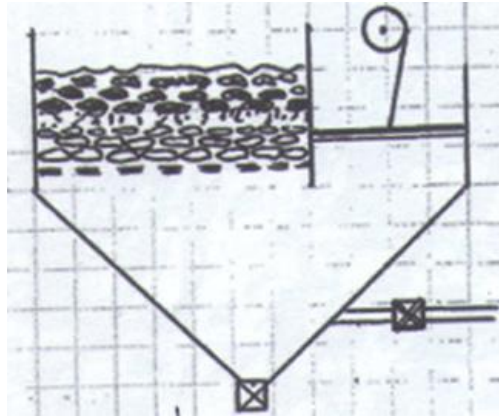


Figura 2.8 – Jigue Harz (Chaves & Chaves-Filho 2013).

O jig Baum (Figura 2.9), também desenvolvido na Alemanha, foi criado para beneficiamento de carvão. Neste equipamento o pistão sofre uma substituição por uma câmara de ar comprimido (Wills 2006).

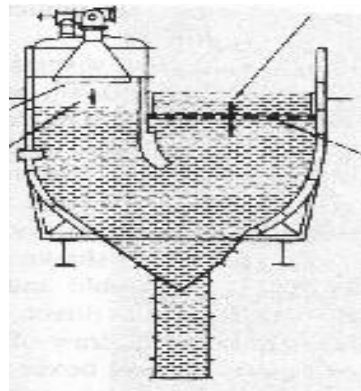


Figura 2.9 – Desenho esquemático do jig Baum (Wills 2006).

Para a separação das camadas de minerais pesados finos e minerais pesados grossos foram criados os jiges Jeffrey, McNally, Allmineral e Rose. Nestes equipamentos torna-se possível controlar a posição do septo de separação das duas camadas.

O jig Jeffrey (Figura 2.10) possui o septo de separação fixo e uma válvula rotativa de velocidade variável, mantendo a altura da camada de pesados constante de acordo com a posição da boia. Esta peça aciona um dispositivo eletromecânico que controla a velocidade de descarga (Chaves & Chaves-Filho 2013).

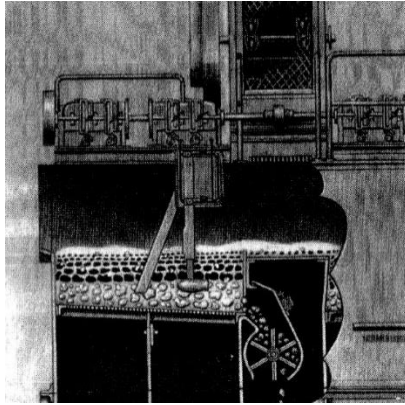


Figura 2.10 – Jigue Jeffrey (Chaves & Chaves-Filho 2013).

No jigue McNally (Figura 2.11), a boia aciona os martelos, que sobem e descem, dando passagem a partículas pesadas (Chaves & Chaves-Filho 2013).



Figura 2.11 – Jigue McNally (Chaves & Chaves-Filho 2013).

O jigue Allmineral (Figura 2.12) possui uma descarga controlada por uma válvula solenoide controlada por sensores de nível mínimo e máximo. Isto é, quando o nível mínimo é atingido, a válvula fecha e o produto pesado se acumula. Já quando o nível máximo é atingido, a válvula abre e descarrega o produto pesado. A descarga é feita sobre uma peneira desaguadora, o que torna a instalação mais compacta (Chaves & Chaves-Filho 2013).

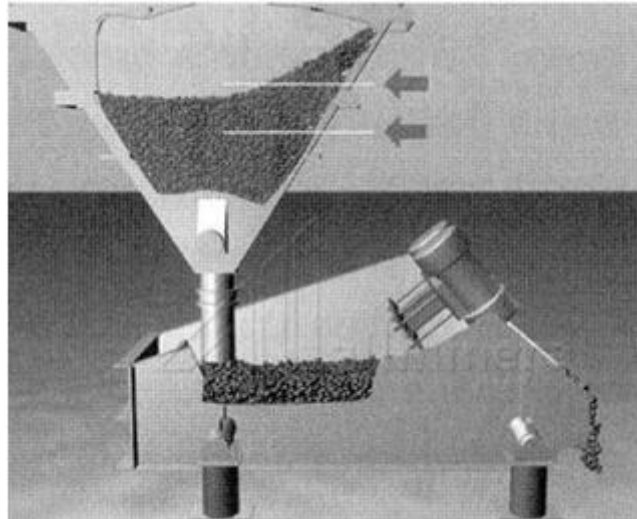


Figura 2.12 – Descarga do jigue Allmineral (Chaves & Chaves-Filho 2013).

O jigue Rose (Radar Operated Separation Equipment) detecta a altura da interface e controla eletronicamente a descarga através de um sistema de radar ou ultrassom (Chaves & Chaves-Filho 2013).

O jigue Takuba foi criado por japoneses, em 1954, com o objetivo de aumentar a área de jigagem e consequente capacidade do modelo Baum. Essa modificação foi possível através da colocação da caixa de vento sobre o jigue, economizando espaço (Chaves & Chaves-Filho 2013).

O jigue Batac (Figura 2.13) é totalmente automatizado e programável, com válvulas independentes de admissão e descarga de ar, o que possibilitou uma alta precisão de corte (Wills 2006)

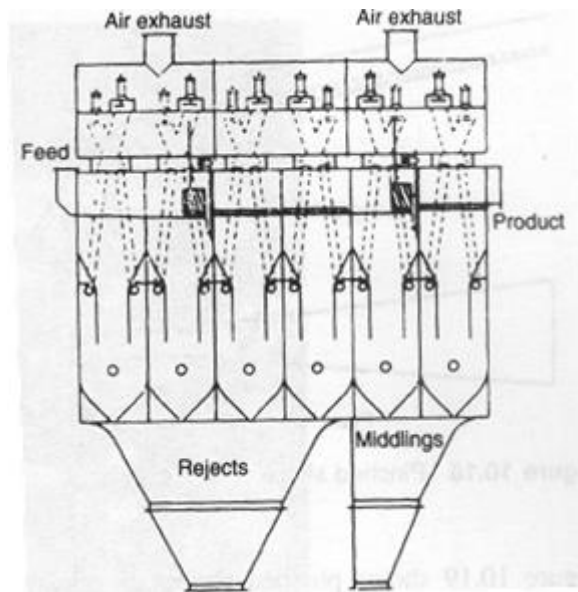


Figura 2.13 – Jigue Batac (Wills 2006).

Para a concentração de minerais de aluvião ou ouro, foram criados os jigues Denver, Yuba, Pan- American, jigue trapezoidal ou Alvenius, e o jigue IHC-Cleveland. Por se tratar de minérios pobres e finos, o concentrado é sempre descarregado no fundo e não pelo leito, o que diminui significativamente a capacidade dos mesmos em retirar os produtos pesados (Chaves & Chaves-Filho 2013).

O jigue Denver (Figura 2.14) possui duas câmaras, sendo que, cada uma possui um diafragma para a movimentação da água. O mecanismo responsável pelas pulsações consiste em uma biela que realiza movimento alternativo vertical dado por um eixo excêntrico, o qual atua sobre um diafragma de borracha (Tomáz 2015).

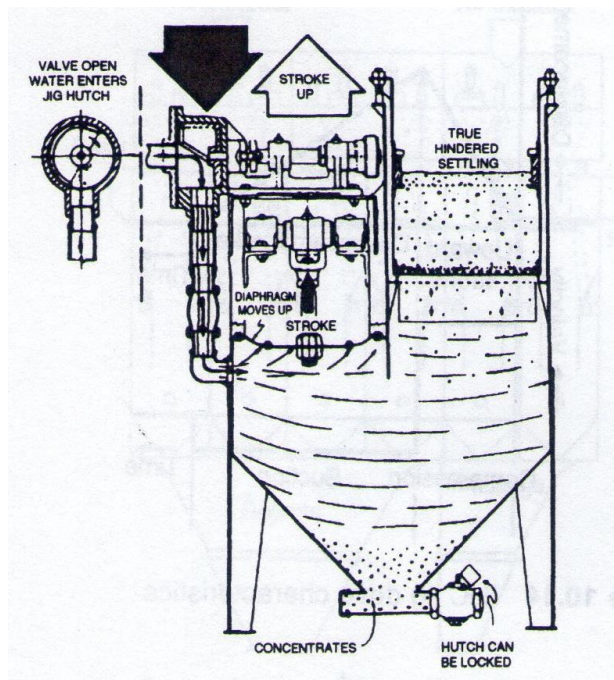


Figura 2.14 – Jigue Denver (Wills 2006).

O jigue Yuba surgiu da compactação do jigue Denver para operação embarcada em dragas que lavravam os fundos dos rios. Para aumentar a área útil embarcada, o diafragma foi posicionado na parede vertical do jigue (Tomáz 2015).

O jigue trapezoidal foi desenvolvido para ser o primeiro *cleaner* de concentrados de cassiterita. O equipamento não apresenta pistão ou diafragma, sendo que o movimento da água através do crivo ocorre com o movimento ascendente e descendente da caixa do jigue. A forma trapezoidal permite que a polpa escoe com menor velocidade, além de possibilitar o aumento da seção à medida que o material sofre uma redução no teor de mineral pesado. Assim permite-se maior espaço para ocorrer a jigagem, além de maior tempo para ocorrer a separação (Tomáz 2015).

O jigue IHC-Cleveland (Figura 2.15) foi desenvolvido pelo engenheiro Cleveland, que juntou vários jigues trapezoidais em paralelo. Tal disposição espacial tornou possível obter uma configuração circular com maior capacidade. A O sistema apresenta um sistema de alimentação central, sendo a descarga periférica de todos os jigues recolhida também por um sistema único (Wills 2006).

