

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado

## **ESTUDO DE APROVEITAMENTO DE REJEITO DE MINERAÇÃO**

Autora: Ana Cláudia Franca Gomes

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Rísia Magriotis Papini

Belo Horizonte

Fevereiro/2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Ana Cláudia Franca Gomes

## **ESTUDO DE APROVEITAMENTO DE REJEITO DE MINERAÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de concentração: Tecnologia Mineral

Orientadora: Prof<sup>ª</sup> Rísia Magriotis Papini

Belo Horizonte

2017



Dedico este trabalho à minha mãe, que é a pessoa mais incrível e inspiradora que conheço. Obrigada por me ensinar que a educação transcende títulos e que um sorriso faz toda a diferença na vida do outro... e que eu nunca, nunca mesmo, me esqueça disso!

“O saber a gente aprende com os mestres e os livros... A sabedoria se aprende com a vida e com os humildes!”

(Cora Coralina)

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, por todo o apoio e assistência, por acreditarem em mim;

Aos meus irmãos, sobrinha, familiares e amigos por entenderem o tempo demandado pelo trabalho;

À professora Rísia pela sua orientação que me permitiu superar dificuldades e enriquecer este trabalho, pelo estágio docente que foi a parte mais incrível deste processo, por acreditar e apoiar o meu projeto quando ele ainda não passava de um esboço;

À Vallourec por apoiar a pesquisa, pelas análises químicas, pela amostra cedida e em especial ao Vannucci pela sua atenção e por dividir comigo um pouco da sua experiência;

Ao Matheus por realizar sua Iniciação Científica comigo, por me ajudar na parte prática deste trabalho, pelos testes quase intermináveis de separação magnética;

Aos professores e técnicos da UFMG que sempre foram solícitos e me ensinaram muito com as suas experiências. Em especial Andreia Henriques, George Valadão, Isabel Batista, Luiz Cláudio, Paulo Brandão, Paulo Viana, Roberto Galery, Sônia Denise, e Toninho.

Aos meus colegas do PPGEM, pelos bons momentos durante o período de execução desse projeto e pelas novas amizades;

Aos profissionais da área que, em algum momento, me ajudaram no desenvolvimento desse trabalho, seja com discussões técnicas, referências bibliográficas, revisões de texto ou com o fornecimento de informações. Muito obrigada Antônio Clareti, Camila Andrade, Carolina Maria, Elaine Campos, Emily Meyer, Fernanda Borsagli, Felipe Aguiar, Laís Nametala, Leandro Bicalho, Leonardo Santos, Lincoln Heringer, Mário Bueno, Maurício Lima, Natália Meireles, Patrícia Bastos, Paula Leal, Rafael Barroso e Thales Souza. Espero não ter esquecido ninguém;

Ao Alberto Afonso e ao André pela paciência! Pelos conselhos, pelas revisões, pelo trabalho prático, pelas novas ideias, pelas discussões, por tornar a rotina muito mais agradável;

À CAPES, CNPq, e FAPEMIG pelo suporte financeiro, pelas instalações e equipamentos necessários nessa jornada, sem este apoio nada seria possível;

À minha querida UFMG e a todos que acreditam na educação;

Obrigada Deus, que mesmo em um país com tantas injustiças e desigualdades, me proporcionou o privilégio de estudar e cruzar o caminho de tantas pessoas especiais!

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivo.....</b>	<b>3</b>
2.1 Objetivo Geral .....	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
<b>3. Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>3</b>
3.1 Considerações sobre barragens de rejeitos .....	4
3.1.1 Necessidade de recuperação de minérios finos .....	5
3.1.2 Aspectos Ambientais no aproveitamento de rejeitos da mineração.....	8
3.1.3 Aspectos econômicos no aproveitamento de rejeitos na mineração.....	9
3.1.4 Sustentabilidade na gestão de rejeitos da mineração .....	11
3.2 Caracterização Tecnológica de Minérios .....	15
3.3 Minério de Ferro – características gerais.....	16
3.4 O Beneficiamento de minério de ferro .....	22
3.4.1 Separação Magnética .....	25
3.4.2 Separador Magnético de Alta Intensidade tipo Jones .....	28
3.4.3 Finos na separação magnética .....	31
3.5 Exemplos de Estudos Recentes.....	33
<b>4. Metodologia.....</b>	<b>37</b>
4.1 Amostragem.....	37
4.2 Caracterização tecnológica .....	38
4.1.1 Determinação da massa específica .....	38
4.2.2 Análise Granulométrica.....	39
4.2.3 Área superficial específica e porosimetria .....	40
4.2.4 Análise Química por Fluorescência de Raios - X.....	41
4.2.5 Difractometria de Raios – X .....	41
4.2.6 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) .....	41

4.3 Testes de concentração .....	41
4.3.1xDeslamagem .....	42
4.3.2 Testes exploratórios – Separador magnético de baixa intensidade .....	43
4.3.3 Testes exploratórios – Separador Magnético de ímã permanente .....	43
4.3.4 Testes exploratórios – Separador Magnético de alta intensidade .....	43
4.3.5 Proposta de rota magnética.....	45
4.3.6 Testes de pressão de lavagem .....	48
4.3.7 Testes de liberação e dispersão .....	49
<b>5. Resultados e Discussão .....</b>	<b>51</b>
5.1 Caracterização Tecnológica.....	51
5.1.1 Massa específica .....	51
5.1.2 Análise granulométrica .....	51
5.1.3 Área superficial específica e porosimetria.....	54
5.1.4 Análise química por fluorescência de raios-x.....	54
5.1.5 Difractometria de raios-x.....	55
5.1.6 Microscópio eletrônico de varredura/EDS.....	56
5.2 Testes de concentração .....	57
5.2.1 Testes de pressão de lavagem .....	63
5.2.2 Testes de liberação e dispersão .....	64
<b>6. Conclusão .....</b>	<b>69</b>
<b>7. Referências Bibliográficas .....</b>	<b>71</b>
<b>8. ANEXO I – Difractogramas de raios-x .....</b>	<b>80</b>
<b>9. ANEXO II – MEV/EDS.....</b>	<b>83</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Cronologia da mineração no Brasil: do seu surgimento até os dias atuais .....	2
Figura 3.1: Esquema de direcionamento geral de rejeitos na mineração .....	5
Figura 3.2: Fluxograma generalizado de reciclagem de resíduos da mineração.....	11
Figura 3.3: Exemplo de fluxograma para a Caracterização Tecnológica de Minérios .....	17
Figura 3.4: A importância do minério de ferro na economia brasileira .....	19
Figura 3.5: Fluxograma típico de tratamento de minério.....	23
Figura 3.6: Classificação e características gerais dos separadores magnéticos.....	27
Figura 3.7: Separador magnético tipo Jones .....	29
Figura 3.8: Diagrama de forças esquemático em separador tipo Jones.....	29
Figura 3.9: A) Campo magnético Uniforme B) Campo magnético Convergente, apresentando o gradiente de campo .....	30
Figura 3.10: Agregação de partículas magnéticas em polpa mineral.....	31
Figura 3.11: Planta de processamento de ultrafinos da Samarco .....	33
Figura 4.1: Fluxograma da metodologia adotada.....	37
Figura 4.2: Mangueira utilizada para deslamagem em 10 $\mu$ m .....	42
Figura 4.3: Rotas A, B e C de concentração magnética no separador tipo Jones .....	47
Figura 4.4: Rota C no separador magnético tipo Jones.....	48
Figura 5.1: Distribuição granulométrica dos sete peneiramentos combinados .....	52
Figura 5.2: Distribuição granulométrica P médio .....	52
Figura 5.3: Análise granulométrica por Granulômetro de difração a laser .....	53
Figura 5.4: Difratoograma da amostra in natura. Quartzo (■), Hematita (●), e Goethita (▲).....	56
Figura 5.5: Análise exploratória MEV/EDS - Imagem de elétrons retroespalhados de hematita A) martita B) granular .....	58
Figura 5.6: Faixa de 45 $\mu$ m – Partícula de Goethita e Hematita (granular) .....	58
Figura 5.7: Análise exploratória MEV/EDS - Imagem de elétrons retroespalhados da faixa 106 $\mu$ m com os minerais: Hematita (granular e martita), Quartzo, Goethita, Caulinita e Óxido de Manganês .....	59
Figura 5.8: Eficiência da Deslamagem por Granulometria de Difração a Laser.....	60
Figura 5.9: Exemplo de imagem analisada na microscopia óptica A) partícula silicosa B) óxido de ferro.....	62
Figura 5.10: Testes de pressão de lavagem para a rota C .....	63
Figura 5.11: Grau de Dispersão (GD) X pH (adição de NaOH) .....	65
Figura 5.12: Grau de Dispersão (GD) x reagente (Hexametáfosfato e Poliacrilato de sódio nas dosagens de 400, 900 e 1200g/t).....	65
Figura 5.13: Distribuição granulométrica do material moído .....	66



Figura 5.14: Resultado dos testes de liberação x dispersão na separação magnética.....	67
Figura 8.1: Difratoograma da faixa 106µm. Quartzo (■), Hematita (●), e Goethita (▲).....	80
Figura 8.2: Difratoograma da faixa 75µm. Quartzo (■), Hematita (●), e Goethita (▲).....	80
Figura 8.3: Difratoograma da faixa 53µm. Quartzo (■), Hematita (●), e Goethita (▲).....	81
Figura 8.4: Difratoograma da faixa 45µm. Quartzo (■), Hematita (●), e Goethita (▲).....	81
Figura 8.5: Difratoograma da faixa 38µm. Quartzo (■), Hematita (●), e Goethita (▲).....	82
Figura 8.6: Difratoograma da faixa < 38µm. Quartzo (■), Hematita (●), e Goethita (▲).....	82
Figura 9.1: Análise de liberação – aumento de 100x: a) faixa 106µ b) 75µm.....	83
Figura 9.2: Faixa 106µm – Partícula de Goethita e Hematita granular.....	83
Figura 9.3: Faixa 53µm - Partícula de Goethita e Hematita granular .....	84
Figura 9.4: Faixa 38µm – Variedades minerais encontradas .....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3-I: Classificação de Barragens de rejeito por Categoria de Risco e Dano Potencial Associado .....	6
Tabela 3-II: Classificação das barragens de mineração identificadas em MG.....	6
Tabela 3-III: Levantamento de dados de 2014, relação das principais minas e quantidade de rejeitos no estado de Minas Gerais.....	7
Tabela 3-IV: Principais tópicos de uma gestão responsável dos rejeitos da mineração .....	12
Tabela 3-V: Composição mineralógica dos tipos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero .....	18
Tabela 3-VI: Principais propriedades e características dos minerais portadores de ferro.....	20
Tabela 3-VII: Principais propriedades e características dos minerais contaminantes de minério de ferro .....	21
Tabela 3-VIII: Principais modelos de separadores magnéticos industriais.....	27
Tabela 3-IX: Exemplos de Estudos recentes de recuperação de finos de minério de ferro em Minas Gerais .....	36
Tabela 4-I – Parâmetros e métodos analisados na caracterização.....	38
Tabela 4-II: Condições operacionais para análise granulométrica em meio fluido (Cyclosizer) 40	
Tabela 4-III: Testes exploratórios de concentração em separador magnético de alta intensidade tipo Jones/ GAP=1,5mm .....	44
Tabela 4-IV: Testes exploratórios de concentração em separador magnético de alta intensidade tipo Jones/ GAP=1,0mm .....	45
Tabela 4-V: Testes exploratórios combinados de separação magnética .....	46
Tabela 4-VI: Rota de concentração: D.....	46
Tabela 4-VII: Testes de pressão de lavagem para a rota C .....	48
Tabela 4-VIII: Testes de liberação e dispersão para a Rota C .....	50
Tabela 5-I: Determinação da densidade relativa ( $\text{g/cm}^3$ ) .....	51
Tabela 5-II: Análise granulométrica do material .....	53
Tabela 5-III: Área superficial específica e porosimetria .....	54
Tabela 5-IV: Análises granuloquímicas .....	55
Tabela 5-V: Possíveis minerais de Mn.....	57
Tabela 5-VI: Análises químicas das rotas de concentração propostas .....	62
Tabela 5-VII: Análises químicas dos testes de liberação e dispersão na rota magnética C .....	67
Tabela 5-VIII: Parâmetros investigados na separação magnética.....	68

## LISTA DE ABREVIACOES

A	Ampere
ASE	Área superficial específica
CAPES	Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
FFB	Formação Ferrífera Bandada
FMS	<i>Floc Magnetic Separation</i>
G	Gauss
GAP	Abertura entre placas
GD	Grau de dispersão
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
Nimby	<i>“Not in my backyard”</i> – Não no meu quintal
ROM	<i>“Run of mine”</i> – Minério tal e qual
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
UF	<i>Underflow</i>
OF	<i>Overflow</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
US	<i>Under size</i>
OS	<i>Over size</i>
T	Tesla
WHIMS	<i>“Wet High Intensity Magnetic Separator”</i> – Separador Magnético de alta intensidade a úmido

## LISTA DE EQUAÇÕES

3:1: Equação de Magnetização.....	25
3:2: Equação de Susceptibilidade Magnética.....	25
4:1: Equação de Densidade Relativa.....	39
4:2: Equação da massa de Gaudin.....	39
4:3: Equação de Grau de Dispersão .....	49

## RESUMO

Um dos grandes desafios atuais da engenharia de minas é o tratamento e a otimização dos recursos naturais. A necessidade de redução de resíduos enviados a barragens de rejeitos, associada à crescente dificuldade de obtenção de licenças ambientais e locais adequados para a sua disposição, é um dos fatores que indicam o processamento de finos como alternativa para a recuperação de ferro estocado nessas estruturas. A fim de investigar tal cenário, foi feita a caracterização tecnológica de amostra proveniente de barragem de rejeito, além de testes de separação magnética para proposta de rota de concentração. A revisão bibliográfica apontou casos exitosos de recuperação de partículas finas de ferro em minas do Quadrilátero Ferrífero e em todos eles a etapa de caracterização tecnológica foi imprescindível. Sobre a caracterização realizada, os resultados mostraram uma densidade relativa de  $3,04\text{g/cm}^3$ , e ASE média para faixas acima de  $38\mu\text{m}$  de  $3,75\text{cm}^3/\text{g}$ . A análise granulométrica classifica o material como fino, com  $d_{90}$  de  $75\mu\text{m}$ , 30% inferior a  $38\mu\text{m}$  e 5% abaixo de  $10\mu\text{m}$ . As fases quartzo, hematita, goethita, caulinita e óxido de manganês foram identificadas e o separador magnético de alta intensidade tipo Jones apresentou os melhores resultados dentre os equipamentos testados. As análises de dispersão indicam que tanto o aumento de pH quanto a adição de dispersante aumentam o grau de dispersão da suspensão e a seletividade na separação magnética. Os valores máximos foram encontrados para pH 9,5, e dosagem de  $900\text{g/t}$  tanto para hexametáfosfato quanto para poliacrilato de sódio. Para os testes de separação magnética realizados no separador tipo Jones, de modo geral, pode-se dizer que quanto maior a seletividade do concentrado, menor será a sua recuperação mássica. Uma maior liberação, dispersão, pressão de água de lavagem e diluição da polpa promovem um concentrado mais rico. Dentre os testes apresentados, o que revelou os melhores resultados (65,91% Fe e 2,70%  $\text{SiO}_2$ ), foi feito neste equipamento em etapas Rougher, Cleaner, Recleaner e Scavenger, com matriz ranhurada de abertura  $1,5\text{mm}$ , campo magnético de  $10.000\text{G}$ , 30% sólidos,  $0,5\text{ kgf/cm}^2$  e 1L de pressão e água de lavagem e adição de hexametáfosfato de sódio ( $900\text{g/t}$ ). Por fim, conclui-se que o material estudado pode ser concentrado por separação magnética atendendo as especificações do produto comercial *pellet feed fines*. Cerca de 50% de todo material estocado ( $1,4 \times 10^6\text{m}^3$  de rejeito) e 80% do total de ferro seriam recuperados, o que, além de receita, diminuiria o dano ambiental associado.

## ABSTRACT

The greatest and noblest challenge of mining engineering for the present and the future of the treatment of iron ore could be considered as the pursuit of optimizing the use of the mineral resources. The need for obtaining adequate places for tailings disposal, reducing waste volumes sent to the tailings dams associated with the growing difficulty in obtaining environmental licenses, are some of the factors that make the processing of slimes a real alternative for increasing the iron and mass recoveries.

In order to investigate said scenario, a technological characterization of the sample from the tailing dam was carried out along with magnetic sorting tests to propose a likely concentration route. The literature elucidated successful recuperation of fine iron particles in mines on the Cuadrilátero Ferrífero; in all cases, the technical evaluation was essential. In relation to the characterization itself, the results demonstrated a relative density of  $3,04\text{g/cm}^3$  and an average  $S_{\text{BET}}$  above the range of  $38\mu\text{m}$  from the  $3,75\text{cm}^3/\text{g}$ . The granulometric analysis classified the material as fine, with  $d_{90}$  of  $75\mu\text{m}$ , 30% inferior to  $38\mu\text{m}$  and 5% below  $10\mu\text{m}$ . The quartz, hematite, goethite, kaolinite and manganese oxide were identified and the Jones-type high-intensity magnetic separator presented the best overall results within the tested equipment. The dispersion analysis indicated that both a rise in pH as well as the addition of dispersant increased the suspension's dispersion degree and the selectivity during the magnetic separation. The maximum values were identified for a 900 g/t of hexametaphosphate and sodium polyacrylate and pH 9,5. As for the magnetic sorting tests executed with the Jones-type sorter, in general it can be said that the greater the selectivity for the concentrate, the smaller its recuperation will be. A greater release, dispersion, washing pressure and dilution of the pulp promotes a richer concentrate. Among the aforementioned tests, the ones which presented the best results (65,91% Fe and 2,70% SiO<sub>2</sub>) were done in this equipment with the Rougher, Cleaner, Recleaner and Scavenger phases, a 1.5mm grooved GAP matrix, a 10,000 G magnetic field, 30% solid, 2 and 1L of water pressure at 0.5 kgf/cm and with the addition of sodium hexametaphosphate (900g/t). Finally, the conclusive results indicate that the studied material can be concentrated through magnetic sorting, keeping in mind the specifications concerning the pellet feed fines commercial product. Besides the financial gain, the activity prolongs the durability of the tailing dam and reduces the environmental impacts associated with these structures.

## 1. Introdução

Damasceno *et al.* (2005) e Lins (2000) contextualizam a importância da mineração ao dizer que esta atividade foi a grande impulsionadora do desenvolvimento no Brasil. Ainda que nossa ocupação inicial esteja relacionada ao comércio de pau-brasil e cana de açúcar, foi a busca por metais preciosos a grande responsável pela nossa interiorização. A descoberta de jazidas provocou a primeira grande corrente migratória para o centro do país, e, a partir daí novos municípios foram surgindo, muitos fazendo alusão ao bem mineral abundante naquela época, principalmente no estado de Minas Gerais.

A figura 1.1 representa uma cronologia simplificada da mineração no Brasil desde a chegada dos portugueses segundo os autores. De 1500 até 1800, os principais bens minerais extraídos eram o ouro, o diamante e o ferro encontrados em jazidas ricas, que afloravam na superfície ou no leito de rios. O pouco maquinário que existia era muito simplório, não dispunha de tecnologia nem treinamento. A mão de obra era muita das vezes escrava, o planejamento de execução e as estimativas de reserva mineral eram quase inexistentes.

Com o passar dos anos, mudanças sociais, políticas, e o aumento da população foram fatores cruciais para a exploração de novos bens minerais. Os autores apontam a Revolução Industrial no século XIX, principalmente pelo aproveitamento energético do carvão, como marco importante para o desenvolvimento deste setor.

Tal cenário é bem longínquo do que se observa desde o século XX até os dias atuais. A crescente demanda por minério de ferro pelo mercado consumidor associada a escassez de depósitos ricos e a necessidade de sofisticação do beneficiamento propicia a exploração de minérios marginais com baixos teores de ferro e altos conteúdos de impurezas, como os dispostos em barragens de rejeitos, por exemplo (NASCIMENTO, 2010; ROCHA, 2008).

A produção de concentrados, a partir destes novos minérios, envolve um aspecto de extrema importância, o volume de resíduos atualmente gerados. Um estudo feito por Jones e Boger (2012) alega que a indústria mineral é a maior produtora mundial de descartes, produzindo cerca de 65 bilhões de toneladas/ano, dos quais 14 bilhões são rejeitos constituídos majoritariamente por partículas finas, menores que 150µm.

Sobre estes descartes, Azcue (2012) alega que os resíduos sólidos são os principais responsáveis pelo impacto ambiental nas atividades mineradoras. O tratamento e o armazenamento destes descartes visam otimizar os custos e maximizar a segurança operacional. Esses dois fatores constituem um dos principais objetivos das mineradoras para cumprir as exigências ambientais, uma vez que a disposição dos resíduos é catalogada como um custo adicional sem retorno dentro do projeto.

Este contexto tem levado cada vez mais ao aproveitamento de rejeitos de mineração, quer pelo emprego de novas tecnologias de beneficiamento desses "minérios" de teores mais pobres ou pela utilização dos mesmos para outras aplicações. Reis (2005) acredita que as

possibilidades de aproveitamento destes descartes são avaliadas a partir da caracterização tecnológica dos mesmos; que, segundo Gomes (1984), é uma etapa fundamental para o máximo aproveitamento de um recurso mineral. As informações são utilizadas para o desenvolvimento do processo.

