



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

GUILHERME AUGUSTO GONÇALVES NOGUEIRA PEDROSA

RECUPERAÇÃO DOS MINERAIS DE FERRO DO SUBPRODUTO
ORIGINADO NA MINA LAGOA DAS FLORES, ITATIAIUÇU-MG

ARAXÁ - MG

2019

GUILHERME AUGUSTO GONÇALVES NOGUEIRA PEDROSA

RECUPERAÇÃO DOS MINERAIS DE FERRO DO SUBPRODUTO
ORIGINADO NA MINA LAGOA DAS FLORES, ITATIAIUÇU-MG

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do título de Engenharia de Minas.

Orientador: Prof^a Dra. Michelly dos Santos Oliveira

ARAXÁ-MG

2019

Guilherme Augusto Goncalves Nogueira Pedrosa

Recuperação dos minerais de ferro do subproduto originado na Mina Lagoa das Flores de Itatiaiuçu-MG

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, como requisito parcial para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia de Minas

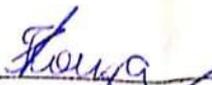
Araxá, 26 de junho de 2019



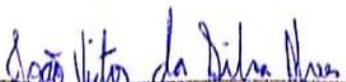
Presidente e Orientadora: Profa. Dra. Michelly dos Santos Oliveira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: Prof. Especialista Francisco de Castro Valente Neto
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: Profá. M^c. Tamiris Fonseca de Souza
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: Especialista João Victor Silva Alves
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder a conclusão de mais uma etapa em minha vida.

Ao meu pai, Oto José Pedrosa, por todo apoio e carinho de sempre. Ao meu irmão, Frederico, por toda amizade e companheirismo nessa caminhada. Vocês foram essenciais nesta conquista.

Agradeço a minha orientadora, Prof.^a Dr^a. Michelly Santos de Oliveira, por toda atenção, suporte e empenho para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Prof. Chico, que não mediu esforços para ajudar na coleta da amostra.

Ao meu amigo e técnico de mineração do laboratório de tratamento de minérios do CEFET-MG, João Victor da Silva Alves, disposto sempre a me ajudar com paciência e atenção.

A empresa Minerita e Lúcio Cerceau, pela oportunidade da realização deste trabalho, através das amostras e informações cedidas.

Aos meus amigos do CEFET, Tia Romba e Aosapão agradeço pela amizade e as histórias vivenciadas. Vocês amenizaram os dias difíceis e multiplicaram as alegrias.

A minha Família, pela ajuda e carinho de sempre. Amo vocês.

E por fim, a você mãe, Miriam Gonçalves Nogueira Pedrosa, por estar sempre presente em meus sonhos, me trazendo paz e aconchego nessa caminhada. Essa vitória é especialmente para a senhora.

RESUMO

No Brasil, a atividade minerária do minério de ferro é de grande importância socioeconômica no desenvolvimento do país, contribuindo de forma decisiva para a melhoria da qualidade de vida da sociedade. Entretanto, devido à maior demanda industrial atrelada à exaustão das jazidas, têm acarretado cada vez mais o descarte de resíduos em seu processo. Dessa forma, o cenário supracitado e o aumento dos preceitos do desenvolvimento sustentável têm estimulado a implementação de processos cada vez mais otimizados que visam a obtenção de maiores taxas de recuperação metálica do ferro e meios para a reutilização do material rejeitado. Assim, o presente trabalho visa à recuperação dos minerais de ferro do subproduto gerado na Mina Lagoa das Flores. A mina constitui-se uma das principais ocorrências de itabirito na região de Itatiaiuçu-MG, situada à borda noroeste do Quadrilátero Ferrífero. Atualmente, são produzidos cerca de 2,2 Mt/ano de estéril, no qual a reserva estimada de 370 Mt é composta por 70% de itabirito compacto, sendo que o teor médio encontrado na alimentação da planta de beneficiamento é de 55% de ferro. O subproduto é o rejeito proveniente das etapas de concentração gravítica e magnética, sendo destinado para a produção de blocos pré-moldados e lajotas. O referente material, mostrou ser composto majoritariamente por hematita e quartzo, com teor médio de ferro de 23,32% e grau de liberação 83,75% abaixo de 0,841mm. O método de concentração escolhido para o aproveitamento do minério de ferro foi a mesa vibratória, com propósito da eventual realimentação da porção concentrada à planta de beneficiamento da empresa e a produção de um rejeito mais puro em sílica. Com os resultados obtidos, foi feita uma análise estatística no software Mintab18, com propósito de otimizar as variáveis operacionais porcentagem de sólidos e inclinação, afim de maximizar o teor de ferro no concentrado aliado a uma boa recuperação mássica. O resultado do teste ideal, consistiu no cenário operacional com 30% de sólidos na alimentação e 4° de inclinação da mesa, onde o teor de ferro no concentrado e recuperação mássica foram de 39,6% e 59,74%, respectivamente. À vista disso, apesar do propósito da realimentação à planta de beneficiamento não ser alcançado, faz-se necessário o estudo de etapas subsequentes, a fim de aumentar a seletividade da operação. O rejeito apresentou uma areia fina com alto teor de sílica, o que pode ser estudado para gerar mais receitas além da produção de blocos pré-moldados e lajotas.

Palavras-chave: Minério de ferro, mesa vibratória, rejeito, recuperação metalúrgica.

ABSTRACT

In Brazil, the mining active of iron ore is of great socioeconomic importance in the country's development, contributing decisively to the improvement of the quality of life of society. However, due to the greater industrial demand linked to the exhaustion of the deposits, they have been causing more and more waste disposal in their process. In the way, the aforementioned scenario and the increase in the precepts of sustainable development have stimulated the implementation of increasingly optimized processes aimed at obtaining higher rates of metallic iron recovery and means for the reuse of the rejected material. Like this, the present work aims at the recovery of itabirite iron ore from the byproduct generated at Lagoa das Flores Mine. The mine is one of the main occurrences of itabirite in the region of Itatiaiuçu-MG, located at the northwest edge of the Iron Quadrangle. Nowadays, about 2.2 Mt / year of barren is produced, in which the estimated reserve of 370 Mt, is composed of 70% of compact itabirite, the average content found in the feed of the beneficiation plant is 55% iron. The by-product comes from the tailings of gravitational and magnetic concentration stages, and it is destined for the production of precast blocks and tiles. The material reference was shown to be composed mainly of hematite and quartz, with a mean iron content of 23.32% and a release rate of 83.75% below 0.841mm. The concentration method chosen for the exploitation of the iron ore was the vibratory table, whose objective was the possible feedback of the concentrated portion to the plant, where a sieve-size cut of 20 mesh was made in its feed. With the results obtained, a statistical analysis of the software Mintab18 was done, with the purpose of optimizing the operational variables: percentage of solids and slope, in order to maximize the iron content in the concentrate together with a good mass recovery. The ideal test result consisted of the operational scenario with 30% solids in feed and 4° in the angle of inclination of the table, where iron content in the concentrate and mass recovery was 39.6% and 59.74%, respectively. However, although the purpose of the feedback to the beneficiation plant is not achieved, it is necessary to study subsequent steps in order to increase the selectivity of the operation. The tailings showed a fine sand with high silica content, which can be studied to generate more revenue than the production of precast blocks and tiles.

Key words: Iron ore, vibratory table, tailings, recovery.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Participação do Ferro no Valor da Produção Mineral Comercializada-2016	19
Figura 2.2- Localização da Mina Lagoa das Flores e amostra local de itabirito compacto.....	21
Figura 2.3 - Mapa Geológico da mina Lagoa das Flores.....	22
Figura 2.4- Classificação e características dos separadores magnéticos	27
Figura 2.5- Mecanismo Aceleração diferencial.....	30
Figura 2.6- Mecanismo Sedimentação Retardada	31
Figura 2.7- Mecanismo Consolidação Intersticial	31
Figura 2.8- Mecanismo de Velocidade Diferencial em Escoamento Laminar...	32
Figura 2.9- Mecanismo de Ação das Forças Cisalhamento	32
Figura 2.10 - Ilustração de uma mesa oscilatória.....	33
Figura 2.11- Área de estratificação das partículas(adaptado)	34
Figura 2.12 - Mesa Concentradora: (a) estratificação vertical entre os riffles, (b) arranjo das partículas ao longo dos riffles, (c) distribuição na mesa.	35
Figura 2.13- Sedimentação de material a altas taxas de alimentação	36
Figura 3.1- Secagem das amostras.....	37
Figura 3.2- Pilha homogeneizada.....	38
Figura 3.3- Pilha longitudinal	39
Figura 3.4- Representação do quarteamento da pilha homogeneizada longitudinal	40
Figura 3.5- Metodologia de preparação da amostra.....	41
Figura 3.6- Homogeneização da Amostra (Mesa)	42
Figura 3.7- Pilha alongada da Amostra (Mesa)	42
Figura 3.8- Retirada das extremidades	43
Figura 3.9- Retirada dos segmentos.	43
Figura 3.10- Peneirador suspenso, utilizado para peneiramento a úmido.....	45
Figura 3.11- Estereomicroscopio Laborana.....	50
Figura 3.12- Classes de composição de partículas	50
Figura 3.13- Mesa Vibratória	51
Figura 4.1- Grau de Liberação da Hematita	54

Figura 4.2 - Difratograma de raios-X da amostra global.....	55
Figura 4.3 -Curva de Distribuição Granulométrica da Amostra Global	57
Figura 4.4 -Curva Granulométrica da Alimentação na Mesa.....	58
Figura 4.5 -Influência das variáveis operacionais sobre a Rec.Mássica	60
Figura 4.6 - Gráfico de interação para Rec. Mássica	61
Figura 4.7 -Influência das variáveis operacionais sobre a Rec.Metalúrgica	62
Figura 4.8 -Curva de contorno para o Teor de Ferro no concentrado	63
Figura 4.9 -Ensaio 6: Concentrado	Rejeito 63
Figura 4.10 -Otimizador de Resposta da mesa	65
Figura 4.11 - Resultados do Ensaio 5	66
Figura 4.12 -Visualização do Ensaio 5	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Principais minerais e seus respectivos teores de ferro.	16
Tabela 2.2 Produção beneficiada do minério de ferro 2015 e 2016.....	19
Tabela 2.3- Principais empresas produtoras.....	20
Tabela.2.4 - Especificação dos principais produtos	23
Tabela 2.5- Critério de concentração.....	29
Tabela 3.1- Peneiras utilizadas na análise granulométrica.....	44
Tabela 3.2- Peneiras utilizadas na análise granulométrica da mesa	46
Tabela 3.3- Variação dos parâmetros na realização dos ensaios na Mesa	52
Tabela 3.4- Matriz do Planejamento fatorial das variáveis operacionais	53
Tabela 4.1- Resultado do Teste de Picnometria da Amostra Global	55
Tabela 4.2- Análise Granulométrica da Amostra Global.....	56
Tabela 4.3- Análise Granulométrica da Mesa.....	57
Tabela 4.4- Resultados Médios dos Ensaios a Mesa	59
Tabela A.1.1- Resultados do Grau de Liberação.....	76

Sumário

1. Introdução	12
2. Revisão Bibliográfica	14
2.1 Minério de Ferro	16
2.1.1 Aspectos Gerais	16
2.1.2 Panorama Mundial	18
2.1.3 Panorama Nacional.....	18
2.1.4 Mina Lagoa das Flores.....	21
2.2 Principais vias de concentração do Minério de Ferro	23
2.2.1 Flotação	24
2.2.2 Separação Magnética.....	26
2.2.3 Concentração Gravítica	28
2.2.4 Mesa Vibratória	33
3. Metodologia	34
3.1 Obtenção e preparação da Amostra Global.....	37
3.2 Obtenção e Preparação da Amostra do Teste de Mesa.....	41
3.3 Caracterização da Amostra.....	44
3.3.1 Análise Granulométrica Amostra Global	44
3.3.2 Análise granulométrica da Amostra Mesa	46
3.3.3 Densidade	47
3.3.4 Difração de raios X.....	48
3.3.5 Cálculo do Teor das amostras.....	48
3.3.6 Grau de Liberação.....	49
3.4 Testes na Mesa Vibratória	51
3.5 Planejamento dos Experimentos	53
4. Resultados e Discussão	50
4.1 Caracterização	54
4.1.1 Grau de Liberação	54
4.1.2 Difração de raios-X	55
4.1.3 Análise Granulométrica da Amostra Global	56
4.1.4 Análise Granulométrica da Mesa.....	57
4.2 Ensaios na Mesa Vibratória	58
4.2.1 Teste Ideal.....	64
5. Conclusão	64

6. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	66
Referências	67
Apêndice A.1- Resultados do Grau de liberação.....	73

1. Introdução

A principal utilização do minério de ferro é essencialmente destinada à indústria siderúrgica para a produção de aço, sendo esta uma liga metálica muito importante na construção de automóveis, máquinas ferramentas em geral e elementos de suporte para construção civil (NASCIMENTO, 2010).

A mineração inicialmente explotava apenas os minérios naturalmente ricos. No entanto, a crescente demanda da indústria metalúrgica sobre o minério de ferro juntamente com a exaustão das jazidas de hematita levaram a necessidade do beneficiamento dos itabiritos compactos no Quadrilátero Ferrífero. Estas rochas apresentam em sua mineralogia pobre teor em *Fe* e maior incidência de sílica (FERREIRA *et al.*, 2015). Sendo assim, existe uma tendência em beneficiar minérios de ferro itabiríticos com liberação em tamanho granulométrico cada vez mais fino (FERREIRA, 2011).

Assim, o beneficiamento do minério de ferro tem aumentado cada vez mais o volume de resíduos gerados. Gomes (2017, p. 1) confirma que a indústria minerária é a maior geradora de resíduos, produzindo aproximadamente 65 bilhões de toneladas por ano, dos quais cerca de 21,54% das partículas apresentam granulometria menor que 0,15mm.

Este contexto aliado com o desenvolvimento sustentável e os requisitos do mercado tem propiciado a necessidade de instalação de processos cada vez mais otimizados que demonstram meios mais econômicos e práticos, visto que, a disposição dos resíduos gera somente despesas (NASCIMENTO, 2010; GOMES, 2017).

Dessa forma, a caracterização tecnológica dos rejeitos é de suma importância, pois proporciona informações da possibilidade ou não de sua recuperação ou criação de meios para seu posterior aproveitamento como subproduto da própria usina. Assim, o impacto ambiental é minimizado e cria-se verbas, onde antes havia somente despesas (BORGES *et al.*, 2008).

Portanto, o presente trabalho consiste num estudo de caso da Mina Lagoa das Flores, situada no Complexo Serra Azul a borda noroeste do Quadrilátero

Ferrífero na cidade de Itatiaiuçu-MG. Nesta mina, de acordo com Vasconcelos *et al.* (2012), são produzidos aproximadamente 2,2 Mt/ano de estéril, sendo 70% composto de itabirito compacto cuja jazida mineral é da ordem de 370 Mt”.

A mina é umas das referências na produção de concentrado de ferro itabiritíco, no qual o seu beneficiamento, após a jigagem, concentração em espirais e separação magnética, origina o subproduto denominado areia fina com granulometria abaixo de 3/4” destinado a construção civil. Assim, este material possui grande potencial para ser analisado a viabilidade da recuperação dos minerais de ferro inseridos em sua composição. Tendo como propósito a eventual realimentação do concentrado à planta de beneficiamento, através de um meio de concentração mais adequado.

2. Revisão Bibliográfica

Este tópico demonstra resumidamente uma breve revisão dos parâmetros gerais do minério de ferro, as principais vias de concentração em seu beneficiamento e as características da Mina Lagoa das Flores.

2.1 Minério de Ferro

2.1.1 Aspectos Gerais

O ferro é o quarto elemento mais abundante na crosta terrestre, possui massa atômica 56 e corresponde a um metal de transição. Entre os metais, é apenas superado pelo alumínio e possui concentração na proporção de 4,2% dentro da litosfera (WALDE, 1985). Este metal dispõe como característica ser maleável e dúctil, tem massa específica de 7,87 e quando equiparado a outros metais é um fraco condutor de eletricidade (MAPA, 2006).

Conforme Carvalho *et al.* (2014), existem diversas tipologias minerais que possuem o metal ferro como componente principal em sua composição química, porém, apenas a exploração dos óxidos demonstra maior viabilidade econômica para sua obtenção. Os principais minerais portadores e seus respectivos teores de ferro são demonstrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Principais minerais e seus respectivos teores de ferro.

Mineral	Fórmula Química	Teor de Ferro (%)
Goethita	$\text{FeO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	62,9
Hematita	Fe_2O_3	69,9
Ilmenita	FeTiO_3	36,8
Limonita	$2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	59,8
Magnetita	Fe_3O_4	72,4
Pirita	FeS_2	46,5
Pirrotita	$\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$	61,0
Siderita	FeCO_3	48,2

Fonte: Adaptado de Carvalho *et al.* (2014)

Geologicamente, os depósitos de minério de ferro podem ser classificados, em cinco categorias principais: (i) sedimentares acamadados; (ii)

formados por soluções hidrotermais;(iii) relacionados a atividades vulcânicas; (iv) relacionados a processos de metamorfismo e/ou deformação, e (v) resultantes de alteração e acúmulo em superfície (TAKEHARA, 2004).

Dentre estes depósitos, os sedimentares acamadados são os mais importantes, pois “[...]deram origem às formações ferríferas bandadas **BIF** (*banded iron formation*) conhecidas no Brasil como itabiritos” (LOPES, 2009, p.21). Os itabiritos são formações ferríferas bandadas metamórficas, deformadas e oxidadas (ROSIÈRE & CHEMALE, 2000). No qual, os minérios constatados neste tipo de depósito são mais enriquecidos e mais explorados (LOPES, 2009).