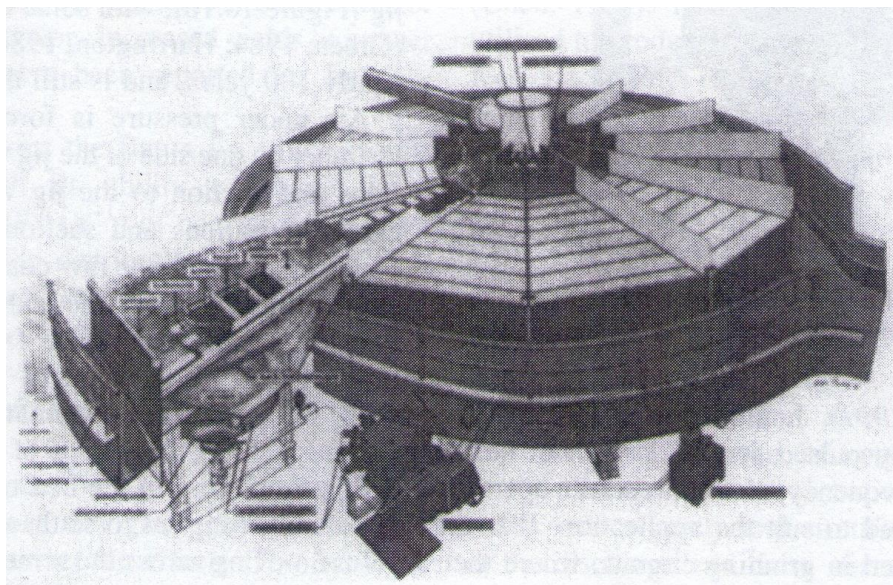


Figura 2.15 – Jigue IHC- Cleveland (Wills 2006).

O jigue Wemco-Remmer foi projetado para separação de minério de ferro, porém é mais utilizado para beneficiamento de carvão em densidades mais elevadas que as comuns (até 2,4 g/cm³) (Chaves & Chaves-Filho 2013).

Os diferentes tipos de jigues no mercado possuem essencialmente os mesmos princípios de operação. As diferenças entre eles estão associadas à geometria da arca, sistema de acionamento, forma de transporte do material, descarga dos produtos e sistemas de controle (Sampaio & Tavares 2005).

Os diferentes tipos de jigues podem ser classificados conforme a Tabela 2.4, sendo divididos em dois grandes grupos de acordo com a condição do crivo. Os jigues de crivo fixo correspondem àqueles em que a água se move através do material, podendo ser classificados de acordo com o mecanismo de pulsação (pistão, diafragma ou pneumático). Já os jigues de crivo móvel são aqueles que o material se move através da água (Sampaio & Tavares 2005).

2.5.2 Jigagem do Minério de Ferro

No passado, tentou-se utilizar o jigue IHC para concentrar minérios itabiríticos, porém ele não foi projetado para a capacidade necessária de concentrado de hematita.

No Brasil, foi utilizado um jigge Baum na usina de Piçarrão, em Nova Era (MG) que beneficiava itabirito na faixa granulométrica entre 8 mm e 2 mm. Na usina da Vale, em Itabira (MG), foi utilizada a operação de jigagem do *sinterfeedno* Cauê, através de jiges Wemco-Remmer (1,52 x 4,88 m, inclinação 6°21'), retirando concentrado de fundo e de leito (Chaves & Chaves-Filho 2013).

Tabela 2.4 – Tipos de jiges, segundo Sampaio & Tavares (2005).

Condição do crivo	Mecanismo de pulsação	Separação dos produtos	Tipo*	Aplicações mais comuns
Crivo fixo	Mecânico Pistão	Sobre o crivo	Harz	Carvão
		Através do crivo	COOLEY, COLLOM	Minérios
			Centrífugo (Kelsey e Altair)	Minérios
	Mecânico Diafragma	Sobre o crivo	Bendelari	Minérios
			JEFFREY	Carvão
		Através do crivo	Denver	Minérios
			Wemco/Remer	Minérios
			Yuba	Minérios
			Pan-Americano Placer	Minérios
			IHC	Minérios
	Pneumático	Sobre o crivo	Baum (McNALLY, ALLJIG)	Carvão, minérios
			Batac/Tacub (KHD, APIC, KOPEX)	Carvão, minérios, materiais secundários
Através do crivo		KHD	Carvão	
Crivo móvel	Mecânico Crivo Móvel	Sobre o crivo	HALKYN, JAMES	Minérios
			WILMOT PAN	Carvão
			Jigge de Rom (KHD)	Carvão
		Através do crivo	Hancock	Minérios
			Pressurizado (IPJ)	Minérios

*Nomes em maiúsculo representam marcas em minúsculas designações genéricas.

A usina de beneficiamento da Unidade de Brucutu, situada próxima a cidade de São Gonçalo do Rio Abaixo (MG), utiliza processos de jigagem do *sinter feed*, sendo responsável por 24% da produção anual da usina (Barcelos 2010).

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1 Materiais

Foram utilizados os seguintes materiais disponíveis no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET- MG, unidade Araxá:

Alimentador vibratório;

Amostra de minério de ferro;

Balança semi-analítica;

Baldes de plástico;

Bandejas metálicas;

Cronômetro;

Esferas de ferro;

Espátulas;

Estufas;

Jigue;

Lona plástica;

Microscópio óptico;

Peneirador vibratório de bancada;

Peneiras;

Picnômetros;

Pisseta;

Provetas;

Sacos plásticos;

Tela metálica;

Trena métrica.

3.2 Obtenção e Preparação das Amostras

O desenvolvimento prático do trabalho foi realizado no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG, unidade Araxá. As amostras utilizadas foram fornecidas pela empresa *Centaurus Metals*, correspondentes ao minério de ferro do depósito de Jambreiro, situado na localidade de São João Evangelista, no município de Guanhães (Minas Gerais).

A amostra cedida pela empresa foi estudada em trabalhos anteriores pelos alunos de graduação em Engenharia de Minas do CEFET-MG, unidade Araxá. Nestes trabalhos foram realizadas as operações de homogeneização e quarteamento do lote inicial, composto por aproximadamente 100 kg, para obtenção da amostra representativa.

Para o presente trabalho utilizou-se apenas uma fração do lote inicial de 100 kg, denominada de amostra inicial, cuja massa correspondeu a 29,87kg. A Figura 3.1 apresenta o fluxograma geral dos procedimentos realizados

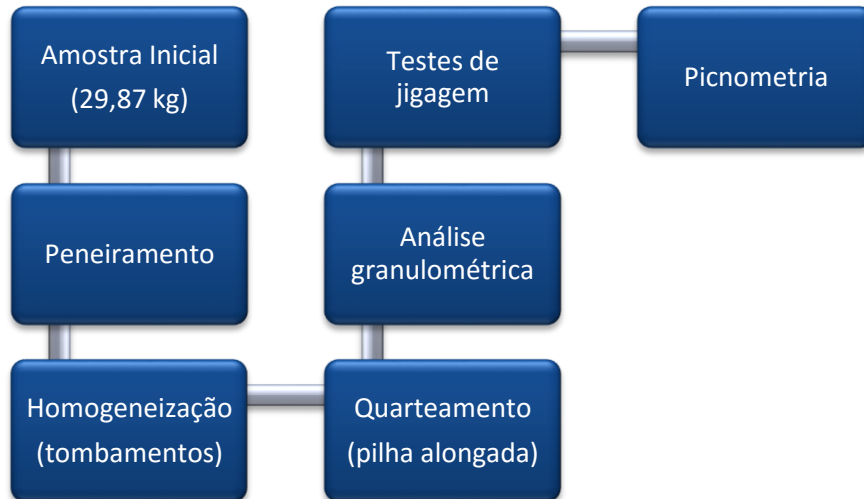


Figura 3.1 – Fluxograma geral dos procedimentos realizados.

O preparo das amostras iniciou-se com o peneiramento a seco manual, com auxílio de uma peneira de 8# (8 mesh¹), separando todo o material passante. Logo após, o material passante na etapa de peneiramento anterior foi novamente peneirado, com auxílio de uma peneira de 20#, separando o material retido e o passante. Através desta etapa, obteve-se 12,68 kg de minério compreendido na faixa granulométrica entre 8# e 20#, além de 17,195 kg de minério passante em 20#. Os materiais foram tratados separadamente, porém passaram pelos mesmos procedimentos.

Em seguida, através de sucessivos tombamentos em lona plástica (total de 32 tombamentos), foi realizada a etapa de homogeneização do material. Para a realização do quarteamento, foram constituídas pilhas alongadas (Figura 3.2), sendo estas divididas ao meio longitudinalmente (Figura 3.3) e, novamente, considerando um espaçamento equidistante, transversalmente (Figura 3.4). Desta maneira, foram obtidas alíquotas de, aproximadamente, 500 g. Estas alíquotas foram separadas e armazenadas para a posterior realização da análise granulométrica e testes de jigagem.

¹Mesh: número de aberturas por polegada linear.



Figura 3.2 – Pilha alongada.



Figura 3.3 – Pilha alongada dividida ao meio (longitudinalmente).



Figura 3.4 – Pilha alongada dividida em espaçamentos equidistantes (transversalmente).

3.3 Análises Granulométricas

As análises foram feitas através do método de peneiramento a seco no peneirador vibratório de bancada durante 20 minutos. A série de peneiras utilizadas para cada análise e suas respectivas aberturas está apresentada na Tabela 3.1 e Tabela 3.2.

Tabela 3.1 – Série de peneiras utilizadas na análise granulométrica do minério compreendido na faixa granulométrica entre 8# e 20#.

Abertura (mm)	Abertura (#)
2,38	8
1,70	10
1,18	16
0,84	20
0,60	30

Tabela 3.2 – Série de peneiras utilizadas na análise granulométrica do minério passante em 20#.

Abertura (mm)	Abertura (#)
0,84	20
0,60	30
0,35	45
0,25	60
0,18	80

O material retido em cada peneira e o passante da última peneira foram pesados em uma balança semi-analítica da marca Gehaka, modelo BG2000. A partir dos dados obtidos foram construídas as curvas granulométricas da alimentação dos testes de jigagem.