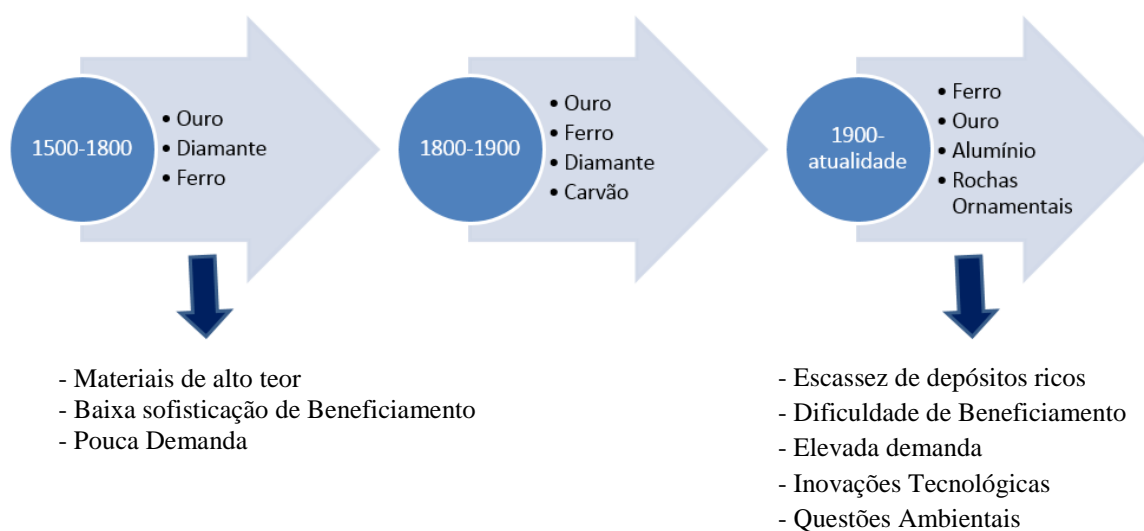


Figura 1.1: Cronologia da mineração no Brasil: do seu surgimento até os dias atuais Bor,

posterior aproveitamento como subproduto na própria usina, ou em outro segmento industrial; uma vez viabilizado seu reuso, minimiza-se o impacto ambiental e cria-se receita, onde antes havia despesas.

Os recentes acidentes relacionados a barragens de rejeitos ocorridos em Minas Gerais evidenciam os trágicos impactos ambientais e sociais relacionados à ruptura dessas construções, além da importância do controle e conhecimento das mesmas. Dentre os danos ressalta-se a supressão vegetal, o comprometimento do abastecimento de água para milhares de pessoas, perdas irreparáveis de fauna e flora, o desalojamento de pessoas, impacto na economia local, e até mesmo, perdas humanas.

Assim, a caracterização dos rejeitos de mineração faz-se necessária para o aproveitamento dos mesmos. A sua importância vem da conservação do meio ambiente, pois reduz a extração do minério, o tamanho de pilhas de estéril e barragens de rejeitos; e também de fatores econômicos, visto que o possível reprocessamento desses resíduos aumenta a vida útil do recurso mineral, podendo alcançar lucros.

O presente trabalho vai de encontro à esta necessidade de minimização de resíduos através de revisão bibliográfica, caracterização tecnológica de amostra proveniente de barragem de rejeito, e estudo de variáveis na separação magnética como alternativas de rota de concentração.



## **2. Objetivo**

### **2.1 Objetivo Geral**

- Caracterização tecnológica do material disposto na barragem de rejeitos da mina Pau Branco da Vallourec (localizada na Rodovia Br 040, Km 562,5, Brumadinho –MG).

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Caracterização física da amostra (determinação da densidade e características granulométricas);
- Caracterização química e mineralógica do material (identificação de fases minerais e morfologia);
- Realização de testes de separação magnética (variando-se os parâmetros Campo magnético, GAP, % sólidos, e pressão de lavagem)

## **3. Revisão Bibliográfica**

### 3.1 Considerações sobre barragens de rejeitos

Subrahmanyam & Forssberg (1990) já discutiam a grande quantidade de bens minerais que eram classificados como resíduos, principalmente pela sua granulometria, e o processamento de partículas finas. Para Luz e Lins (2010) as faixas finas podem ser subdivididas como supercoloidais ( $< 0,2\mu\text{m}$ ), coloidais ( $< 1\mu\text{m}$ ), quase-coloidais ( $< 10\mu\text{m}$ ), pré-coloidais ( $< 20\mu\text{m}$ ) e finos ( $< 150\mu\text{m}$ ), médios ( $< 50\mu\text{m}$ ) e grossos ( $> 500\mu\text{m}$ ).

Um levantamento feito por Aguiar (2013) constatou que aproximadamente 49 milhões de metros cúbicos de rejeito de minério de ferro foram descartados em 2010 em barragens no estado de Minas Gerais. Os resíduos sólidos são os principais responsáveis pelo impacto ambiental nas atividades mineradoras. O tratamento e o armazenamento destes descartes visam minimizar os custos e maximizar a segurança operacional. Esses dois fatores constituem um dos principais objetivos das mineradoras para cumprir as exigências ambientais, uma vez que a sua disposição dos resíduos é catalogada como um custo adicional sem retorno dentro do projeto.

São dois os tipos de resíduos produzidos pelas atividades de mineração, os estéreis e os rejeitos. Sobre o primeiro, no decapeamento da jazida são produzidos materiais sem nenhum valor econômico para aquele empreendimento, o denominado estéril, que será disposto em pilhas. Já o segundo, os rejeitos, são resultantes de processos de beneficiamento, podem conter elevado grau de toxicidade, além de partículas dissolvidas e em suspensão, metais pesados e reagentes.

Edraki *et al.* (2014) definem os rejeitos da mineração como grãos finos de rocha oriundos de processos de beneficiamento mineral que envolvam água, podendo conter metais dissolvidos e reagentes previamente utilizados.

Nos processos de tratamento de minérios a quantidade gerada de rejeitos é muito alta, e o destino final dos mesmos é função dos objetivos econômicos da empresa.

Abreu (2012) relembra que tanto os estéreis quanto os rejeitos são dispostos na superfície de terrenos, em locais pré-selecionados e onde não exista minério em subsuperfície. As mineradoras, independente da lavra a céu aberto ou subterrânea, são responsáveis pela disposição dos seus resíduos.

O Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH, ao abordar a lei N° 12.334, de 20 de setembro de 2010 define o sistema de disposição de estéril como uma estrutura projetada e implantada para acumular materiais, em caráter temporário ou definitivo, de modo planejado e controlado em condições de estabilidade geotécnica e protegidos de ações erosivas. Define também o sistema de disposição de rejeitos como estrutura de engenharia para contenção e deposição de resíduos originados de tratamento de minérios, captação de água e correção química de efluentes.

Assim, as barragens de rejeitos são estruturas construídas com a finalidade de reter os descartes produzidos pelo processo de beneficiamento. Representam uma fonte de poluição importante, sendo a sua construção, e fatores que vão desde a escolha da localização até o fechamento, regidos por normas ambientais específicas, além de critérios econômicos, geotécnicos, estruturais, sociais e de segurança.

Edraki *et al.* (2014) salientam que os resíduos sólidos podem conter finos e lamas que afetam/prejudicam a estabilidade das instalações do seu próprio armazenamento.

A figura 3.1 ilustra um esquema de direcionamento geral de resíduos na mineração.



Figura 3.1: Esquema de direcionamento geral de rejeitos na mineração

### 3.1.1 Necessidade de recuperação de minérios finos

Com o passar dos anos as barragens tem ganhado destaque no cenário nacional, com a criação de leis, portarias e resoluções que visam à regulação e fiscalização destas construções. Dentre estas leis destaca-se a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) estabelecida pela CNRH 2010 que estabelece que o empreendedor é o responsável legal pela segurança da barragem, que deve garantir as inspeções previstas por lei, as revisões periódicas, e a organização da documentação referente a mesma.

As barragens cadastradas no PNSB são classificadas de acordo com dois parâmetros em níveis alto, médio ou baixo como ilustra a tabela 3-I. A CNRH (2010) explica que o parâmetro risco associado envolve características técnicas e aspectos que influenciam a probabilidade de acidente, como estado de conservação e plano de segurança de barragens. Já o dano potencial associado diz respeito aos impactos ambientais, econômicos e sociais que a ruptura, vazamento ou infiltração no solo da estrutura podem vir a acarretar independente da sua probabilidade de ocorrência.

Tabela 3-I: Classificação de Barragens de rejeito por Categoria de Risco e Dano Potencial Associado

Categoria de Risco	Dano Potencial Associado		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	A	B	C
Médio	B	C	D
Baixo	C	D	E

Fonte: Adaptado de DNPM (2012).

Sobre a classificação destas estruturas, a tabela 3-II identifica e classifica as barragens de rejeito e as específicas de minério de ferro em Minas Gerais.

Duarte (2008) observa que, assim como no Brasil, a maioria dos países possui legislação vigente para disposição de resíduos minerais e barragens de rejeitos. Contudo, não são raros os acidentes envolvendo tais estruturas, e juntamente com eles, os prejuízos econômicos, sociais e ambientais. Apesar da lei e da tecnologia disponíveis, algumas barragens são construídas com critérios falhos de projeto, operação ou manutenção.

Lozano (2006) enfatiza que o custeamento de acidentes, que envolve, dentre outros fatores, danos a propriedades, estudos e relatórios, indenizações e taxas legais, tempo da equipe e perda de remuneração, é notoriamente mais elevado que o de prevenção, que engloba estudos preliminares, engenharia de projeto, supervisão de construção, operação e serviços de manutenção.

Tabela 3-II: Classificação das barragens de mineração identificadas em MG

Classificação	Nº de barragens	Barragens de minério
		de ferro

A	2	0
B	4	3
C	114	49
D	63	29
E	61	20
<b>Total</b>	<b>244</b>	<b>101</b>

Fonte: Adaptado de DNPM (2014).

Para Duarte (2008), apesar de legislação específica, são poucos os países que têm o real controle do número e condição das barragens de contenção de rejeitos em seus territórios. Uma das primeiras ações para minimizar o risco de acidentes seria uma eficaz gestão dessas estruturas, um inventário completo que especifica as dimensões dos projetos (altura, volume, comprimento da crista, massa depositada, entre outros), suas características de operação e monitoramento. Com os dados devidamente coletados e organizados, deve-se classificar a barragem segundo seu parâmetro de risco, definindo assim o seu nível e o tipo de inspeção que deverá ser realizada.

A tabela 3-III almeja ilustrar a quantidade de rejeitos gerada por ano pelas principais empresas de Minas Gerais. O levantamento de dados é uma estimativa feita através de informações obtidas pela revista *Minérios & Minerales* (2014), pelo DNPM e por profissionais que atuam na mineração de ferro.

Segundo o Informe Mineral do DNPM, em 2014, aproximadamente 290 milhões de toneladas de minério de ferro foram produzidas em Minas Gerais. A estimativa feita alcançou 94% dessa produção, onde mais de 100 milhões de toneladas foi considerada rejeito de minério de ferro.

A estimativa feita na tabela 3-III não apresenta valores exatos visto a dificuldade de obtenção dessas informações, que não considera produção ou venda de estoque, ou desconhece o reprocessamento desses rejeitos. O levantamento de dados salienta a grande quantidade de movimentação, ROM, produção, e consecutivamente rejeitos gerados todos os anos.

O estado de Minas Gerais possui mais de 200 barragens de rejeitos mineiros cadastradas no PNSB, sendo quase 40% provenientes da extração de minério de ferro. Ainda que dentre estas, uma pequena parcela seja classificada com alto dano potencial associado ou categoria de risco, a mineração, em especial, a de ferro deposita milhões de toneladas de rejeito em barragens de contenções todos os anos.

Tabela 3-III: Levantamento de dados de 2014, relação das principais minas e quantidade de rejeitos no estado de Minas Gerais

Mina	Empresa	Ano base: 2014			
		Localização	ROM (Mt/2014)	Produto final (Mt/2014)	Rejeitos (Mt/2014)

Itabira	Vale	Itabira	60,7	35,5	25,2
Minas Centrais	Vale	São Gonçalo do Rio Abaixo	47,8	33,0	14,8
Minas Itabirito	Vale	Itabirito	46,1	33,0	13,1
Alegria	Vale	Mariana	16,3	11,0	5,3
Capão Xavier	Vale	Nova Lima	33,0	22,0	11,0
Paraopeba	Vale	Nova Lima	30,3	28,2	2,1
Vargem Grande	Vale	Nova Lima	30,2	25,0	5,2
Pico	Vale	Itabirito	28,5	20,0	8,5
Casa de Pedra	CSN	Congonhas	25,9	18,0	7,9
Fábrica Nova	Vale	Catas Altas	16,4	13,7	2,7
Capitão do Mato	Vale	Nova Lima	16,0	11,0	5,0
Fazendão	Vale	Catas Altas	13,2	10,2	3,0
Oeste	Mineração Usiminas	Itatiaiuçu	10,7	6,4	4,3
Pau Branco	Vallourec Mineração	Brumadinho	6,0	4,3	1,7
Serra Azul	Arcelor Mittal Mineração	Itatiaiuçu	3,6	1,8	1,8
Total	15 minas		384,7	273,1	111,6

Fonte: Dados obtidos junto à revista *Minérios & Minerais* (2014), DNPM e profissionais que atuam na mineração de ferro.

### 3.1.2 Aspectos Ambientais no aproveitamento de rejeitos da mineração

Down (1977) já observava os efeitos não desejados decorrentes da mineração, tais como alterações ambientais, conflitos de uso do solo, depreciação de imóveis circunvizinhos, geração de áreas degradadas, transtornos ao tráfego urbano, entre outros.

Para IBRAM (2013) no Brasil, os principais problemas oriundos desta atividade podem ser englobados em quatro categorias: poluição da água, poluição do ar, poluição sonora, e subsidência do terreno. Para o caso da mineração de ferro em específico, atualmente as barragens de rejeitos constituem o maior impacto ambiental associado, e ao mesmo tempo, imprescindíveis para a viabilização das usinas de beneficiamento do ramo. Edraki, *et al.* (2014) acrescentam que os reagentes utilizados na etapa de beneficiamento como coletores, floculantes, óleos ou qualquer agente químico, agravam o risco de contaminação de solos e água.

Além dos impactos listados, para Neto e Petter (2005), “é importante ressaltar a degradação do meio físico devido à exploração dos minérios. Gera-se, portanto, uma segunda escassez, considerando que as jazidas minerais são como bens não renováveis”.

A importância dos impactos da mineração em área urbana vem do seu alto grau de ocupação, que é agravada quanto maior a proximidade de áreas onde ocorre a atividade

extrativa. Esta proximidade também agrava os impactos visuais provenientes dos altos volumes de rocha e solos movimentados e às dimensões da cava ou da frente de lavra. O desconforto ambiental pode ser sentido mesmo quando as emissões de gases, níveis de poeira, ruído e vibrações estiverem abaixo dos padrões ambientais estabelecidos. Os danos causados sobre a saúde, da mesma forma, diminuem, ou são inexistentes quanto menor for essa imediação.

A mineração é uma atividade extrativista de grande porte, e como tal, gera grandes impactos ambientais, principalmente quando não realizada por empresas responsáveis que seguem a legislação vigente.

Entretanto, Azcue (2012), IBRAM (2013), acreditam que a análise de um projeto não deve ser restrita aos danos ambientais associados, uma vez que a não implantação da atividade minerária gera o impacto social, ou seja, impede o desenvolvimento da região próxima a jazida.

Neto e Petter (2005) acreditam que mesmo a mineração sendo responsável por boa parte da arrecadação de impostos dos municípios em que está inserida, o fato de ser uma atividade que extrai bens não renováveis não deve ser negligenciado. Surge então o princípio poluidor – pagador que constitui uma estratégia econômica que busca o equilíbrio entre o ônus e o bônus dessa atividade.

Benjamin (1992) define o princípio poluidor- pagador como aquele que estabelece o dever do poluidor de arcar com os custos de prevenção, reparação e repressão da poluição. Dessa forma o princípio não deve ser entendido simplesmente como “poluiu, pagou”. Seu alcance abrange todos os custos de proteção ambiental. A política que as mineradoras devem adotar é a de impactar e poluir o mínimo possível, e ainda assim estar ciente e ressarcir a população do dano causado.

### **3.1.3 Aspectos econômicos no aproveitamento de rejeitos na mineração**

Para Borges (2008) o conhecimento dos rejeitos favorece a viabilização de seu posterior aproveitamento como subproduto na própria usina, ou em outro segmento industrial. Viabilizando-se seu reuso, minimiza-se o impacto ambiental e cria-se receita, onde antes havia despesas.

A gestão de resíduos é de extrema importância para uma mineradora, além de minimizar os danos causados ao meio ambiente, o reaproveitamento desses rejeitos, seja na própria planta de beneficiamento da empresa, ou na sua comercialização em outro setor, proporciona um retorno econômico.

A indústria civil vem aproveitando, e com o passar dos anos, com uma frequência e quantidade maior, os descartes da mineração como fonte de materiais alternativos, o que pode reduzir preços, o consumo de matérias primas e de energia.

Ainda que as aplicações industriais para os resíduos da mineração dependam das características dos depósitos minerais correspondentes, as aplicações mais comuns, de uma forma geral, são:

- Finos de ferro: Siderúrgicas e recentes aplicações na indústria civil.
- Resíduos finos de rochas ornamentais: Argamassas, cerâmicas vermelhas (tijolos, telhas), vidro, tintas, manilhas, corretivos de solos, entre outros.
- Resíduos grossos de rochas ornamentais: Fábricas de cimento, brita e areia artificial, artesanatos, seixos ornamentais, bijuterias, muros de contenção de taludes, pavimentação, filetes para muros etc.

Kitobo *et al.* (2009), acreditam que o alto preço das commodities metálicas em conjunto a crescente consciência ambiental justificam o reprocessamento de materiais já dispostos em antigas barragens de rejeitos. Sem dúvida o fator econômico é essencial nesta tomada de decisão. Como exemplo os autores citam resíduos dispostos em barragens antigas com quantidades consideráveis de cobre cujo beneficiamento poderia ser financeiramente mais viável que as operações primárias de mineração. Entretanto, se os minerais de cobre se encontravam como inclusões finas e intercaladas com pirita e outras gangas; as etapas de concentração adicionais associavam um custo que não justificava o empreendimento. Logicamente outros fatores além da geologia influenciam no tratamento para cada mineral em particular. Ao discutir a retomada de material de barragens de rejeitos deve-se considerar que essas partículas podem ter sofrido mudanças geofísicas e químicas desde a sua deposição.

Pensando nos custos de extração, carregamento e transporte dos resíduos de uma mina até o seu último destino, sem esquecer o dinheiro gasto em reabilitação ambiental, Struthers, Brumle e Taylor (1997) e Edraki *et al.* (2014) propuseram um sistema geral integrado de reciclagem que envolve a recuperação do metal estocado em antigas barragens de rejeitos como ilustrado na figura 3.2. A mineralogia de cada minério em particular deve ser analisada para uma correta adequação do fluxograma.

Moss e de la Cerda (2006) salientam que cada mina deve desenvolver seu próprio método de reciclagem de resíduos visando o seu próprio lucro considerando tópicos como recursos disponíveis, custo de pessoal, questões legais, identificação de danos ambientais associados, condições e operação da planta de tratamento, e inclusive a cotação de equipamentos de segunda mão.



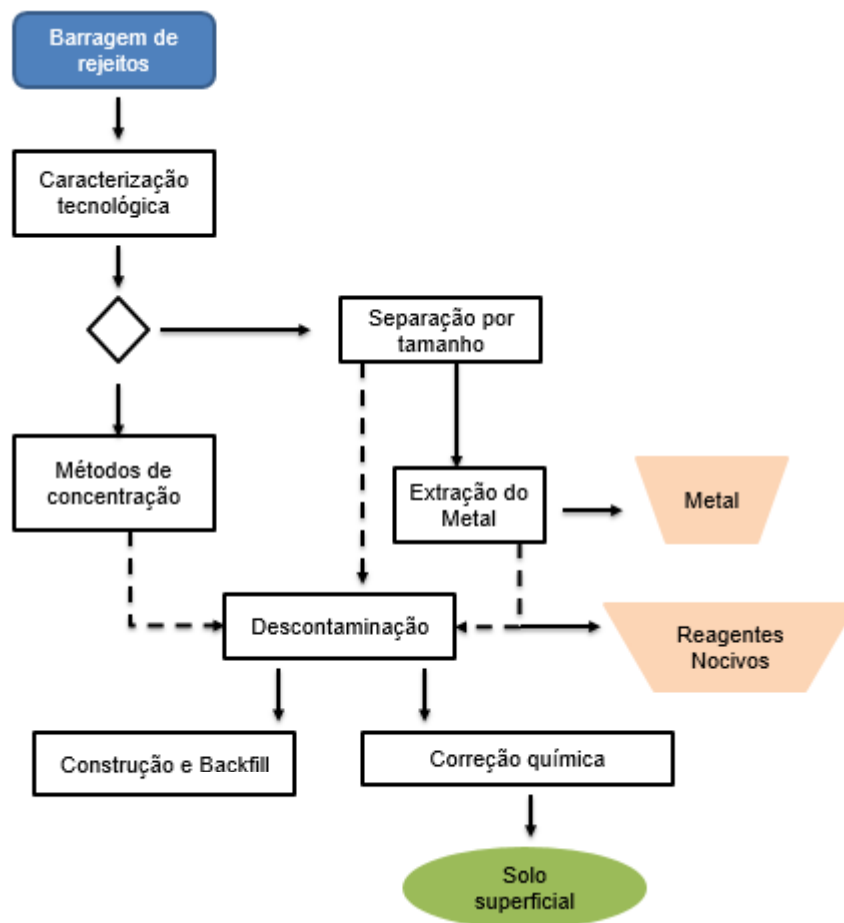


Figura 3.2: Fluxograma generalizado de reciclagem de resíduos da mineração

Fonte: Adaptado de Struthers, Brumle e Taylor (1997) e Edraki *et al.* (2014).

### 3.1.4 Sustentabilidade na gestão de rejeitos da mineração

Visto os impactos provocados pela atividade mineral, tem-se que os mesmos podem resultar na “síndrome NIMBY”, que segundo Menegaki (2014, p.1438), no caso de mineração significa<sup>1</sup>: “Vocês podem minerar em qualquer lugar, mas não no meu quintal”. Essa corrente nada mais é que uma parcela da população contra a mineração em um determinado município. Sendo esses empreendimentos geradores de emprego, por que tal oposição? Muitas vezes a atividade extrativa começa em uma sociedade já consolidada, o que gera conflitos de interesse, uma vez que a localização da jazida não pode ser negociada. Também segundo o autor:<sup>2</sup> “É o local que escolhe o projeto, não o contrário”.

<sup>1</sup> “You can mine everywhere, but Not In My Back Yard”

<sup>2</sup> “it is the site that chooses the project, not the reverse”.