O Quadrilátero Ferrífero na região central do estado de Minas Gerais, com vértices nordeste em Itabira, sudeste em Mariana, sudoeste em Congonhas e noroeste em Itaúna, com área aproximada de 7000 Km² (TOTOU, 2010). “Nessa região, os depósitos de minério de ferro são do tipo Lago Superior e apresentam rochas quartzosas contendo óxido de ferro com alguns carbonatos e silicatos[...]” (Alecrim,1982, p.18 *apud* Nascimento, 2010). Sendo este tipo de ambiente deposicional, Lago Superior, responsável por 92,0% de todas as formações ferríferas bandadas existentes na crosta terrestre (MAZON, 2006).

Diante desse contexto, no Quadrilátero Ferrífero, o minério de ferro pode ser segregado em duas tipologias principais: o minério hematítico e o minério itabirítico. Sendo estes minérios, classificados de acordo com sua textura e composição mineral. O minério hematítico obtém a composição mais homogênea, portanto, mais ricos em ferro (teores superiores a 64%) e com as seguintes características texturais e físicas: (i) minério compactado; (ii) minério pulverulento com foliações, lineado ou granulado; (iii) minério com hematita de granulometria fina e sem estrutura interna (denominado *Blue dust*).

Já o minério itabirítico é estabelecido pela alternância de camadas de óxido de ferro e camadas de sílica, com teores de ferro que variam entre 20% e 55% no total e características texturais que variam de compacto ou friável, dependendo da taxa de atuação dos processos intempéricos. Este minério é classificado como a maior fonte de minério de ferro, pois as reservas de hematita já se apresentam bastante exauridas (CARVALHO, 2014).

2.1.2 Panorama Mundial

De acordo com a *United State Geological Service* (2018), os reservas mundiais de minério de ferro estão estimados em mais de 230 bilhões de toneladas.

A produção mundial do minério de ferro em 2017 teve um aumento de 20 milhões de toneladas em relação a 2016, após um aumento de 30 milhões toneladas em 2016 em relação a 2015. Apesar do aumento global na produção, 27 dos 50 principais países produtores de minério de ferro diminuíram a produção. Um exemplo são os Países da África Ocidental, que foram afetados pelo vírus Ebola (USGS, 2018)

No entanto, as principais jazidas concentram-se em poucos países, nos quais se destacam consecutivamente Austrália, Brasil, China, Índia e Rússia, correspondendo a aproximadamente a 82% da produção mineral em 2016. Sendo as reservas medidas e indicadas de minério de ferro no Brasil, estimadas em 12 bilhões de toneladas, correspondendo 5,2% das reservas mundiais (USGS, 2018).

2.1.3 Panorama Nacional

Segundo Departamento Nacional Produção Mineral (2017), em 2016, as substâncias da classe dos minerais metálicos corresponderam por cerca de 77% da produção mineral brasileira comercializada. Entre essas substâncias, oito equivalem a 98,6% do valor da produção, sendo estas: alumínio, cobre, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel e ouro. A venda dessas substâncias rendeu a economia minerária 71,9 bilhões de reais, com realce para o ferro por corresponder 63,4% da receita gerada (Figura 2.1).

Dessa forma, somente o valor da produção bruta e beneficiada do elemento metálico ferro gerou a indústria minerária brasileira a renda de 46,233 bilhões de reais. Industrialmente, a produção do minério de ferro em 2016, atingiu aproximadamente 421,358 Mt (milhões de toneladas) com um teor médio de 63,65%. Entretanto, em relação a 2015, houve uma diminuição aproximada 2,2% na produção, como demonstrado na Tabela 2.2.

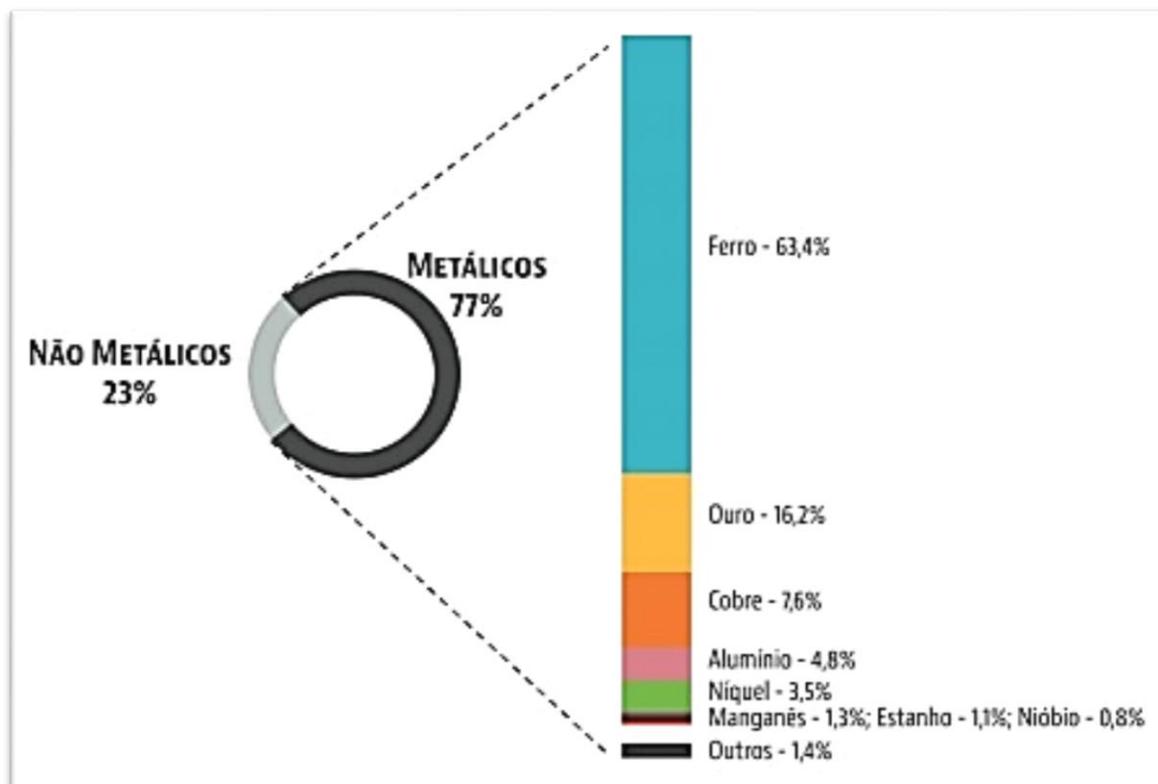


Figura 2.1- Participação do Ferro no Valor da Produção Mineral Comercializada-2016.
Fonte: (DNPM,2017)

Tabela 2.2 Produção beneficiada do minério de ferro 2015 e 2016.

Produção Beneficiada 2015			
Substância	Quantidade (toneladas)	Contido (toneladas)	Teor Médio
Ferro	430.836.327	275.589.840	63,97
Produção Beneficiada 2016			
Substância	Quantidade (toneladas)	Contido (toneladas)	Teor Médio
Ferro	421.358.009	268.183.617	63,65

Adaptado: (DNPM,2017)

A Tabela 2.3, demonstra os principais parques produtores e suas respectivas participações percentuais no valor total da comercialização da produção mineral do ferro. Sendo aproximadamente 77,3% da produção nacional, concentrada nos estados de Minas Gerais e Pará.

Tabela 2.3- Principais empresas produtoras.

Empresa	UF	Participação (%)
Vale S. A	MG, PA	77,29
Congonhas Minérios S. A	MG	7,93
Anglo American Minério de Ferro Brasil	MG	5,74
Gerdau Açominas S. A	MG	1,27
Mineração Usiminas S. A	MG	0,95
Itaminas Comércio de Minérios S. A	MG	0,88
Vallourec Mineração Ltda.	MG	0,78
Minerações Brasileiras Reunidas S. A	MG	0,76
Ferrous Resources do Brasil S. A	MG	0,53

Fonte:(DNPM, 2017)

2.1.4 Mina Lagoa das Flores

A Mina Lagoa das Flores está situada no Complexo Serra Azul, localizado a margem noroeste do Quadrilátero Ferrífero (Figura 2.2). Esta ocorrência constitui uma das principais fontes de minério de ferro da região, sendo pertencente à empresa Minerita Minérios Itaúna Ltda.

Vasconcelos *et al.* (2012) expõem que o Complexo Serra Azul atribui-se pelo cavalgamento das rochas do Grupo Itabira sobre as rochas mais novas do Grupo Piracicaba em flanco invertido, com mesma inclinação composto majoritariamente por Itabirito e associados às formações ferríferas, sendo uma unidade geológica de idade pré-cambriana. Na referente mina, são produzidos cerca de 2,2 Mt/ ano de estéril, no qual 70% composto de itabirito com textura compactada cuja reserva mineral é estimada na ordem de 370 Mt.

De acordo com Cerceau (2019), engenheiro responsável pela mina, atualmente as tipologias que estão sendo lavradas são: depósito residual canga (Rolados de Minério de Ferro), itabirito friável (Brechas), itabirito semicompacto, itabirito anfibolítico e itabirito compacto (Figura 2.3). Destas tipologias, 10% do itabirito anfibolítico, 20 % semicompacto e 70% do itabirito compacto estocados em pilhas que são designadas como minério de oportunidade e não mais estéril (VASCONCELOS *et al.* 2012) O propósito destas pilhas será atender a alimentação após a instalação da moagem que está em fase de estudos.

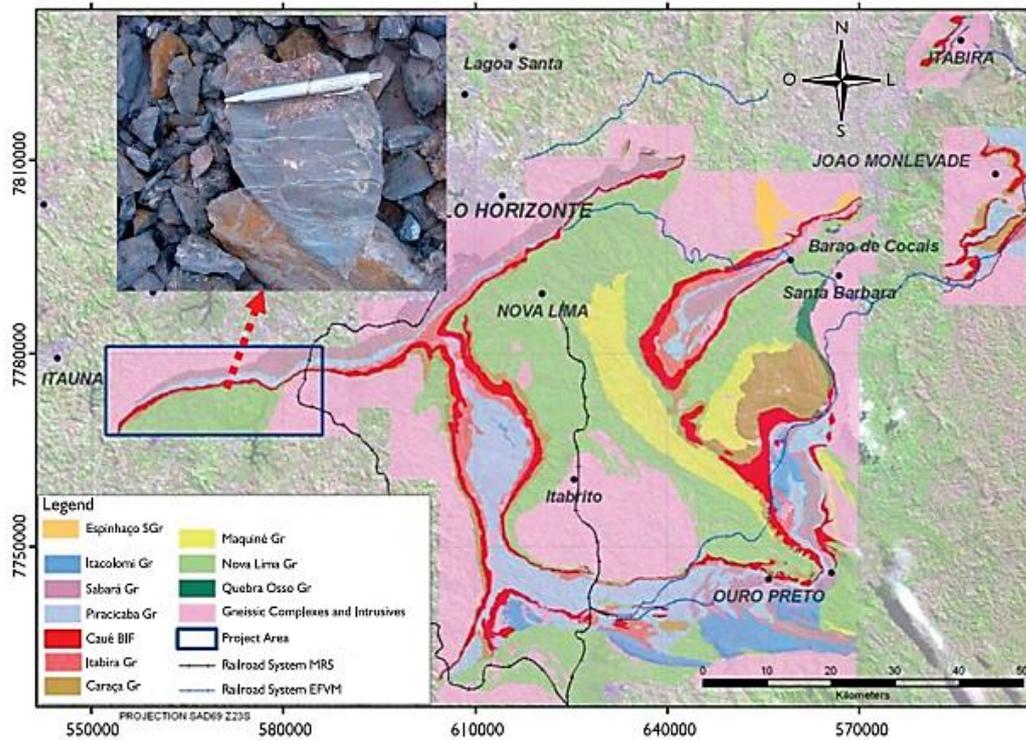


Figura 2.2- Localização da Mina Lagoa das Flores e amostra local de itabirito compacto.
Fonte: Vasconcelos *et al.* (2012)

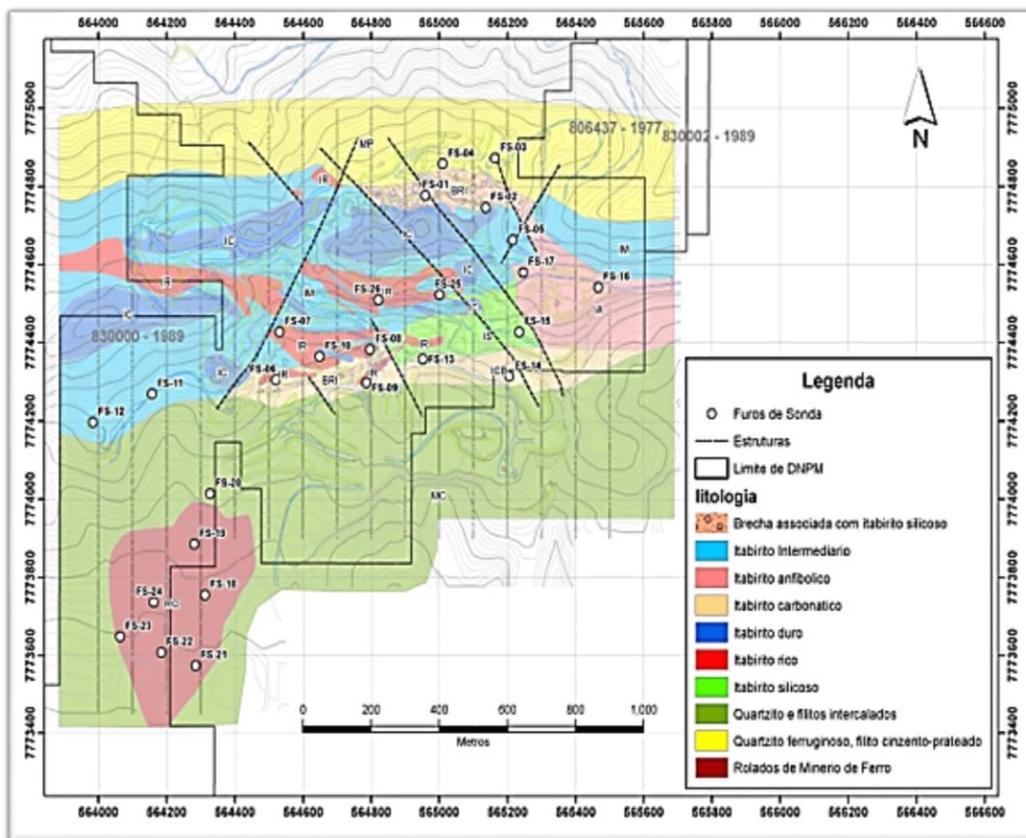


Figura 2.3 - Mapa Geológico da mina Lagoa das Flores.
Fonte: Vasconcelos *et al.* (2012)

Posteriormente a lavra, efetua-se a blendagem das tipologias restantes, visando à garantia do bom aproveitamento da reserva. Assim, um teor médio de 55% de ferro é encontrado na alimentação da planta de beneficiamento.

2.2 Principais vias de concentração do Minério de Ferro

O beneficiamento mineral pode ser conceituado como o conjunto de operações que são realizadas no minério bruto a fim de obter um produto rentável (TOTOU, 2010). Este tratamento, consiste em operações aos bens minerais objetivando a cominuição, classificação e a concentração relativa dos minerais de interesse, sem provocar alteração em seus parâmetros químicos ou físicos ao final (LUZ & LINZ, 2004).

Industrialmente, devido ao valor unitário da tonelada do minério de ferro ser relativamente baixo, a viabilidade econômica de seu beneficiamento, encontra-se em grandes escalas (milhões de toneladas), o que propicia grandes equipamentos e elevada capacidade (GOMES, 2009).

Entretanto, o beneficiamento do minério de ferro é considerado simples em relação a outros minérios (BROD, 2012). Onde a concentração, efetua-se através da combinação de alguns métodos. Os produtos de minério de ferro são estabelecidos geralmente pelos menores teores metálicos, granulometria e teores máximos de impurezas, conforme demonstrado na Tabela 2.4. Estas exigências variam de acordo com as propriedades física, química, mineralógica do minério e as especificações da indústria siderúrgica, cujos teores mínimos de ferro são da ordem de 64% (LOPES & LIMA, 2009).

Tabela.2.4 - Especificação dos principais produtos. Alterado: (Schobbenhaus & Coelho, 1986)

Denominação	Especificações principais			
	Tamanho (mm)	%Fe	%P(máx.)	Umidade (%)
Granulado comum	12,5 a 152,4	68,0 a 69,0	0,045	1
Granulado peneirado	12,5 a 152,4	68,0 a 69,0	0,045	1
<i>Pebble</i>	10,0 a 75,0	Min 64	0,08	2,0 a 4,0
<i>Natural pellet</i>	5,0 a 25,0	66,0 a 68,0	0,06	2,0 a 4,0
<i>Run of mine</i>	12,5 a 200	min 64	0,08	2,0 a 4,0
<i>Sinter feed D</i>	<6,5	Min 64	0,05	5
<i>Standard sinter feed</i>	<6,36	64,5	0,07	4,0 a 6,0
<i>Pellet feed</i>	<1,0	67,5	0,018	8

Standard Sinter Feed: %SiO₂ entre 4 e 6%

Pellet Feed: %SiO₂<2%

Logo, para o tratamento de minérios de ferro ricos realiza-se a cominuição, classificação e deslamagem. Um exemplo é o polo minerário de Carajás, onde apenas uma etapa de britagem e classificação são exigidas (Brod, 2012). Porém, como grande parte dos depósitos de ferro no Brasil estão exauridos, a introdução de operações de concentração gravítica, magnética e flotação são necessárias afim de enriquecer e minimizar as impurezas inseridas no minério de ferro (NASCIMENTO, 2010).

2.2.1 Flotação

A flotação é um processo de separação de partículas sólidas que consiste na exploração da diferenciabilidade das propriedades superficiais das espécies existentes, baseando-se no controle dos distintos graus de hidrofobicidade dos minerais suspensos numa polpa, através do emprego de reagentes químicos seletivos (MARIA, 2009).