3.4 Testes de jigagem

Os testes foram realizados no jigue da marca MINERALMAQ, modelo JUST/16 1, no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG, unidade Araxá. Entretanto, devido a não utilização do mesmo, foi necessário, primeiramente, realizar ajustes para garantir seu correto funcionamento.

Na lateral esquerda do jigue foi inserida uma calha de metal para a descarga do material. Na lateral direita, foi inserida uma chapa de metal, para impedir qualquer vazamento. A rotação do motor foi invertida e o suporte para o crivo foi elevado, para garantir que o material leve conseguisse descarregar sobre a calha. Na parte inferior do jigue, foi fixada uma abertura de saída, para impedir vazamentos e, ao final da mangueira, foi colocada uma garrafa, definindo o volume de controle (Figura 3.5).



Figura 3.5 – Ajustes realizados no jigue.

Depois de realizar testes para o aprimoramento do jigue, foram iniciados os testes de acordo com as variáveis operacionais a serem utilizadas neste trabalho, conforme a Tabela 3.3. Para verificação da reprodutibilidade foram realizadas duplicatas de cada teste.

Tabela 3.3 – Variáveis operacionais utilizadas em cada teste.

Teste	Granulometria (#)	Alimentação (g/min)	Camada de Leito	Seixos (mL)
1	8# < x < 20#	826	3 a 4	120
2			2	72
3		1632	2	72
4			3 a 4	120
5	<20#	826	2	72
6			3 a 4	120
7		1632	3 a 4	120
8			2	72

Os testes foram realizados em dois dias, de modo que em um dia fossem realizados os testes referentes à taxa de alimentação menor e, em outro dia, fossem realizados os testes referentes à taxa de alimentação maior. Tal observação é válida, já que o regulador de alimentação do alimentador vibratório não consegue manter exatamente a mesma taxa, caso tenha ocorrido alguma alteração. Assim,

poderia ser garantida a reprodutibilidade da mesma taxa de alimentação dos testes realizados no mesmo dia.

O volume de seixos foi calculado com auxílio de provetas. Os seixos foram colocados em uma proveta de 1000 mL e, um volume conhecido de água foi adicionado até completar o volume. A diferença entre o volume da proveta e o volume de água adicionado, corresponde ao volume dos seixos.

Para a realização dos testes, primeiramente, a alimentação foi colocada no alimentador vibratório, sendo regulada de forma a manter uma alimentação constante. Em seguida, a tela correspondente à granulometria do material foi fixada, e os seixos colocados sobre a tela (Figura 3.6). Em seguida, um balde foi posicionado na descarga do material leve. A vazão de água foi acionada até completar totalmente o volume de controle e a arca do jigge, atingindo a calha de descarga de rejeito, escoando por esta. Foi regulada a vazão de água que escoaria pela calha de descarga de rejeito a uma taxa satisfatória para garantir o fluxo de material durante o teste (Figura 3.7). Posteriormente, a operação do jigge foi acionada e, então, o alimentador vibratório foi ligado. A operação foi realizada até exaustão do material alimentado.



Figura 3.6 – Tela e seixos sobre o crivo.

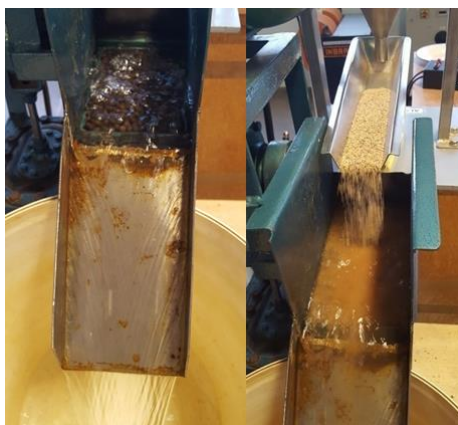


Figura 3.7 – Fluxo de água, à direita, e fluxo do material leve, à esquerda, na calha de descarga.

Ao final da alimentação, o fluxo de material para a garrafa foi interrompido, classificando-o como concentrado. O jigge, a vazão de água e o alimentador vibratório foram desligados.

O material leve, descarregado no balde, foi classificado como rejeito. Este material foi colocado em uma bandeja metálica (Figura 3.8), secado em estufa por 24h, a 100°C. Posteriormente, sua massa foi obtida em balança semi-analítica. O jigge foi lavado, retirando-se todo o material que ficou retido no crivo. Este material foi classificado como produto médio.



Figura 3.8 – Material leve (rejeito) na bandeja metálica.

O produto médio e o concentrado (Figura 3.9) foram colocados em bandejas metálicas, secados em estufa por 24h, à 100°C. A massa destes materiais foi obtida em balança semi-analítica.



Figura 3.9 – À direita, produto médio e, à esquerda, concentrado.

O procedimento citado foi realizado para todos os outros testes e suas duplicatas, alterando-se as variáveis operacionais (Tabela 3.3). Ao final do procedimento descrito, todos os produtos foram embalados e etiquetados.

3.5 Picnometria

A picnometria corresponde ao método mais prático para a determinação, com precisão razoável, da densidade de um material. Além disso, através desta determinação torna-se possível a determinação do teor dos produtos obtidos em cada teste. Tal consideração se torna válida caso seja assumida a premissa de que o material estudado e alimentado nos testes de jigagem apresenta composição diminerálica (hematita e quartzo).

Tal observação pôde ser confirmada através de análise mineralógica visual com o auxílio de microscópio óptico da marca Laborana. Através deste equipamento, o material estudado foi analisado e classificado como sendo composto por quartzo e óxidos de ferro, sendo predominantemente hematita. Tal análise foi realizada pelo geólogo e mineralogista, Francisco Valente, professor efetivo do CEFET-MG, unidade Araxá.

A técnica utilizada para o cálculo da densidade dos sólidos foi a picnometria, apresentada em Sampaio *et al.* (2007).

Os picnômetros utilizados (Gay-Lussac) possuem volume de 50 mL, e exigem balança com precisão de duas casas decimais. Para assegurar sua eficiência, as vidrarias foram calibradas de acordo com a ABNT NBR ISSO/IEC 17025.

Primeiramente, torna-se necessário determinar a densidade da água, através da Equação 1:

$$da = \frac{M4 - M1}{Vp} \quad (1)$$

Sendo: da = densidade da água;

$M1$ = massa do picnômetro;

$M4$ = massa do picnômetro + massa da água;

Vp = volume do picnômetro.

Em seguida, é necessário calcular o volume ocupado pela água, após colocar a amostra de minério no picnômetro, de acordo com a Equação 2:

$$Va = \frac{M3 - M2}{da} \quad (2)$$

Sendo: Va = volume da água;

$M2$ = massa do picnômetro + massa da amostra;

$M3 = \text{massa do picnômetro} + \text{massa da amostra} + \text{massa da água}.$

Então, pode-se calcular o volume da amostra, de acordo com a Equação 3, e a densidade da amostra, de acordo com a Equação 4:

$$V_s = V_p - V_a \quad (3)$$

$$d_s = \frac{M_s}{V_s} = \frac{M_2 - M_1}{(M_4 + M_2) - (M_1 + M_3)} \quad (4)$$

Sendo: $d_s =$ densidade da amostra;

$M_s =$ massa da amostra;

$V_s =$ volume da amostra.

Para definir a densidade foram realizadas três medições e efetuou-se a média. O procedimento foi composto pelas seguintes etapas:

- A)** Inicialmente pesou-se o picnômetro vazio (M_1), previamente limpo e seco;
- B)** Adicionou-se uma massa de 2g de amostra no picnômetro, o conjunto foi pesado e o valor do conjunto amostra e picnômetro (M_2) foi anotado;
- C)** Em seguida, o picnômetro foi completamente preenchido com água. Pesou-se o conjunto água, picnômetro e amostra (M_3) e anotou-se o valor indicado pela balança;
- D)** Posteriormente, o picnômetro foi totalmente esvaziado e limpo. Em seguida, adicionou-se água enchendo-se totalmente o recipiente. O conjunto foi pesado e o valor de sua massa (M_4) anotado. Subtraindo M_1 de M_4 obteve-se a massa de água (M_a);
- E)** A densidade da água foi calculada através do quociente da massa da água ($M_4 - M_1$) e volume do picnômetro (50 mL) conforme Equação 1;

- F)** Para encontrar o volume de água adicionado (V_a) no picnômetro com a amostra subtraiu-se M_2 de M_3 e dividiu-se o resultado pela densidade da água (d_a);
- G)** O volume de sólidos (V_s) pôde ser obtido ao subtrair o volume de água (V_a) dos 50 mL do picnômetro;
- H)** Por último, foi calculada a densidade dos sólidos, sendo tal valor o quociente de M_s por V_s .

A massa de 2 g de amostra foi padronizada em todos os testes para minimizar os erros associados a essa massa, mantendo o mesmo suporte para a comparação dos resultados.

O procedimento citado foi realizado para todos os testes e suas duplicatas, assim como para a amostra representativa da alimentação de cada granulometria.

A partir das densidades de sólidos, foram calculados os teores das alimentações e dos testes, através da Equação 5. Dado que a partir de uma amostra que basicamente é composta por dois minerais, a densidade média é proporcional ao teor de cada mineral.

$$\%MM = \frac{d_{mm}}{d_M} \left(\frac{d_M - d_g}{d_M - d_g} \right) \quad (5)$$

Sendo: $\%MM$ = teor de mineral-minério;

d_{mm} = densidade do mineral-minério;

d_M = densidade do minério;

d_g = densidade da ganga.