Sobre os conflitos de interesse, além dos danos ambientais, nem sempre a população se conscientiza do desenvolvimento local que a mineradora pode promover, ou a própria instituição não é transparente no que diz respeito a sua responsabilidade social.

Para alcançar um ponto de interseção entre máximo de desenvolvimento econômico, mineração e mínimo de impacto ambiental, vem o conceito de desenvolvimento sustentável elaborado pela ONU que acredita que o desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade das gerações futuras atenderem as suas próprias necessidades”.

Sendo os recursos minerais não renováveis, e que a sustentabilidade almeja satisfazer as necessidades presentes assegurando as das futuras, como é possível garantir tal conceito em uma atividade fundamentada na extração de bens limitados?

Os planos de gerenciamento já existentes dos resíduos sólidos minerais devem conter informações como a descrição dos empreendimentos, diagnóstico dos resíduos gerados e/ou administrados incluindo-se os passivos ambientais, explicitação dos responsáveis pelas etapas de gerenciamento, definição dos procedimentos operacionais de cada etapa, ações preventivas e corretivas em casos de acidentes ou incorreções, metas e procedimentos de minimização, medidas de saneamento dos passivos ambientais e periodicidade da revisão.

Adiansyah *et al.* (2015, p.635) afirmam que a gestão dos rejeitos da mineração é um fator crucial dentre todos os demais dessa indústria devido aos impactos irreversíveis gerados por eles. A Tabela 3-IV aponta os principais tópicos de uma gestão sustentável de resíduos mineiros.

Tabela 3-IV: Principais tópicos de uma gestão responsável dos rejeitos da mineração

<b>Tópicos de sustentabilidade na gestão dos rejeitos da mineração</b>			
<b>Meio Ambiente</b>	<b>Economia</b>	<b>Social</b>	<b>Legislação</b>
Poluição da água e do ar	Despesas gerais	Problemas de saúde	Leis
Esgotamento dos recursos hídricos	Despesas operacionais	Impacto social	aplicáveis
Destruição do ecossistema	Custo de reagentes	Segurança	
Ocupação do solo	Custo de energia	Aprovação da população	
Emissões de gases	Custo para encerramento		

Fonte: Adaptado de Adiansyah *et al.* (2015).

Uma vez discutido que a manutenção/ expansão da qualidade de vida humana são inimagináveis sem a exploração dos recursos minerais, que o desenvolvimento sustentável depende substancialmente desta atividade que sofre ameaça de escassez de recursos, a ideia da gestão dos rejeitos da mineração passa a ser entendida como a chave para tal sustentabilidade.

A sustentabilidade na mineração começa com o princípio de produção sustentável que deve atingir da mesma forma o consumo, já que a melhor forma de garantir recursos para

as gerações futuras e também de diminuir a quantidade de rejeitos com toda sua problemática ambiental e social é diminuir a sua fonte geradora. Entretanto, quando essa redução não for possível, a gestão de rejeitos mineiros envolve a sua valorização.

Conforme Barros (2012, p.67): “A valorização consiste no reemprego, reciclagem ou qualquer outra ação visando obter, a partir dos resíduos sólidos, materiais reutilizáveis ou energia, dando, de certa forma, um valor de mercado aos resíduos”.

Importante ressaltar que a retomada, ou a valorização de descartes da mineração prolonga a sua vida útil, ou seja, já não podem mais serem nomeados como rejeitos, uma vez que essa nomenclatura é destinada aos descartes que não possuem outra destinação que não a sua disposição final.

Dijkema, Reuter e Verhoef (2000) contextualizam a “corrente” *Zero waste*, que pode ser interpretada como Desperdício Zero, quando diz<sup>3</sup>: “Uma substância ou objeto é qualificado como sendo um desperdício quando nem todo o seu potencial é utilizado [...] A necessidade de uma abordagem sistêmica para a gestão de resíduos torna-se, então, óbvia”.

A política dos 5 R's, contempla o não desperdício mencionado, é o princípio básico da educação ambiental sobre descartes, que de modo análogo, pode ser estendida para os resíduos da mineração, objetivando minimizar a quantidade lançada em pilhas de estéreis e barragens de rejeitos. São os 5 R's:

- Reduzir: Trabalha com o conceito de exploração e consumo responsáveis;
- Reutilizar: Segundo este princípio, um material recuperado deve voltar ao ciclo de produção;
- Reempregar: Consiste em encontrar nova utilidade para um material que não pode mais ser aproveitado no seu ciclo de origem;
- Reciclar: transformar um material quanto as suas propriedades físicas ou físico-químicas para produção de descartes em novos produtos;
- Repensar: promove a conscientização sobre o consumismo e estimula a preferência da compra de produtos que geram menos impacto ambiental.

Reduzir a extração de minério, como já dito, não é tarefa fácil devido ao crescimento populacional e a demanda por tecnologia. Outra alternativa seria o uso de novos materiais ou materiais avançados, que são estruturas novas com propriedades superiores, como fibras de carbono e de cerâmica, ligas de alumínio, compostos polímeros, entre outros. Entretanto, ainda que a utilização desses novos materiais degrade menos o meio ambiente que os convencionais, além do seu alto preço de produção, Nunes (2006) aponta que o uso dos avançados pode apresentar um problema para alguns países que sobrevivem

---

<sup>3</sup> “A substance or object is qualified a waste when it is not used to its full potential. [...] the necessity of a systemic approach to the resource and waste management becomes obvious.”

quase que exclusivamente da exportação mineral, já que o desenvolvimento sustentável engloba emprego e renda para a população desses países. Trazendo esse raciocínio para a realidade brasileira, são muitos os municípios que tem a mineração como pilar econômico.

Sobre reutilizar, reempregar e reciclar, o reaproveitamento de rejeitos é o ponto ápice da gestão dos mesmos, uma vez que vêm sendo dispostos em barragens sem terem sido utilizados maximamente, indo contra a corrente *Zero Waste*.

Para Adiansyah (2015), Borges (2008) e IBRAM (2013), ainda que o aproveitamento de rejeitos não seja algo novo em países desenvolvidos, os emergentes ainda estão em fase de implantação desse novo conceito sustentável, já que estes também passam por uma maior demanda por recursos minerais, pelo esgotamento das reservas de matéria prima e pelo crescente volume de resíduos sólidos.

Ainda que as rotas de concentração alcancem somente produtos não comercializados ou fora do interesse da mineradora em questão, os mesmos podem ser vendidos para outras empresas como insumos agrícolas, ou de construção civil por exemplo. Esse tipo de reciclagem é a forma mais comum de estender o ciclo de vida dos minerais. Ela preserva os principais insumos naturais e reduz a necessidade de abertura de novas minas com impactos ambientais associados. Além disso, em muitos casos, o processamento secundário de matérias-primas minerais é ambientalmente menos nocivo e necessita de menos energia do que a produção primária.

Por fim, sobre o conceito repensar, cada vez associa-se mais os diversos segmentos industriais com a responsabilidade social associada a eles. Projetos sustentáveis ou a ausência deles refletem sim na imagem de uma empresa mineradora.

“À medida que as nações ao redor do mundo se industrializam e as populações se esforçam para melhorar seus padrões de vida, a mineração vem para assumir um papel mais central no cenário mundial. Lá se foi a época em que as conversas sobre preços de commodities eram restritas aos analistas da indústria. Hoje, mineração é notícia de primeira página todos os dias no mundo todo. Para as empresas de mineração, essa maior visibilidade vem com maior responsabilidade.”

Glenn Ives, citado em IBRAM (2013, p.153).

### 3.2 Caracterização Tecnológica de Minérios

Para Neumann, Scheneider e Neto (2004) a caracterização tecnológica de minérios é uma etapa fundamental para o máximo aproveitamento de um recurso mineral. É um ramo especializado aplicado ao beneficiamento de minérios que estuda aspectos específicos da mineralogia de amostras e as informações obtidas são utilizadas para o desenvolvimento e otimização dos processos.

Brandão e Santos (2002) adiciona que além de fornecer os subsídios necessários para o correto dimensionamento da rota de processos, melhorar o seu rendimento global, determinar e quantificar toda a assembleia mineralógica, definir quais são os minerais de interesse, e a partição do(s) elemento(s) útil (úteis) na amostra (caracterização mineralógica), também se estuda a textura da rocha, definindo o tamanho de partícula necessário para liberação do(s) mineral (ais) de interesse de sua ganga, e definem-se diversas propriedades físicas e químicas destas partículas que darão auxílio na escolha do método de concentração mais adequado.

A maneira de se caracterizar uma amostra de minério varia muito com a mineralogia e demais propriedades inerentes ao minério, com os objetivos e a abrangência da pesquisa, com as rotas de processamento possíveis, com a disponibilidade de tempo, e com os recursos financeiros. Embora a natureza do minério e o tipo particular de produto gerado variem, Vasconcelos *et al.* (2012) acreditam que os principais dados exigidos para uma boa caracterização de minérios são geralmente os mesmos: a identificação mineral, a proporção, a composição, e a liberação das espécies constituintes.

De uma maneira geral, a caracterização de uma amostra é executada em estágios interligados. Segundo Porphírio, Barbosa e Bertolino (2010), o primeiro estágio é o fracionamento da amostra, que além de facilitar a identificação dos minerais pela sua relativa individualização, melhora a quantificação das fases e estabelece certas propriedades físicas dos minerais, já incorporando informações úteis para processo. Este fracionamento mais frequentemente é feito por densidade e susceptibilidade magnética, métodos que exploram as características de peso específico e caráter magnético das partículas minerais; além de classificação por tamanho de partícula. A resposta dos minerais ao fracionamento já pode fornecer as suas propriedades físicas, inclusive simulando, com as devidas restrições, condições de operação industrial.

Ainda pelos autores, a segunda fase é a identificação das fases. O mineralogista dispõe de uma variada gama de técnicas analíticas para a identificação dos minerais, e as mais difundidas são as microscopias óptica e eletrônica de varredura e a difração de raios - X. Esta etapa é imprescindível dentro da caracterização tecnológica e é facilitada na medida em que um ou mais minerais são concentrados no fracionamento, de maneira que seu sinal, por exemplo, num difratograma de raios - X é mais claro e a interpretação mais fácil e segura.

O terceiro é a quantificação dos minerais. Para Neumann, Scheneider e Neto (2004), várias técnicas podem ser utilizadas para quantificar os minerais, e ainda que em amostras de mineralogia mais complexa esta etapa seja complicada, simplificações são possíveis, como o agrupamento de minerais em função de sua resposta num eventual processo, como por exemplo, o agrupamento de minerais de ferro, englobando hematita, magnetita, goethita e limonitas).

Por fim, a liberação do mineral de interesse constitui o último estágio e é uma das informações mais importantes na caracterização. Para Porphírio, Barbosa e Bertolino (2012) o grau de liberação alcançado pode ser estimado pelo método de Gaudin onde faixas granulométricas são analisadas através de um microscópio óptico. Métodos mais modernos disponíveis de cálculos do espectro de liberação, baseados em análise de imagens, fornecem resultados muito mais precisos e completos.

A figura 3.3 ilustra um fluxograma geral para a caracterização mineralógica de minérios.

### 3.3 Minério de Ferro – características gerais

O ferro (Fe) é um metal de transição de massa e número atômico de 56 e 26 unidades respectivamente. Encontra-se, quando em temperatura ambiente, no estado sólido e é amplamente utilizado como matéria prima para diversos ramos industriais, essencial para a construção civil, para ligas metálicas, para o ramo de transporte, para o estrutural, entre tantos outros. É o quarto elemento mais abundante da crosta terrestre (4,5%), sendo o oxigênio, o silício e o alumínio os detentores das maiores frações. Já dentre os metais, o ferro ocupa a segunda posição, ficando atrás apenas do alumínio.

Entretanto, para Dana e Hurlbut (1974), ainda que muito frequente, a ocorrência do ferro nativo é rara, o que se vê é o elemento associado a outros formando carbonatos, óxidos, sulfetos e silicatos. Assim, industrialmente, o ferro é obtido a partir de substâncias minerais; e, ainda que faça parte da composição de várias espécies, o elemento é basicamente extraído dos óxidos.

Os óxidos são compostos por um arranjo de íons de ferro e íons  $O^{2-}$  (e  $OH^-$  para os hidróxidos, também da classe dos óxidos), dentre eles destacam-se os principais minérios de ferro: magnetita ( $Fe_3O_4$ ), hematita ( $Fe_2O_3$ ) e goethita ( $FeO(OH)$ ).

A magnetita é um mineral caracterizado principalmente pelo seu forte magnetismo. Apresenta também brilho metálico, cor preta, dureza 6,0, é frequentemente encontrada em cristais octaédricos e mais raramente em dodecaedros, possui aproximadamente 72% de Fe e 28% de O em sua composição (KLEIN & DUTROW, 2012).

O óxido hematita é o mineral de ferro mais abundante, caracterizado pelo seu traço vermelho típico. Outras características são brilho metálico, dureza entre 5,5 e 6,0, é

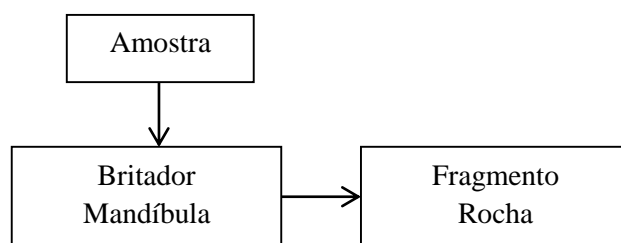


Figura 3.3: Exemplo de fluxograma para a Caracterização Tecnológica de Minérios

Fonte: Adaptado de Neuman, Scheneider e Neto (2004).

paramagnético e contem cerca de 70% de Fe e 30% de O. Pode ocorrer nas formas compacta, especular, porosa, granuloblástica e martítica. Sobre a última, o mineral é

chamado martita quando apresenta aspecto terroso em pseudomorfos octaédricos sobre a magnetita (DANA E HURBULT, 1974).

A goethita é um mineral bastante comum, formado principalmente sob condições oxidantes como produto de intemperismo de outros minerais que contém ferro. Na sua composição apresenta teores aproximados de Fe 63%, O 27% H<sub>2</sub>O 10% e Mn 5%. Ocorre em vários tons de marrom, assim como o seu traço. É opaco, seu brilho é adamantino e sua dureza circunda em torno de 5 (KLEIN & DUTROW, 2012).

Sobre os minerais de ganga comuns em depósitos de ferro, o mais comum é o quartzo, (SiO<sub>2</sub>), podendo haver também silicatos e alumino-silicatos como a caulinita (Al<sub>4</sub>(Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>) (OH)<sub>8</sub>) e gibbsita (Al(OH)<sub>3</sub>).

A tabela 3-VI traz as principais características destes três importantes óxidos de ferro, já a 3-VII dos principais contaminantes.

Magnetita, hematita e goethita são, no Quadrilátero Ferrífero, encontrados em depósitos de minério de ferro que se formam como resultado da lixiviação da sílica (SiO<sub>2</sub>), importante componente da formação ferrífera bandada (FFB), onde tais óxidos estão alojados. Pode-se dividir o minério de ferro em dois grupos principais, minério itabirítico e minério hematítico. O primeiro pode ser subdividido em itabirito comum, itabirito dolomítico e itabirito anfibolítico. Estas denominações se devem a fatores como conteúdo mineral e textura. O itabirítico é caracterizado pela alternância de bandas claras (SiO<sub>2</sub>) e escuras (óxidos de Fe) e seu teor de ferro está entre 20 e 55%; já o hematítico é um minério mais rico, seu teor de Fe é superior ao 60%, e é constituído basicamente por hematita (CARVALHO *et al*, 2014).

A tabela 3-V resume as principais características destes minérios.

Por fim, para a contextualização da importância do minério de ferro para economia brasileira, segundo o DNPM (2016), em 2015, as substâncias metálicas representaram 76% do total da produção mineral comercializada no Brasil. Como ilustra a figura 3.4, neste grupo, ferro, alumínio, cobre, estanho, manganês, nióbio, níquel e ouro correspondem a quase 100% do total produzido. A participação do ferro é a mais expressiva, alcançando mais de 60%, devido, principalmente a extração desse bem nos estados de Minas Gerais e Pará.

Tabela 3-V: Composição mineralógica dos tipos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero

Tipos de Minério	Conteúdo mineral	Textura
------------------	------------------	---------



		Banda/Conteúdo principais/		Acessórios**	
<b>Itabirítico</b>	<b>Itabirito comum</b>	clara	quartzo	Hematita, clorita, sericita, dolomita, pirofilita, óxidos de Mn	
		escura	óxidos de Fe*	Sericita, quartzo, pirofilita	compacto,
	<b>Itabirito dolomítico</b>	clara	dolomita	Quartzo, óxido de Fe*, pirofilita, talco, óxidos de Mn	friável ou pulverulento
		escura	óxidos de Fe*	Quartzo, dolomita, óxidos de Mn	
	<b>Itabirito Anfibolítico</b>	clara	tremolita/actionolita hornblenda	Quartzo, dolomita, anfibólio	
		escura	óxidos de Fe*	Quartzo, dolomita, anfibólio	
<b>Hematítico</b>	<b>Hematítico</b>	Hematita		Magnetita, quartzo, pirofilita	Maciço, pulverulento
*Hematita é o mineral-minério dominante. Magnetita aparece subordinadamente					
**Fosfatos de ferro podem ocorrer em todos os tipos. Sulfetos estão ocasionalmente presentes					

Fonte: Adaptado de Nascimento (2010).

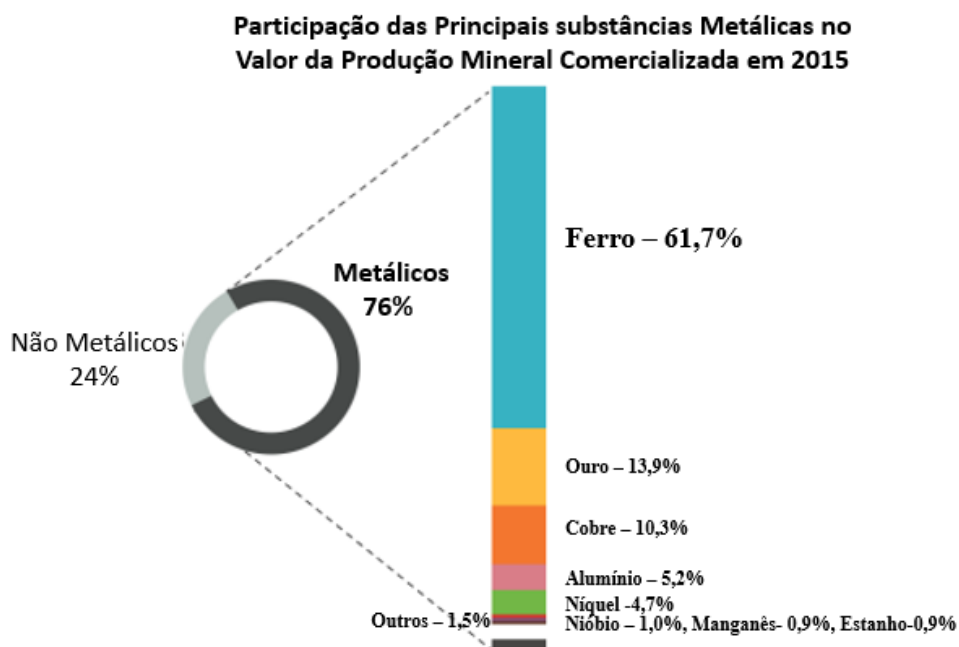





Figura 3.4: A importância do minério de ferro na economia brasileira




Fonte: Adaptado de DNPM (2016).

Tabela 3-VI: Principais propriedades e características dos minerais portadores de ferro

Propriedades físicas e cristalográficas diferenciadoras dos principais óxidos de ferro									
Mineral	Fórmula Química	Brilho	Clivagem	Cor/Traço	Fratura	Dureza	Hábito	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Susceptibilidade magnética (Unidade 10 <sup>-6</sup> SI)
<b>Magnetita</b>									
	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ~72% Fe	Metálico	Ausente	Preto/ Preto	Subconchoidal	6	Cristais octaédricos, Aglomerados maciços	5,18	Ferromagnético  (7,00 x 10 <sup>4</sup> - 2,00x10 <sup>7</sup> )
<b>Hematita</b>									
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ~70% Fe	Metálico	Ausente ou com partição micácea prinuiciada	Cinza grafite ou vermelho ocre/  Vermelho ocre	Subconchoidal	5,5- 6,5	Maciço, placoide  ou terroso	5,26	Paramagnético  (0,42 - 3,80) x 10 <sup>4</sup>
<b>Goethita</b>									
	FeO(OH) ~63%	Adamantino Submetálico	Perfeita	Tons de marrom/ Tons de marrom	Ausente	5,0 -5,5	Botrioidal, maciço, fibroso ou acicular	4,27	Paramagnético  1,28 - 1,70

Fonte: Adaptado de Klein & Dutrow (2012) e Henriques (2012).

Tabela 3-VII: Principais propriedades e características dos minerais contaminantes de minério de ferro

<b>Propriedades físicas e cristalográficas diferenciadoras dos principais contaminantes de minério de ferro</b>									
<b>Mineral</b>	Fórmula Química	Classificação	Brilho	Clivagem	Cor/Traço	Fratura	Dureza	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Susceptibilidade magnética
	SiO <sub>2</sub>	Silicato	Vítreo	Imperfeita	Diversas	Conchoidal	7	2,65	Diamagnético
<b>Caulinita</b> 	Al <sub>4</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>8</sub>	Filossilicato	Terroso, opaco ou nacarado	Perfeita	Frequentemente branco	-	2/ 2,5	2,6	Diamagnético
<b>Gibbsita</b> 	Al(OH) <sub>3</sub>	Hidróxido	Vítreo, nacarado e sedoso	Perfeita	Incolor, branco cinza, amarelo, vermelho e castanho	Conchoidal	2,3/ 2,4	2,5 - 3,5	Diamagnético

Fonte: Adaptado de Klein & Dutrow (2012) e Aguiar (2013).

### 3.4 O Beneficiamento de minério de ferro

Valadão e Araújo (2007) definem o processamento mineral como “conjunto de operações básicas que são realizadas em uma matéria-prima mineral (minério bruto) com o objetivo de se obter a sua adequação, ou seja, produtos comercializáveis”. Os termos beneficiamento, tratamento de minérios e processamento mineral se referem ao mesmo conceito.