Peres (1996) *apud* Mazon (2006) afirmam , que o entendimento do caráter hidrofóbico de uma partícula, está associado à sua molhabilidade pela água. Logo, partículas mais hidrofóbicas possuem maior aversão por água. O conceito antagônico de hidrofobicidade é denominado hidrofilicidade. Deve-se ressaltar também, os compostos químicos são classificados em dois grupos: polares e apolares. Este conceito é importante, pois, ambas partes com mesmas características químicas possuem boa afinidade.

Neste contexto, nos processos de flotação, a fase líquida é sempre a água, cuja espécie apresenta característica química polar, e a fase gasosa constituída em grande maioria pelo ar, apresenta essencialmente caráter apolar. Sendo assim, as substâncias hidrofóbicas das quais apresentam superfície apolar, possuem maior afinidade com o ar. Em contrapartida, substâncias hidrofílicas cuja superfície é polar, possuem maior afinidade pela água.

Ou seja, é um processo que se fundamenta basicamente em fazer flutuar um material de natureza hidrofóbica sobre uma fase líquida, enquanto deposita sobre o fundo do equipamento, o material de caráter hidrofílico (RABOCKAI, 1979 *apud* NASCIMENTO, 2010, p.21).

Industrialmente a flotação, é utilizado como processo de concentração de minerais, no tratamento de efluentes e também na reciclagem do papel (BROD, 2012). Esta vasta aplicação industrial efetua-se pela vantagem de que minerais naturalmente hidrofílicos, que são encontrados em enorme quantidade na natureza, podem ter a sua superfície modificada seletivamente para hidrofóbica pelo meio da concentração de reagentes na superfície (adsorção) denominados como coletores. Isto é, a propriedade diferenciadora pode ser induzida (PERES, 1996).

Porém, como a maioria dos processos operacionais de flotação, a otimização do sistema necessita do emprego de substâncias orgânicas e inorgânicas, denominadas como reguladores/modificadores e espumantes.

Visto que, geralmente, a simples passagem de um fluxo de ar não é suficiente para carregar as partículas hidrofóbicas da polpa. Portanto, faz-se necessário ter uma espuma estável e bolhas com tamanhos apropriados para transportar os minerais. Onde, estes parâmetros são alcançados através da atuação dos reagentes designados espumantes, “[...] os quais abaixam a tensão superficial da interface líquido/ ar e têm ainda a importante função de atuar na cinética da interação partícula/bolha, fazendo que o afinamento e a ruptura do filme líquido ocorram dentro do tempo da colisão” (PERES *et al.*, 1980; *apud* TOTOU, 2010, pg.14).

Já os modificadores ou reguladores, apresentam diversas ações, das quais podem destacar: ajuste do pH do sistema, ajuste e controle do potencial eletroquímico e do estado de dispersão da polpa, aumento da seletividade e da ação efetiva do coletor e transformar ou fortificar o caráter hidrofílico dos minerais inseridos à polpa, deixando-os inalterados à ação dos coletores (PERES *et al.*, 1980 *apud* TOTOU, 2010).

Essas e outras variáveis operacionais possuem grande impacto sobre a efetividade do processo, correspondido pelo teor, retirada das impurezas e/ou recuperação do mineral de interesse (FERREIRA, 2015)

Diante do cenário operacional, a flotação do minério de ferro pode ser realizada por duas rotas: direta ou reversa. Na direta, o óxido de ferro é flotado, utilizando reagentes aniônicos (sulfonatos de petróleo e querosene) ou ácidos

graxos (Hanna float e derivados). Na flotação reversa, a sílica é flotada com ajuda de reagente catiônicos (aminas) e depressores (amido) (LOPES G. , 2009).

2.2.2 Separação Magnética

Segundo Klein & Dutrow (2007) *apud* Silva (2014), corroboram que as propriedades físicas nos minerais são características da sua composição química e principalmente de sua estrutura cristalina.

Os mesmos autores acrescentam que a origem das propriedades magnéticas nos minerais resulta de propriedades atômicas que são específicas para um grupo de elementos. Portanto, o campo magnético é o resultado do movimento do elétron em sua órbita em torno do seu núcleo e relacionado ao número quântico spin, que pode assumir os valores de $+\frac{1}{2}$ ou $-\frac{1}{2}$ (SILVA, 2014). Assim, quando exposta a um campo magnético, a partícula se torna magnetizada e essa magnetização induzirá a formação dos polos magnéticos na partícula que fica orientada ao longo das linhas do campo magnético (ROCHA, 2018).

Dessa forma, a separação magnética utiliza como propriedade diferenciadora o comportamento das partículas minerais perante a um campo magnético, ou susceptibilidade magnética (GOMES, 2017)

Segundo Moskowitz (1991), a susceptibilidade magnética é a medida do quanto magnetizada ou não uma substância pode se tornar na presença de um campo magnético e geralmente é utilizada para descrever a classificação de minerais magnéticos. A partir dos quais podem ser divididos genericamente, em três grupos distintos (CRISÓSTOMO, 2015, p. 16):

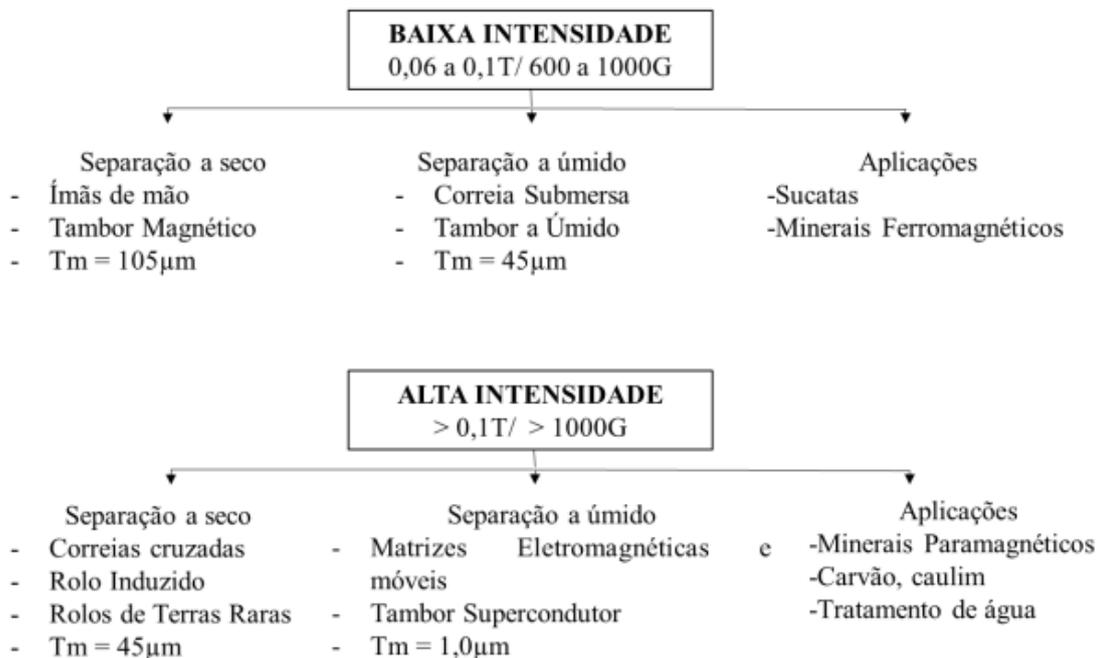
Diamagnéticos: são repelidos pelo campo magnético. Nos minerais diamagnéticos os dipolos elementares não são permanentes. Na presença de campo magnético externo, os elétrons formam dipolos opostos ao campo atuante. Assim, devido à repulsão (efeito muito fraco), a susceptibilidade magnética desses minerais é negativa, são exemplos o quartzo e a calcita.

Paramagnéticos: nos minerais paramagnéticos os dipolos elementares são constantes e tendem a se orientar na mesma direção de um campo

magnético aplicado externamente. Porém, o alinhamento perfeito é impossibilitado pelo movimento térmico. Sua magnetização varia proporcionalmente com o campo magnético aplicado e a temperatura, sendo assim são fracamente atraídos, como exemplo a hematita.

Ferromagnéticos: nos minerais ferromagnéticos os dipolos elementares são permanentes e se alinham perfeitamente a um campo magnético aplicado, sendo atraídos fortemente e resultando em altas taxas de magnetização, como exemplo a magnetita.

Segundo Lage (2010) *apud* Gomes (2017) , a separação magnética pode ser realizada pelas vias úmida e seca, e depende das propriedades minerais, das características do separador , do nível de produção e do grau de recuperação. Os equipamentos para este método de concentração podem ser subdivididos de acordo com a intensidade do campo de indução, como demonstrado, resumidamente, na Figura 2.4



Tm= Tamanho mínimo da partícula

Figura 2.4- Classificação e características dos separadores magnéticos

Fonte: Adaptado por Gomes (2017) de Sampaio e Luz (2010)

Os autores também acrescentam que quando a magnetita e o quartzo são predominantes na composição do minério de ferro, a concentração de alta intensidade não é aconselhada devido ao arraste de partículas diamagnéticas. Se ainda assim, a alta intensidade for utilizada, recomenda-se uma etapa preliminar de desbaste em separadores de baixo campo magnético (< 2.000 Gauss), para o minério de ferro que possui mais de 30% de magnetita em sua composição. Já para tipologias com concentrações menores que 30%, o desbaste pode ser realizado em campo médio (2.000 a 9.000 Gauss).

Vale ressaltar, a recuperação das frações de hematita contida no rejeito produzido pelo beneficiamento do minério de ferro foi possível aplicando separadores de alta intensidade acoplados com dispositivo de pulsação, que propicia reduzir ou acabar a contaminação do concentrado provocado pelo aprisionamento de partículas não magnéticas na matriz (CHEN *et al.*, 2009 *apud* SILVA, 2014, p.28)

Bartnik *et al.* (1975) *apud* Silva (2014), afirmaram que é possível produzir concentrados com teores de sílica menores que 2% com a aplicação de separadores magnéticos em campo alto. Isto é possível em duas situações: quando as partículas de minério de ferro apresentam boa condição de liberação em faixas mais grosseiras, por exemplo, maiores que 0,1 mm. Outra situação, é a ocorrência de magnetita associada a hematita.

Além disso, os custos operacionais e fatores ambientais são vantagens deste procedimento. A primeira vantagem relaciona-se a simplicidade dos equipamentos, pela pequena quantidade de produtos utilizados, e a segunda vantagem refere-se a uma pequena quantidade na liberação de resíduos que possam afetar o ambiente circunvizinho a operação.

2.2.3 Concentração Gravítica

A concentração gravítica, ou também conhecida como separação densitária, é definida por Luz *et al.* (2010) como um processo no qual partículas de diferentes densidades, tamanhos e formas são separadas umas das outras por ação da força da gravidade ou por forças centrífugas. Os mesmos autores

ainda complementam que este processo é um dos métodos mais antigos relacionados ao beneficiamento mineral (Luz, França, & Sampaio, 2010).

Já Mular *et al.* (2002) *apud* por Galvão (2017) enfatizam que o beneficiamento gravimétrico é um processo de concentração físico em que a separação depende da movimentação relativa das partículas minerais e do fluido envolvido.

Um guia que auxilia a ter uma aproximação da facilidade de obter uma separação entre minerais por meio de um método gravimétrico qualquer, é definido pelo cálculo do Critério de Concentração (CC) (MULAR *et al.* 2002, *apud* GALVÃO 2017, p.26). Como demonstrado pela Equação 2.1:

$$CC = \frac{(\rho_p - 1)}{(\rho_l - 1)} \quad (2.1)$$

Onde: ρ_p , equivale a densidade dos minerais pesados presentes a alimentação e ρ_l é a densidade dos minerais leves. Esta equação é utilizada estipulando a densidade da água igual 1,0. Sendo todos os termos constituintes da equação dados em g/cm³.

A Tabela 2.5 apresenta uma relação entre o Critério de Concentração e a eficiência de efetuar uma separação por métodos gravíticos, com a respectiva faixa granulométrica.

Tabela 2.5- Critério de concentração

Critério de concentração	Eficiência
>2,5	Separação eficiente até 74 μ m
2,5-1,75	Separação eficiente até 147 μ m
1,75-1,50	Separação possível até 1,4 mm, porém difícil
1,50-1,20	Separação possível até 6mm, porém difícil

Fonte: Tagart, 1945 *apud* Luz *et al.*, (2010).

Para Ferreira (2011), a viabilidade da separação é otimizada com o aumento da resistência do meio, empuxo e a força gravitacional. Já para Sampaio e Tavares (2005), para um processamento satisfatório ,faz-se

necessário que a alimentação tenha uma distribuição granulométrica estreita , além de uma diferença significativa de densidade ou forma entre os minerais constituintes.

Sobre as vantagens dos métodos densitários ou gravíticos pode-se destacar: *capex* por tonelada mais baixa, não utilização de produtos químicos, impacto ambiental relativamente pequeno exceto pela disposição de lamas. Entretanto, há um fator limitante da técnica que é o elevado consumo de água, sendo de extrema importância projetos que visam à recirculação desta água utilizada (CHAVES & CHAVES-FILHO, 2013).

Segundo Wills (2006), devido à problemática relacionada à mineração e ao meio ambiente, os métodos gravíticos têm sido reavaliados. Isso se deve à simplicidade relativa das operações, produção de pouca poluição quando comparados com os outros métodos, além do aumento de custos com a utilização de reagentes na flotação.

Os autores Chaves & Filho (2013) afirmam que a separação gravítica se divide em quatro grupos: operações de jigagem, operações de meio denso, operações de separação em lâmina d'água e operações centrífugas. Além disso, o grau de liberação e a distribuição das partículas segundo sua densidade irá influenciar e conseqüentemente definir qual método será empregado. Para Lins (2010), a partir de granulometrias abaixo de 74 micrômetros torna-se ineficiente a utilização de equipamentos que fazem da força da gravidade o propulsor dos mecanismos de separação.

Luz *et al.* (2010) ,relatam os principais mecanismos atuantes no processo de concentração gravítica:

Aceleração diferencial : as partículas sofrem seguidas acelerações e desacelerações ,devido ao efeito das colisões das paredes do concentrador ou de outras partículas , podendo mover-se apenas por tempos e distâncias curtas antes que pare ou desviei sua trajetória. A Figura 2.5 , demonstra que este mecanismo de separação independe do tamanho das partículas e depende somente das densidades dos minerais e do fluído.



Figura 2.5-Mecanismo Aceleração diferencial

Fonte: Modificado de Luz *et al.* (2010)

Sedimentação Retardada: uma partícula em queda livre num fluido sofre aceleração da gravidade, até certo tempo, aumentando a velocidade até atingir um limite máximo, a partir de então sua velocidade permanece constante. A diferença de densidade entre as partículas minerais inseridas no fluido, possuem um efeito de sedimentação retardada mais pronunciado em faixas granulométricas grosseiras em relação às faixas mais finas do minério. Neste mecanismo, o fator mais importante para realizar a separação das partículas é a velocidade terminal. Conforme demonstrado na Figura 2.6:

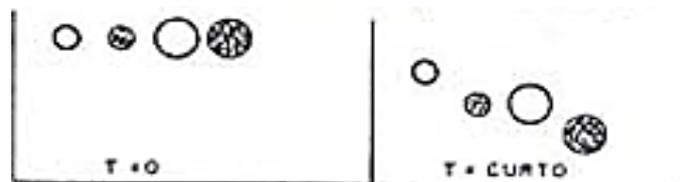


Figura 2.6-Mecanismo Sedimentação Retardada

Fonte: Modificado Luz *et al.* (2010)

Consolidação Intersticial: Este mecanismo é proporcionado pela movimentação das partículas finas nos espaços vazios formados entre as partículas grossas de um ou mais minerais. Ou seja, a separação dos minerais é decorrente do seu tamanho e densidade, como mostrado na Figura 2.7:

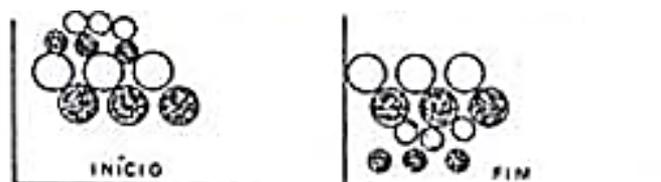


Figura 2.7-Mecanismo Consolidação Intersticial

Fonte: Modificado Luz *et al.* (2010)

Velocidade Diferencial em Escoamento Laminar: Uma película de água fluindo em uma superfície lisa e inclinada acarreta uma distribuição parabólica da velocidade do fluxo, que atinge o máximo na interface do fluido/ar e o mínimo em contato com a superfície. Vale ressaltar, que este princípio se aplica em lâmina de água com pequena espessura, até dez vezes o diâmetro da maior partícula. Note-se, que a forma das partículas influencia na estratigrafia da separação, onde as partículas achatadas escoam acima das esféricas. Como mostrado na Figura 2.8:



Figura 2.8-Mecanismo de Velocidade Diferencial em Escoamento Laminar

Fonte: Modificado Luz *et al.* (2010)

Ação das Forças de Cisalhamento: A estratificação vertical das partículas é resultado das pressões desenvolvidas pelo movimento simultâneo e perpendicular da polpa e da superfície. Esse mecanismo é demonstrado pela Figura 2.9:

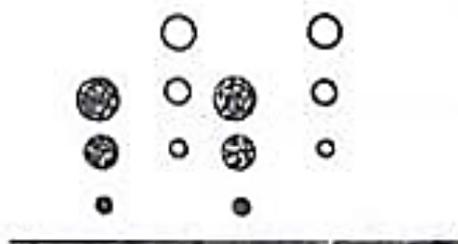


Figura 2.9- Mecanismo de Ação das Forças Cisalhamento

Fonte: Modificado Luz *et al.* (2010)

2.2.4 Mesa Vibratória

A mesa vibratória é também chamada de oscilatória ou somente de mesa concentradora, e corresponde a um dos equipamentos amplamente utilizados nas operações de concentração via separação gravítica. Em escala laboratorial, este equipamento costuma ser empregado para testes preliminares de concentração (LINS, 2010).