Após os cálculos dos teores de hematita presente na amostra de minério de ferro, é possível calcular o teor de ferro (% Fe) no concentrado de cada teste, considerando que a hematita é constituída de 69,96% de ferro, conforme a Equação 6. Uma vez que a amostra é, basicamente, composta por dois minerais, a densidade média é proporcional ao teor de cada mineral.

$$\%Fe = 0,6996 * \%MM \quad (6)$$

Foi necessário também, calcular as recuperações metalúrgicas e recuperações mássicas, de acordo com as Equações 7 e 8, respectivamente.

$$R_{met} = \frac{A*a}{C*c} \quad (7)$$

Sendo: R_{met} = recuperação metalúrgica;

A = massa de sólidos da alimentação;

a = teor da alimentação;

C = massa de sólidos do concentrado;

c = teor do concentrado.

$$R_{mas} = \frac{C}{A} \quad (8)$$

Sendo: R_{mas} = recuperação mássica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análises Granulométricas

A análise granulométrica de granulometria compreendida entre 8# e 20# (grosseira) está representada na Figura 4.1, onde pode ser observado um d_{50} igual a 1,05 mm e um d_{80} igual a 1,40 mm, parâmetros característicos para esta amostra.

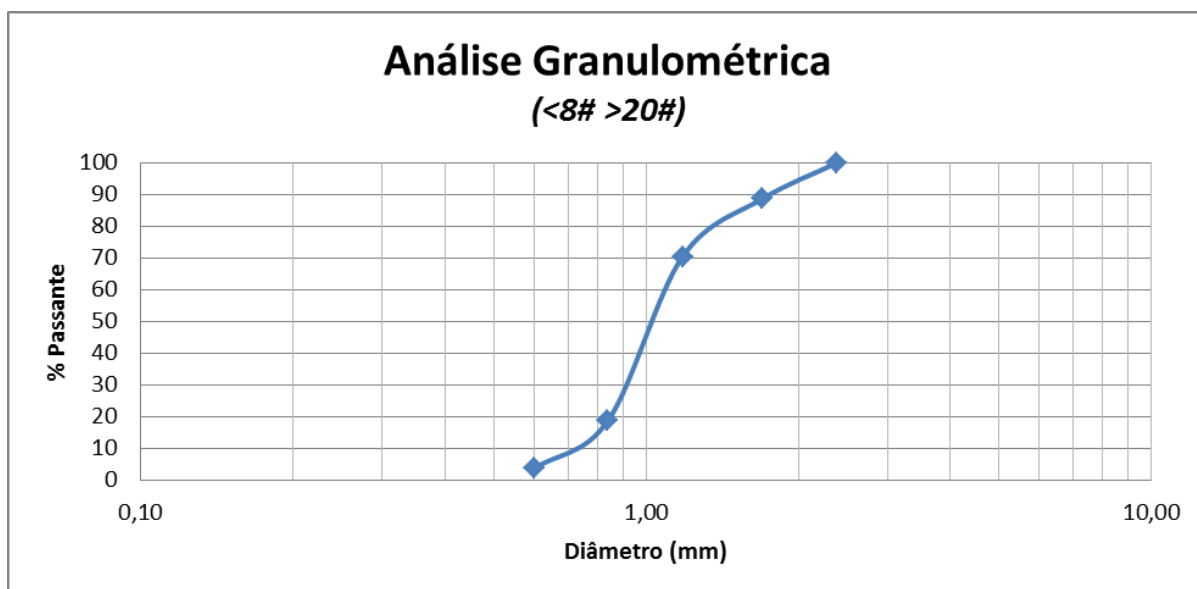


Figura 4.1 – Análise granulométrica da amostra de minério de ferro compreendida na faixa granulométrica entre 8# e 20#.

A análise granulométrica da amostra de minério de ferro de granulometria passante em 20# (fina) está representada na Figura 4.2, onde pode-se observar um d_{50} igual a 0,41 mm e um d_{80} igual a 0,60 mm, parâmetros característicos para esta amostra.

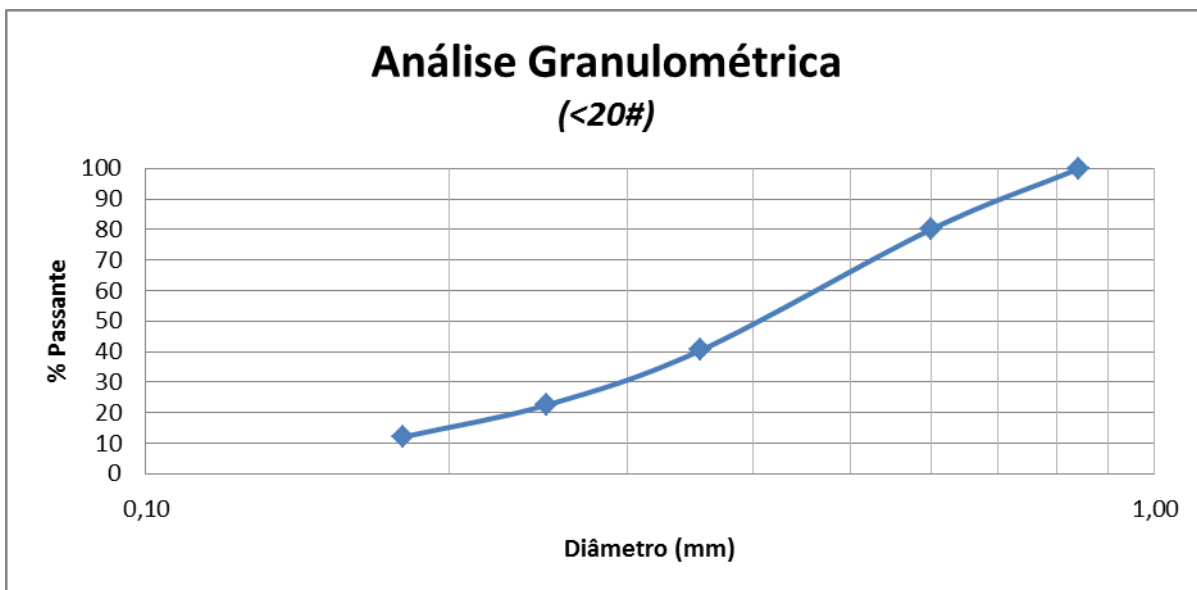


Figura 4.2 – Análise granulométrica da amostra de minério de ferro passante em 20#.

4.2 Testes de Jigagem

A Tabela 4.1 apresenta os resultados em relação às massas obtidas para a alimentação e os produtos gerados nos testes realizados no jig, juntamente com as perdas de massa envolvida. Nesta Tabela, os dados se referem aos testes, identificando-os como normal (N), duplicata (D) e triplicata (T). As massas registradas se referem à alimentação do teste (A), além dos produtos leve (R), pesado (C) e misto (M), conforme descrito na metodologia. Para cada teste foram calculadas as perdas em massa, sendo admissível uma perda máxima de 5%.

Ainda segundo a metodologia, os testes foram realizados em duplicata, visando comprovar a reprodutibilidade dos testes. Para o Teste 4 foi realizada uma triplicata, já que durante a execução do teste duplicado foi perceptível a variação das massas obtidas no rejeito. Ou seja, as duplicatas do teste em questão não foram suficientes para a comprovação da reprodutibilidade do teste nas condições citadas. Tal constatação foi obtida visualmente (características dos produtos gerados) e pela obtenção das massas obtidas no teste, mesmo durante a execução do mesmo.

Tabela 4.1 – Resultados em relação às massas obtidas para a alimentação e os produtos gerados nos testes realizados no jigue.

Teste	Granulometria (#)	Alimentação (g/min)	Seixos (mL)	A (g)	R (g)	M (g)	C (g)	Perda (%)		
1	N	8# < x < 20#	120	506	108,53	284,39	100,33	2,50		
	D			512	98,20	229,22	168,20	3,20		
2	N		72	510	1,72	341,40	159,97	1,40		
	D			504	3,87	321,55	176,86	0,30		
3	N		1632	72	508	2,70	370,09	126,31	1,80	
	D				514	5,43	346,08	154,44	1,60	
4	N			120	120	512	34,65	243,84	216,82	3,30
	D					511	120,95	202,38	178,73	1,70
	T	513				84,69	260,53	162,45	1,00	
5	N	< 20#		72	542	44,92	272,63	218,27	1,10	
	D				482	39,80	286,75	150,66	1,00	
6	N			120	120	522	30,27	349,93	129,52	2,40
	D		502			35,63	235,62	226,27	0,90	
7	N		1632	120	530	51,45	432,89	40,75	0,90	
	D				546	37,20	409,42	96,94	0,40	
8	N			72	72	508	57,86	299,43	144,16	1,30
	D					514	42,88	371,38	88,53	2,20

As perdas de massa foram baixas, o que demonstra os cuidados durante a execução dos testes. As perdas podem ocorrer durante a remoção dos produtos, na limpeza do jigue, na transferência do material para as bandejas metálicas e na pesagem.

Após uma análise visual do produto misto e do concentrado, foi perceptível a similaridade das amostras obtidas. Pensando em um processo contínuo para o jigue em questão, não haveria um produto misto, mas somente o rejeito (leve) e o concentrado (pesado). Diante deste cenário, o produto misto e o concentrado foram agrupados e homogeneizados, obtendo o concentrado final (C_f), conforme mostra Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resultados em relação ao agrupamento e homogeneização das massas do produto misto e do concentrado dos testes realizados.

Teste	Granulometria (#)	Alimentação (g/min)	Seixos (mL)	A (g)	R (g)	C _f (g)	
1	N	8# < x < 20#	120	506	108,53	384,72	
	D			512	98,20	397,42	
2	N		72	510	1,72	501,37	
	D		504	3,87	498,41		
3	N		1632	72	508	2,70	496,40
	D				514	5,43	500,52
4	N		1632	120	512	34,65	460,66
	D				511	120,95	381,11
	T	513			84,69	422,98	
5	N	8# < x < 20#	72	542	44,92	490,90	
	D			482	39,80	437,41	
6	N		< 20#	120	522	30,27	479,45
	D				502	35,63	461,89
7	N		1632	120	530	51,45	473,64
	D				546	37,20	506,36
8	N		1632	72	508	57,86	443,59
	D				514	42,88	459,91

Como proposto na metodologia, foram executados testes em duplicata (ou triplicata, no caso do Teste 4), visando melhor representatividade dos resultados. Diante dos resultados, torna-se possível uma aferição da reprodutibilidade destes ensaios duplicados (ou triplicados) em relação aos valores obtidos. As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam a comparação dos resultados obtidos para as duplicatas (ou triplicatas) em relação às massas de rejeito e concentrado obtidas nos testes, respectivamente.