Para Luz e Lins (2010) o conjunto das principais operações realizadas na etapa de beneficiamento é composto pela cominuição (redução do tamanho através de moagem e britagem), separação por tamanho (por peneiras, ciclonagem e classificação em espiral), concentração (separação das espécies mineralógicas economicamente viáveis da ganga), separação sólido/líquido (para a recuperação da água utilizada no processo), e disposição de rejeito. Geralmente essas fases ocorrem simultaneamente em uma planta industrial. A figura 3.5 ilustra um fluxograma típico de beneficiamento de minério de ferro.

Galery, Valadão e Montenegro (2007) chamam atenção para a importância da adequação da granulometria nas fases de fragmentação e separação por tamanho, uma vez que este parâmetro compromete as demais etapas do beneficiamento. O tamanho dos grãos está diretamente relacionado ao tempo de residência das partículas, e para cada tempo de residência, distintos resultados serão obtidos.

Do ponto de vista metalúrgico, segundo a sua granulometria, o minério de ferro é dividido nas categorias granulado ou lump ore (faixa entre 200 e 12,5mm), finos para sinter ou sinter feed (entre 12,5 e 0,15mm) e finos para pelotas ou pellet feed (faixa inferior a 0,15mm).

No Brasil, muitas vezes, para a produção de granulado, etapas de cominuição, separação por tamanho e concentração gravítica são suficientes para alcançar os teores exigidos comercialmente. Entretanto, para a obtenção de sinter e pellet feed fines, a flotação e a separação magnéticas são as técnicas de concentração mais utilizadas, seja isoladamente ou combinadas (CARVALHO *et al*, 2014).

Para Peres e Araújo (2009) a flotação é sem dúvida o principal método de concentração de minerais empregados atualmente no mundo para o processamento de minérios dos mais variados tipos. É, por exemplo, praticamente o único método empregado para o processamento de minérios contendo metais básicos como cobre, chumbo, zinco e níquel e é também extremamente relevante para a obtenção de produtos de alta qualidade em bens minerais como minério de ferro.

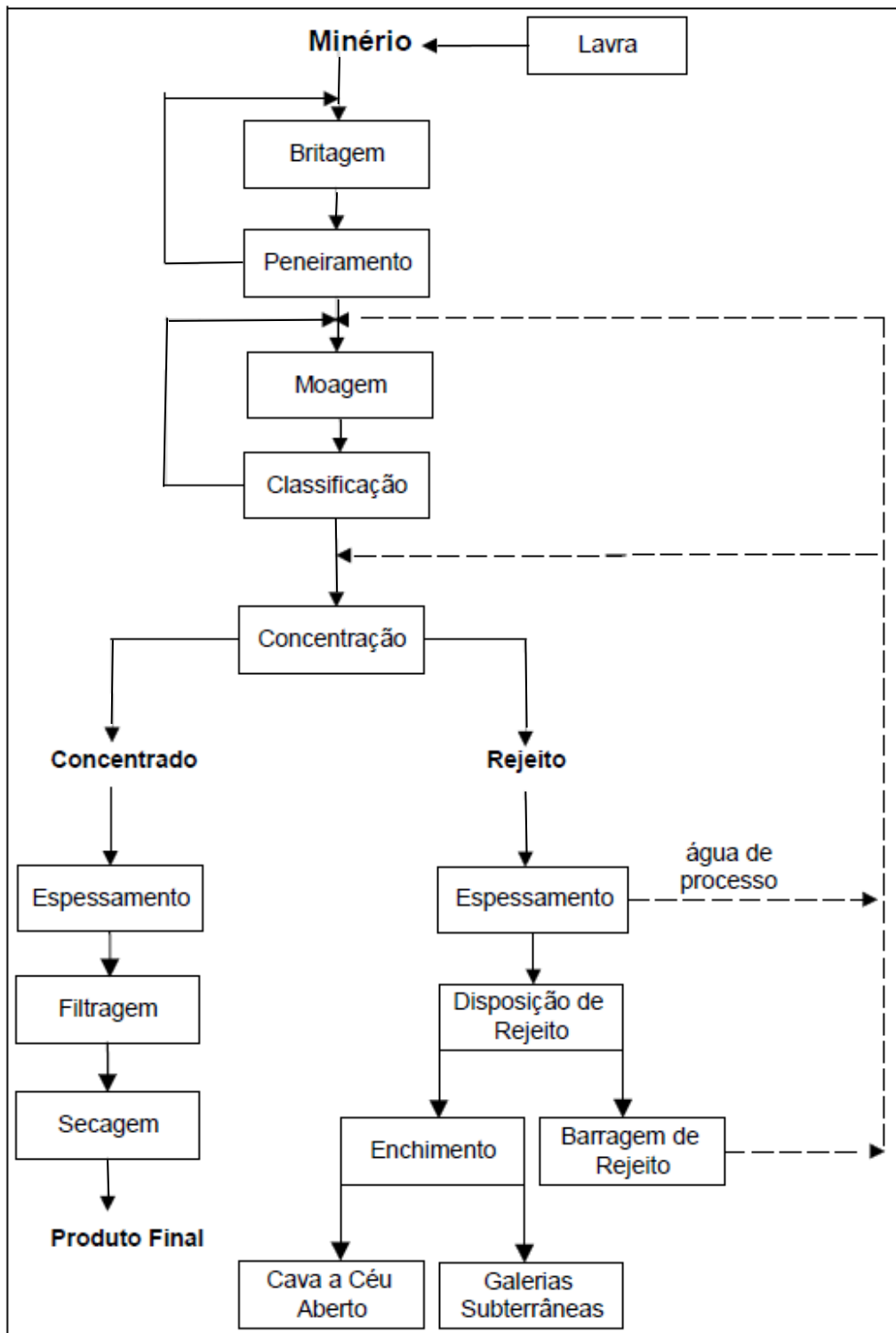


Figura 3.5: Fluxograma típico de tratamento de minério.

Fonte: Luz e Lins (2010).

Nascimento (2010) acrescenta que a flotação aniônica direta tem potencial para ser aplicada na concentração de minérios de ferro que contêm baixos teores desse elemento, como por exemplo, para material proveniente de barragem de rejeito que foi descartado como resíduo. Para tal, os coletores comumente utilizados são os ácidos graxos e, ainda que autores apontem a necessidade de mais pesquisas sobre os depressores, o hexametáfosfato de sódio e o ácido tânico são os mais frequentes.

Santos e Brandão (2003), e Nascimento (2010) em estudos de caracterização mineralógica do minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, apontaram abundante ocorrência de goethita terrosa, mineral que gera grande quantidade de material fino e poroso, podendo comprometer a etapa de beneficiamento.

Totou et al (2011) observam que é comum em depósitos brasileiros frações altamente decompostas pelo intemperismo, o que também gera partículas finas. Nas operações de lavra e cominuição em minério itabirítico é comum o surgimento de finos geradores de lama.

Peres e Araújo (2009) pedem atenção especial para as partículas finas, isso porque elas tendem a se agregar ou recobrir as mais grossas da polpa, fenômeno conhecido como *slimes coating*, o que na flotação pode aumentar a área superficial do sistema, gerando um consumo excessivo de reagentes. Além disso, este material fino altera a rigidez da espuma, interfere no contato partícula-bolha, comprometendo os resultados finais do processo.

Rocha (2008) observa que além de maiores dosagens de coletores, as partículas mais finas também requerem um maior tempo de residência na célula de flotação. Entretanto, é comum que as condições do sistema sejam ajustadas para as partículas mais grossas que estão misturadas as mais finas, o que pode justificar a baixa flotabilidade destas.

Totou et al (2011) defende a deslamagem como método de eliminação desta fração fina indesejada para o beneficiamento. Logicamente, o grau de dispersão da polpa para esta etapa deve ser observado, uma vez que as partículas precisam estar dispersas para uma deslamagem eficiente.

Aguiar (2013) ressalta que cada jazida de ferro possui suas características específicas, como granulometria, composição química, abrasividade, mineralogia e liberação dos grãos e que não existe uma rota padronizada para o minério de ferro. O que enfatiza a importância de estudos direcionados para cada corpo mineral, da caracterização de cada minério em questão.

Para Valadão e Araújo (2007) como método de concentração, os métodos magnéticos são o de segunda maior utilização no Brasil. As suas principais aplicações estão na concentração de minérios ferro magnéticos.

### 3.4.1 Separação Magnética

A separação magnética utiliza como propriedade diferenciadora o comportamento das partículas minerais sob a ação de um campo magnético, ou, susceptibilidade magnética. Segundo este parâmetro, os minerais se dividem em três grupos, os ferromagnéticos (que possuem grande intensidade magnética), paramagnéticos (que possuem média ou baixa intensidade magnética) e diamagnéticos (que não possuem intensidade magnética).

De acordo com Wills e Munn (2006), quando submetidos à ação de um campo magnético, os materiais paramagnéticos se alinham de modo que as linhas de força sejam atraídas para a área de maior intensidade do campo, estes materiais podem ser separados dos diamagnéticos em concentradores de alta intensidade. Ilmenita, rutilo, wolframita, monazita, siderita, pirrotita, cromita e hematita são exemplos desses minerais.

Sobre campo magnético, Sampaio e Luz (2010) pontuam duas grandezas: densidade de fluxo magnético ou magnetização ( $B$ ) e intensidade de campo ou de magnetização ( $H$ ), ambas medidas em Tesla (T) ou Gauss (G) –  $1T = 10^4G$ . Assim, o número de linhas de força que passa pelo material (unidade de área) está relacionado à intensidade de magnetização  $M$  (ampere/m) como ilustra a equação:

3:1

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M})$$

Onde:

$\mu_0$  = permeabilidade no espaço =  $4\pi \times 10^{-7}$  (Tesla.metro/ampere)

Vale lembrar que no vácuo e no ar (valor muito baixo)  $M=0$ .

A susceptibilidade magnética ( $K$ ) é uma propriedade física oriunda das características atômicas que explica o comportamento de um mineral quando este é submetido à ação de um campo magnético externo; ou, em outras palavras, é o grau em que um mineral pode ser magnetizado e é descrita pela equação:

3:2

$$\mathbf{K} = \mathbf{M/H}$$

$K$  assume valores positivos para os materiais ferromagnéticos e paramagnéticos, sendo que para estes últimos os valores são inferiores a  $10^{-3}$ . Para os diamagnéticos, o  $K$  deve ser negativo e inferior a  $10^{-5}$ . A tabela 3-VI traz os valores desse parâmetro para os principais óxidos de ferro: magnetita, hematita e goethita.

Os separadores magnéticos são equipamentos utilizados neste tipo de concentração mineral onde as partículas com maior susceptibilidade magnética se concentram na fração

magnética, e as com menor, na fração não magnética. Para Valadão e Araújo (2007) para o caso de minério de ferro, estes equipamentos são amplamente utilizados na separação de magnetita e hematita do quartzo.

Segundo Lage (2010) essa concentração pode ser realizada pelas vias úmida e seca, e depende de quatro fatores: as propriedades dos minerais, as características do separador, o nível de produção e o grau de recuperação. Os equipamentos para este método de beneficiamento podem ser subdivididos segundo as características do campo de indução. Assim, a separação magnética pode ocorrer em separadores de baixa intensidade (0,06 a 0,1T/ ou 600 a 1000G), e alta intensidade (valores superiores a 0,1T/ ou 1000G), por vias seca ou úmida, como ilustra, de forma resumida, a figura 3.6. A tabela 3-VIII traz os modelos dos principais equipamentos utilizados industrialmente.

Queiroz e Brandão (2009) relembram que a magnetita é o exemplo mais clássico de mineral ferromagnético, podendo ser concentrada em equipamentos de baixa intensidade, separada, principalmente do quartzo, exemplo de material diamagnético.

Os autores também advertem que quando a magnetita e o quartzo são os constituintes predominantes do sistema, a concentração magnética de alta intensidade não é recomendada devido ao arraste das partículas diamagnéticas. Se ainda assim, a alta intensidade for utilizada, quando o minério de ferro possuir mais de 30% de magnetita em sua constituição, uma etapa de preliminar de desbaste em equipamento de baixo campo magnético (< 2.000 Gauss) é altamente recomendada. Já para frações menores que 30%, o desbaste pode ser efetuado em campo médio (2.000 G a 9.000 G).

Aguiar (2013) comenta a importância da adequação do tamanho das partículas para esta etapa de concentração. Em um dos separadores magnéticos mais comuns, o Jones, é comum a obstrução das matrizes quando os grãos são maiores que o GAP (distância entre as placas presentes no equipamento).

Por fim, Wills e Munn (2006) defendem a separação de minérios com média ou alta intensidade magnética pela sua facilidade e rapidez de operação. Além disso, o custo econômico e fatores ambientais são vantagens desse procedimento. A primeira vantagem refere-se a simplicidade dos equipamentos de separação magnética, pela ausência ou pequena quantidade de produtos utilizados; já a segunda refere-se a pequena quantidade de resíduos que possam impactar/ poluir o ambiente, além de possibilitar uma posterior atividade de reciclagem.



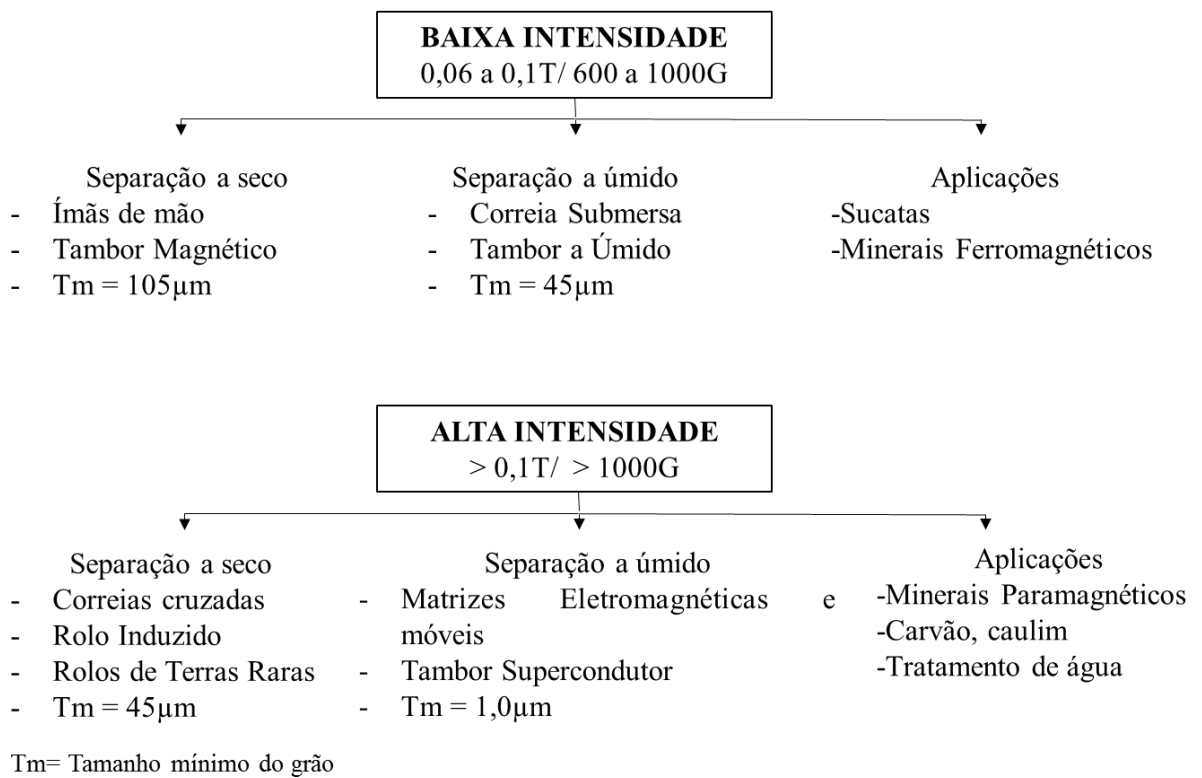


Figura 3.6: Classificação e características gerais dos separadores magnéticos

Fonte: Adaptado de Sampaio e Luz (2010).

Tabela 3-VIII: Principais modelos de separadores magnéticos industriais

Separador	Fluido	Fonte de Eletromagnetismo	Tipo de Equipamento
Separador magnético de alta intensidade a úmido	Úmido	Eletromagnético	WHIMS -Wet High Intensity Magnetic Separator
Separador magnético de rolo induzido	Seco	Eletromagnético	IRMS- Induced Roll Magnetic Separator
Separador magnético de correia cruzada	Seco	Eletromagnético	X/BELT - Crossbelt Magnetic Separator
Separador magnético de tambor de terras raras	Seco	Ímã permanente	RED - Rare Earth Drum Magnetic Separator
Separador magnético de rolo de terras raras	Seco	Ímã permanente	REMRS - Rare Earth Magnetic Roll Separator
Separador magnético de baixa intensidade a úmido	Úmido	Ímã permanente	LIMS- Low Intensity Magnetic Separator

Fonte: Adaptado de Silva (2012).

### 3.4.2 Separador Magnético de Alta Intensidade tipo Jones

A figura 3.7 é um desenho esquemático de um separador magnético de alta intensidade a úmido, ou, em inglês WHIMS – *Wet High Intensity Magnetic Separator*, tipo Jones que através de um eletroímã cria um campo magnético de alta intensidade.

O equipamento possui dois níveis que operam simultaneamente. Em cada um deles há uma estrutura circular de movimento rotatório que contém as matrizes magnéticas. As matrizes são um conjunto de placas (geralmente ranhuradas e em paralelo umas com as outras) que recebem a polpa mineral. As placas têm a função de aumentar o campo magnético aplicado; as partículas paramagnéticas são então atraídas para a sua superfície ficando presas. O movimento rotatório direciona essas partículas para serem lavadas por um jato de água afim de que aquelas com susceptibilidade magnética mediana (médios) sejam retiradas. O movimento rotatório continua até um ponto onde não existe mais campo magnético e as partículas com maior susceptibilidade magnética (concentrado) possam assim ser recolhidas com outro jato de água (WILLS e MUNN, 2006 e VALADÃO e ARAÚJO, 2007).

Para Silva (2012) e Silva (2014) em um separador tipo Jones, dentre as forças que atuam em uma partícula, a magnética é a mais importante. Outras como o peso da partícula, o arraste hidrodinâmico e as interações de superfícies (forças concorrentes) também influenciam no processo, como ilustra a figura 3.8.

A figura 3.9 ilustra o conceito de gradiente. Quando uma partícula sofre ação de um campo magnético uniforme (A), as forças atuantes iguais e opostas se anulam, a resultante é então igual a zero. A variação do campo, também chamada de gradiente, que é função do material magnetizado, faz com que a resultante de forças que agem sob essa partícula não seja nula, provocando a atração ou a repulsão da mesma. Em outras palavras, a intensidade de campo pode ser entendida como o número de linhas de fluxo que passa por uma área delimitada, já o gradiente de campo diz respeito a convergência (B) ou divergência dessas linhas.

Uma maneira de se produzir gradiente, ou seja, induzir pontos dentro do equipamento com campo de alta intensidade, é a utilização de matrizes entre os polos do eletroímã. As matrizes devem ser escolhidas segundo as características do minério, gradiente máximo de campo, capacidade de remoção das partículas magnéticas, capacidade de vazão da polpa e material de fabricação, uma vez que a matriz deve ter o mínimo de magnetização na ausência de campo magnético aplicado pelo equipamento. Dentre as matrizes propostas destacam-se a de bolas (ou esferas) e de placas ranhuradas, sendo esta última mais utilizada industrialmente (SAMPAIO e LUZ, 2010).

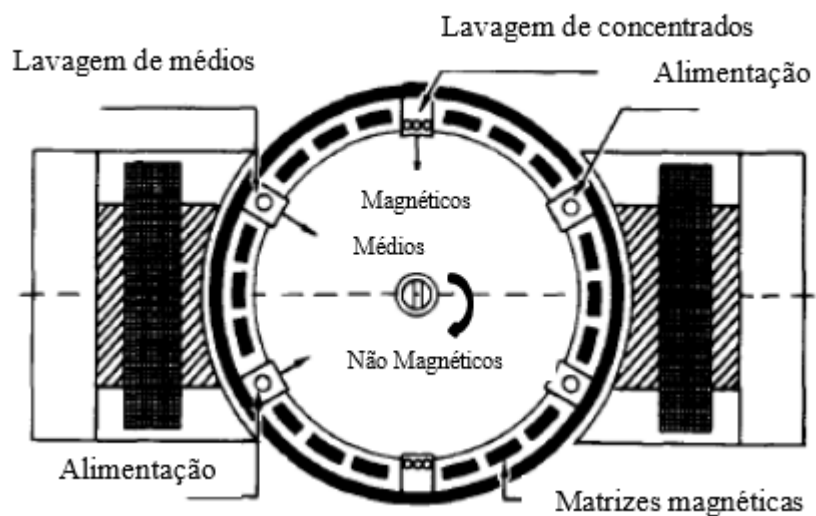


Figura 3.7: Separador magnético tipo Jones

Fonte: Adaptado de Wills e Munn (2006).

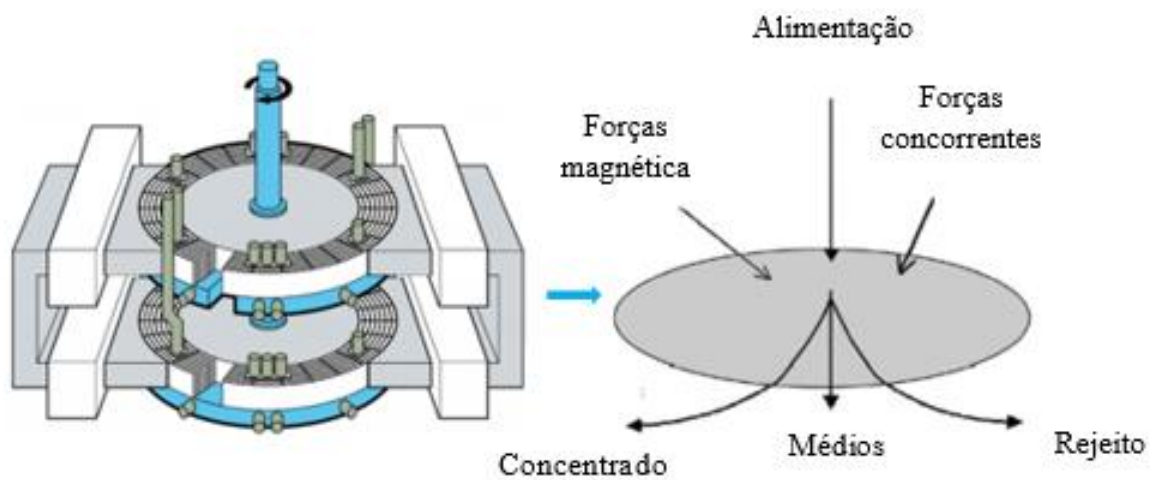


Figura 3.8: Diagrama de forças esquemático em separador tipo Jones

Fonte: Adaptada de Silva (2012) e Silva (2014).