De acordo com Galvão (2017), o método de concentração gravimétrica da mesa foi desenvolvido empiricamente no final do século passado por Arthur R. Wilfley e tem sido um dos equipamentos mais utilizados no enriquecimento de minérios na separação densitária. A Figura 2.10 ilustra uma típica mesa oscilatória.

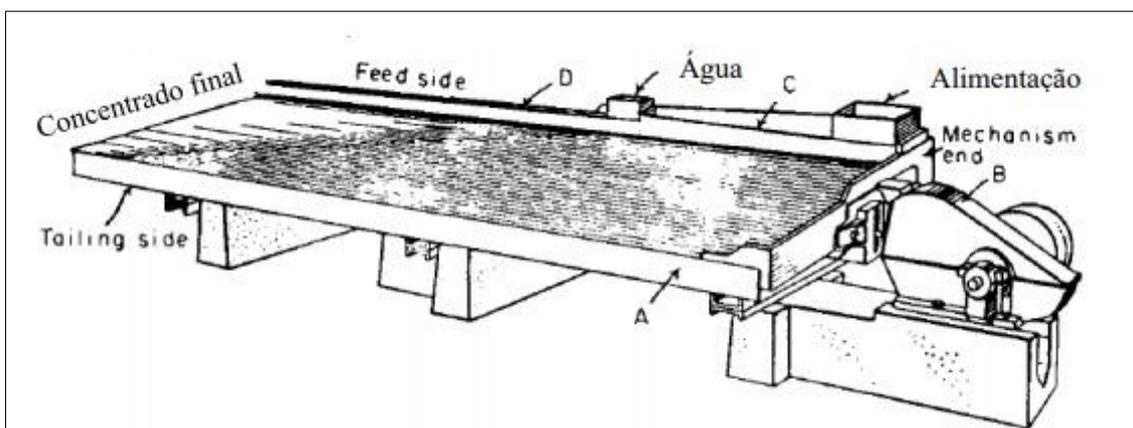


Figura 2.10 - Ilustração de uma mesa oscilatória.
Fonte: Galvão (2017, p. 27) adaptado de Wills (2006).

Chaves *et al.* (2013) explicam que este equipamento é composto de um deque revestido com material de alta aderência (borracha ou plástico). Onde é alimentada na extremidade superior a água que provoca o carregamento das partículas sólidas na direção da extremidade inferior.

Operacionalmente, a mesa possui um movimento oscilatório simultâneo a direção perpendicular do fluxo d'água. Logo, como resultante desses movimentos, as partículas percorrem uma trajetória diagonal na mesa. E é exatamente essa combinação de movimentos, que acarreta forças que permite a segregação ideal de três produtos distintos. Na região longitudinal, obtêm-se as frações mais grossas e finas leves perto do motor de acionamento de oscilação, enquanto na região final do comprimento da mesa e da região transversal o descarregamento das partículas denominadas mistas. Já na parte abaixo da metade da região transversal ocorre a descarga da fração pesada. (GALVÃO, 2017). A Figura 2.11 ilustra as respectivas áreas de estratificação das partículas.

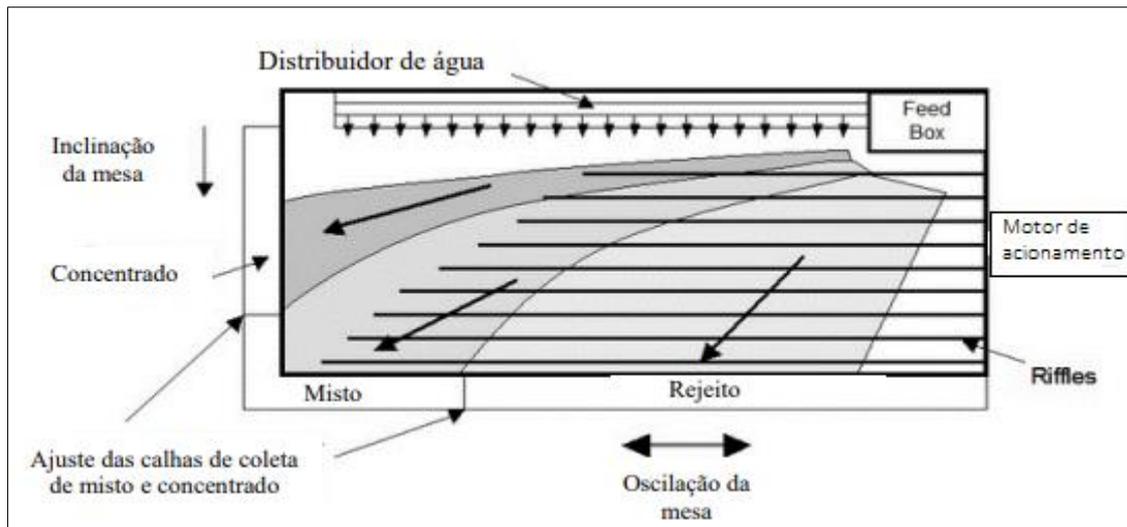


Figura 2.11–Área de estratificação das partículas(adaptado)

Fonte: <https://www.911metallurgist.com/blog/gold-shaking-tables>

Em relação aos mecanismos de separação atuantes na mesa oscilatória, Luz *et al.* (2010) afirmam que os mesmos são mais facilmente compreendidos analisando separadamente cada região da mesa, com riffles e lisa. Nos espaços com os *riffles*, as partículas estratificam-se devido à dilatação causada pelo movimento assimétrico da mesa e pela turbulência da polpa através dos *riffles*, comportando-se este leito entre os *riffles* como se fosse um jigge em miniatura – com sedimentação retardada e consolidação intersticial (improvável a aceleração diferencial), conforme Figuras 2.12(a) e (b). Finalmente, a região lisa, evidencia-se mais fortemente o espalhamento dos minerais constituintes do concentrado pesado. Este fenômeno é consequência do mecanismo de velocidade diferencial em escoamento laminar e movimento assimétrico paralelo à direção dos *riffles*, conforme mostrado pela Figura 2.12 (c).

Não obstante, para que os resultados da concentração em mesa sejam satisfatórios, faz-se necessário delimitar as variáveis operacionais. Sunil *et al.* (2011) *apud* Galvão (2017), expõem que a performance do processo, está dependentemente relacionada com as características físicas e químicas da alimentação e com os parâmetros operacionais associados ao equipamento.

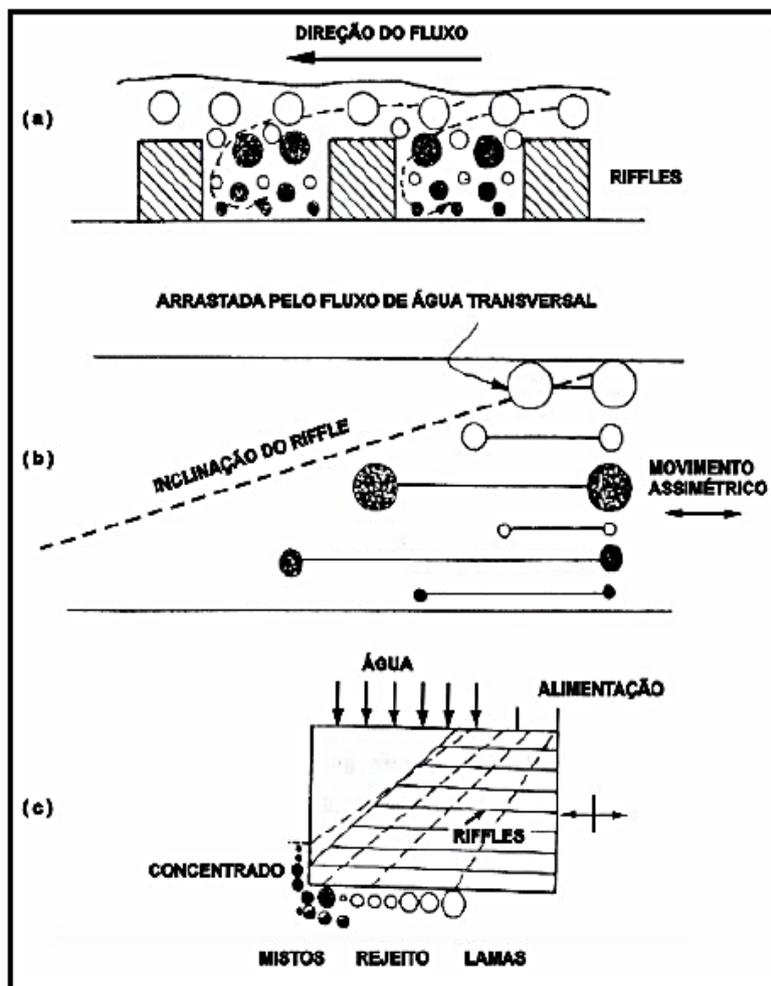


Figura 2.12 - Mesa Concentradora: (a) estratificação vertical entre os riffles, (b) arranjo das partículas ao longo dos riffles, (c) distribuição na mesa.

Fonte: Luz, Sampaio e França (2010, p. 316).

Sampaio e Tavares (2005) apontam que para obter maiores descargas de partículas leves, inclinações maiores são necessárias e para maiores descargas de partículas densas utilizam-se menores inclinações. Vale ressaltar que a escolha da inclinação transversal é importante, sendo otimizada, efetua-se a melhor distribuição do material sobre a mesa. Diante desse contexto, como maiores inclinações resultam em maiores descargas do rejeito, simultaneamente, aumenta-se a vazão da alimentação ao processo. Porém, Andery (1980) *apud* por Galvão (2017) adverte que apesar do aumento da taxa de alimentação, diminui-se a seletividade da separação do processo. Este fato foi corroborado por Alves (2017), onde foi visualizado a sedimentação de material a altas taxas de alimentação para inclinações maiores que 6°



Figura 2.13-Sedimentação de material a altas taxas de alimentação

Fonte: (Alves, 2017)

Manser *et.al* (1991), apontam que grandes variações na vazão da água de lavagem influenciam na seletividade da concentração do minério de ferro. Ou seja, pequenas vazões dificultam que as partículas finas densas cheguem ao concentrado, e por outro lado, altas vazões aumentam a turbulência do fluido no sistema, facilitando que as partículas mais finas de hematita passem por cima dos *riffles*, aumentando assim, o teor de Fe no rejeito.

A vazão de água de diluição necessária para uma boa separação no processo deve ser suficiente para que ocorra a estratificação das partículas e a dilatação do leito formado entre os *riffles* (BURT, 1984 *apud* ALVES, 2017, p.16).

3. Metodologia

Neste t3pico ser3o abordados os procedimentos realizados durante o desenvolvimento na prepara33o, caracteriza33o e os ensaios efetuados 3 mesa concentradora com o material em estudo.

3.1 Obten33o e prepara33o da Amostra Global

O desenvolvimento experimental e toda prepara33o do material foi efetuado no Laborat3rio de Tratamento de Min3rios do CEFET-MG, Campus Arax3. As amostras foram provenientes da Mina Lagoa das Flores, situada na cidade de Itatiaiu3u-MG, sendo fornecidas pela empresa Minerita Min3rios Ita3na Ltda. O processo de beneficiamento da empresa consiste na britagem, classifica33o, concentra33o magn3tica e concentra33o grav3tica (espirais). Onde, o concentrado passa posteriormente a uma etapa de desaguamento e o rejeito a uma etapa de espessamento. No trabalho foram coletadas e utilizadas amostras do subproduto composto e oriundo do rejeito dos jigues, parte do rejeito dos tambores magn3ticos e parte do rejeito das espirais concentradoras. Sendo, o presente material era destinado a constru33o civil, para a produ33o de blocos pr3-moldados para cal3amento.

Primeiramente realizou-se a secagem do lote inicial de 475 kg nas estufas, como demonstrado na Figura 3.1.



Figura 3.1- Secagem das amostras

Logo após, foi retirado uma alíquota de 245 kg do lote inicial seco para a homogeneização e quarteamo da amostra. O processo de homogeneização tem por objetivo obter uma distribuição mais uniforme das partículas da amostra. Assim, para este procedimento foi utilizado uma lona quadrada, onde despejou-se a alíquota de 245kg do lote inicial em forma de pilha cônica e iniciou-se o método de tombamento (Figura 3.2). Nesse método as pontas da lona são levantadas alternadamente oito vezes, designando as partículas alocadas anteriormente na base para o pico, encerrando-se assim um ciclo. Segundo Sampaio *et al.* (2007) após algumas recorrências desta prática, a pilha é classificada como homogênea



Figura 3.2-Pilha homogeneizada

Ao final da homogeneização, foi realizada a construção da pilha longitudinal distribuindo-se manualmente o material, longitudinalmente, por meio de constantes passagens. A quantidade de material em cada alíquota, tomada no lote de 245kg, deve ser o bastante para espalhar através de toda pilha, com velocidade constante. Construída a pilha com aproximadamente 4,8 m, as extremidades foram retomadas e novamente distribuídas longitudinalmente sobre seu centro (Figura 3.3).

A operação de quarteamo foi realizada manualmente, tendo como objetivo a obtenção de amostras finais com propriedades correspondentes do ponto de vista estatístico que representa a amostra global. Assim, diminui-se a massa a ser manipulada para a obtenção de resultados representativos das análises químicas, granulométricas, mineralógicas e peso específico (Sampaio *et al.*, 2007).



Figura 3.3- Pilha longitudinal

Após a pilha estruturada, foi efetuado a divisão de segmentos, utilizando-se placas metálicas. Sendo primeiramente, seccionada longitudinalmente formando assim duas pilhas. A Figura 3.4 demonstra as etapas de preparação da pilha longa para o quarteamento.

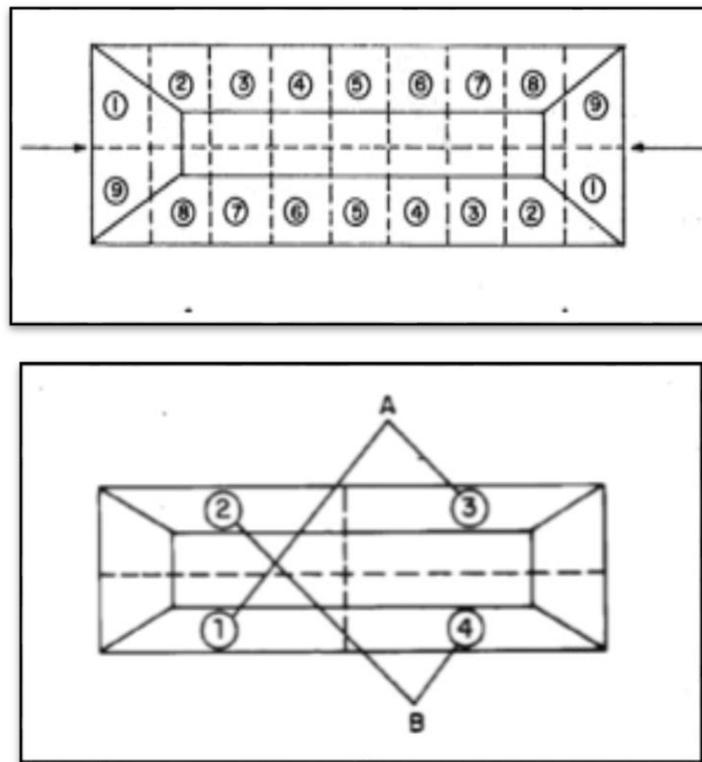


Figura 3.4-Representação do quarteamento da pilha homogeneizada longitudinal

Assim, as frações com índices pares foram coletadas alternadamente com as frações com índices ímpares, sendo misturadas até a obtenção de 25

alíquotas de 5kg para a prática de concentração e 0,75 kg para as análises granulométrica, química, picnometria. A Figura 3.5 ilustra o diagrama com toda a preparação da amostra.

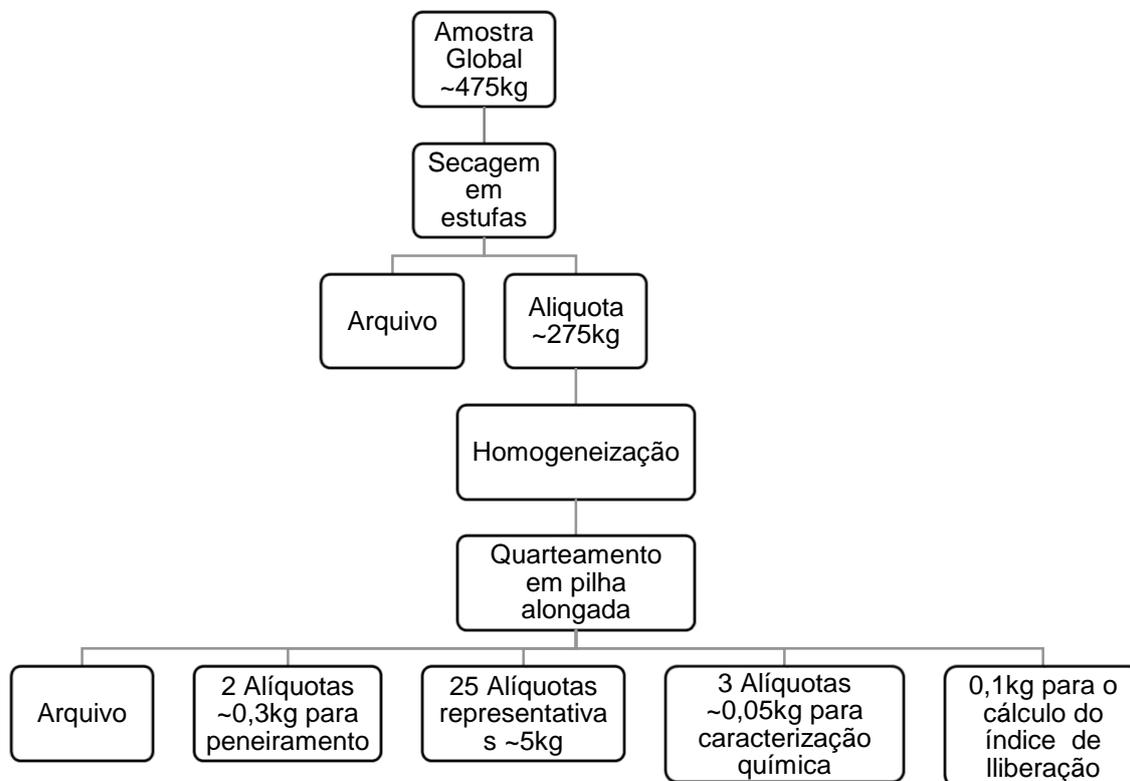


Figura 3.5- Metodologia de preparação da amostra

3.2 Obtenção e Preparação da Amostra do Teste de Mesa

Após a preparação da amostra global, separou-se 6 alíquotas de 5 kg. Nestas alíquotas, houve a necessidade de efetuar um corte granulométrico abaixo de $0,841mm$ até completar, aproximadamente, 19 kg de material passante. Este corte foi em decorrência dos resultados obtidos no cálculo do índice de liberação da amostra global.