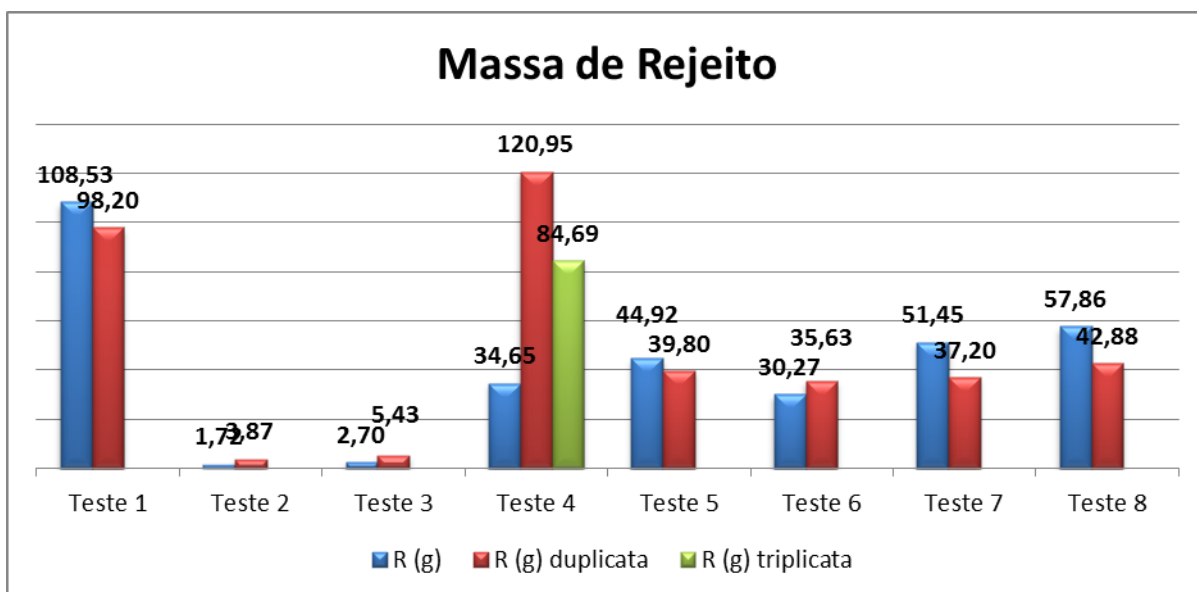


Figura 4.3 – Comparação das massas dos rejeitos obtidos nos testes realizados.

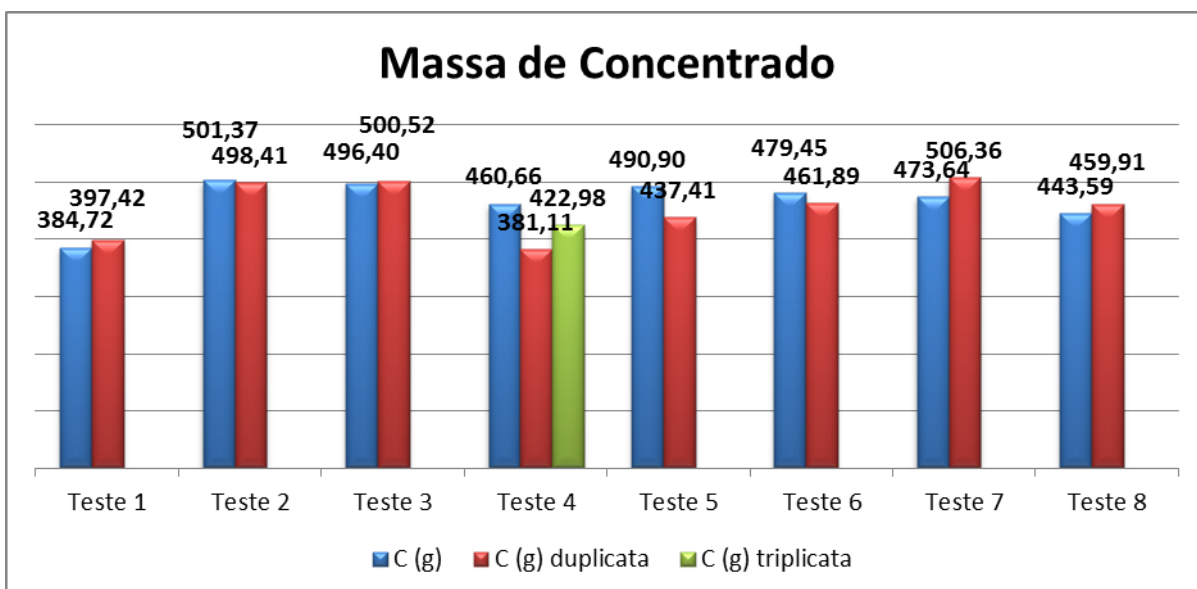


Figura 4.4 – Comparação das massas dos concentrados obtidos nos testes realizados.

Pela análise das Figuras 4.3 e 4.4, em relação às massas geradas nos rejeitos e concentrados, os testes foram considerados reproduzíveis, exceto para o Teste 4, em relação as massas de concentrado e rejeito e, para o Teste 5, em relação a massa de concentrado. Para estes testes, os valores de massas alteraram consideravelmente, apesar de apresentarem os mesmos parâmetros operacionais durante a execução dos ensaios.

Os resultados obtidos para as massas geradas nos rejeitos dos Testes 2 e 3, considerando a granulometria compreendida na faixa granulométrica entre 8# e 20# apresentaram alta transferência de massa para o produto pesado. Tal cenário pode ser atribuído ao fato que, por ser um material mais grosseiro, as partículas leves não sofreram arraste pelo fluxo de água em direção à calha de rejeito. Como a velocidade de sedimentação apresenta relação direta com a massa da partícula, as de granulometria grosseira acabaram sedimentando muito rápido no leito. Logo, elas foram encaminhadas para o produto pesado (concentrado), contaminando este material.

Para cada amostra representativa da alimentação dos testes do minério de ferro (granulometrias grosseira e fina), assim como para os rejeitos e os concentrados obtidos em cada teste, foram realizadas a metodologia de picnometria descrita (item 3.5), visando obter o teor de cada um destes materiais. Foram realizados três testes de picnometria, a fim de calcular a média das densidades encontradas, conforme a Tabela 4.3. O coeficiente de variação (CV) máximo admissível corresponde a 5%.

Pela análise da Tabela 4.3, torna-se possível observar que, para alguns produtos, não foram realizadas as três picnometrias, pois as massas não foram suficientes, já que foi padronizada uma massa de 2 g de sólido para cada teste.

O resultado de densidade do rejeito do Teste 2 (N) foi desconsiderado por apresentar uma densidade muito baixa para apenas um teste realizado, já que a valor de massa de sólidos da amostra era de 1,72 g, sendo inferior ao valor padronizado para as outras picnometrias.

A Tabela 4.4 apresenta os valores de teores de hematita (Fe_2O_3) e ferro (Fe) para a alimentação (a) e os concentrados (c_i), além das recuperações mássicas (R_{mas}) e metalúrgicas (R_{met}), calculados conforme a Equações 5, 6, 7 e 8, respectivamente.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de picnometria para a alimentação e os produtos obtidos nos testes realizados.

Teste	Produto	Densidade 1 (g/cm ³)	Densidade 2 (g/cm ³)	Densidade 3 (g/cm ³)	Densidade média (g/cm ³)	CV	
A (8# < x < 20#)		3,35	3,19	3,17	3,23	3	
1	N	C _f	3,50	3,50	3,34	3,45	3
		R	2,66	2,63	2,64	2,64	1
	D	C _f	3,58	3,46	3,58	3,54	2
		R	2,79	2,63	2,70	2,70	3
2	N	C _f	3,17	3,12	3,24	3,18	2
		R	1,11	-	-	1,11	-
	D	C _f	3,27	3,39	3,57	3,41	4
		R	2,98	-	-	2,98	-
3	N	C _f	3,72	3,63	3,63	3,66	1
		R	2,94	-	-	2,94	-
	D	C _f	3,35	3,29	3,22	3,29	2
		R	3,14	3,17	-	3,15	1
4	N	C _f	3,35	3,35	3,24	3,31	2
		R	2,63	2,77	2,75	2,72	3
	D	C _f	3,77	3,77	3,72	3,75	1
		R	2,83	2,77	2,83	2,81	1
	T	C _f	4,18	4,18	4,08	4,15	1
		R	2,85	2,79	2,66	2,77	3
A (< 20#)		3,50	3,50	3,50	3,50	0	
5	N	C _f	3,58	3,63	3,56	3,59	1
		R	2,70	2,73	2,79	2,74	2
	D	C _f	3,50	3,40	3,44	3,45	1
		R	2,91	2,73	2,77	2,81	3
6	N	C _f	3,70	3,58	3,46	3,58	3
		R	2,79	2,81	2,79	2,80	1
	D	C _f	3,57	3,79	3,70	3,68	3
		R	2,77	2,81	2,81	2,80	1
7	N	C _f	3,63	3,79	3,72	3,71	2
		R	2,81	2,75	2,71	2,76	2
	D	C _f	3,72	3,84	3,70	3,75	2
		R	2,77	2,95	2,87	2,86	3
8	N	C _f	3,72	3,77	3,77	3,75	1
		R	2,87	2,81	2,81	2,83	1
	D	C _f	3,84	3,84	3,84	3,84	0
		R	2,81	2,85	2,89	2,85	1

Para os cálculos foi considerado que o minério de ferro é formado apenas por sílica e hematita, sendo utilizadas as densidades de 2,65 g/cm³ para a sílica e 5,20 g/cm³ para a hematita.