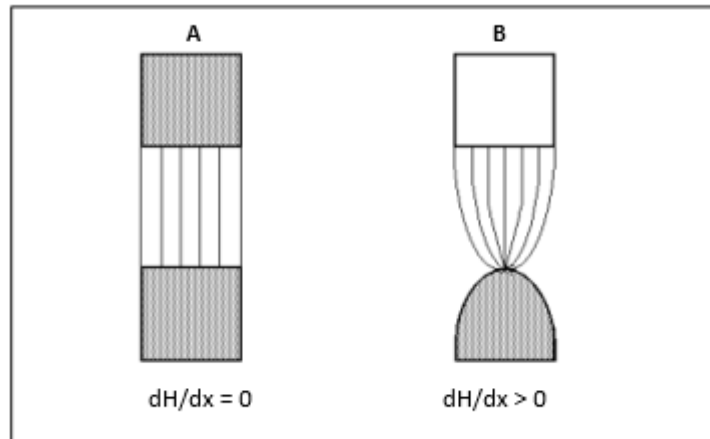


Figura 3.9: A) Campo magnético Uniforme B) Campo magnético Convergente, apresentando o gradiente de campo

Fonte: Adaptado de Sampaio e Luz (2010).

Silva (2012) e Silva (2014) fazem observações sobre variáveis na concentração magnética em separador tipo Jones:

- O percentual de sólidos ou diluição de polpa deve ser avaliado segundo dois critérios. Aproveitar ao máximo a capacidade do equipamento, ou seja, considerar a maior e mais espessa taxa de alimentação é o objetivo econômico do processo. Entretanto, a maior diluição da polpa dificulta o arraste de partículas magnéticas para o concentrado, o que pode reduzir a recuperação metalúrgica, e assim, a rentabilidade;
- O ajuste de corrente está relacionado ao ajuste de campo magnético que por sua vez afeta a recuperação metálica no concentrado. Assim, partículas fracamente magnéticas podem ser recuperadas com a aplicação de campos magnéticos altos. Entretanto, estes devem ser avaliados de modo que não prejudiquem a seletividade do processo, e não gerem mais custos operacionais com energia;
- Uma menor relação de sólidos para líquidos aliada a um campo magnético baixo faz com que apenas partículas com a susceptibilidade magnética mais alta (dentro do sistema) sejam direcionadas para o concentrado, que tende a ser mais puro, enquanto a recuperação metalúrgica tende a ser prejudicada;
- Sobre o parâmetro água de lavagem, a pressão deve ser ajustada segundo o teor almejado no concentrado, uma vez que maiores pressões tendem a um concentrado mais puro;
- Sobre o parâmetro matriz, se esta for ranhurada, quanto menor a distância entre as placas, ou GAP, maior será o gradiente do campo. A forma da matriz utilizada também afeta as forças atuantes no sistema, que por sua vez influencia na distribuição do campo magnético.
- Para minerais ferromagnéticos a granulometria das partículas não é relevante para este processo. Já para os paramagnéticos, considerando partículas com o mesmo

valor de susceptibilidade magnética, quanto menor o tamanho do grão, menor é a recuperação na fração magnética, ou, em outras palavras, quanto menor a partícula, maior o efeito do arraste hidrodinâmico.

### 3.4.3 Finos na separação magnética

Além do arraste hidrodinâmico discutido previamente, observa-se que a floculação ou agregação magnética é um fenômeno comumente observado em partículas finas de magnetita devido principalmente a alta força atrativa entre as partículas magnéticas. Lu, Pugh e Forssberg (2005) apontam que partículas com susceptibilidade magnética mais baixa, ou paramagnéticas, também podem formar agregados quando um campo magnético externo suficientemente alto é aplicado sobre elas.

Assim, pelos autores, em uma polpa mineral, a agregação de partículas magnéticas (ferromagnéticas e paramagnéticas), pode ocorrer por revestimento (quando a não magnética é muito maior que as magnéticas e é revestida por elas), por sementeira (quando não magnéticas e magnéticas possuem tamanhos similares e se agregam de forma intercalada) e também por arraste (quando as magnéticas são bem maiores que as não magnéticas e arrastam estas para o concentrado), como ilustra a figura 3.10.

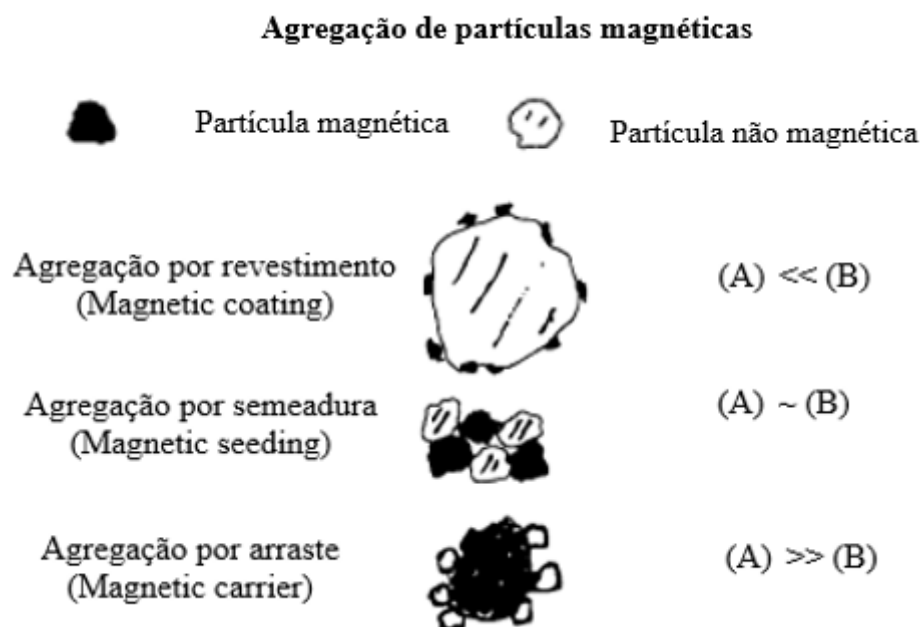


Figura 3.10: Agregação de partículas magnéticas em polpa mineral

Fonte: Adaptado de Lu, Pugh e Forssberg (2005).

Lu, Pugh e Forssberg (2005) e Silva (2012) discutiram a chamada *Floc Magnetic Separation* (FMS) no beneficiamento de minério de ferro de baixo teor. Para os autores é possível aumentar a eficiência da separação magnética pela remoção de partículas finas fracamente magnéticas. Para tal é necessário dispersar e promover a floculação seletiva destas partículas antes do processo de concentração.

Bhagat e Pathak (1995) estudaram a separação magnética de alta intensidade para minério de tungstênio com a aplicação de dispersante polimérico durante a concentração. Os processos de cominuição do minério geravam finos que, na polpa, formavam agregados. Um separador tipo WHIMS com campo de 1T (10.000G) para separar as partículas magnéticas das não magnéticas. O uso de dispersante diminuiu a heterocoagulação do sistema que alcançou um concentrado 10% mais rico, entretanto com recuperação mássica cerca de 3% menor.

Perez et al (2003) propuseram um dispersante polimérico sulfonado para aumentar a seletividade na separação magnética de minérios. O reagente deve ser adicionado a polpa imediatamente antes ou durante o processo para inibir a agregação de partículas finas. A patente é dirigida para minérios finos de ferro com baixo teor metálico.

O dispersante foi proposto devido ao fato da eficácia de processos de separação magnética serem prejudicados pela adsorção ou aglomeração de partículas não magnéticas em torno de partículas magnéticas, impedindo que estas sejam atraídas pelo campo induzido pelo equipamento, fazendo que as mesmas sejam direcionadas para o rejeito.

Os autores também descrevem outro processo de concentração magnética onde a polpa mineral que contém finos ferromagnéticos é dispersa com reagentes tais como silicato de sódio, hexametáfosfato de sódio e poliácrilato de sódio.

Santos, Brandão e Rocha (2016) avaliaram a influência do caráter eletrostático no estado de agregação em polpa de minério laterítico de níquel, e concluíram que em valores básicos de pH o grau de dispersão da polpa aumenta. Isso porque em valores ácidos, os minerais se encontravam carregados tanto negativamente (quartzo), como positivamente (hematita, goethita e magnetita), promovendo a agregação das partículas. Já com o aumento do pH, as cargas de superfície tendem a adquirir o mesmo sinal e aumentar a repulsão entre elas.

Assim, os estudos citados evidenciaram que o caráter magnético e o eletrostático estão diretamente relacionados ao estado de dispersão e agregação de polpas de minério diluídas, especialmente pela presença de finos.

### 3.5 Exemplos de Estudos Recentes

A fim de demonstrar a viabilidade do aproveitamento de rejeito de mineração, serão listados alguns exemplos de práticas bem-sucedidas em mineradoras localizadas no Quadrilátero Ferrífero na última década. Para tal é importante lembrar que a Samarco foi pioneira no reaproveitamento de rejeito de minério de ferro em Minas Gerais.

Em 1994 a empresa estudou e implantou uma planta de processos para ultrafinos. O minério proveniente da moagem passava por ciclones que separavam os ultrafinos (menor que  $10\mu\text{m}$ ) da etapa de flotação. O underflow desses ciclones alimentava a flotação convencional e o overflow alimentava a planta de ultrafinos que dispunha de uma bateria de ciclones. O overflow dessa etapa era o rejeito final direcionado para barragem de rejeito, e o UF era encaminhado para um tanque onde eram adicionados reagentes. A polpa passava então por um estágio final de flotação com os estágios rougher e cleaner, como ilustra a figura 3.11.

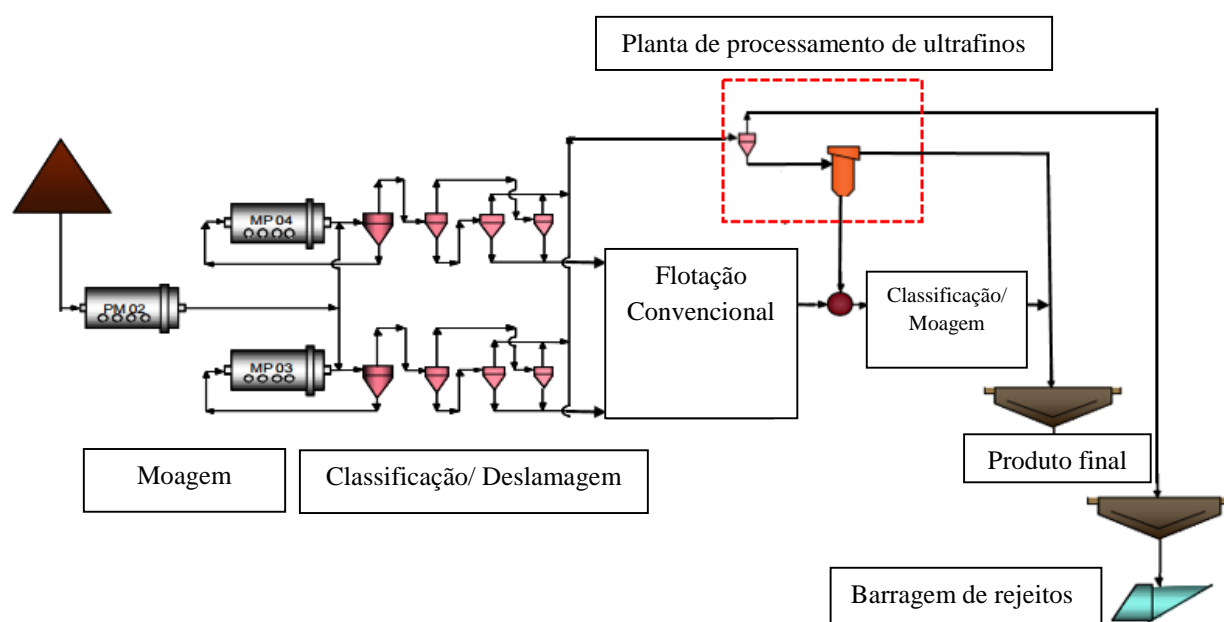


Figura 3.11: Planta de processamento de ultrafinos da Samarco

Fonte: Adaptado de Mapa (2006).

- Rocha (2008) investigou o aproveitamento econômico de rejeitos ultrafinos (lamas) através da flotação catiônica reversa de ferro apesar da visão tradicional de que partículas finas não flutam. Após caracterização tecnológica do material, dosagens de reagentes foram analisadas, e devido aos bons resultados provenientes dos testes de bancada, testes

pilotos foram realizados. O estudo aponta delta financeiro favorável para a mineradora visto o montante extra de minério ultrafino.

- Gomes (2009) investigou o rejeito estocado na barragem proveniente da usina de tratamento de minério da mina de Córrego do Feijão em Brumadinho – MG que beneficiava hematita e itabirito limonítico. Após amostragem e caracterização tecnológica da barragem, parâmetros para a concentração por separação magnética foram ajustados. Os resultados obtidos comprovaram a possibilidade de se produzir concentrado de minério de ferro que atendesse às especificações químicas de pellet feed para utilização em alto forno a partir do material antes denominado como rejeito.

- Santos (2010) estudou a flotação para lamas após dois estágios de ciclonagem da mina Pico da Vale. Para tal, o material foi caracterizado e rotas de flotação em coluna direta e reversa foram analisadas. O minério composto principalmente por hematita, goethita, caulinita, quartzo e gibbsita apresentou teores satisfatórios no concentrado para o Fe (64%) e SiO<sub>2</sub> (1,80%) para a flotação reversa em coluna.

- Totou et al (2011) estudaram a deslamagem que antecede a flotação de material fino, menor que 150µm em material itabirítico através de dosagens de distintos reagentes. Os resultados obtidos enfatizaram a importância da dispersão para a deslamagem. Dentre as opções testadas, o hidróxido de sódio, na faixa de pH 9,5 apresentou o resultado mais satisfatório.

- Sales (2012) estabeleceu parâmetros para a concentração magnética de finos provenientes do underflow do espessador de lamas da usina de Brucutu da Vale, encontrando teores que justificam o beneficiamento destes, até então, descartados como rejeitos. Os valores de Fe e SiO<sub>2</sub> no concentrado foram de 66,8% e 0,76% respectivamente.

- A empresa MINERITA (Minérios Itaúna Ltda.) recebeu da FEAM (Fundação Estadual do Meio Ambiente) em 2012 o prêmio de Boas Práticas Ambientais com o apoio da secretaria de Meio Ambiente e desenvolvimento sustentável do Governo de Minas Gerais e do SENAI. A empresa, que extrai ferro, visando o aproveitamento da sílica, caracterizou o seu rejeito, e, a partir daí, encontrou uma rota de concentração para a produção de areia industrial, que após alguns testes como os de resistência mecânica e absorção de água, foi considerada de excelente qualidade para fabricação de artefatos de cimento para uso na construção civil. Para a comercialização do novo produto alcançado, uma nova empresa, a BLOCOITA foi criada.

- Costa, Gumieri e Brandão (2014) estudaram a viabilidade do aproveitamento do rejeito de sinter-feed como agregado na produção de concreto para a fabricação de elementos pré-moldados. Após caracterização tecnológica e separação magnética, o desempenho do rejeito segundo suas propriedades físicas, técnicas e ambientais foi considerado satisfatório para o seu uso como concreto para pavimentação. Entretanto, devido a densidade elevada do produto decorrente do ferro presente, recomenda-se que a sua produção seja feita no próprio local de aplicação, evitando assim custos adicionais de transporte.



- Andrade (2014) caracterizou o rejeito de quatro barragens do Quadrilátero Ferrífero determinando a distribuição do tamanho das partículas, a composição química, a identificação das fases minerais e a morfologia dos grãos. Os resultados obtidos demonstraram características satisfatórias para o uso destes descartes na construção civil, como na fabricação de concreto, argamassas, cerâmicas e obras de pavimentação. A autora salienta que cada barragem apresentou granulometria e teores de ferro e sílica distintos. Testes mecânicos devem ser feitos para a comprovação da viabilidade do uso de rejeitos para este fim.

A tabela 3- IX ilustra, de maneira simplificada, os exemplos citados.

Tabela 3-IX: Exemplos de Estudos recentes de recuperação de finos de minério de ferro em Minas Gerais

Exemplos de Estudos recentes de recuperação de finos de minério de ferro em Minas Gerais				
Fonte	Empresa/Mina	Origem Lama	Etapas	Resultados
Rocha (2008)	CSN/ Casa de Pedra	Underflow do espessador de lama	Caracterização tecnológica , deslamagem e flotação catiônica reversa(célula mecânica e coluna)	Teores de 66,8% Fe e 0,51 SiO <sub>2</sub> no concentrado Lamas se tratadas separadamente, flotam
Gomes (2009)	Vale/ Corrégo do Feijão	Overflow da ciclonagem	Caracterização tecnológica , deslamagem classificação, flotação e separação magnética	Teores de 67,5% Fe e 1,5% SiO <sub>2</sub> no concentrado Os melhores resultados foram obtidos através de separação magnética.
Santos (2010)	Vale/ Mina do Pico	Overflow da ciclonagem	Caracterização tecnológica , deslamagem e flotação em coluna direta e reversa	Teores de 64,0% Fe e 1,8% de SiO <sub>2</sub> no concentrado Os melhores resultados foram obtidos através da flotação reversa
Totou el al (2011)	-	Overflow da ciclonagem	Testes de dispersão na deslamagem antecedendo a flotação	O ajuste de ph em 9,5 apresentou os melhores resultados de dispersão, e consecutivamente de deslamagem e flotação
Sales (2012)	Vale/ Brucutu	Underflow do espessador de lama	Caracterização tecnológica e concentração magnética (cleaner, scavenger e cleaner do scavenger)	Teores de 66,8% Fe e 0,76% de SiO <sub>2</sub> no concentrado
FEAM (2013)	Minerita	Planta de beneficiamento	Caracterização tecnológica, concentração de silicatos, testes de resistência mecânica e absorção de água	Produção de areia industrial comercializável para a industria civil
Costa, Gumeri e Brandão (2014)	Empresa não identificada no Quadrilátero Ferrífero	Planta de beneficiamento não identificada	Caracterização tecnológica, separação magnética, ensaios de resistência à compressão, absorção e desgaste por abrasão	O rejeito sinter feed após concentração foi considerado satisfatório na produção de concreto para fabricação de pré-moldados
Andrade (2014)	4 barragens de rejeito do Quadrilátero Ferrífero	Material já disposto em barragens	Caracterização tecnológica	As quatro barragens apresentaram teores altos que justificam estudos de concentração para Fe e SiO <sub>2</sub>

## 4. Metodologia

A metodologia para a realização deste trabalho baseia-se em amostragem, caracterização tecnológica e testes em escala de bancada de separação magnética. Os testes práticos que serão descritos a seguir foram feitos através da amostra cedida com cerca de 85kg pela mina Pau Branco proveniente da sua barragem de rejeitos.

### 4.1 Amostragem

Para submeter o material inicial aos testes práticos uma amostragem foi realizada através da secagem do material em estufa a 100<sup>o</sup>C seguida por desagregação manual por rolos de acrílico (preparação), da homogeneização com pás e quarteamento, primeiramente por divisores de rifles (n<sup>o</sup> 90/12, n<sup>o</sup> 30/16 e n<sup>o</sup> 10/16 grelhas da marca Dialmática) e depois por pilhas cônicas, como ilustra o fluxograma da figura 4.1. A amostragem foi feita com o intuito de garantir que as alíquotas utilizadas nas etapas posteriores fossem representativas do todo.

O material resultante do oitavo quarteamento foi dividido em alíquotas que alimentaram a caracterização tecnológica e os testes de concentração;

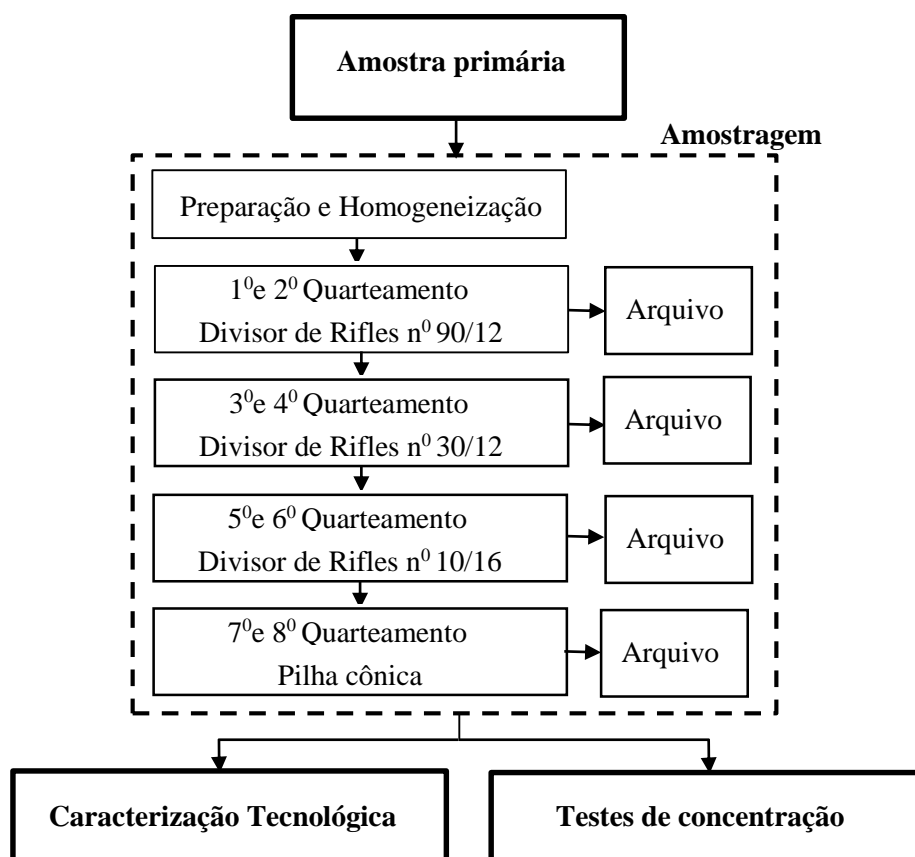


Figura 4.1: Fluxograma da metodologia adotada

## 4.2 Caracterização tecnológica

A tabela 4-I apresenta as etapas realizadas na fase da caracterização tecnológica cujos objetivos principais foram a identificação das fases constituintes da amostra e da liberação do ferro.