Acabado o corte, despejou-se o material passante em forma de pilha cônica e novamente o processo de homogeneização por tombamento em lona foi realizado. Como demonstrado na Figura 3.6:



Figura 3.6- Homogeneização da Amostra (Mesa)

Após a homogeneização, foi construída a pilha alongada distribuindo longitudinalmente, por constantes passagens, o material homogêneo (Figura 3.7).



Figura 3.7- Pilha alongada da Amostra (Mesa)

Construída a pilha com aproximadamente 2,16 metros, cada extremidade no valor de 10% do comprimento total, foi retomada e novamente distribuída longitudinalmente sobre o eixo central (Figura 3.8).



Figura 3.8- Retirada das extremidades

Após este procedimento, a pilha foi dividida por segmentos pré-definidos para a retomada de 12 alíquotas de 1,5 kg para os testes de concentração e duas alíquotas de 0,2 kg para o peneiramento (Figura 3.9).



Figura 3.9- Retirada dos segmentos.

3.3 Caracterização da Amostra

3.3.1 Análise Granulométrica Amostra Global

Para determinar a distribuição granulométrica da amostra global foi realizado o peneiramento combinado, utilizando uma massa inicial de 300g. A Tabela 3.1 demonstra a série de peneiras utilizada na prática experimental.

Tabela3.1-Peneiras utilizadas na análise granulométrica

Abertura (#)	Abertura (mm)
3/4"	19,000
4	4,750
9	2,000
16	1,180
28	0,590
45	0,355
60	0,250
80	0,190
100	0,150
150	0,106
200	0,074
270	0,053
325	0,044
400	0,040
-400	-0,040

Para o presente experimento foram utilizadas as peneiras das marcas Granutest, Bronzinox e o peneirador suspenso da CDC, modelo PV-08. A primeira etapa do peneiramento foi efetuada a úmido, com auxílio de um balde alocado no fundo e uma mangueira para alimentação de água na série (80# =>Fundo), no intuito de obter a distribuição das partículas mais finas (Figura 4.6).

Quando a água coletada na saída se encontrava com a mesma tonalidade da água adicionada na alimentação do peneiramento, o procedimento foi finalizado.



Figura 3.10- Peneirador suspenso, utilizado para peneiramento a úmido

Fonte: (LOPES G. , 2009)

Após a secagem em estufa, as massas retidas foram pesadas e novamente realimentadas ao peneiramento a seco pela série de peneiras (3/4" => 80#, FUNDO), com o tempo de peneiramento estipulado em 15 minutos. Posteriormente, as massas que ficaram retidas foram novamente pesadas, obtendo assim, a distribuição granulométrica das partículas mais grosseiras e a construção da curva granulométrica completa. E por fim, este mesmo processo foi repetido, no intuito de verificar a dispersão dos resultados e assegurar que a análise granulométrica foi efetuada corretamente.

3.3.2 Análise granulométrica da Amostra Mesa

Para determinar a distribuição granulométrica da amostra mesa foi realizado o peneiramento combinado, utilizando a massa inicial de 200g. A Tabela 3.2 demonstra a série de peneiras utilizados no experimento laboratorial.

Tabela 3.2- Peneiras utilizadas na análise granulométrica da amostra mesa

Abertura (#)	Abertura (mm)
28	0,600
30	0,590
35	0,420
45	0,355
60	0,250
70	0,212
80	0,190
140	0,106
200	0,074
270	0,053
325	0,044
400	0,040
-400	-0,040

Para este experimento, na primeira etapa foi efetuado o peneiramento via úmida pelas séries (80# => Fundo), no intuito de obter a distribuição das partículas mais finas. Onde, as adaptações efetuadas para este experimento, foram as mesmas utilizadas para a análise da amostra global (Figura 3.10).

Quando a água coletada na saída do peneiramento, encontrava-se com a mesma tonalidade da água adicionada na alimentação, o procedimento foi encerrado.

Após a secagem em estufa, a massa retida pela peneira de 80 *mesh* foi pesada e novamente realimentada para o peneiramento a seco, constituído pela série de peneiras (28# => 70#, Fundo), com o tempo estipulado em 15 minutos. Posteriormente, as massas retidas em cada peneira e o passante da última peneira (retido fundo) foram novamente pesadas, obtendo assim a distribuição granulométrica da faixa mais grosseira e os dados restantes para a construção completa da curva granulométrica da alimentação da mesa concentradora.

3.3.3 Densidade

A técnica utilizada para calcular a densidade da amostra foi o método da picnometria. Para Sampaio *et al.* (2007, p. 39), "um picnômetro consiste, basicamente, num balão de vidro com fundo chato, equipado com uma rolha também de vidro, através da qual passa um canal capilar", sendo construído cautelosamente de forma para que seu volume seja praticamente invariável.

Os testes de picnometria foram efetuados em uma balança de precisão de duas casas decimais e em triplicata para assegurar que o experimento fosse realizado corretamente, e por fim, realizou-se a média entre os três resultados obtidos. Sendo a alíquota da amostra global coletada, seguiu-se basicamente, os seguintes passos de acordo com Silva (2007) para a determinação da densidade relativa da amostra:

- Primeiramente pesou-se o picnômetro vazio, anteriormente seco e limpo, conseguindo o valor de A_1 ;
- Adicionou-se a amostra, numa quantidade que tampasse o fundo achatado do picnômetro, logo após, pesou-se o conjunto conseguindo o valor de A_2 ;
- Acrescentou-se a água ao picnômetro com a amostra, pesou-se novamente o conjunto, obtendo valor A_3 ;
- Formada a polpa, esta foi retirada do frasco, sendo novamente limpo e seco e acrescentou-se água até o transbordo do picnômetro, logo após, pesou-se o conjunto, conseguindo o valor de A_4 ;

A densidade relativa da amostra foi obtida substituindo os valores das massas encontradas em A_1 , A_2 , A_3 e A_4 na equação 3.1. Os cálculos foram realizados para amostra global, a amostra que alimentou a mesa e os produtos gerados durante os ensaios.

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

Sendo:

ds: Densidade do sólido;

A_1 : Massa do picnômetro;

A_2 : Massa do picnômetro+ Amostra;

A_3 : Massa do picnômetro + Amostra+ Água;

A_4 : Massa do picnômetro + Água;

3.3.4 Difração de raios X

Constituída a amostra final, três alíquotas pulverizadas de 0,05kg foram enviadas ao Laboratório do CEFET-MG Campus em Belo Horizonte. A caracterização mineralógica foi realizada através da difração de raios X (método do pó total).

Operacionalmente, as “vantagens da técnica de difração de raios X são a simplicidade e rapidez das análises, a confiabilidade dos resultados, pelo fato do perfil de difração obtido ser característico de cada fase cristalina do mineral [...]” (Freire ,2012 *apud* Figueiredo ,2017, p.23). Desta forma, esta análise permite conhecer os tipos de microestruturas cristalinas inseridas na amostra global, qualificando assim, as fases correspondentes da sua composição mineralógica.

Para obtenção do difratograma de raio X, as condições instrumentais foram: alimentação elétrica de 40 quilovolts de voltagem e 30 miliampères de corrente, varredura de 10° a 80° em 2 θ , passo de 0,02° e velocidade de escaneamento de dois graus por minuto.

3.3.5 Cálculo do Teor das amostras

Para os cálculos do teor das amostras, foram necessários, primeiramente, os resultados obtidos das densidades das amostras com auxílio da técnica de picnometria.

Estes cálculos foram realizados tanto para amostra da alimentação quanto para todos os produtos, concentrado e rejeito, gerados durante os testes de concentração. Onde os resultados adquiridos, foram obtidos considerando que a amostra é constituída, por apenas, hematita e quartzo. Como demonstrado pela Equação 3.2:

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

Onde:

- %MM= teor do mineral minério;
- d_{mm} = densidade do mineral minério, hematita estipulada em (5,3 g/cm³);

- d_s =densidade da amostra, obtido pela picnometria;
- d_g =densidade da ganga, quartzo estipulada em $(2,65 \text{ g/cm}^3)$.

3.3.6 Grau de Liberação

O cálculo do grau de liberação foi efetuado pelo método de Gaudin. Esse método baseia-se em identificar e contar o número de partículas totalmente liberadas em função do número de partículas mistas, em uma determinada faixa granulométrica. Dessa maneira, obtém-se uma análise detalhada das partículas mistas, o que é de suma importância para a previsão do impacto das mesmas perante ao desempenho de um processo de concentração (Ferreira,2013).

Para tal procedimento, foi realizado o peneiramento a seco com tempo estipulado de 15 minutos, utilizando uma massa inicial de 100 gramas da fração representativa da amostra global. Assim, as alíquotas retidas de cada peneira, foram homogeneizadas e alocadas separadamente em uma placa *Petri*. Através do auxílio de pinças e um estereomicroscópio da marca Laborana (Figura 3.11), foram analisadas e contabilizadas partícula por partícula até que o número mínimo 100 fosse atingido.



Figura 3.11-Estereomicroscópio Laborana

Fonte: (Luz P. , 2018)

Para realização do cálculo, baseou-se o espectro de liberação em seis classes de liberação, como demonstrado pela Figura 3.12.

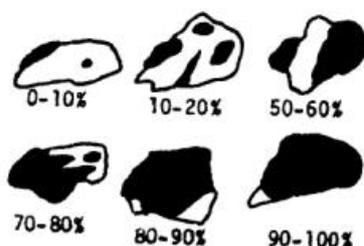


Figura 3.12- Classes de composição de partículas

Fonte: (Petruk, 2000)

Dessa forma, a partícula totalmente liberada, assume o índice de liberação 10, sendo o valor proporcionalmente reduzido até 0 com a diminuição do mineral-minério presente nas partículas mistas. Para os cálculos percentuais da liberação da amostra global, foi utilizada a Equação 4.

$$\text{Grau de liberação} = \frac{\Sigma \text{índice de liberação das partículas livres}}{\Sigma \text{índice de liberação das partículas livres+mistas}} \times 100 \quad (3.3)$$

3.4 Testes na Mesa Vibratória

Os testes em mesa vibratória foram realizados no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG Campus Araxá (Figura 3.13).

A concentração gravítica foi realizada com objetivo de avaliar a viabilidade da recuperação do minério de ferro presente no material. As variáveis operacionais foram baseadas em decorrência dos resultados obtidos no trabalho de Alves (2017). O autor supracitado, com auxílio do *software* Minitab, determinou a otimização do processo de separação na mesa, resultando boas recuperações de minério de ferro da amostra proveniente do depósito Jambreiro da região de Guanhães-MG.

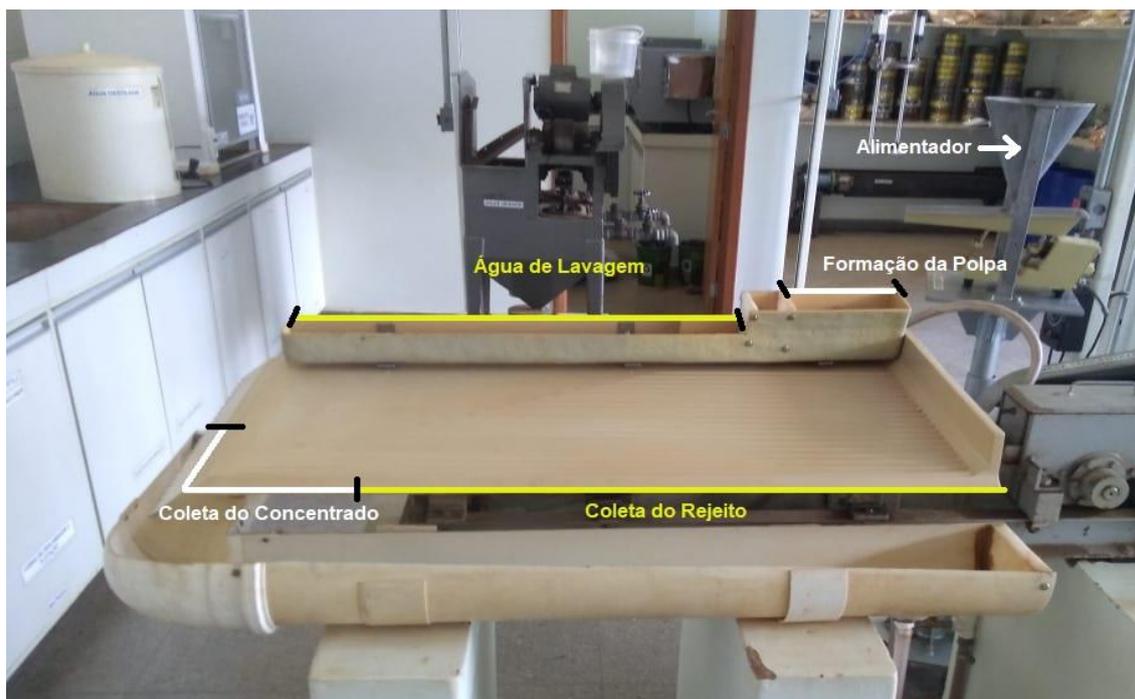


Figura 3.13-Mesa Vibratória

Adaptado: Pelo próprio Autor

Assim, foram mantidos constantes os parâmetros vazão da alimentação (160 Kg/h), água de lavagem (150 L/h), inclinação longitudinal da mesa (0,5°), frequência de oscilação da mesa (3,2Hz) e amplitude de oscilação (0,6cm). Dentre as variáveis investigadas destaca-se: inclinação transversal da mesa e porcentagem de sólidos. A Tabela 3.3 apresenta estes parâmetros variados na realização dos ensaios.

Tabela 3.3-Variação dos parâmetros na realização dos ensaios na Mesa

Teste	Porcentagem de Sólidos (%)	Inclinação (°)
1.1		3
1.2		3
2.1	25	4
2.2		4
3.1		5
3.2		5
4.1		3
4.2		3
5.1		4
5.2	30	4
6.1		5
6.2		5

Como demonstrado, todos os ensaios foram efetuados em duplicata para validar a confiabilidade dos resultados e de acordo com as etapas do seguinte procedimento:

- Para cada teste, direcionou-se ao alimentador vibratório uma alíquota de 1,5 Kg previamente homogeneizada e preparada.

- Posteriormente, a inclinação da mesa foi ajustada, com auxílio de um clinômetro.

- Logo, regulou-se a vazão da água de lavagem e a vazão água de diluição, com auxílio de um rotâmetro acoplado na saída da mangueira. Assim, iniciou-se a alimentação após a mesa estar completamente coberta pela lâmina d'água.

- Com a mesa em regime operacional, foi efetuado o recolhimento dos produtos gerados por 20 segundos (cronometrados), com auxílio de bandejas.

- Posteriormente, foram secadas e pesadas as alíquotas referentes aos produtos da operação.

- Em sacos plásticos, os respectivos produtos de cada ensaio foram arquivados e efetuou-se o cálculo da densidade dos sólidos nesses produtos e do teor de ferro através da Equação 3.2.

3.5 Planejamento dos Experimentos

Com os dados adquiridos, estes foram inseridos na interface (DOE) do Minitab 18. Em resumo, esta ferramenta auxilia a investigação simultânea dos efeitos das variáveis de entrada em variáveis de saída (Minitab 18, 2019). Dessa forma, operacionalmente o sequenciamento dos ensaios, foi definir o melhor cenário operacional para inclinação e porcentagem de sólidos.

Portanto, as variáveis de entrada foram definidas como ângulo de inclinação e porcentagem de sólidos, e as respostas recuperação mássica, metalúrgica e o teor de ferro no concentrado como variáveis de saída. Na Tabela 3.4, estão dispostos ordenadamente os níveis utilizados e seus respectivos

valores em função das variáveis operacionais para análise de sua influência nas respostas. Sendo que (-) significa o menor nível da variável e (+) o maior nível.

Tabela3.4- Matriz do Planejamento fatorial das variáveis operacionais

	Fator 1	Fator 2	Porcentagem de Sólidos (%)	Inclinação (°)
Nível	-	-	25	3
	-	0	25	4
	-	+	25	5
	+	-	30	3
	+	0	30	4
	+	+	30	2

Feito o cálculo fatorial dos dados, os resultados foram inseridos em gráficos que demonstram visualmente os efeitos propiciados na operação, facilitando assim a percepção do melhor cenário operacional para a concentração de ferro na mesa vibratória.

4. Resultados e Discussão

Neste tópico serão demonstrados os resultados obtidos, atrelados a uma análise crítica perante ao impacto dos mesmos na eficiência dos ensaios.