Pode-se perceber que não seria viável realizar uma análise quantitativa dos dados, já que para alguns testes as recuperações metalúrgicas ultrapassaram o valor de 100%. Isso ocorre devido à imprecisão das picnometrias. Além disso, tal cenário pode ser atribuído ao fato de ser considerada a premissa que, após as etapas de homogeneização e quarteamento na preparação, todas as amostras teriam o mesmo teor. Esses fatores, na prática, podem mostrar divergências e afetar os resultados.

Tabela 4.4 – Teores, recuperações metalúrgicas e recuperações mássicas dos testes realizados.

Teste		Fe ₂ O ₃ (%)		Fe (%)		R _{mas} (%)	R _{met} (%)	R _{Nmet} (%)
		A	C _f	A	C _f			
1	N	36,62	47,29	25,60	33,08	78,00	100,72	60,69
	D		51,27		35,87	80,19	108,68	65,48
2	N		33,99		23,78	99,66	91,25	54,98
	D		45,45		31,80	99,23	122,74	73,96
3	N		56,27		39,37	99,46	150,17	90,48
	D		39,67		27,75	98,93	105,49	63,56
4	N		40,66		28,45	93,00	99,91	60,20
	D		59,82		41,85	75,91	121,83	73,41
	T		73,71		51,57	83,32	165,97	100,00
5	N		49,52		53,39	34,61	37,35	94,06
	D	47,29		33,08	92,84		87,85	52,93
6	N	52,97		37,06	91,62		96,88	58,37
	D	57,08		39,93	91,66		104,59	63,02
7	N	58,26		40,76	88,46		103,14	62,14
	D	59,82		41,85	91,47		109,35	65,89
8	N	59,82		41,85	90,20		107,94	65,04
	D	63,19		44,21	93,16		118,34	71,30

Entretanto, torna-se possível realizar uma análise qualitativa dos resultados obtidos. Para tal, os valores de recuperação metalúrgica foram normalizados. Assim,

o maior valor para recuperação obtido dentre todos os testes foi considerado como 100%, realizando proporções para os demais valores. Através do procedimento descrito, foram obtidas as recuperações metalúrgicas normalizadas (RNmet).

As Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam as comparações dos resultados obtidos nos testes e suas respectivas duplicatas (ou triplicatas) em relação aos teores de ferro no concentrado, além das recuperações metalúrgicas normalizadas e mássicas, respectivamente. Tal procedimento foi realizado anteriormente para as massas obtidas nos produtos.

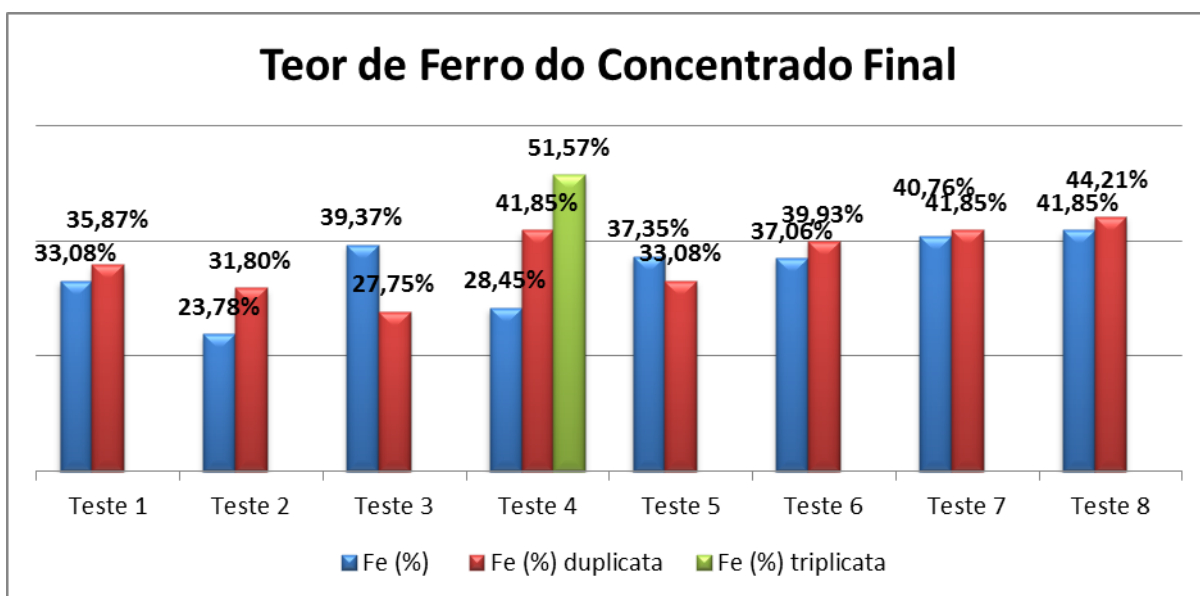


Figura 4.5 – Comparação dos teores de ferro no concentrado obtidos nos testes realizados.

Pela análise das Figuras 4.5 e 4.6, pode ser observado que os testes realizados para as amostras de minério de ferro passante em 20# obtiveram maior reprodutibilidade, já que os valores não apresentam variações bruscas. Já para os testes das amostras de minério de ferro compreendidas na faixa granulométrica entre 8# e 20# variaram bastante, demonstrando terem sido menos reprodutíveis.

A comparação dos resultados de recuperações mássicas obtidas entre as duplicatas (ou triplicatas), apresentados na Figura 4.7, foram os mais reprodutíveis para ambas as granulometrias, quando comparados as recuperações metalúrgicas normalizadas e os teores. Isso ocorre devido ao procedimento adotado para o

cálculo de recuperação mássica (Equação 8). Neste, não são levados em consideração os valores de teores, o que descarta os erros associados a imprecisão da picnometria. Portanto, confirma a representatividades das duplicatas, exceto para o Teste 4.

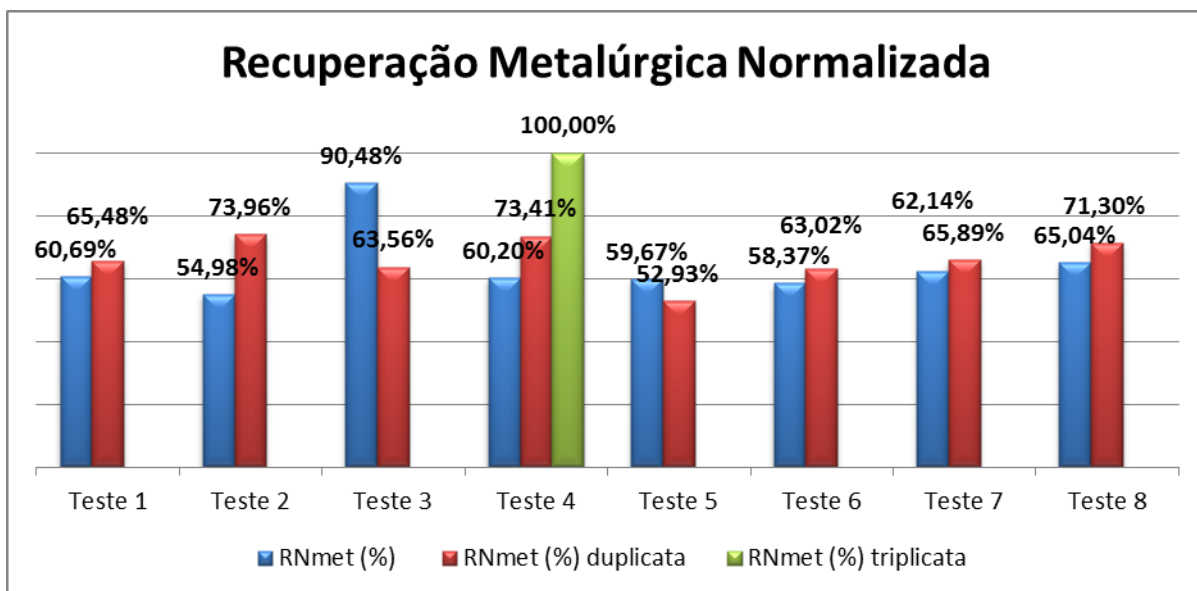


Figura 4.6 – Comparação das recuperações metalúrgicas normalizadas dos testes realizados.

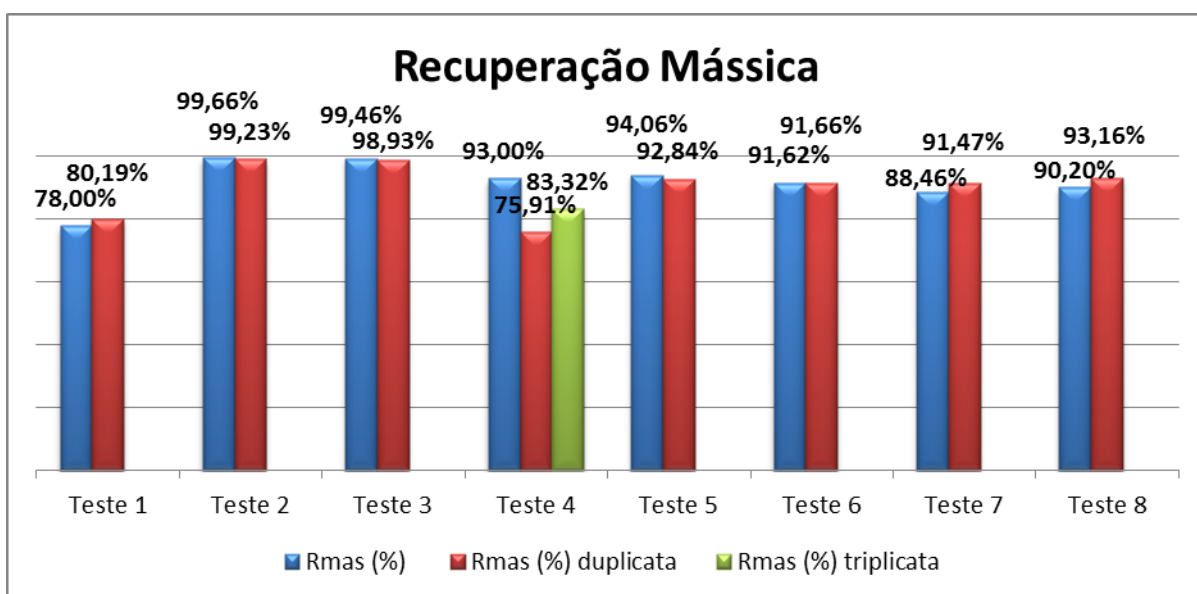


Figura 4.7 – Comparação das recuperações mássicas dos testes realizados.