Os resultados obtidos na caracterização auxiliaram na escolha dos parâmetros para os ensaios de concentração magnética propostos.

Tabela 4-I – Parâmetros e métodos analisados na caracterização

Caracterização	Parâmetro	Método
Física	Densidade	Picnômetro
	Granulometria	Peneiramento/ Cyclosizer/ Granulômetro de difração a laser
	Área Superficial Específica	BET
Química	Análise semiquantitativa	Fluorescência de raios-x
Mineralógica	Identificação de fases	Difração de raios-x
	Identificação morfológica	Microscopia eletrônica de varredura/EDS

### 4.1.1 Determinação da massa específica

Para a determinação da massa específica do material foram realizados dois testes em triplicata com um picnômetro de 100ml, água destilada e estufa a 100<sup>0</sup>C da seguinte maneira:

- Pesou-se o picnômetro vazio ( $P_p$ ) previamente limpo, seco em estufa e resfriado a temperatura ambiente;
- Adicionou-se material até cerca da metade do volume do picnômetro encontrando a massa do sistema ( $P_{p+m}$ );
- Acrescentou-se água morna aquecida em estufa sem que houvesse transbordo. O novo sistema permaneceu em repouso por 30 min para a eliminação de bolhas de ar e sedimentação do material sólido;
- Após 30 min mais água foi adicionada até o transbordo. A água externa foi seca e a massa do sistema picnômetro mais água mais minério ( $P_{p+m+a}$ ) foi anotada;
- O picnômetro foi limpo e seco em estufa. Adicionou-se água até o transbordo e a massa do sistema picnômetro mais água ( $P_{p+a}$ ) foi registrada.

A densidade relativa do material estudado foi calculada através da equação 4.1:

$$d = \frac{P_{p+m} - P_p}{(P_{p+a} - P_p) - (P_{p+m+a} - P_{p+m})}$$

Onde  $d$  é a densidade relativa,  $P_p$  o peso do picnômetro,  $P_{p+m}$  peso do picnômetro mais minério,  $P_{p+m+a}$  peso do picnômetro mais minério mais água e  $P_{p+a}$  o peso do picnômetro mais água.

#### 4.2.2 Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi feita através de peneiramento combinado com peneiras da série Tyler, Cyclosizer e granulômetro de difração a laser.

##### Peneiramento combinado

Para estimar a quantidade de material peneirado nesta etapa a massa de Gaudin foi calculada segundo a equação 4.2:

4:2

$$M = \left[ \frac{di + ds}{2} \right] \cdot p \cdot A \cdot n$$

Sendo  $M$  a massa máxima retida em cada peneira (g);  $di$  a abertura da peneira em questão (cm);  $ds$  a abertura da peneira imediatamente acima da escala (cm);  $p$  a densidade da amostra ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $A$  a área da malha da peneira ( $314,16 \text{ cm}^2$ ); e  $n$  o número de camadas de partículas (3).

Após o cálculo da massa de Gaudin, sete peneiramentos combinados (P1, P2, P3, P4, P5, P6 e P7) foram feitos segundo a mesma metodologia:

- O corte a úmido foi realizado em  $38\mu\text{m}$  em peneiras Bertel de 20cm de diâmetro montadas em agitador suspenso de construção própria com motor Weg W22 e conjunto Steel 2100 por 15 minutos com vazão de água de 1L/s;
- O oversize dessa etapa foi seco em estufa e submetido a peneiramento a seco em duas séries de peneiras com as mesmas características das utilizadas no corte a úmido por 30 minutos. A primeira série foi composta pelas peneiras de 1180, 850, 600 e  $425\mu\text{m}$ , e a segunda pelas de 300, 212, 150, 106, 75, 53, 45 e  $38\mu\text{m}$ .

Apesar da peneira de 45 $\mu$ m não compor a série de Tyler, ela foi adicionada tendo em vista a grande quantidade de finos e a massa de Gaudin calculada.

### **Cyclosizer**

As partículas com granulometria inferior a 38 $\mu$ m provenientes do peneiramento combinado alimentaram os testes no Cyclosizer e no granulômetro de difração a laser. Os parâmetros aplicados ao Cyclosizer Warman M4 são apresentados na tabela 4-II.

Tabela 4-II: Condições operacionais para análise granulométrica em meio fluido (Cyclosizer)

<b>Condição operacional</b>	<b>Valor</b>
Temperatura (°C)	23
Vazão (mm)	200
Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	3,04
Tempo de elutriação (min)	20

### **Granulômetro de difração a laser**

Nesta etapa, para analisar a granulometria das partículas menores que 38 $\mu$ m o equipamento Sympatec Heloscom com comprimento focal de 50mm e hexametáfosfato de sódio (0,05%) foram utilizados.

#### **4.2.3 Área superficial específica e porosimetria**

Foram amostradas e enviadas para análise de área superficial específica e porosimetria amostras em quatro faixas granulométricas: o material in natura, o material deslamado em 38 $\mu$ m, o deslamado em 10 $\mu$ m e o inferior a 38 $\mu$ m.

A análise de área superficial específica (ASE) pelo método de BET e a distribuição de tamanho de poros pelo modelo de BJH foram realizadas em Quantachrome, modelo Nova 1000 com temperatura de degaseificação de 200°C utilizando como adsorvato o nitrogênio gasoso.

#### **4.2.4 Análise Química por Fluorescência de Raios - X**

O equipamento de fluorescência de raios-X utilizado é um Espectrômetro de Raios-X da marca Rigaku, modelo 3550. Trabalha com 60kV e 110mA. Possui fonte com filamento de tungstênio e janela de berílio. As pastilhas foram preparadas pelo método de prensagem. Além do material *in natura* as faixas granulométricas de 150, 106, 75, 53, 45, 38 e menor que 38 $\mu$ m também foram analisadas.

#### **4.2.5 Difratomia de Raios – X**

As análises de difratometria de raios-X foram realizadas em difratômetro de raios –X Philips (Panalytical) para amostras em pó com sistema X'Pert-APD, controlador PW 3710/31, gerador PW1830/40 e detector PW3020/000 executando varredura de  $2\theta$  de 3°-80°.

Foram submetidas à difração sete amostras, amostra *in natura* e as faixas granulométricas 106, 75, 53, 45 e 38 e menor que 38 $\mu$ m.

Como preparação das amostras, as faixas com granulometria superior a 38 $\mu$ m foram cominuídas em moinho de panela da Inbrás.

A partir do banco de dados foram identificadas as fases minerais majoritárias para os difratogramas obtidos das sete amostras.

#### **4.2.6 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)**

As análises nesta etapa foram conduzidas em microscópio eletrônico de varredura JEOL, modelo JSM-5410 acoplado com microsonda EDS Thermo Noran 6714<sup>a</sup>-1SUS-SN.

Foram submetidas à análise cinco faixas granulométricas, 106, 75, 53, 45 e 38 $\mu$ m. Para esta etapa seções polidas recobertas com carbono foram preparadas. A análise EDS foi feita em todas as faixas de tamanho afim de identificar fases minerais tanto majoritárias quanto minoritárias.

### **4.3 Testes de concentração**

Para os testes de concentração em separador magnético a amostra original foi dividida em três frações segundo a sua granulometria. A primeira corresponde ao material deslamado em 38 $\mu$ m, “>38 $\mu$ m”, a segunda ao deslamado em 10 $\mu$ m, “>10 $\mu$ m” e por último, a terceira parcela corresponde ao material entre “38 - 10 $\mu$ m”.

Após a deslamagem as três frações passaram por testes exploratórios em equipamentos distintos (Separador de baixa intensidade Salas, separador de ímã permanente Terras Raras e separador de alta intensidade tipo Jones) variando-se parâmetros operacionais dos mesmos.

Os testes que apresentaram os melhores resultados (análise por microscópio óptico Olympus SZX12) inspiraram as quatro rotas de concentração magnética propostas.

### 4.3.1 Deslamagem

A deslamagem em  $38\mu\text{m}$  foi feita por peneiramento a úmido em peneiras Bertel de  $50\times 50(\text{cm}\times\text{cm})$  montadas em agitador de peneiras Produtes. O oversize dessa etapa foi seco em estufa por 24 horas, desagregado e amostrado para que pequenas alíquotas de 50g fossem submetidas à separação magnética. O undersize foi reservado para a terceira fração estudada.

A deslamagem em  $10\mu\text{m}$  para as duas frações restantes (" $>10\mu\text{m}$ " e entre " $38$  e  $10\mu\text{m}$ ") foi feita em balde de 20L com aproximadamente 1,7kg de material e 15L de água (polpa com 10% de sólido) em triplicata da seguinte forma:

- O pH da polpa foi ajustado pra 10,5 com a adição de NaOH (5%);
- A polpa foi agitada por 10 minutos em agitador manual;
- Tempo de espera de sedimentação = 5min;
- A sifonagem foi feita com mangueira especial para deslamagem, como ilustra a figura 4.2.



Figura 4.2: Mangueira utilizada para deslamagem em  $10\mu\text{m}$

O oversize dessa etapa foi seco em estufa por 24 horas, desagregado e amostrado para que pequenas alíquotas de 50g fossem submetidas à separação magnética. Já o undersize, também seco e desagregado, foi encaminhado para teste de eficiência de deslamagem no



granulômetro de difração a laser Sympatec Heloscom com comprimento focal de 20mm e hexametáfosfato de sódio (0,05%).

#### **4.3.2 Testes exploratórios – Separador magnético de baixa intensidade**

As três frações foram submetidas à concentração magnética em separador Salas da Inbrás com campo de 800 Gauss com 30% de sólidos, pH natural, velocidade angular do tambor de 150 RPM, distância entre o tambor e o fundo da bacia de 27cm, etapa rougher.

#### **4.3.3 Testes exploratórios – Separador Magnético de ímã permanente**

As três frações foram submetidas à concentração magnética no separador Terras Raras da Inbrás com campo de 8000 Gauss, etapa rougher. As alíquotas de 50g submetidas foram secas e desagregadas. As velocidades adotadas para a esteira do equipamento para as frações “>38 $\mu$ m”, “>10 $\mu$ m” e entre “38 e 10 $\mu$ m” foram de 200, 320 e 415 RPM respectivamente.

#### **4.3.4 Testes exploratórios – Separador Magnético de alta intensidade**

As três frações foram submetidas à concentração magnética em separador de alta intensidade tipo Jones. A tabela 4-III contém os testes realizados com GAP de 1,5mm, 0,5kgf/cm<sup>2</sup> e 1L de pressão e de água de lavagem. Já a 4-IV possui os com GAP de 1,0mm, 30% de sólidos, pH natural, 0,5kgf/cm<sup>2</sup> e 1L de pressão e de água de lavagem.

Também foram executados testes de concentração combinando o separador Terras Raras com o tipo Jones como apresenta a tabela 4-V. Para a etapa no equipamento de ímã permanente a alíquota foi seca e desagregada. Para a seguinte com o separador de alta intensidade foi adotado polpa com 30% de sólidos, GAP de 1,5mm, pH natural, 1kgf/cm<sup>2</sup> e 1L de pressão e de água de lavagem.

Tabela 4-III: Testes exploratórios de concentração em separador magnético de alta intensidade tipo Jones/ GAP=1,5mm

Testes exploratórios de concentração em separador tipo Jones/- GAP = 1,5mm, 0,5kgf/cm <sup>2</sup> e 1L de pressão e de água de lavagem.									
Teste	Material	pH	% sólidos	Etapa Rougher			Etapa Cleaner		
				Matriz	Corrente (A)	Campo Gauss	Matriz	Corrente (A)	Campo Gauss
1	>38µm	10,5	50,0	Ranhurada	7,0	11000	Ranhurada	7,0	11000
2	>38µm	10,5	30,0	Ranhurada	3,6	8000	Ranhurada	4,0	9000
3	>38µm	Natural	50,0	Ranhurada	4,0	7000	Ranhurada	4,0	7000
4	>38µm	Natural	40,0	Bola	4,8	6000	Bola	4,8	6000
5	>38µm	Natural	30,0	Bola	7,0	7000	Ranhurada	4,0	9000
6	>38µm	Natural	40,0	Bola	7,0	7000	Ranhurada	4,0	9000
7	>38µm	Natural	50,0	Ranhurada	7,0	11000	Ranhurada	7,0	11000
8	>38µm	Natural	50,0	Ranhurada	5,0	10000	Ranhurada	5,0	10000
9	>38µm	Natural	50,0	Bola	2,4	6000	Ranhurada	2,4	6000
10	>38µm	Natural	30,0	Ranhurada	7,0	10000	Ranhurada	7,0	10000
11	>38µm	Natural	50,0	Bola	7,0	7000	Bola	7,0	7000
12	>38µm	Natural	40,0	Bola	7,0	7000	Ranhurada	4,0	9000
13	>38µm	Natural	40,0	Ranhurada	5,0	90000	Ranhurada	5,0	90000
14	>10µm	Natural	30,0	Bola	7,0	7000	Bola	7,0	7000
15	>10µm	Natural	30,0	Bola	7,0	7000	Ranhurada	4,0	9000
16	>10µm	Natural	30,0	Ranhurada	5,0	10000	Ranhurada	5,0	10000
17	>10µm	Natural	30,0	Ranhurada	7,0	11000	Ranhurada	7,0	11000
18	38 - 10µm	Natural	30,0	Bola	7,0	7000	Bola	7,0	7000
19	38 - 10µm	Natural	30,0	Bola	7,0	7000	Ranhurada	4,0	9000
20	38 - 10µm	Natural	30,0	Ranhurada	5,0	10000	Ranhurada	5,0	10000
21	38 - 10µm	Natural	30,0	Ranhurada	7,0	11000	Ranhurada	7,0	11000

Tabela 4-IV: Testes exploratórios de concentração em separador magnético de alta intensidade tipo Jones/ GAP=1,0mm

Testes exploratórios de concentração em separador tipo Jones							
Teste	Material	Etapa Rougher			Etapa Cleaner		
		Matriz	Corrente (A)	Campo Gauss	Matriz	Corrente (A)	Campo Gauss
22	>38 $\mu$ m	Bola	7,0	7000	Ranhurada	1,8	9000
23	>38 $\mu$ m	Ranhurada	3,2	15000	Ranhurada	3,2	15000
24	>38 $\mu$ m	Ranhurada	2,5	11000	Ranhurada	2,5	11000
25	>10 $\mu$ m	Bola	7,0	7000	Ranhurada	1,8	9000
26	>10 $\mu$ m	Ranhurada	2,0	10000	Ranhurada	2,0	10000
27	>10 $\mu$ m	Ranhurada	3,2	15000	Ranhurada	3,2	11000
28	38 - 10 $\mu$ m	Bola	7,0	7000	Ranhurada	1,8	9000
29	38 - 10 $\mu$ m	Ranhurada	3,2	15000	Ranhurada	3,2	15000
30	38 - 10 $\mu$ m	Ranhurada	2,5	11000	Ranhurada	2,5	11000

**GAP= 1,0mm, 30% sólidos, pH natural, 0,5kgf/cm<sup>2</sup> e 1L de pressão e de água de lavagem**

#### 4.3.5 Proposta de rota magnética

Os testes realizados no separador magnético tipo Jones (de 1 a 30) foram avaliados por microscopia óptica segundo a proporção de quartzo e minerais de ferro do concentrado. Os resultados obtidos inspiraram três rotas de separação magnética no separador tipo Jones. A figura 4.3 representa os fluxogramas executados, todos eles tiveram como estabelecidos os parâmetros GAP = 1,5mm, 30% sólidos, pH natural, 0,5kgf/cm<sup>2</sup> e 1L de pressão e de água de lavagem.

Outra rota de concentração também foi proposta para o separador Terras Raras conforme a tabela 4-VI.

O concentrado final de cada um dos circuitos propostos (A, B, C e D) foi enviado para análise química.

Tabela 4-V: Testes exploratórios combinados de separação magnética

<b>Testes exploratórios combinados</b>								
Teste	Material	Terras Raras		Jones etapa Rougher		Jones etapa Cleaner		
		Velocidade esteira(RPM)	Matriz	Corrente (A)	Campo (Gauss)	Matriz	Corrente (A)	Campo (Gauss)
31	>38 $\mu$ m	200	Ranhurada	7,0	11000	Ranhurada	7,0	11000
32	>38 $\mu$ m	200	Bola	7,0	7000	Bola	7,0	7000
33	>38 $\mu$ m	200	Ranhurada	5,0	10000	Ranhurada	5,0	10000
34	>10 $\mu$ m	320	Ranhurada	5,0	10000	Ranhurada	5,0	10000
35	>10 $\mu$ m	320	Bola	7,0	7000	Bola	7,0	7000
36	38 - 10 $\mu$ m	414	Ranhurada	5,0	10000	Ranhurada	5,0	10000
37	38 - 10 $\mu$ m	414	Bola	7,0	7000	Bola	7,0	7000

Tabela 4-VI: Rota de concentração: D

<b>Rota D de concentração proposta para o separador de ímã permanente</b>			
Equipamento	Material	Velocidade esteira(RPM)	Etapas
Terras Raras	>38 $\mu$ m	200	Rougher, Cleaner e Recleaner
	>10 $\mu$ m	320	Rougher, Cleaner e Recleaner

GAP = 1,5mm, pH: Natural/ 30% sólido  
0,5kgf/cm<sup>2</sup> e 1L de água de lavagem

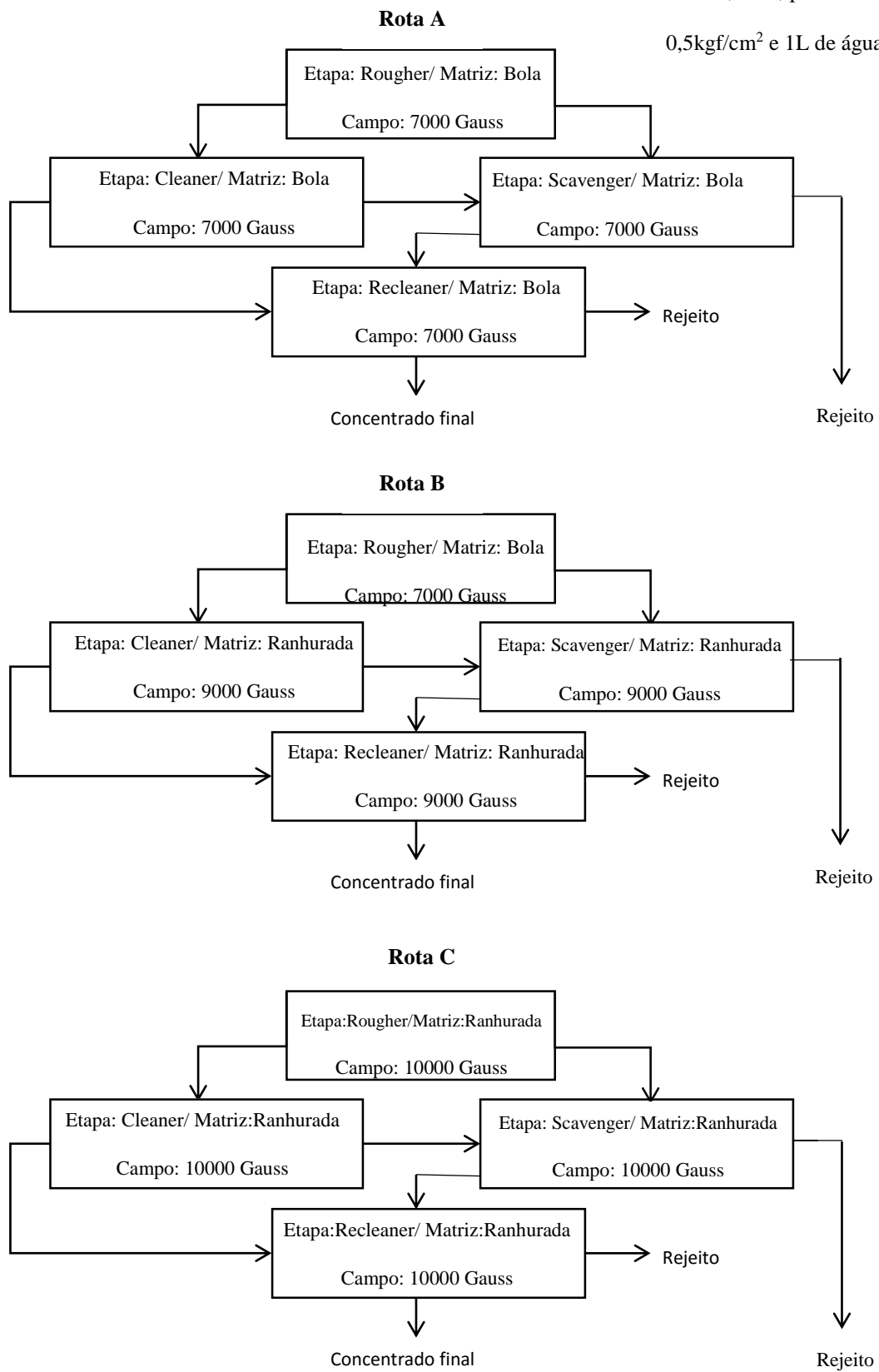


Figura 4.3: Rotas A, B e C de concentração magnética no separador tipo Jones

### 4.3.6 Testes de pressão de lavagem

O parâmetro pressão de água de lavagem foi avaliado para o material  $>10\mu\text{m}$  utilizando apenas a rota C de concentração magnética no separador tipo Jones (figura 4.4) para as pressões 0,5, 1,0 e 1,3kgf/cm<sup>2</sup> como ilustra a tabela 4-VII. Os testes realizados foram encaminhados para análise química.