4.1 Caracterização

4.1.1 Grau de Liberação

Com o desenvolvimento da análise, foi verificada uma grande incidência de partículas mistas acima da fração granulométrica +0,841 mm (20#). Logo, para o cálculo do grau de liberação da amostra global foram utilizadas as seguintes faixas granulométricas: -0,841mm + 0,250mm; -0,250mm +0,106mm; -0,106mm+0,053mm; -0,053mm

A Figura 4.1 mostra os resultados do grau de liberação através do método ótico pela contagem de partículas livres e mistas de hematita nas respectivas faixas granulométricas. As informações detalhadas foram apresentadas no apêndice A.1.

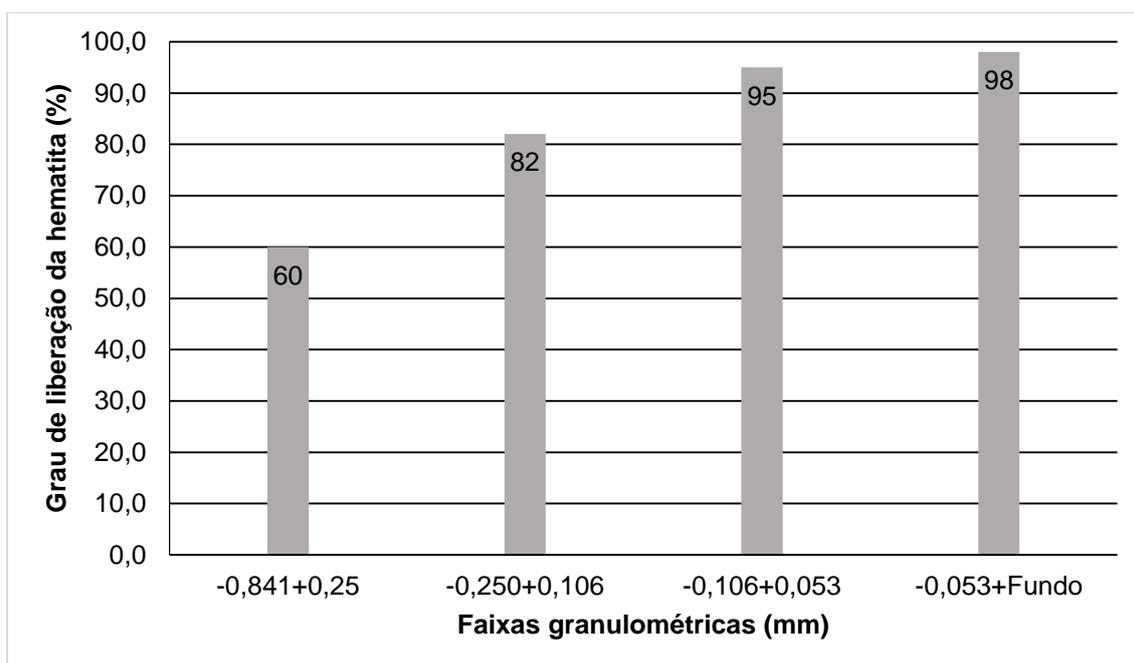


Figura 4.1-Grau de Liberação da Hematita.

Como demonstrado pela Figura 4.1, optou-se por realizar um corte granulométrico de -0,841mm (20#) antes da alimentação do material a mesa. Procedimento aplicado, devido ao aumento da liberação da hematita abaixo

desta faixa granulométrica. Relata-se com os dados obtidos, a boa liberação deste minério nas faixas granulométricas $-0,106\text{mm}+0,053\text{mm}$ e $-0,053\text{mm}+\text{Fundo}$.

4.1.2 Difração de raios-X

A Figura 4.2, apresenta os resultados obtidos pela técnica de difratometria de raios-X da amostra global. Logo, observam-se no difratograma os principais picos provenientes dos minerais constituintes na estrutura cristalina do material.

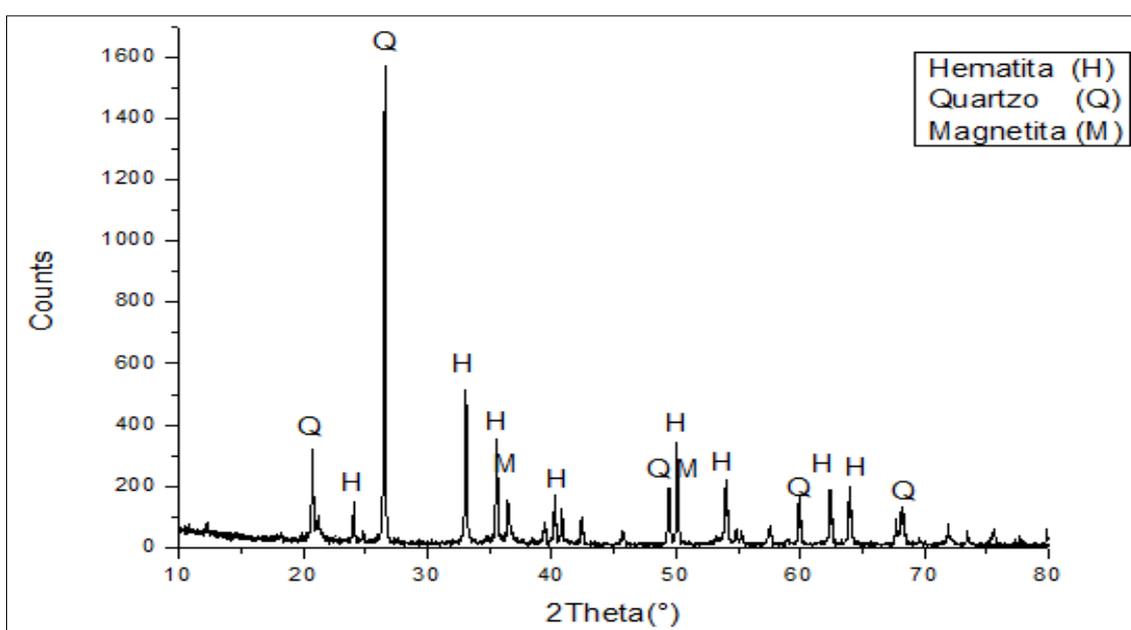


Figura 4.2 - Difratograma de raios-X da amostra global

Devido a amostra ser composta majoritariamente por quartzo e hematita, a utilização da picnometria em função do cálculo dos teores dos concentrados, resultará em valores confiáveis. Isso foi demonstrado pela Tabela 4.1, onde os resultados dos testes em triplicata, apresentaram baixa dispersão da massa específica, garantindo a reprodutibilidade dos ensaios.

Com a densidade média do sólido calculada, foi possível determinar o teor de hematita presente na amostra global, de acordo com a Equação 3.2. Portanto, definiu-se que o teor de hematita na amostra foi igual a 33,32%.

Tabela 4.1- Resultado do Teste de Picnometria da Amostra Global

Picnômetro	1	3	4
Massa do Picnômetro (g)	30,7	31,98	31,56
Massa do Picnômetro + Amostra (g)	40,67	39,26	42,01
Massa do Picnômetro + Amostra + Água (g)	87,05	87,38	89,42
Massa do Picnômetro + Água (g)	80,25	82,39	82,22
Densidade do Sólido (g/cm ³)	3,15	3,18	3,22
Desvio Padrão Médio		0,035	
Densidade Média do Sólido (g/cm³)		3,18	
Coefficiente de Variação (%)		1,1	

Assim, sabendo que a proporção mássica na hematita é constituída aproximadamente de 70% de ferro, admita-se que o teor de ferro na amostra global e a amostra da mesa foram igual a 23,32% e 31,86%, respectivamente.

4.1.3 Análise Granulométrica da Amostra Global

A Tabela 4.2 demonstra os dados obtidos pela análise granulométrica do material coletado. A operação foi realizada através do peneiramento combinado com uma massa inicial de 300 gramas, tendo uma perda mássica de 2,2 gramas ao final. Portanto, a perda foi de 0,73%, uma perda bem abaixo do limite tolerado de 5% e nenhuma das peneiras excederam a massa máxima retida, conseqüentemente a análise granulométrica mostrou-se eficiente.

Tabela 4.2- Análise Granulométrica da Amostra Global

Malha (#)	Malha (mm)	Malha (µm)	Retido (g)	Massa Máxima (g)	Retido (%)	Retido Acumulado (%)	Passante Acumulado (%)
3/4"	19,000	19000	0,00	-	0,00	0,00	100
4	4,750	4750	3,97	3043,65	1,33	1,33	98,67
9	2,000	2000	48,41	865,04	16,25	17,58	82,42
16	1,180	1180	44,80	407,53	15,04	32,62	67,38
28	0,590	590	67,20	226,83	22,57	55,19	44,81
45	0,355	355	32,42	121,11	10,89	66,08	33,92
60	0,250	250	12,67	77,53	4,25	70,33	29,66
80	0,190	190	10,79	56,39	3,62	73,95	26,03
100	0,150	150	8,26	43,57	2,77	76,72	23,26
150	0,106	106	10,00	32,81	3,36	80,08	19,90
200	0,074	74	11,25	23,07	3,78	83,87	16,13
270	0,053	53	9,15	16,28	3,07	86,94	13,06
325	0,044	44	5,26	12,43	1,76	88,69	11,29
400	0,040	40	0,53	10,76	0,18	0,18	11,11
-400	-	-	33,09	-	11,11	100	0,00
Massa Total (g)			297,8g	-	100	Perda (%)	0,73%

A partir dos dados obtidos, foi construída a curva de distribuição granulométrica da amostra global, representada pela Figura 4.3

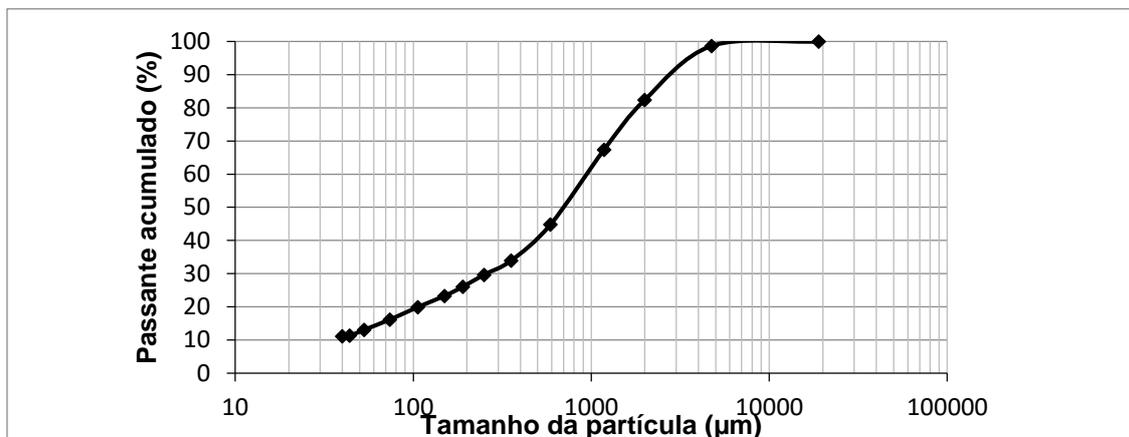


Figura 4.3 -Curva de Granulométrica da Amostra Global

A Figura 4.3 demonstra uma distribuição granulométrica da amostra bastante ampla, com D_{80} equivalente a 1,87mm. Afirmando assim, a origem do produto relatada por Cerceau (2018), onde a fração oriunda dos jigues é a mais grosseira e as demais frações referentes às espirais concentradoras e aos tambores magnéticos mais fina.

4.1.4 Análise Granulométrica da Mesa

A Tabela 4.3 demonstra os resultados obtidos da distribuição granulométrica da alimentação na mesa. Como exposto pela Tabela 4.3, a perda mássica foi de 1,9% do montante e nenhuma das peneiras excederam a massa máxima retida. Portanto, novamente a operação foi efetuada de forma eficiente, através do peneiramento combinado com 200 gramas da amostra.

Outra observação importante é que 29,48% das partículas, apresentaram granulometria menor que 0,074mm. Sabendo-se que o Critério de Concentração (Equação 2.1) foi de 2,6, pressupõe que este cenário poderia influenciar negativamente na eficiência da separação gravítica entre os minerais, como demonstrado pela Tabela 2.5.

Tabela 4.3- Análise Granulométrica da Alimentação da Mesa

Malha (#)	Malha (mm)	Malha (μm)	Retido (g)	Massa Máxima (g)	Retido (%)	Retido Acumulado (%)	Passante Acumulado (%)
20	0,841	841	0,00	-	0,00	0,00	100
28	0,600	600	23,45	1593,50	11,95	11,95	88,05
30	0,590	590	2,89	1315,94	1,47	13,42	86,58
35	0,420	420	22,71	1116,88	11,60	25,02	74,98
45	0,355	355	16,55	857,01	8,44	33,46	66,54
60	0,250	250	16,77	669,02	8,55	42,01	57,99
70	0,212	212	4,81	510,89	2,45	44,46	55,54
80	0,190	190	9,45	444,54	4,81	49,27	50,73
140	0,106	106	28,84	327,33	14,63	63,90	36,10
200	0,074	74	12,98	199,05	6,62	70,52	29,48
270	0,053	53	11,1	140,44	5,65	76,17	23,83
325	0,044	44	5,43	107,26	2,77	78,94	21,06
400	0,040	40	9,27	92,89	4,73	83,67	16,33
-400	-	-	31,94	-	16,30	100	0,00
Massa Total (g)			196,19		100	Perda (%)	1,9

Com os dados obtidos, foi possível construir a curva granulométrica referente a amostra da alimentação na mesa oscilatória (Figura 4.4). A partir do gráfico é possível observar um d_{80} da alimentação, correspondente a abertura de 0,490 mm, ou seja, 80% das partículas presentes na alimentação são menores que essa abertura de peneira.

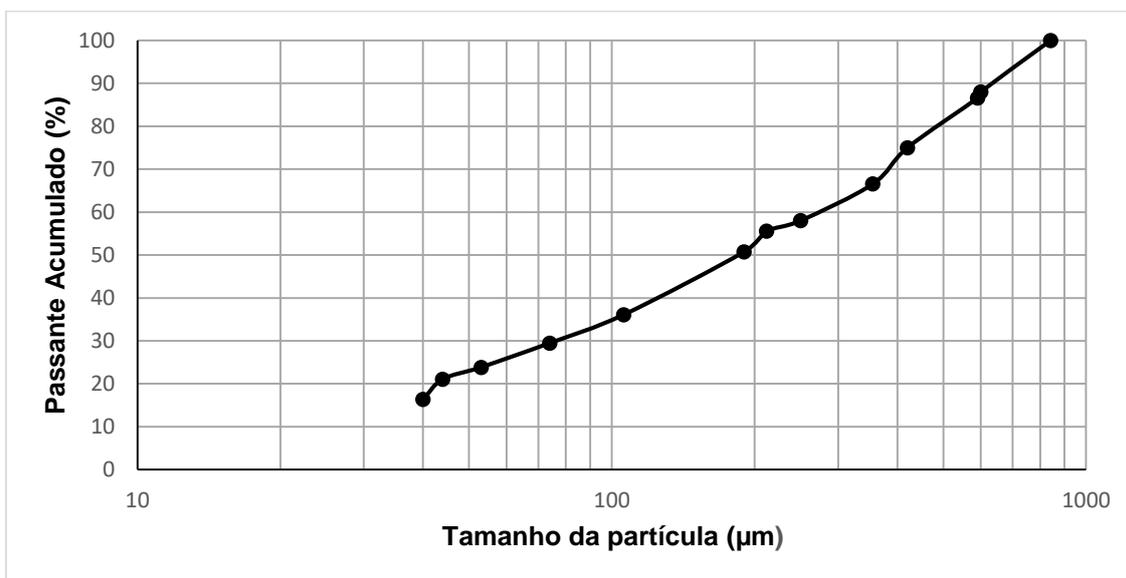


Figura 4.4- Curva Granulométrica da Alimentação na Mesa

4.2 Ensaio na Mesa Vibratória

Os testes realizados na mesa vibratória consistiam em obter as melhores variáveis operacionais para a concentração do minério de ferro presente no material, concebendo assim, uma areia mais pura (rejeito) e maiores ganhos na recuperação mássica e metalúrgica do minério. Tais testes avaliaram a viabilidade da realimentação do concentrado à planta de beneficiamento da empresa.

Para tal procedimento, foram realizados 12 testes para avaliar em duplicata seis condições operacionais como demonstrado pela Tabela 3.3. Posteriormente, foi efetuado a secagem, a pesagem e a picnometria dos produtos gerados para o cálculo da recuperação metalúrgica e mássica.

Dessa forma, os resultados obtidos na Tabela 4.4, foram calculados através da média entre as duplicatas com o intuito de amenizar o impacto dos erros sistemáticos da operação na dispersão dos resultados, gerando assim maior confiabilidade do procedimento. Lembrando que, o teor de ferro na alimentação foi de 31,86%.

Tabela 4.4- Resultados Médios dos Ensaio a Mesa

Ensaio	% Sól.	Inclinação	Rec. más. (%)	Rec. met. (%)	Teor Fe Conc. (%)
1		3°	61,42	64,21	33,31
2	25	4°	57,48	68,36	37,89
3		5°	47,47	56,02	37,65
4		3°	77,3	57,82	23,83
5	30	4°	59,74	74,25	39,6
6		5°	32,66	56,42	55,04

Ao analisar os dados coletados, com auxílio das ferramentas estatísticas do software MiniTab, foi possível a construção do gráfico da Figura 4.5. Tal gráfico apresenta os efeitos principais das variáveis operacionais inclinação e porcentagem de sólidos em relação a recuperação em massa do material.