Para a análise qualitativa dos dados em relações as variáveis utilizadas, foi realizada a média dos resultados dos testes, conforme Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Média dos resultados e variáveis dos testes realizados.

Teste	Granulometria (#)	A (g/min)	Seixos (mL)	Fe (%)	R _{mas} (%)	R _{Nmet} (%)
				C _f		
1	8# < x < 20#	826	120	34,47	79,09	63,08
2			72	27,79	99,44	64,47
3		1632	72	33,56	99,19	77,02
4			120	40,62	84,08	77,87
5	< 20#	826	120	38,50	91,64	60,70
6			72	35,22	93,45	56,30
7		1632	72	43,03	91,68	68,17
8			120	41,30	89,97	64,01

A Figura 4.8 mostra as comparações dos testes em relação as variáveis taxa de alimentação e extensão da camada de fundo para as amostras de minério de ferro compreendidas na faixa granulométrica entre 8# e 20#.

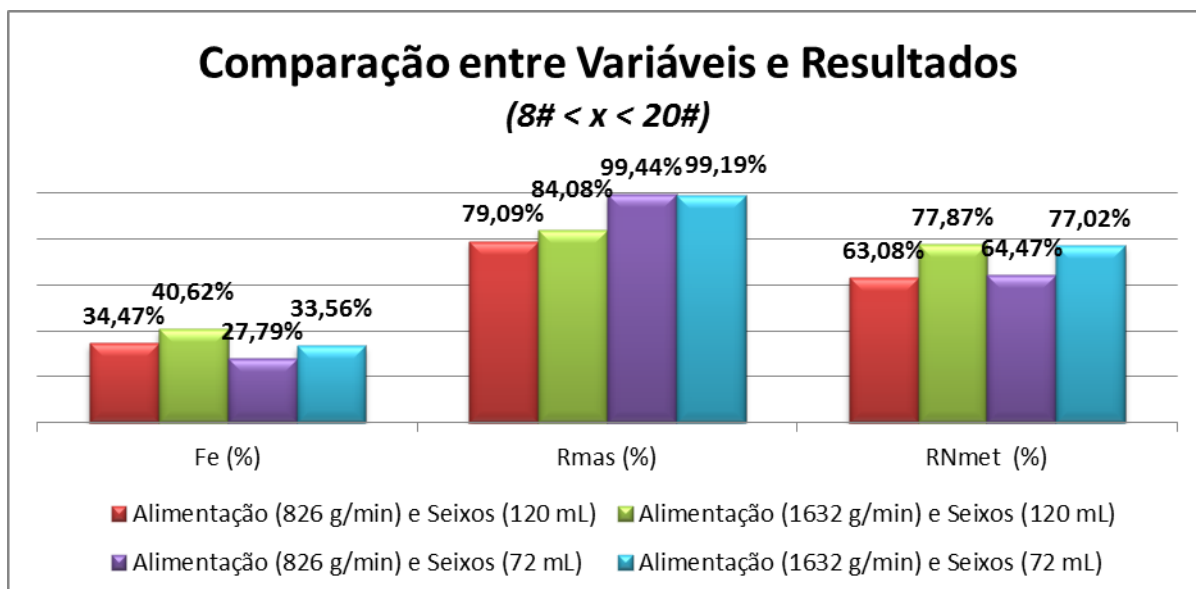


Figura 4.8 – Comparação das variáveis e resultados dos testes realizados para as amostras de minério de ferro compreendidas na faixa granulométrica entre 8# e 20#.

A partir da análise da Figura 4.8, pode-se observar que a variável volume de seixos se relaciona de maneira diretamente proporcional com o teor de ferro no concentrado. Já em relação ao parâmetro recuperação mássica, o comportamento desta variável se apresentou inversamente proporcional. Quanto à influência desta

variável na recuperação metalúrgica normalizada, não foi observada relação característica. Ou seja, a variação no volume de seixos empregado nos ensaios não afetou este parâmetro, uma vez que este permaneceu praticamente constante. Tal cenário pode ser atribuído à função desempenhada pela camada de leito (compostos por seixos). Esta função corresponde ao controle da taxa de transferência das partículas em direção ao fundo da arca, podendo penetrar e percolar através do leito e do crivo, seguindo para compor o concentrado.

Logo, com o maior volume de seixos, a transferência de massa para o concentrado sofreu maior controle, evitando que partículas leves fossem carregadas para este. Assim, observou-se uma menor massa de concentrado, refletindo em uma menor recuperação mássica. Enquanto isso, devido à menor contaminação do concentrado por partículas leves, percebeu-se um maior teor de ferro neste.

A constância observada nos valores de recuperação metalúrgica normalizada pode ser atribuída ao efeito sinérgico dos parâmetros discutidos anteriormente sob este. Ou seja, a taxa de partículas densas recuperadas no concentrado não foi afetada pela variação do volume de seixos, sendo que essa variável afetou principalmente a transferência de massa das partículas leves. Assim, mesmo apresentando menor massa no concentrado, com teor de ferro mais expressivo neste, a proporção partículas densas, presentes na alimentação, que foram encaminhadas para o concentrado (recuperação metalúrgica) se manteve praticamente inalterada. Essa constatação contradiz a afirmação de Barcelos (2010). Segundo este, quanto mais densa e mais espessa for a camada de leito, menor será a recuperação do produto denso. Tal discussão pode ser atribuída tanto para a taxa de alimentação de 826 g/min, quanto para a de 1632 g/min, uma vez que o comportamento observado entre a variável e os parâmetros foi similar em ambos os cenários.

Ainda segundo análise da Figura 4.8, pode-se observar que a variável taxa de alimentação se relaciona de maneira diretamente proporcional com todos os parâmetros analisados (teor de ferro no concentrado, recuperação mássica e recuperação metalúrgica normalizada). Tal observação pode ser atribuída tanto para

o volume de seixos de 120 mL, quanto para o de 72 mL, uma vez que o comportamento observado entre a variável e os parâmetros foi similar em ambos os cenários. A exceção fica a cargo do efeito dessa variável sobre a recuperação mássica empregando o volume de seixos de 72 mL. Ou seja, não foi observada influência da variação da taxa de alimentação sobre a recuperação mássica, sendo que esta permaneceu praticamente constante.

O comportamento geral entre a variável taxa de alimentação e os parâmetros (diretamente proporcional) está atrelado ao cenário de operação nessas condições. Ou seja, quando foi empregada maior taxa de alimentação, o efeito do fluxo de arraste para a calha de descarga do rejeito se mostrou menos pronunciado. Assim, tanto partículas densas quanto leves experimentaram maior tempo de residência sobre o leito. Com isso, foi observada maior transferência de massa para a arca, tanto de partículas leves quanto densas, seguindo para compor o concentrado.

Desta forma, foi observado maior teor de ferro neste produto, devido ao efeito mais pronunciado na transferência de massa de partículas densas, que sedimentaram mais rapidamente e, conseqüentemente, atravessando o leito e crivo primeiramente. Tal discussão corrobora com a maior recuperação metalúrgica, uma vez que a maior proporção de partículas densas, presentes na alimentação, foi encaminhada para o concentrado, aumentando este parâmetro. O acréscimo na recuperação mássica se deve à maior taxa de transferência de partículas, tanto leves quanto densas, para a arca. Estas partículas atravessaram o leito e crivo, seguindo para compor o concentrado.

A Figura 4.9 mostra as comparações dos testes em relação as variáveis taxa de alimentação e profundidade da camada de fundo para as amostras de minério de ferro passante em 20#.

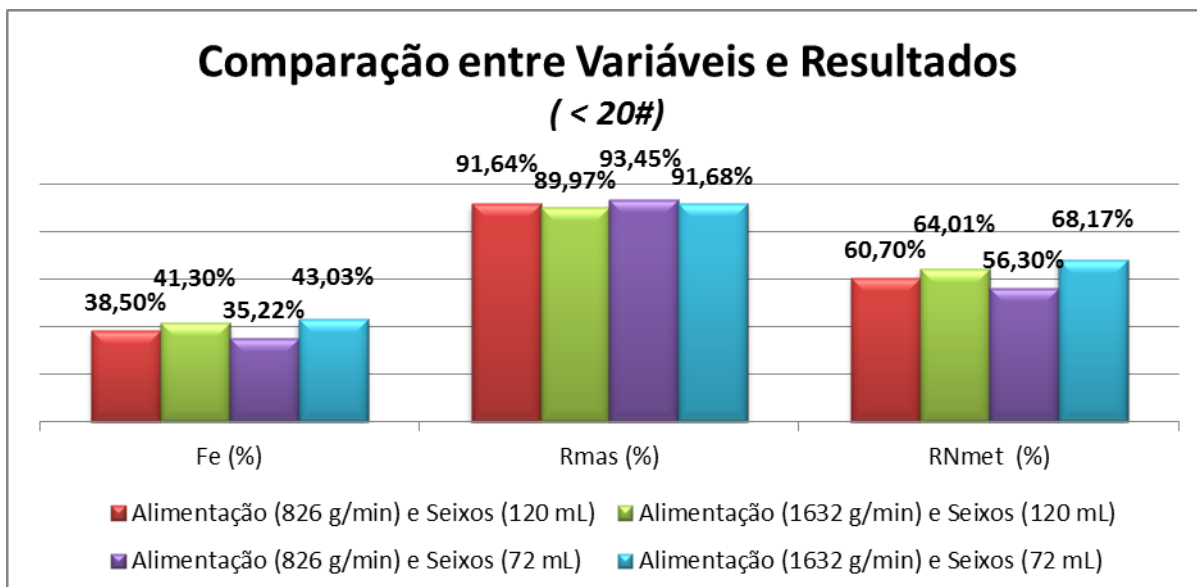


Figura 4.9 – Comparação das variáveis e resultados dos testes realizados para as amostras de minério de ferro passante em 20#.