Tabela 4-VII: Testes de pressão de lavagem para a rota C

Testes de pressão de lavagem					
Teste	Material	% sólidos	Água de lavagem	pH	Pressão de lavagem
38	$>10\mu\text{m}$	30	1L	Natural	0,5kgf/cm <sup>2</sup>
39	$>10\mu\text{m}$	30	1L	Natural	1,0kgf/cm <sup>2</sup>
40	$>10\mu\text{m}$	30	1L	Natural	1,3kgf/cm <sup>2</sup>

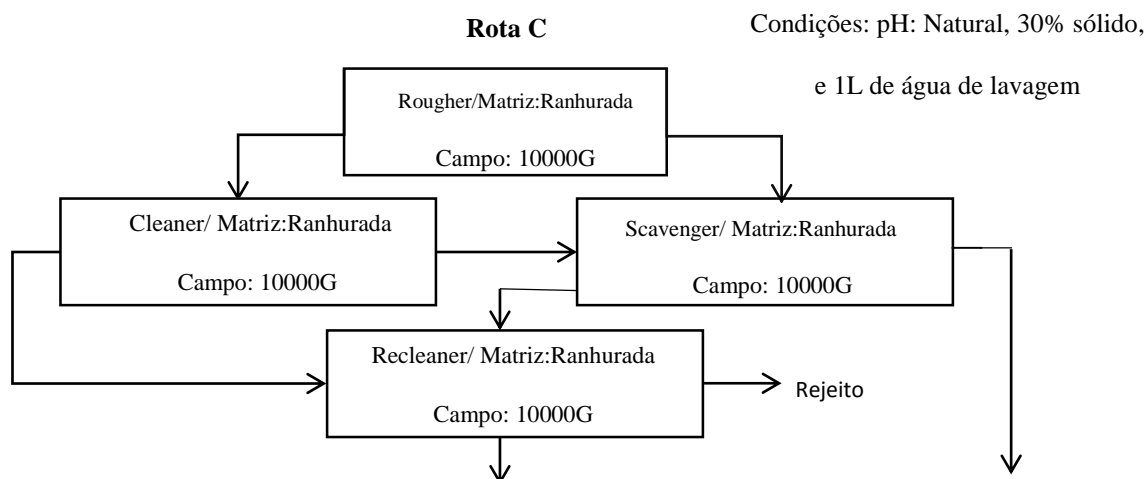


Figura 4.4: Rota C no separador magnético tipo Jones

#### 4.3.7 Testes de liberação e dispersão

Após análise química dos concentrados das quatro rotas de separação magnética, observou-se que apenas a fração mais fina, entre 38-10 $\mu$ m atingiu as especificações do produto comercial pellet feed fines (~ 65% Fe e ~3% de sílica). Portanto, avaliou-se a influência da liberação e da dispersão da polpa para testes de separação magnética.

Para a avaliação da influência da liberação na separação magnética foi feito o corte do material nas frações “>38” e “>10 $\mu$ m” em 150 $\mu$ m por peneiramento (Peneiras Bertel de 20 cm de diâmetro). Também foi feita a cominuição do material *in natura* em moinho de barras da Inbrás (20 minutos, moagem a seco). O material moído que alimentou os novos testes de separação magnética foi deslamado nas mesmas condições descritas no tópico Deslamagem.

A análise granulométrica do produto da moagem foi realizada nas mesmas condições que as descritas para o material *in natura*.

O produto da moagem foi utilizado nos ensaios de dispersão em tubo de Galery (tubo de vidro de 18,5cm de altura, 4,5cm de diâmetro com uma saída a 1,5cm do fundo do tubo e 0,5cm de diâmetro para o sobrenadante) com a seguinte metodologia:

- 5g do material moído e amostrado e 200mL de água destilada foram adicionados ao tubo previamente instalado sobre agitador magnético;
- Mediu-se o pH natural e adicionou-se reagentes à polpa. Foram analisados três reagentes dispersantes: NaOH (1%, ajuste de pH variando de 8,5 - natural - até 11,5) e hexametáfosfato e poliacrilato de sódio (1%, nas dosagens de 400, 900 e 1200g/t);
- O pH foi ajustado para os testes com NaOH para os valores 9,0, 9,5, 10,0, 10,5, 11,0 e 11,5. Para os demais reagentes (hexametáfosfato e poliacrilato de sódio) o pH utilizado foi o natural da polpa de aproximadamente 8,5;
- A polpa foi condicionada por 10 minutos através de agitação magnética; após esse período, desligou-se a agitação para que o material ficasse em regime de sedimentação por 2 minutos;
- Esgotou-se o sobrenadante e pesou-se as massas secas obtidas (massa dispersa/*overflow* e massa afundada/*underflow*);
- Todos os testes foram feitos em triplicata.

O grau de dispersão da polpa (GD) foi determinado pela equação 4.1:

4:3

$$GD = \frac{M_{of}}{(M_{of} + M_{uf})} \times 100 \quad \text{¶}$$

Onde  $M_{of}$  é a massa do *overflow* (g) e  $M_{uf}$  a massa do *underflow* (g).

Assim, novos testes de separação magnética foram executados afim de analisar a influência da liberação e da dispersão da polpa. A rota avaliada foi a Rota C (figura 4.4) por apresentar bons resultados de Fe no concentrado (tabela 5-VI) para as frações mais grossas. A tabela 4-VIII ilustra os testes realizados, onde “x” representa parâmetro adotado e “-” parâmetro não adotado.

Tabela 4-VIII: Testes de liberação e dispersão para a Rota C

Teste	Amostra	Preparação da amostra para a rota magnética C			
		Corte em 150 $\mu$ m	Moagem - 20 min	Ajuste-pH 10,5	Adição Hexametáfosfato de sódio
41	>10 $\mu$ m	x	x	-	-
42	>10 $\mu$ m	x	x	x	-
43	>10 $\mu$ m	x	x	-	x
44	>10 $\mu$ m	x	-	-	-
45	>10 $\mu$ m	x	-	x	-
46	>10 $\mu$ m	x	-	-	x
47	>38 $\mu$ m	x	-	-	-
48	>38 $\mu$ m	x	-	x	-
49	>38 $\mu$ m	x	-	-	x



## 5. Resultados e Discussão

Os resultados das análises descritas na metodologia são expostos neste tópico.

### 5.1 Caracterização Tecnológica

#### 5.1.1 Massa específica

Os resultados de determinação de massa superficial específica estão representados na tabela 5-I.

Tabela 5-I: Determinação da densidade relativa ( $\text{g/cm}^3$ )

Densidade relativa $d$ ( $\text{g/cm}^3$ )	
<b>1ª Triplicata</b>	<b>2ª Triplicata</b>
Média = 3,00	Média = 3,08
<b>Média triplicatas = 3,04</b>	
Desvio padrão = 0,06	

Assim, a média dos valores encontrados nas triplicatas forneceu um valor de densidade relativa da amostra de  $3,04\text{g/cm}^3$ .

#### 5.1.2 Análise granulométrica

Devido à grande quantidade de finos na amostra, sete peneiramentos combinados foram feitos em respeito à massa máxima por peneira de Gaudin (tabela 5-II). A figura 5.1 representa os gráficos resultantes dos sete peneiramentos e uma média (P médio) entre eles.

A figura 5.1 salienta a reprodutividade das sete distribuições granulométricas, o que justifica a curva P médio que foi plotada através da média aritmética entre elas. Observa-se também que o  $d_{90}$  é de aproximadamente  $75\mu\text{m}$  e que cerca de 35% do material é menor que  $38\mu\text{m}$ .

O undersize de todos os sete peneiramentos, após decantação e remoção do sobrenadante, foi seco em estufa, homogeneizado e amostrado de forma a gerar alíquotas para classificação em meio fluido (Cyclosizer) e para a granulometria de difração a laser.

A tabela 5-II representa os valores encontrados para a massa de Gaudin, P médio e Cyclosizer, e a figura 5.2 a curva granulométrica global correspondente. Nela observa-se que os peneiramentos realizados representam uma análise granulométrica, uma vez que a massa retida nas faixas selecionadas não ultrapassou a massa de Gaudin.

Pela figura 5.2 observa-se que quase 100% do material está abaixo de 150 $\mu\text{m}$ , o  $d_{90}$  é de aproximadamente 75 $\mu\text{m}$ , o  $d_{50}$  equivale a 45 $\mu\text{m}$ , cerca de 30% do material é menor que 38 $\mu\text{m}$  e cerca de 5% é menor que 10 $\mu\text{m}$ .

A figura 5.3 representa o gráfico fornecido pelo equipamento Sympatec Heloscom com comprimento focal de 50mm e aponta que o undersize do corte a úmido apresenta o  $d_{50}$  de aproximadamente 10 $\mu\text{m}$ .

Os resultados obtidos na classificação em meio fluido e na difração a laser ainda que utilizados para partículas menores que 38 $\mu\text{m}$  foram analisados de modo distinto. Para o primeiro método a análise feita foi global, considerando também os resultados do peneiramento combinado. Já no segundo, apenas partículas menores que 38 $\mu\text{m}$  foram consideradas.

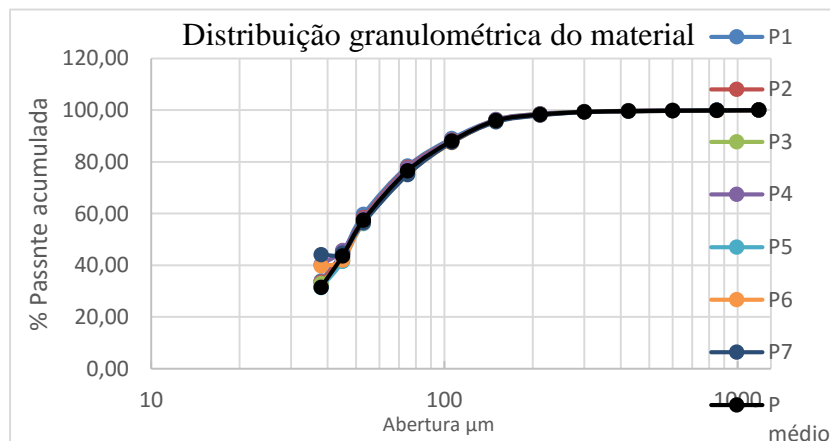


Figura 5.1: Distribuição granulométrica dos sete peneiramentos combinados

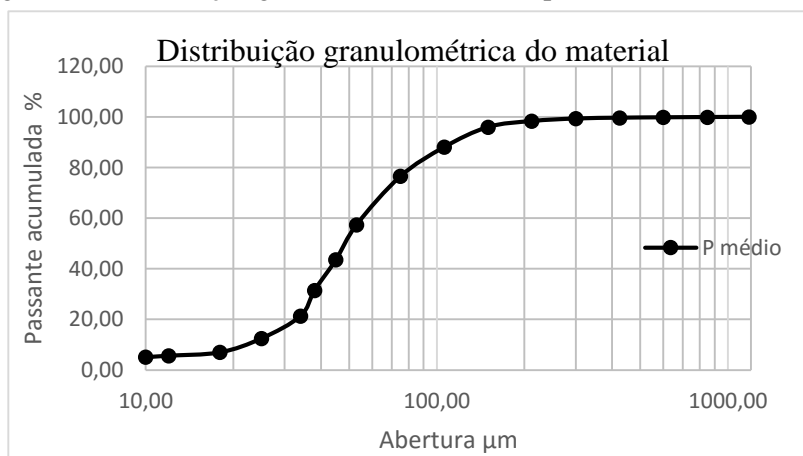


Figura 5.2: Distribuição granulométrica P médio

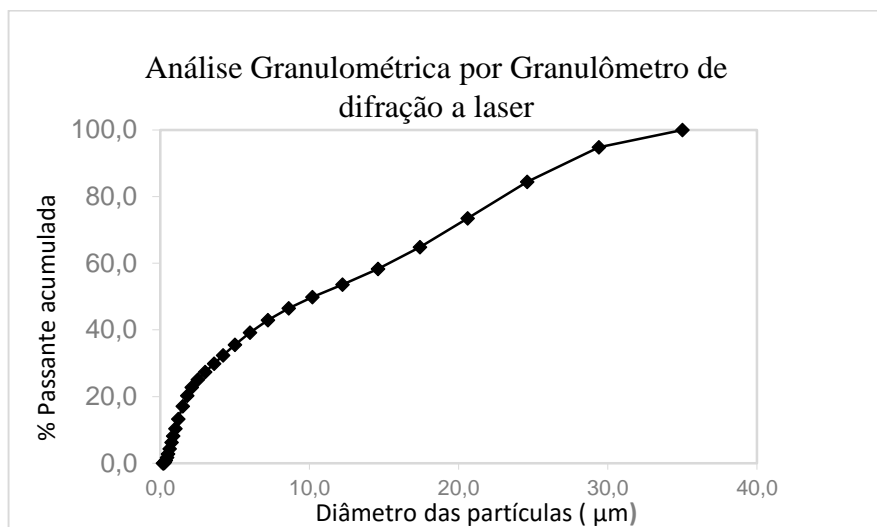


Figura 5.3: Análise granulométrica por Granulômetro de difração a laser

Tabela 5-II: Análise granulométrica do material

Análise Granulométrica					
Abertura (µm)	Série Tyler Massa de Gaudin(g)	Massa Retida(g)	% Retida simples	P médio % Retida acumulada	% Passante acumulada
1180	408,19	0,00	0,00	0,00	100,00
850	291,77	0,07	0,10	0,10	99,90
600	208,41	0,08	0,10	0,20	99,80
425	147,32	0,12	0,16	0,35	99,65
300	104,20	0,24	0,32	0,68	99,32
212	73,59	0,75	1,00	1,67	98,33
150	52,03	1,76	2,35	4,02	95,98
106	36,79	5,95	7,93	11,95	88,05
75	26,01	8,63	11,50	23,45	76,55
53	18,40	14,35	19,14	42,59	57,41
45	14,09	10,37	13,83	56,43	43,57
38	11,93	5,29	7,05	63,47	36,53
34	-	11,40	15,20	78,67	21,33
25	-	6,61	8,81	87,48	12,52
18	-	4,14	5,52	93,00	7,00
12	-	0,99	1,32	94,32	5,68
10	-	0,45	0,60	94,92	5,08
< 10 µm	-	3,81	5,08	100,00	0,00

### 5.1.3 Área superficial específica e porosimetria

A tabela 5-III mostra os valores encontrados para área superficial específica e porosimetria.

Tabela 5-III: Área superficial específica e porosimetria

Área superficial específica e porosimetria			
Amostra	ASE (m <sup>2</sup> /g)	Porosimetria	
		Volume de poros (cm <sup>3</sup> /g)	Tamanho médio de poros (nm)
<i>In natura</i>	3,713	0,023	3,82
Deslamado em 38µm	3,704	0,020	3,82
Deslamado em 10µm	3,854	0,020	3,82
< 38µm	13,400	0,024	3,82

As amostras analisadas apresentam ASE compatível com essa granulometria para minério de ferro. Como exemplo, \*Silva (2014) observou uma ASE de 1,5m<sup>2</sup>/g para minério de ferro goethítico com d<sub>50</sub> = 150µm; já Mangabeira (2009) encontrou para esse parâmetro valores de 3,0, 2,0, 9,6, e 0,6m<sup>2</sup>/g para distintas minas de ferro da empresa Samarco após moagem para adequação à flotação.

A fração mais fina, menor que 38µm, como esperado, é a que apresenta a maior ASE, uma vez que a redução da granulometria aumenta a área superficial do conjunto de partículas. O volume e o tamanho dos poros não variam consideravelmente.

Como será comprovado na análise microscópica, o material original não é poroso. Apresenta uma variedade da hematita, a martita, cuja estrutura é em treliça, o que afere uma maior porosidade a hematita, responsável por aumentar a área superficial específica, mas não de modo exorbitante.

### 5.1.4 Análise química por fluorescência de raios-x

A tabela 5-IV contém o resultado da análise química e aponta que o material *in natura* bem como as demais faixas analisadas não podem ser classificados como produto comercial de minério de ferro, uma vez que as especificações de *pellet feed fines*, adequada para essa granulometria, exigem teores aproximados de 65% de Fe e de contaminantes (SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) de cerca de 3%.

Observa-se também que o material inferior a 38 $\mu$ m é o mais rico em ferro, contendo um teor de 41,2% enquanto o *in natura* apresenta apenas 36,53%. A faixa granulométrica mais pobre, ou com maiores teores de contaminantes é a de 38 $\mu$ m, contendo 58,22% de SiO<sub>2</sub> e 1,53% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Tabela 5-IV: Análises granuloquímicas

<b>Análises Químicas por Fluorescência de Raios-X</b>							
Amostra	Teores Químicos (%)						
( $\mu$ m)	Fe	Mn	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	PPC	Fechamento
<i>In natura</i>	36,53	0,225	43,64	1,56	0,033	2,59	100,41
150	30,01	0,149	55,61	1,58	0,033	2,35	100,35
106	35,95	0,411	42,08	1,73	0,047	4,31	100,22
75	36,10	0,262	44,54	1,36	0,034	2,82	100,78
53	33,05	0,176	49,64	1,19	0,033	2,04	100,45
45	28,99	0,155	55,60	1,29	0,029	1,79	100,42
38	27,40	0,160	58,22	1,53	0,032	2,30	101,53
<38	41,82	0,331	33,88	2,09	0,063	3,29	99,67

### 5.1.5 Difractometria de raios-x

Em todas as amostras submetidas à difração, *in natura*, 106, 75, 53, 45, 38 e menor que 38 $\mu$ m foram identificadas as mesmas fases majoritárias, sendo o quartzo a fase mais marcante seguida pela hematita e por último goethita.

A figura 5.4 é o difratograma encontrado para o material *in natura*, a seta vermelha indica o pico máximo encontrado para a hematita. O anexo I dispõe dos demais difratogramas com os picos das fases minerais identificados.

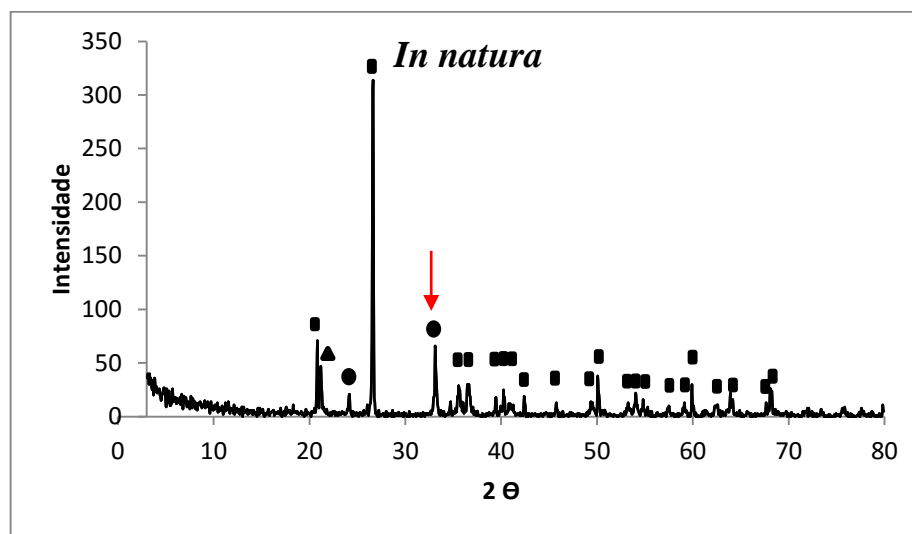


Figura 5.4: Difratograma da amostra *in natura*. Quartzo (■), Hematita (●), e Goethita (▲)

### 5.1.6 Microscópio eletrônico de varredura/EDS

Em todas as faixas granulométricas submetidas ao microscópio eletrônico de varredura por imagem de elétrons retroespalhados e análise química EDS, 106, 75, 53, 45 e 38µm, foram confirmados os minerais descobertos no DRX (quartzo, hematita e goethita) e também foram encontradas duas fases minoritárias, a caulinita, e um óxido de manganês. Sobre a hematita, foram detectadas duas variações do mineral, a granular e a martita.

Poucas partículas mistas foram identificadas, como a 2 da figura 5.7, onde existe a inclusão de pontos de hematita em uma matriz de quartzo, observou-se que os minerais de ferro se encontram praticamente liberados na faixa de 106µm.

As análises realizadas, ainda que apontem a presença de óxido ou hidróxido de manganês, não conseguem especificar qual o/os mineral/ais presentes. Isso ocorre principalmente devido a variada mineralogia destes compostos. Além disso, autores como Klein e Dutrow (2012) e Carvalho Filho et al (2011) apontam o conhecimento inexato de estruturas de minerais de Mn.

Klein e Dutrow (2012) listam os principais óxidos e hidróxidos de manganês, sendo a pirolusita o mineral mais frequente deste elemento, e a manganita um hidróxido comum. As análises EDS apontaram a presença de K, o que poderia indicar a criptomelana e a manjiorita; de Ba presente na hollandita e na romanechita; de Al, constituinte da litioforita; e de Mg e Ca observáveis na todoroquita. Para os autores a romanechita se destaca dos outros óxidos de Mn pela sua forma botrioidal, como observado na partícula 6a da figura 5.7. Carvalho Filho et al (2011) identificam a todoroquita e a litioforita como os óxidos de Mn mais presentes em solos do Quadrilátero Ferrífero. A tabela 5-V contextualiza os possíveis minerais de manganês detectados neste trabalho.