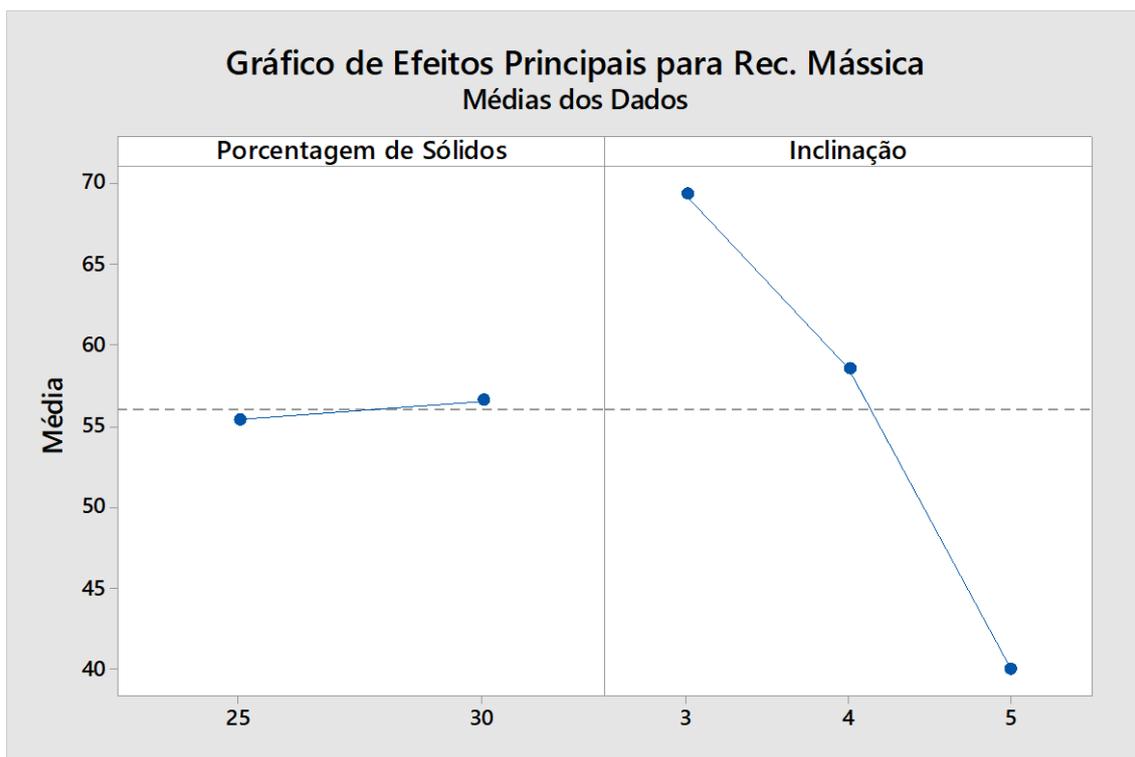


Figura 2.5- Influência das variáveis operacionais sobre a Rec.Másssica

Portanto, observa-se pela Figura 4.5, quando a variável inclinação é alterada, um efeito mais significativo é realizado sobre a recuperação mássica do material. O aumento da inclinação de 3° para 5°, resulta em uma diminuição média de 29,3% no valor da recuperação em massa. Este efeito, corrobora a afirmação realizada pelos autores Sampaio e Tavares (2005). Os autores supracitados apontam que para cenários operacionais onde menores inclinações são utilizadas, a descarga de partículas mais densas(concentrado) é aumentada ao final da mesa. Logo, para maiores inclinações, a descarga de partículas leves é aumentada ao início do comprimento da mesa.

No que se diz respeito à porcentagem de sólidos, em seu nível máximo a recuperação mássica sofre um aumento médio de 1,11%, uma diferença pequena, mas esperada. Pois, o aumento da concentração de sólidos na polpa, acarreta a maior probabilidade do carreamento das partículas na descarga do regime operacional. Exceto pelo ensaio 6, que apesar do aumento da porcentagem de 25% para 30% de sólidos na alimentação, foi o único ensaio em que houve uma diminuição na recuperação mássica de 47,7% do primeiro

cenário para 32,66 % do segundo cenário. Esse efeito está, possivelmente, atrelado aos erros sistemáticos da operação, como por exemplo: vazão mássica inconstante do alimentador vibratório.

A Figura 4.6 corresponde ao gráfico referente à interação das variáveis operacionais: porcentagem de sólidos e inclinação. Neste gráfico o comportamento das retas que se interceptam ou tendem se cruzar fora do intervalo estudado apresentam interação entre as variáveis na operação de uma resposta. Portanto, o efeito da porcentagem de sólidos está correlacionado ao ângulo de inclinação da mesa escolhida para obtenção de uma boa eficiência na recuperação em massa.

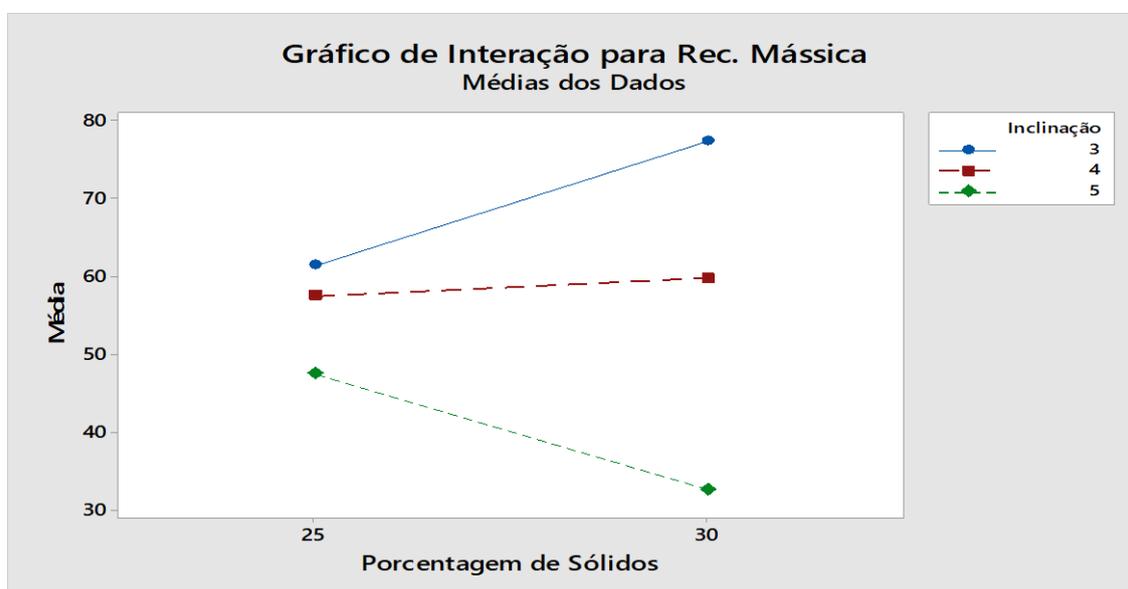


Figura 4.6- Gráfico de interação para Rec. Mássica

Vale ressaltar, que o ensaio 4 obteve um concentrado com teor de ferro de 23,83%, cujo cenário não condiz com a premissa do método de concentração, pois o valor estipulado está abaixo da concentração de ferro na alimentação. Este fato pode estar correlacionado a falha no desenvolvimento da técnica de picnometria devido não homogeneização antes da coleta do material para o picnômetro. À vista disso, este valor foi considerado um *outlier* na análise dos dados para recuperação metalúrgica e teor de ferro no concentrado, impedindo sua influência negativa na confiabilidade da descrição estatística dos resultados na concentração.

O gráfico da Figura 4.7, apresenta os efeitos principais das variáveis operacionais na recuperação metalúrgica do material. Com relação à variável porcentagem de sólidos, nota-se pelo gráfico, quando o nível menor (25%) é passado para nível maior (30%), a resposta da recuperação metalúrgica na operação sofre um aumento metalúrgico médio de 2,5%.

Já a variável inclinação, a alteração do ângulo de 3° para 4° acarretou um aumento metalúrgico médio de 7,01% na recuperação metalúrgica. Entretanto, quando o ângulo de inclinação foi alterado de 4° para 5°, verificou-se um maior efeito na resposta da recuperação metalúrgica, pois a reta que conecta os valores médios dos níveis analisados possui inclinação mais íngreme quando comparada as outras retas. Ou seja, houve uma diminuição metalúrgica de 15,09% da recuperação do nível intermediário (4°) para o nível maior (5°).

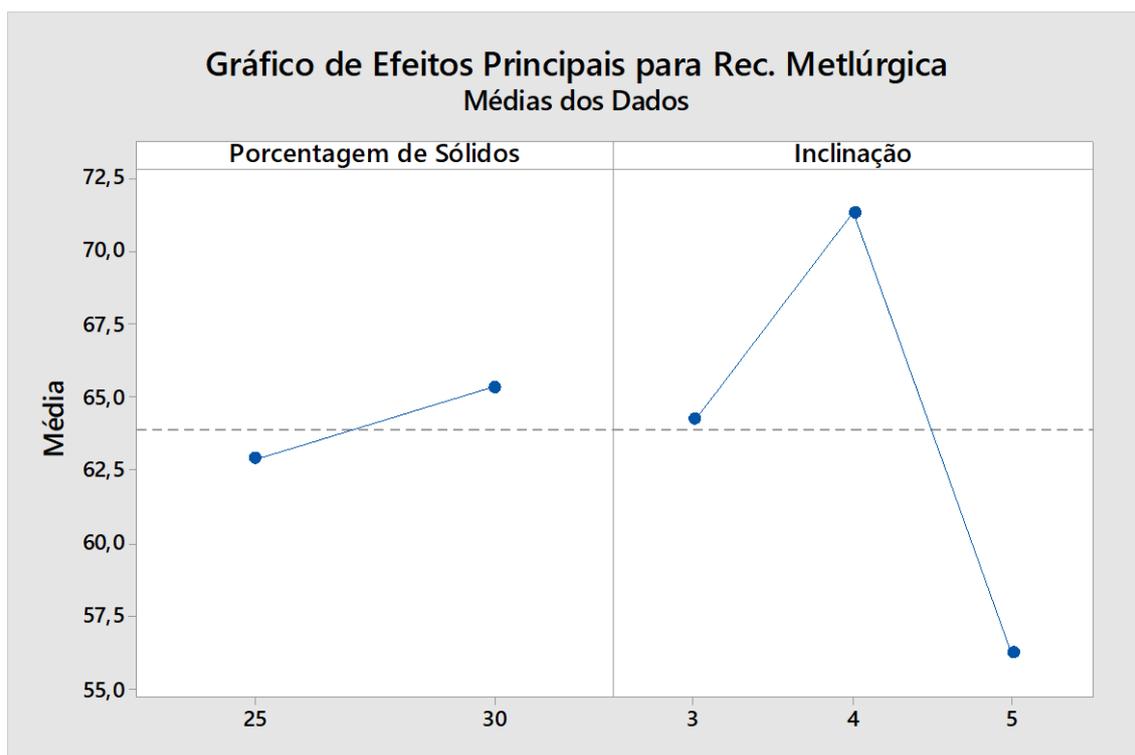


Figura 4.7-Influência das variáveis operacionais sobre Rec. Metalúrgica

Além disso, simultaneamente as variáveis analisadas, nota-se que a área de coleta designada como concentrado na Figura (3.13), também influenciou no aumento da recuperação em massa e na diminuição da seletividade metalúrgica da operação, pois a mesma, engloba a área referente a descarga mássica das partículas mistas.

A Figura 4.8 apresenta a curva de contorno sobre os teores médios de ferro obtidos no concentrado das duplicatas. Este gráfico demonstra o comportamento entre uma resposta ajustada e duas variáveis contínuas (porcentagem de sólidos e inclinação). Nesse gráfico os pontos que possuem o mesmo valor estão ligados para produzir linhas de contorno, mostrando assim uma visão bidimensional da resposta influenciada pelas variáveis operacionais analisadas (Minitab 18, 2019).

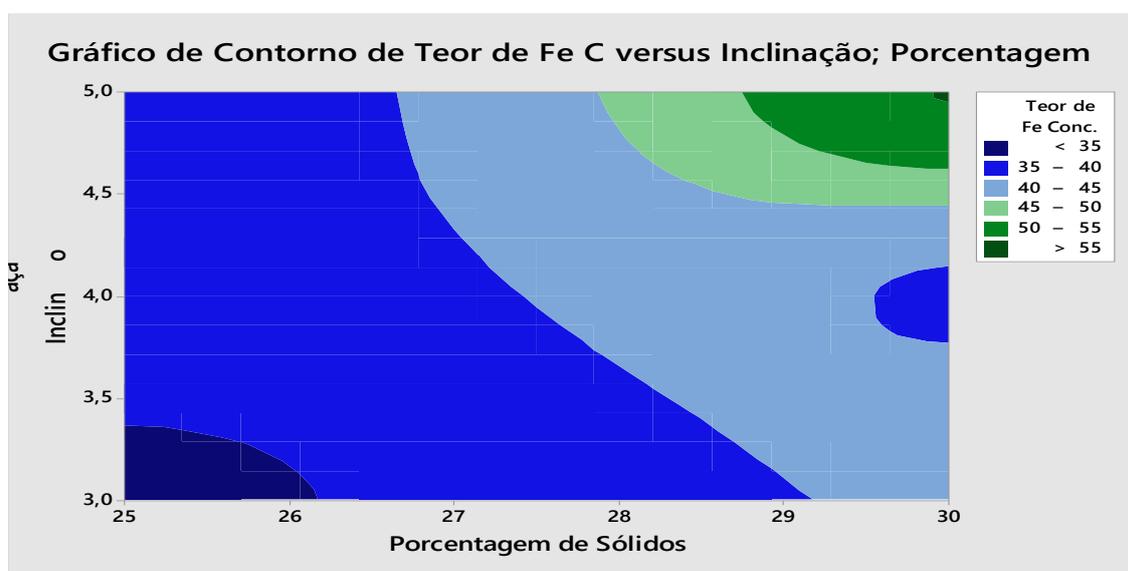


Figura 4.8-Curva de contorno para o Teor de Ferro no concentrado

De acordo com a Figura 4.8, os índices superiores a 28% e 4,5° para as variáveis operacionais porcentagem de sólidos e inclinação, respectivamente, possuem os melhores valores dos teores de ferro no concentrado, dos quais os resultados ultrapassam os 45%. Dessa forma, o ensaio 6 representa o cenário com maior teor de ferro no concentrado, proporcionado pela melhor estratificação do material neste regime operacional. A Figura 4.9 está representado o concentrado e o rejeito do ensaio 6.

Observa-se pela Figura 4.9 uma diferença de tonalidades entre os produtos gerados, os quais foram observados os teores de ferro no concentrado e rejeito, respectivamente, de 55,04% e 19,16%. Apesar do teor de ferro ter sido alto na porção concentrada, houve uma grande rejeição metálica de ferro no

rejeito, ocasionada pelo carreamento das partículas finas e densas na descarga das partículas leves nas maiores inclinações.



Figura 4.9 -Ensaio 6: Concentrado

Rejeito

Portanto, otimizar a operação faz-se necessário, para que os índices dos teores de ferro dos concentrados analisados estejam aliados a valores mais satisfatórios de recuperação mássica e um rejeito mais puro.

4.2.1 Teste Ideal

O teste ideal é a conclusão das análises proferidas, em que consiste obter o melhor cenário de concentração em relação aos resultados obtidos durante os ensaios. Para a obtenção do teste ideal, foi utilizado o “otimizador de resposta” do software Minitab18. Essa ferramenta estatística especifica a combinação de variáveis de entrada que otimizam uma resposta simples ou o conjunto de respostas (Minitab 18, 2019), calculando uma solução ótima e traçando um gráfico de otimização

Assim, a Figura 4.10 expõe o gráfico de otimização do conjunto de resposta para os ensaios realizados. O objetivo foi maximizar a resposta do teor de ferro no concentrado juntamente a maior recuperação mássica do material.

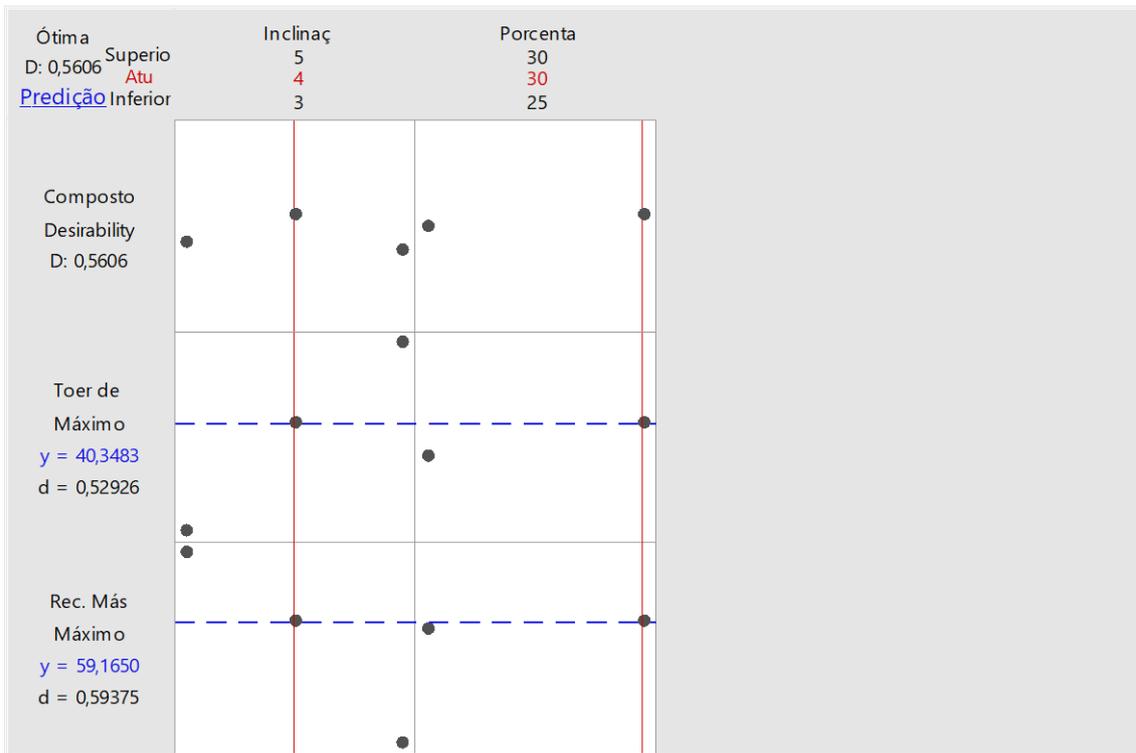


Figura 4.10- Otimizador de resposta da mesa

O gráfico de otimização demonstra que os resultados obtidos foram realizados no cenário operacional com ângulo de inclinação de 4° e porcentagem de sólidos de 30%. Nesse cenário o conjunto das respostas otimizadas resultam a 40,35% de teor de ferro no concentrado atrelado a recuperação em massa maximizada de 59%.