A partir da análise da Figura 4.9, pode-se observar que a variável volume de seixos se relaciona de maneira diretamente proporcional com o teor de ferro no concentrado e recuperação metalúrgica normalizada, enquanto em relação ao parâmetro recuperação mássica, o comportamento desta variável se apresentou inversamente proporcional, mas de maneira bem sutil e pouco expressiva. Tal cenário pode ser atribuído, mais uma vez, à função que é empregada pela camada de leito (compostos por seixos), como discutido anteriormente. Neste cenário específico (granulometria fina), observou-se efeito menos expressivo sobre a recuperação mássica, em relação à granulometria grosseira.

Já em relação à recuperação metalúrgica normalizada, foi observado influência entre a variável e o parâmetro, ao contrário do cenário anterior (granulometria grosseira). Essa constatação pode ser atribuída à característica granulométrica das amostras. Ou seja, foi observada a ocorrência mais efetiva do mecanismo conhecido como consolidação intersticial. Esse fenômeno ocorre devido ao fato de diferentes partículas não percorrem a mesma distância, durante o ciclo de pulsação do jig. Existe um espaço de tempo em que as partículas pequenas depositam-se sobre o um leito de partículas grossas e, posteriormente, depositam-se nos interstícios entre as partículas grossas, conforme discutido no item 2.2.1.1

(Barcelos 2010). Logo, devido à menor granulometria das partículas, estas experimentaram menor resistência ao atravessarem os interstícios do leito. Como as partículas densas sedimentaram primeiramente, estas foram encaminhadas para o concentrado, aumentando o teor de ferro neste, além da recuperação metalúrgica normalizada. Enquanto isso, as partículas leves experimentaram maior tempo de residência sobre o leito, sofrendo sedimentação mais eficiente, seguindo para compor o concentrado. Assim, devido à contaminação por partículas leves no concentrado, foram observados valores de recuperações metalúrgicas normalizadas notadamente menores em relação à granulometria grosseira. Tal discussão pode ser atribuída para a taxa de alimentação de 826 g/min.

Ainda segundo análise da Figura 4.9, pode-se observar que a variável taxa de alimentação se relaciona de maneira diretamente proporcional aos parâmetros teor de ferro no concentrado e recuperação metalúrgica normalizada. Entretanto, apresenta relação inversamente proporcional com o parâmetro recuperação mássica, de maneira sutil e pouco expressiva. Tal observação pode ser atribuída tanto para o volume de seixos de 120 mL, quanto para o de 72 mL, uma vez que o comportamento observado entre a variável e os parâmetros foi similar em ambos os cenários.

O comportamento entre a variável taxa de alimentação e os parâmetros teor de ferro no concentrado e recuperação metalúrgica normalizada (diretamente proporcional) está atrelado ao cenário de operação nessas condições. Ou seja, quando foi empregada maior taxa de alimentação, o efeito do fluxo de arraste para a calha de descarga do rejeito se mostrou menos pronunciado. Assim, as partículas densas experimentaram maior tempo de residência sobre o leito. Com isso, foi observada maior transferência destas partículas para a arca, seguindo para compor o concentrado, uma vez que estas sedimentam primeiramente devido à maior densidade. Com isso, foi observada maior recuperação metalúrgica, além de maior teor de ferro no concentrado.

Em relação ao parâmetro recuperação mássica, o comportamento observado pode ser atribuído ao alto fluxo de partículas alimentadas no equipamento. Ou seja,

as partículas leves, por sedimentarem tardiamente, podem ter sofrido ação mais efetiva do fluido de arraste em direção à calha de descarga de rejeito. Assim, foi observada uma sutil redução na recuperação mássica.

Portanto, pode-se constatar que as variáveis em que se obteve o maior enriquecimento de ferro (43,03%) foram a granulometria mais fina (passante em 20#), empregando uma taxa de alimentação de 1632 g/min e volume de seixos correspondente a 72 mL (2 camadas de leito). Porém, não se atingiu as especificações de teor de ferro para setor siderúrgico que, segundo Silva (2011), para um melhor desempenho do processo de sinterização, o minério deve ter teor de ferro superior a 60%. Este fator torna-se interessante realizar novos ensaios utilizando etapas de concentração *cleaner* e *re-cleaner* para os concentrados obtidos nos testes, de forma a aumentar a recuperação de hematita.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como propósito avaliar os efeitos causados pela variação dos parâmetros operacionais na concentração do minério de ferro, via jigagem, comprovando que a granulometria, a taxa de alimentação e a profundidade da camada de fundo interferem sinergicamente no desempenho da operação.

Não foi possível realizar uma análise quantitativa dos resultados obtidos, devido à imprecisão da picnometria e por considerar que, após as etapas de homogeneização e quarteamento na preparação, todas as amostras tem o mesmo teor.

Porém, foi possível realizar uma análise qualitativa, determinando o comportamento do teor de ferro, recuperação metalúrgica e recuperação mássica. Para a granulometria grosseira (compreendida entre 8# e 20#), **pode-se observar que com o aumento volume de seixos, houve uma menor recuperação mássica.**

Porém, devido à menor contaminação do concentrado por partículas leves, percebeu-se um maior teor de ferro. Entretanto, a taxa de partículas densas recuperadas no concentrado não foi afetada pela variação do volume de seixos. Dessa forma, a recuperação metalúrgica se manteve praticamente inalterada.

Essa constatação contradiz a afirmação de Barcelos (2010). Segundo este, quanto mais densa e mais espessa for a camada de leito, menor será a recuperação do produto denso. Ainda em relação à granulometria grosseira, quando foi empregada maior taxa de alimentação, observou-se o comportamento diretamente proporcional com todos os parâmetros analisados (teor de ferro no concentrado, recuperação mássica e recuperação metalúrgica normalizada).

Para a granulometria fina, pode-se observar que a variável volume de seixos e taxa de alimentação se relacionam de maneira diretamente proporcional com o teor de ferro no concentrado e recuperação metalúrgica normalizada, enquanto em relação ao parâmetro recuperação mássica, o comportamento desta variável se apresentou inversamente proporcional, mas de maneira bem sutil e pouco

expressiva. Assim, o estudo realizado não atingiu as expectativas em relação ao teor de ferro para o setor siderúrgico, porém obteve-se a relação entre as variáveis com maior enriquecimento de ferro (43,03%), sendo estas a granulometria mais fina (passante em 20#), empregando uma taxa de alimentação de 1632 g/min e volume de seixos correspondente a 72 mL (2 camadas de leito).

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados alcançados sugerem a realização dos seguintes estudos futuros:

- Realizar estudos de etapas de concentração *cleaner* e *re-cleaner* para os concentrados obtidos nos testes, de forma a aumentar a recuperação de hematita;
- Realizar estudos utilizando outras variáveis operacionais de jigues.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alecrim J. D. 1982. *Recursos minerais do estado de Minas Gerais*: Belo Horizonte, 297 p.
- Barcelos H. O. 2010. *Jigagem de minérios itabiríticos*. MSc Dissertação, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 74 p.
- Burt R. O. 1984. *Gravity concentration technology*. Elsevier, Amsterdam, 605 p.
- Carvalho P. S. L., Silva M. M., Rocio M. A. R., Moszkowicz J. 2014. *Minério de ferro*. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, 197-234 p.
- Chaves A. P. & Chaves-Filho R. C. 2013. *Separação densitária*. São Paulo, Oficina de Textos, v.6, 240 p.
- Gaudin A. M. 1939. *Principles of mineral dressing*. McGraw-Hill Book Company Inc., New York, 554 p.
- Kelly E. G. & Spottiswood D. J. 1982. *Introduction to mineral processing*. New York.
- Lins F. A. F. 2010. *Concentração gravítica*. Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, 301-326 p.
- Lopes G. M. 2009. *Flotação direta de minério de ferro*. MSc Dissertação, Escola de Minas de Ouro Preto, Ouro Preto, 176 p.
- Maia E. S. 2011. *Pelotização e redução de concentrado magnético*. MSc Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio, Rio de Janeiro, 144 p.
- Nascimento D. R. 2010. *Flotação aniônica de minério de ferro*. MSc Dissertação, Escola de Minas de Ouro Preto, Ouro Preto, 116 p.
- Roberto J. B. 2010. *Influência dos diversos tipos litológicos nas operações de concentração da instalação de beneficiamento de Brucutu*. MSc Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, 119 p.
- Rosière C. A., Chemale Jr. F., Guimarães M. L. V. 1993. *Um modelo para a evolução microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero*. Geonomos, 65-84 p.
- Sampaio J. A., França S., Braga P. F. A. 2007. *Tratamento de minérios: prática laboratoriais*. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, 570 p.
- Sampaio C. H. & Tavares L. M. M. 2005. *Beneficiamento gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade*. UFRGS, Porto Alegre, 603 p.
- Silva J. N. S. 2011. *Siderurgia*. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (UFES), Belém do Pará, 110 p.
- Silva A. J. C. A., Montresor G. C., Fitzhardinge R. J., Mullati, J. C., Verde D. C. S. 2014. *Mineralização em ferro do depósito Jambreiro, Guanhães-MG*. In: Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador, 47 p.

- Takehara L. 2004. *Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros – fração sinter feed*. PhD Tese, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 421 p.
- Tomáz R. S. 2015. *Jigagem: uma revisão de literatura*. Universidade Federal de Goiás, Catalão, 58 p.
- USGS (United States Geological Survey). 2013. *Mineral commodity summaries*. United States Government Printing Office, Washington, 198 p.
- Wills B. A. 1992. *Mineral processing technology: an introduction to practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. Oxford.
- Wills B. A. 2006. *Wills' mineral processing technology: an introduction to practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. Amsterdam, Elsevier, 444 p.