O cenário otimizado proposto pelo software representa o ensaio 5, onde gráfico da Figura 4.11 demonstra os resultados gerados em seu regime operacional.

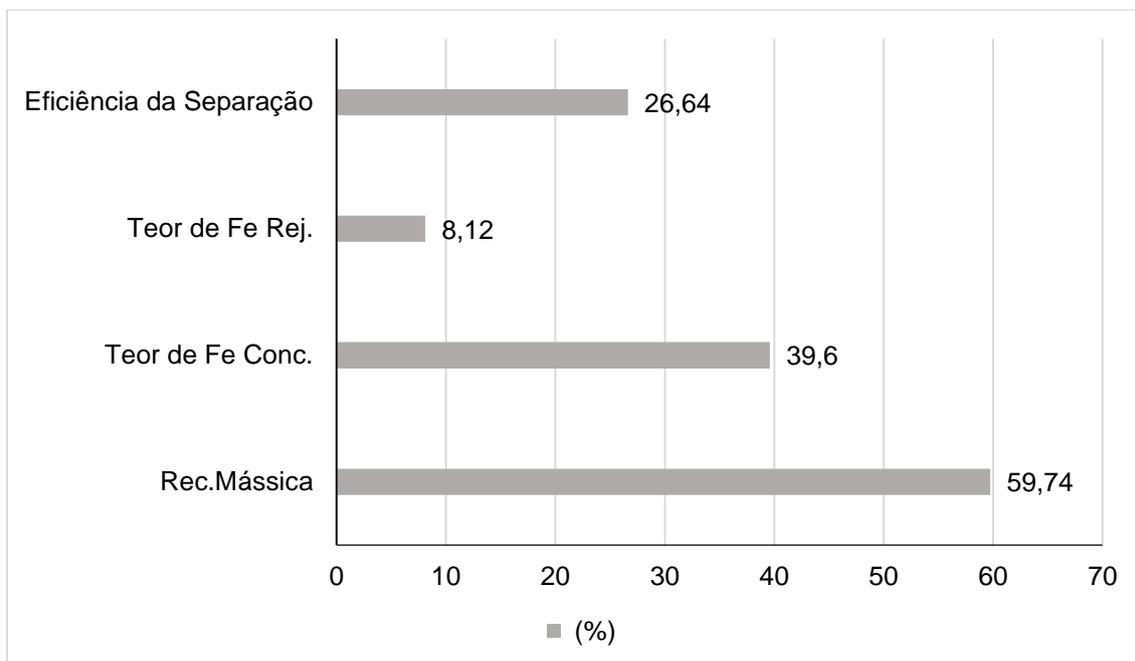


Figura 4.11- Resultados do Ensaio 5

Nota-se pelo gráfico, que o rejeito gerado pelo ensaio supracitado, possui um teor de 8,12 de ferro, o que fornece uma areia mais pura em sílica para a produção de lajotas e blocos pré-moldados. Entretanto, a eficiência da separação na mesa foi de 26,64%, um valor relativamente baixo, que pode estar correlacionado em dois aspectos:

- A proporção de 29,48% das partículas, apresentarem granulometria abaixo de 0,074mm;
- Baixo grau de liberação de hematita em faixas granulométricas mais grosseiras na alimentação.

Estes aspectos podem ser observados pelo cenário operacional do citado ensaio, que é apresentado pela Figura 4.12.

Operacionalmente, apesar da distribuição uniforme do material sobre o deque, não foi verificado um corte perceptível de separação entre a hematita e quartzo, aspecto influenciado pela presença de partículas mistas carregadas juntamente com as partículas densas, como demonstrado pela Figura 4.12. Além disso, evidencia-se pela cor do fluido, a grande incidência de partículas finas sendo carregadas no regime operacional. Este aspecto pode influenciar na viscosidade do fluido, o que efetivamente pode atrapalhar a seletividade da operação. Sendo assim, pressupõe-se a implementação de uma etapa de

deslamagem anterior a alimentação da mesa, a fim de proporcionar uma melhora na eficiência da concentração.



Figura 4.12-Visualização do Ensaio 5

5. Conclusão

A análise da difração de raios-x revelou a presença majoritária de hematita e quartzo na amostra, que justificou a utilização da picnometria para os cálculos dos teores dos concentrados. A picnometria em triplicata obteve valores próximos, validando a confiabilidade dos resultados. Destaca-se também, a importância da homogeneização do material antes da coleta, pois a segregação entre as partículas pode resultar teores equivocados para posterior análise.

O teor de ferro da amostra global e da alimentação da mesa foram respectivamente 23,32% e 31,86%. O material mostrou boa liberação de hematita com tamanho granulométrico abaixo de 0,106 mm.

Outro aspecto importante foi o planejamento fatorial processado pelo software Minitab18. Essa ferramenta proporcionou facilidade na percepção dos efeitos ocasionados pela alteração das variáveis operacionais na concentração gravítica, expondo assim, uma solução ótima, compreendida pelo propósito do estudo.

Foi observado também que o ângulo de inclinação da mesa foi a variável operacional mais influente sobre os resultados médios das recuperações em massa e metalúrgica do material. Para maiores inclinações e maiores porcentagem de sólidos acarretaram cenários com maior seletividade metálica ao concentrado.

O teste ideal consistiu em maximizar juntamente o teor de ferro no concentrado e a recuperação mássica da mesa oscilatória. O melhor cenário correspondeu ao ensaio 5: inclinação de 4° e 30% de sólidos, o teor de ferro encontrado no concentrado e no rejeito, foi de 39,6% e 8,12%, respectivamente. À vista disso, como a recuperação em massa de 59,74% foi significativa, faz-se necessário à implementação de uma etapa *cleaner* subsequente para melhorar a seletividade da operação, a fim de atender as especificações da realimentação do concentrado à planta de beneficiamento. Sendo o rejeito da etapa *cleaner* realimentado em circuito fechado a etapa anterior analisada. Relata-se também a necessidade de utilização de uma etapa de deslamagem anterior a alimentação da concentração, impedindo o impacto negativo das partículas muito finas na eficiência da separação.

O rejeito final apresentou uma areia muito fina rica em sílica, o que pode ser estudado para encontrar meios que gerem mais receitas além da produção de blocos pré-moldados e lajotas.

6. Sugestões para Trabalhos Futuros

- Verificar a viabilidade da moagem para a faixa granulométrica acima de 20 mesh (0,841mm);
- Analisar o efeito da variável operacional amplitude na seletividade da operação;
- Otimizar a etapa cleaner subsequente;
- Estudar o material abaixo de 0,250mm;

Referências

- ALECRIM,J.D. (1982). **Recursos Minerais do Estado de Minas Gerais. *Metaning***,p. 297.
- ALVES, J. (2017). **Concentração de Minério de Ferro Proveniente do Depósito Jambreiro da Região de Guanhães-MG Utilizando Mesa Concentradora. *Graduação***. CEFET-MG, Araxá.
- ANDERY, P. (1980). **Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia**. Recife: ITEP.
- BARTNIK, J., ZABEL, W., & HOPSTOCK, D. (Oct. de 1975). **The Production of Iron Ore Superconcentrate by High-Intensity Magnetic Separation . *International Journal of Mineral Processing*** , vol.2, p.117-126.
- BORGES, A. (2015). **Concentração de Minério de Ferro do Depósito de Jambreiro da Região de Guanhães-MG Via por Métodos Gravíticos e Magnéticos. *Graduação***. CEFET-MG, Araxá.
- BORGES, A., LUZ, J. & FERREIRA, E. (2008). **Caracterização da parcela magnética de minério fosfático de carbonatito. *Mestrado***. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- BROD, R. (2012). **Circuito Alternativo para Flotação do Minério de Ferro. *Dissertação Mestrado Universidade Federal de Ouro Preto- Escola de Minas***.
- BURT, R. (1984). **Gravity concentration technology**. Amsterdam: Elsevier.
- CARVALHO,P.S.L., SILVA,M.M., ROCIO,M.A.R. & MOSZKOWICZ,J . (2014). **Minério de Ferro. *BNDES Setorial***, p.197-234.
- CERCEAU, L. (2018). **Informação Pessoal. *enviado para <guipedrosa123@gmail.com>***, 1.
- CERCEAU, L. (2019). **Informação Pessoal. *enviado para <guipedrosa123@gmail.com>***, 1.
- CHAVES, A. & CHAVES-FILHO, R. (2013). **Separação Densitária (Vol. 6)**. São Paulo: Oficina de Textos.

- CHEN, L., XIONG, D., & HUANG, H. (Aug. de 2009). **Pulsating High Gradient Magnetic Separation of Fine Hematite from Tailings.** *Minerals & Metallurgical Processing*, vol. 26, p.163-168.
- CRISÓSTOMO, R. (2015). **A Separação Magnética de Minérios de Ferro no Brasil- Uma Revisão.** *Monografia.* Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- DNPM. (2017). **ANUÁRIO BRASILEIRO MINERAL - Principais Substâncias Metálicas.**
- FERREIRA, C. (2015). **Métodos de Flotação de Minério de Ferro.** *Monografia.* Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- FERREIRA, D. (2011). **Principais Etapas do Tratamento de Minérios Itabiríticos do Quadrilátero Ferrífero.** *Monografia.* Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- FERREIRA, R. (2013). **Estudo de Liberação das Fases Mineraias em Minérios de Ferro.** *Mestrado.* Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- FERREIRA, R., SILVA, R. & MARQUES, M. (2015). **Relação Entre Grau de Metamorfismo e Malha de Liberação de Itabiritos Compactos do Quadrilátero Ferrífero.** *Tecnol. Metal. Mater. Miner*, p.140-145.
- FIGUEIREDO, R. (2017). **Caracterização de Areias Silicosas e de Rejeitos de Mineração para Uso em Processos de Fundição.** *Dissertação de Mestrado*, p. 21.
- GALVÃO, R. O. (2017). **Aplicação de um Planejamento Fatorial na Recuperação da Ilga Metálica (FeSiMn) de Escória Empregando-se a Mesa Oscilatória Wifley.** *Dissertação de Mestrado.* Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências , Departamento de Engenharia de Minas, Recife.

- GOMES, A. (2017). **Estudo de Aproveitamento de Rejeito de Mineração. Dissertação de Mestrado.** Universidade federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- GOMES, M. A. (2009). **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de Ferro.** Pós-graduação em Engenharia Mineral. Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- KLEIN, C., & DUTROW, B. (2007). **Physical properties of minerals.** In: C. Klein, & B. Dutrow, *The Manual of Mineral Science* (p. 19-36). INC: Jonh Wiley & Sons .
- LAGE, E. (2010). **Separadores Magnéticos: Experiência em minério de ferro na Herculano Mineração.** Pós Graduação em Engenharia Mineral. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- LINS, F. (2010). **Concentração Gravítica** (5 ed.). Rio de Janeiro: CETEM.
- LOPES, G. (2009). **Flotação Direta de Minério de Ferro.** Pós-Graduação. Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- LOPES, G. & LIMA, R. (2009). **Flotação Direta de Minério de Ferro com Oleato de Sódio.** *Escola de Minas de Ouro Preto*, v.62,n.3,p.323-329.
- LUZ, A. B. & LINZ, F. A. (2004). **Introdução ao tratamento de minérios.** *Estudo da Arte.* Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro.
- LUZ, A., FRANÇA, S. & SAMPAIO, J. (2010). **Tratamento de Minérios** (4 ed.). Rio de Janeiro: CETEM/MCT.
- LUZ, P. (2018). **Determinação do Grau de Liberação da Hematita de Pratinha, Minas Gerais.** *Monografia.* Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá.
- MANSER, R., BARLEY, R., & WILLS, B. (1991). **The shaking table concentrator-the influence of operating conditions and table parameters on mineral separation.** *Minerals Engineering*,p. 369-381.
- MAPA, P. (2006). **Rota de Processo para o Underflow da Deslamagem de Minério de Ferro do concentrador da Samarco Mineração S.A.**

- Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- MARIA, R. (2009). **Otimização Técnico-Econômica de Circuitos de Flotação**. *Pós-Graduação*. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- MAZON, R. (2006). **Efeito do Tempo de Residência sobre a Recuperação Metálica da Flotação Coluna Reversa de Minério de Ferro**. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal de Ouro Preto Curso de Pós Graduação em Engenharia Mineral, Ouro Preto.
- METALLURGIST, 9. (15 de novembro de 2018). *911 Metallurgist*. Fonte: 911 Metallurgist: <https://www.911metallurgist.com/blog/gold-shaking-tables>
- MINITAB 18. (10 de Junho de 2019). *Visão Geral de Gráfico de contorno*. Fonte: Suporte ao Minitab:<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/using-fitted-models/how-to/contour-plot/before-you-start/overview/>
- MINITAB 18. (10 de Junho de 2019). *Visão Geral de Otimizador de resposta,Planejar um experimento*. Fonte: Suporte ao Minitab 18: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/using-fitted-models/how-to/response-optimizer/before-you-start/overview/>
- MOSKOWITZ, B. (5-8 de June de 1991). ***Hitchhiker's Guide to Magnetism***. Fonte: Magneticmicrosphere: www.irm.umn.edu/hg2m/hg2m.pdf
- MULAR, A., DOUG, N. & DEREK, J. (2002). **Mineral Processing Plant Design, Pratices and Control**. *Proceedings, vol 2, vol 1*.
- NASCIMENTO, D. R. (2010). ***Flotação aniônica de minério de ferro***. Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas, UFOP.
- PERES, A. (1996). **Flotação**. *Monografia*. Departamento de Engenharia de Minas, UFMG, Belo Horizonte.
- PERES,A.,COELHO,E.&ARAÚJO,A.(1980). **Flotação,espessamento,deslamagem e floculação seletiva**. In: E.

- Coelho, *Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia* (pp. 205-286). Recife: ITEP-CNPq.
- PETRUK, W. (2000). **Applied Mineralogy in the Mining Industry**. Elsevier, p.286.
- RABOKAI, T. (1979). **Físico Química de Superfícies**. São Paulo: Instituto de Química da Universidade de São Paulo.
- ROCHA, R. (2018). **Concentração de Rejeito de Flotação e Lamas de Minério de Ferro por Separação Magnética**. Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas., Ouro Preto.
- ROSIÈRE, C. & CHEMALE, J. (2000). **Itabiritos e Minérios de Ferro de Alto Teor do Quadrilátero Ferrífero- Uma Visão Geral e Discussão**. *Revista Geonomos*, ed.(2), p.27-43.
- SAMPAIO, C. & TAVARES, L. (2005). **Beneficiamento Gravimétrico: uma introdução aos processos de Concentração Mineral e Reciclagem de Materiais por densidade**. *Estudo*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- SAMPAIO, J., FRANÇA, S. & BRAGA, P. (2007). **Tratamento de Minérios Práticas Laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM-MCT.
- SANTOS, E., GAMA, E., FRANÇA, R., SOUZA, A. & MATOS, R. (1 de Dezembro de 2013). **Espectrometria de Fluorescência de Raios-X na Determinação de Espécies Químicas**. *Enciclopédia Biosfera*, n.9, p. 3415.
- SCHOBENHAUS, C. & COELHO, C. (1986). **Principais Depósitos Minerais Brasileiros- Ferro e Metais da Indústria do Aço**. *DNPM*, 2, 501.
- SILVA, F. (2007). **Estudos de Caracterização Tecnológica e Beneficiamento do Caulim da Região Borborema-Seridó**. Mestrado. COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- SILVA, J. (2014). **Aplicação de Separação Magnética de Alta Intensidade (WHIMS) no Beneficiamento de Ibritos Pobres**. Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

- SUNIL, K., RAMAMURTHY, Y. & VEERENDA, S. (2011). **Recovery of Chromite Values from Plant Tailings by Gravity Concentration.** *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, vol.10, p.13-25.
- TAKEHARA, L. (2004). **Caracterização Geometalúrgica dos Principais Minérios de Ferro Brasileiros- Fração Sinter Feed.** *Tese de Doutorado.* Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Geociências, Porto Alegre.
- TOTOU, A. (2010). **Efeito da Dispersão da Deslamagem e Flotação de Polpas de Minérios Hematíticos Itabiríticos.** *Dissertação de Mestrado. Escola de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral.* Universidade de Ouro Preto, Ouro Preto.
- USGS. (2018). **Mineral Commodity Summaries.** *Sumário.* U.S Geological Survey, Reston, Virginia.
- VASCONCELOS, J., BRANDÃO, P. & LEMOS, L. (2012). **Estudos de Caracterização e Concentração de Itabirito Compacto do Complexo Serra Azul, MG.** *Tecnol. Metal. Mater. Miner*, p.89-94.
- WALDE, D. (1985). **Geologia do Ferro.** *Principais Depósitos Minerais do Brasil*, 2, 123-126.
- WILLS, B. (2006). **Mineral Processing Technology** (7 ed.). Oxford: Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery.

Apêndice A.1- Resultados do Grau de liberação

A Tabela A.1.1, demonstra o registro de cálculo do grau de liberação da hematita na amostra global para as respectivas faixas granulométricas:

Faixa Granulométrica (mm)	Índice de Partículas Livres	Índice de Partículas Mistas	Grau de liberação (%)
-0,841 + 0,250	290	193	60
-0,250 + 0,106	620	136	82
-0,106 + 0,053	780	41	95
-0,053 + Fundo	830	17	98