Tabela 5-V: Possíveis minerais de Mn

Mineral	Fórmula química
Criptomelana	$\text{KMn}_8\text{O}_{16}$
Hollandita	$\text{BA}_2\text{Mn}_8\text{O}_{16}$
Litioforita	$(\text{Li, Al})\text{MnO}_2(\text{OH})$
Manganita	$\text{MnO}(\text{OH})$
Manjiroita	$(\text{Na, K})\text{Mn}_8\text{O}_{16} \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Pirolusita	$\text{MnO}_2$
Todoroquita	$(\text{Mn, Ca, Mg})\text{Mn}_3\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Romanechita	$(\text{Ba, H}_2\text{O})_2(\text{Mn}^{+4}, \text{Mn}^{+3})_5\text{O}_{10}$

A figura 5.5 A enfatiza a variedade martita da hematita com o hábito octaédrico característico da magnetita, a B apresenta a variedade granular. Ambas foram encontradas em todas as faixas estudadas. A figura 5.7 tirada na faixa de 106 $\mu\text{m}$  contém todos os minerais apontados nesta análise. Já a 5.6 ilustra uma partícula mista de hematita e goethita na faixa de 45 $\mu\text{m}$ . Por fim, o anexo II contém as demais imagens obtidas no MEV com as respectivas análises pontuais EDS.

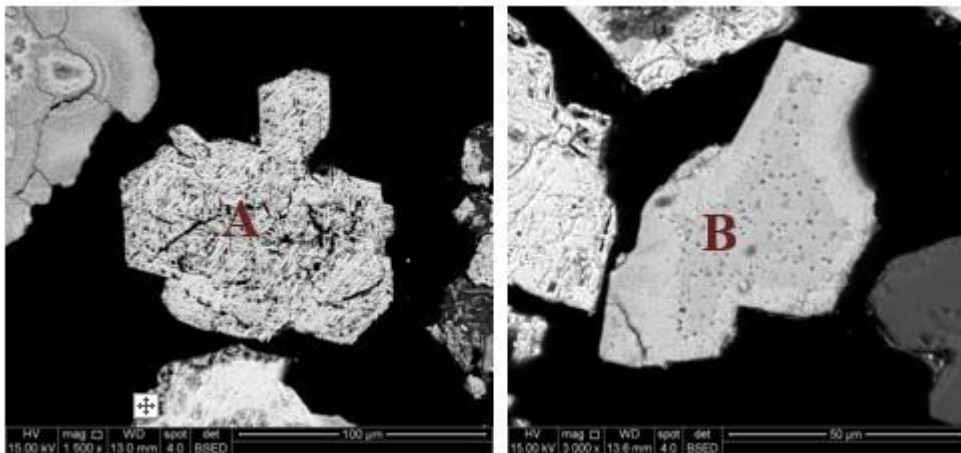
## 5.2 Testes de concentração

O undersize da deslamagem feita foi submetido à granulometria de difração a laser com o intuito de se avaliar a eficiência do procedimento como mostra a figura 5.8. Observa-se que o  $d_{90}$  é de aproximadamente 10 $\mu\text{m}$ .

A figura 5.2 ilustra que cerca de 5% da amostra *in natura* é menor que 10 $\mu\text{m}$ ; ainda que partículas mais grosseiras não tenham sido eliminadas, apenas 1% do material foi removido nesta etapa, a eficiência de deslamagem pode ser então, melhorada.

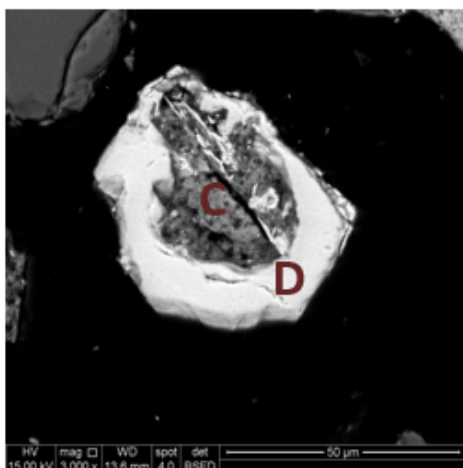
Os testes exploratórios no separador magnético de baixa intensidade (800 Gauss) obtiveram uma recuperação mássica muito baixa, de cerca de 1,0%. Este resultado, juntamente aos difratogramas e análises no MEV/EDS analisados descartam a presença de magnetita na amostra.

Já os testes realizados nos equipamentos Terras Raras e Jones apresentaram valores médios de recuperação mássica de 60 e 50% respectivamente. Entretanto, as rotas que combinaram os dois equipamentos (Tabela 4-V) tiveram como valor máximo desse parâmetro 35%. Dessa forma os testes exploratórios combinados foram descartados para rota de concentração magnética.



Análise	Partícula A		Partícula B	
Química	Elemento	Teor (%)	Elemento	Teor (%)
Alto	Fe	74,86	Fe	70,42
Médio	O	23,85	O	27,48
Baixo	Si	1,29	Al	1,29
Hematita:	Martita		Granular	

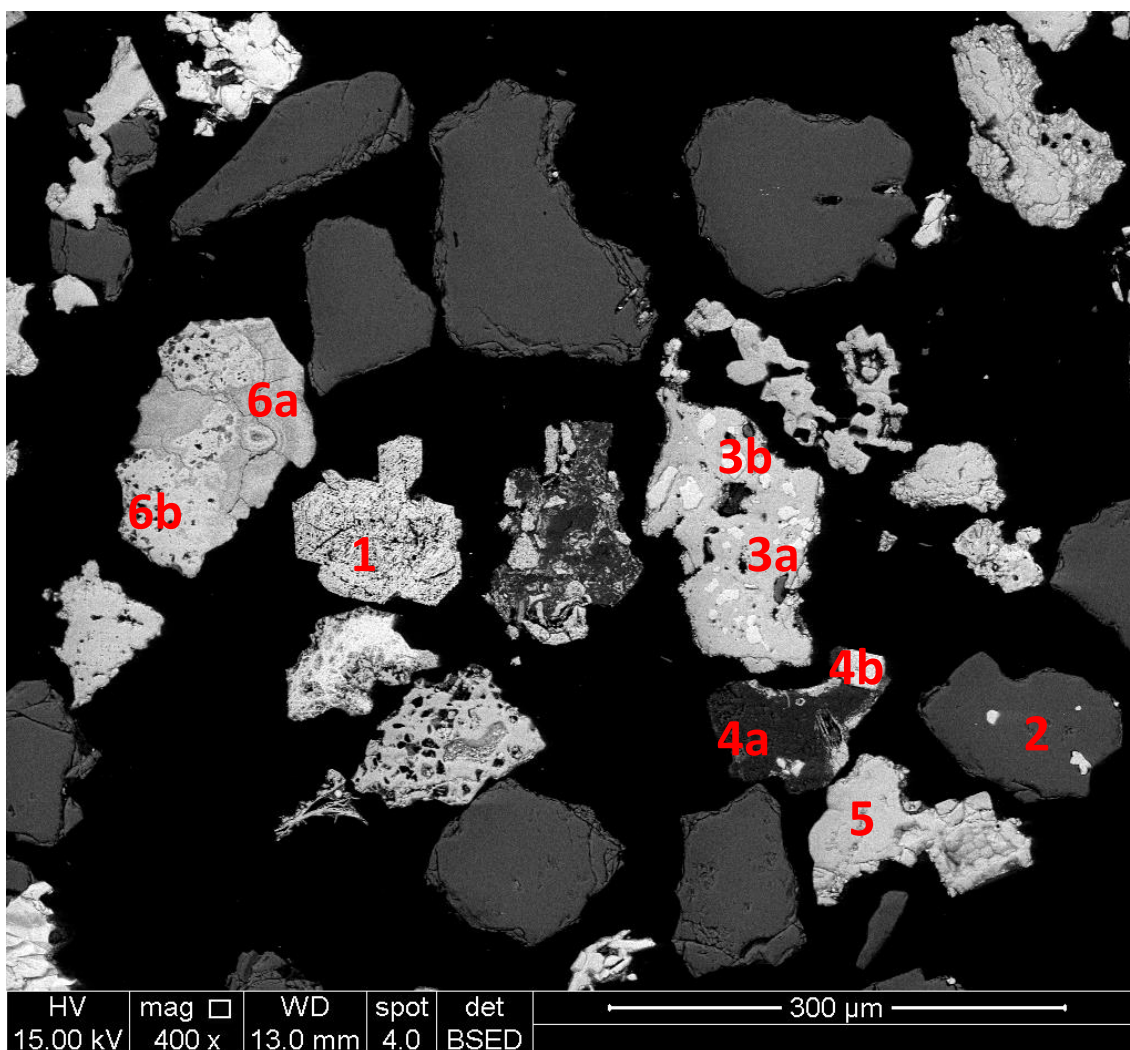
Figura 5.5: Análise exploratória MEV/EDS - Imagem de elétrons retroespalhados de hematita A) martita B) granular



Análise	Partícula C		Partícula D	
Química	Elemento	Teor (%)	Elemento	Teor (%)
Alto	Fe	61,93	Fe	71,39
Médio	O	22,05	O	24,48
Baixo	Si/Ti	4,64/4,56	Ti	1,03
Traço	Ca/Al	2,86/1,63	Si/Al	0,99/0,75
Mineral	Goethita		Hematita	

Figura 5.6: Faixa de 45µm – Partícula de Goethita e Hematita (granular)





Análise	Partículas analisadas								
	1	2	3a	3b	4a	4b	5	6a	6b
Química	Fe	Si	Fe	Fe	-	Fe	Fe	Mn	Mn
Alto	Fe	Si	Fe	Fe	-	Fe	Fe	Mn	Mn
Médio	-	-	-	-	Al	-	-	-	-
Baixo	Si	-	Si	-	Fe	-	Si	Fe, Al, K	Al, K, Ba, Fe
Traço	-	Fe	Al, P	Si, P, Al	Si	Si, Al	Al	Si	Si
Mineral	Hematita	Quartzo	Goethita	Hematita	Caulinita	Hematita	Goethita	Óxido de	Óxido de
Variedade	(martita)	-	-	(granular)	-	(granular)	-	Manganês	Manganês

Figura 5.7: Análise exploratória MEV/EDS - Imagem de elétrons retroespalhados da faixa 106μm com os minerais: Hematita (granular e martita), Quartzo, Goethita, Caulinita e Óxido de Manganês

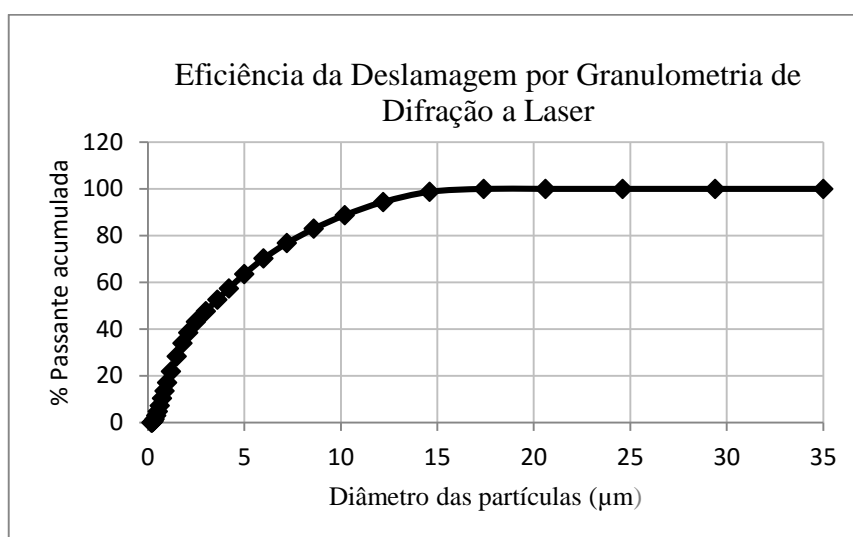


Figura 5.8: Eficiência da Deslamagem por Granulometria de Difração a Laser

Os testes exploratórios executados no separador de alta intensidade (Tabelas 4-III e 4-IV), e no de ímã permanente foram submetidos à microscopia óptica; os que obtiveram melhor avaliação visual segundo a proporção de quartzo no concentrado inspiraram as rotas A, B, C (figura 4.3) e D (tabela 4-VI) de concentração propostas.

A figura 5.9 exemplifica as imagens analisadas, nela é possível observar partículas de quartzo liberado, a sua proporção frente aos outros minerais existentes e partículas com brilho característico de mineral de ferro – hematita.

Todos os testes exploratórios realizados no separador magnético tipo Jones (tabelas 4-III e 4-IV) apresentaram valores de recuperação mássica muito próximos, de cerca de 50%, já nas análises visuais, as seguintes observações foram feitas:

- Quanto maior a porcentagem de sólidos, maior a proporção de quartzo no concentrado. Os testes 8 e 10, por exemplo, foram feitos sob as mesmas condições, exceto pela % sólidos; o último apresentou melhor resultado. Quanto maior a diluição mineral, menor a probabilidade de arraste de partículas não magnéticas para o concentrado.

Teste	Material	pH	% sólidos	GAP (mm)	Etapa Rougher		Etapa Cleaner	
					Matriz	Campo (G)	Matriz	Campo (G)
8	>38µm	Natural	50	1,5	Ranhurada	10000	Ranhurada	10000
10	>38µm	Natural	30	1,5	Ranhurada	10000	Ranhurada	10000

- Quanto menor o GAP, maior o gradiente provocado pela matriz. O aumento do gradiente por sua vez, faz com que uma proporção maior de não magnéticos seja arrastado para o concentrado. Os testes 16 e 26 foram realizados com GAP de 1,5

e 1,0mm respectivamente, os demais parâmetros foram iguais. O 16 apresentou maior seletividade.

Teste	Material	pH	%sólidos	GAP (mm)	Etapa Rougher		Etapa Cleaner	
					Matriz	Campo (G)	Matriz	Campo (G)
16	>10 $\mu$ m	Natural	30	<b>1,5</b>	Ranhurada	10000	Ranhurada	10000
26	>10 $\mu$ m	Natural	30	<b>1,0</b>	Ranhurada	10000	Ranhurada	10000

- Os testes realizados com a matriz de bolas apresentaram resultados de recuperação mássica ligeiramente mais satisfatórios. A disposição das esferas promove menos espaços vazios para o escoamento da polpa quando comparado a matriz de placas ranhuradas; como ilustração, dentre os testes 3 e 11, o primeiro obteve um concentrado mais puro.

Teste	Material	pH	%sólidos	GAP (mm)	Etapa Rougher		Etapa Cleaner	
					Matriz	Campo (G)	Matriz	Campo (G)
3	>38 $\mu$ m	Natural	50	1,5	<b>Ranhurada</b>	7000	<b>Ranhurada</b>	7000
11	>38 $\mu$ m	Natural	50	-	<b>Bola</b>	7000	<b>Bola</b>	7000

- Os testes realizados com ajuste de pH em 10,5 apresentaram menor proporção de quartzo no concentrado devido a dispersão promovida na polpa que diminuiu o efeito de agregação entre as partículas. Entretanto, a recuperação mássica foi menor. Nos testes 1 e 7 onde as demais condições foram constantes, o primeiro apresentou um concentrado mais rico e a menor recuperação mássica.

Teste	Material	pH	%sólidos	GAP (mm)	Etapa Rougher		Etapa Cleaner	
					Matriz	Campo (G)	Matriz	Campo (G)
1	>38 $\mu$ m	<b>10,5</b>	50	1,5	Ranhurada	11000	Ranhurada	11000
7	>38 $\mu$ m	<b>Natural</b>	50	1,5	Ranhurada	11000	Ranhurada	11000

Os testes no separador tipo Jones variaram o campo magnético de 6000 a 15000G, e de maneira geral, quanto maior o campo, maior a recuperação de ferro no concentrado, entretanto, a concentração de contaminantes também aumenta.

Os testes realizados com campo máximo, 15000G, porém, apresentaram resultados inferiores tanto de recuperação quanto de seletividade no concentrado. Uma possível explicação é a redução da área da matriz devido à grande quantidade de material depositado nela, o que além de atrair não magnéticos para o concentrado, aumenta o escoamento da polpa.

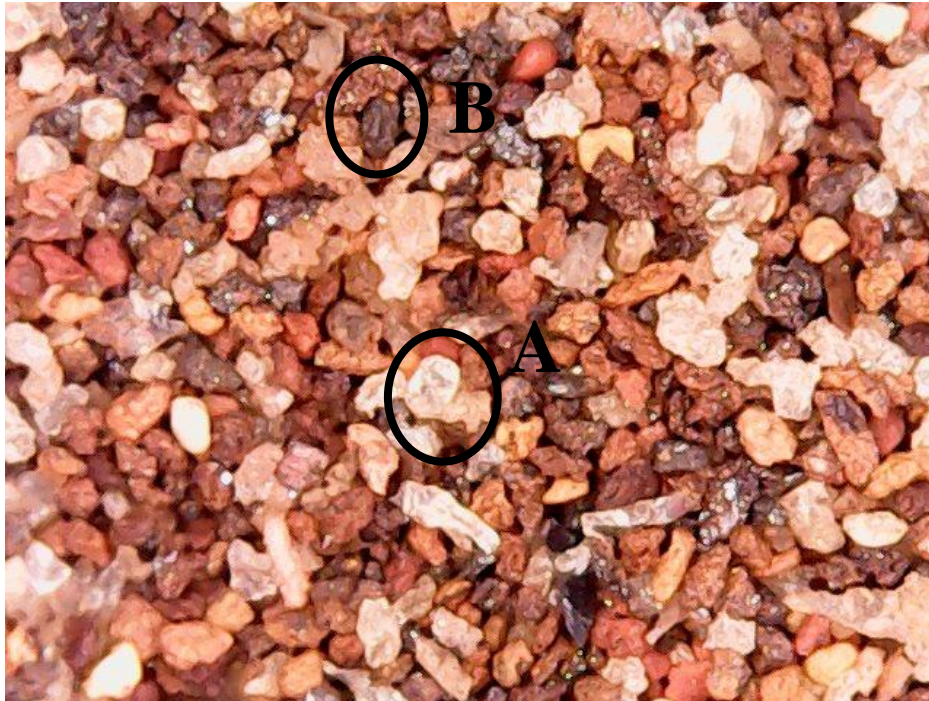


Figura 5.9: Exemplo de imagem analisada na microscopia óptica A) partícula de quartzo B) óxido de ferro

Tabela 5-VI: Análises químicas das rotas de concentração propostas

<b>Rotas magnéticas -FRX</b>				
Material	Rota	Teores Químicos (%)		
		Fe	SiO <sub>2</sub>	PPC
<b>&gt;38μm</b>	A	62,62	4,86	2,79
	B	63,59	4,38	2,41
	<b>C</b>	<b>63,82</b>	<b>4,50</b>	<b>1,72</b>
	D	61,41	7,86	2,11
<b>&gt;10μm</b>	A	63,86	3,76	2,27
	B	64,13	3,90	2,18
	<b>C</b>	<b>63,88</b>	<b>3,72</b>	<b>2,34</b>
	D	61,03	9,14	2,76
<b>38 - 10μm</b>	<b>A</b>	<b>67,70</b>	<b>1,78</b>	<b>3,72</b>
	<b>B</b>	<b>66,83</b>	<b>1,74</b>	<b>1,29</b>
	<b>C</b>	<b>65,99</b>	<b>1,98</b>	<b>1,50</b>

A tabela 5-VI contém as análises químicas feitas nos concentrados das quatro rotas propostas. Nela é possível observar que para a fração entre 38-10 $\mu$ m todas as três rotas no Jones propostas alcançaram o produto *pellet feed fines* (~ 65% Fe e ~3% de sílica), sendo que a rota A, com campo de 7000G e matriz de bolas, alcançou o maior teor de ferro.

Já para as frações >38 e >10 $\mu$ m, as rotas A, B e C executadas no Jones apresentaram valores próximos de teores de ferro e sílica, entretanto não caracterizam produto final de minério de ferro principalmente pelo alto teor de contaminante no concentrado. Para estes dois materiais a rota D, feita no Terras Raras, apresentou piores resultados que o Jones.

### 5.2.1 Testes de pressão de lavagem

A figura 5.10 contém a análise química feita para os três testes de pressão de água de lavagem e a sua representação gráfica. A partir dela observa-se que o aumento da pressão de lavagem promove o aumento do teor de ferro no concentrado, entretanto, diminui a recuperação do elemento. Para os testes realizados, valores de pressão de lavagem entre 0,5 e 1,0, ou, mais especificamente 0,75 kgf/cm<sup>2</sup>, caracterizam as melhores faixas de trabalho.

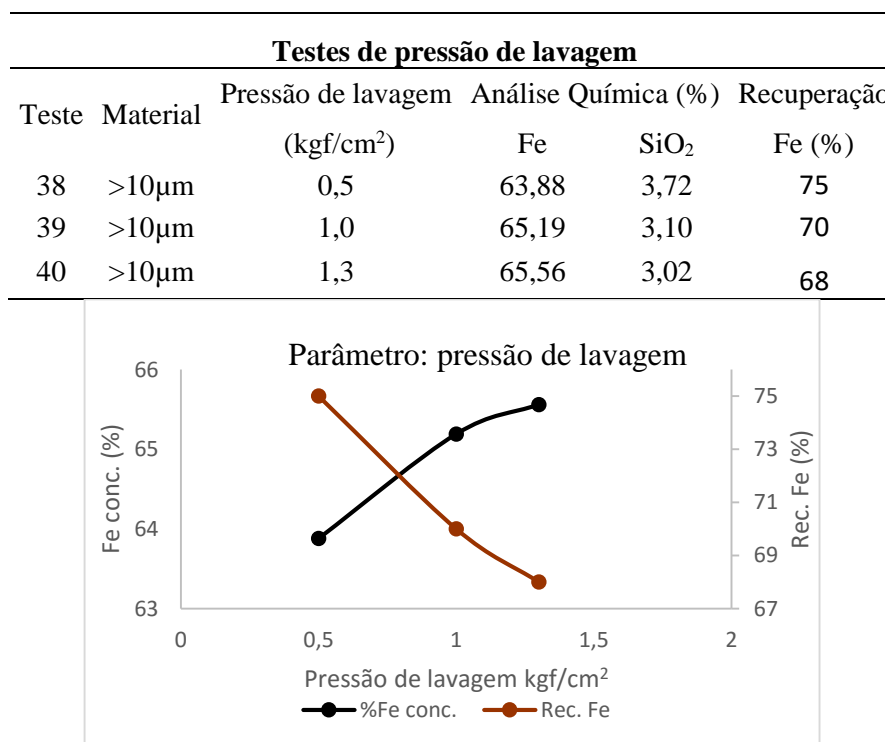


Figura 5.10: Testes de pressão de lavagem para a rota C

## 5.2.2 Testes de liberação e dispersão

A tabela 5-VI comprovou que as três rotas de separação magnética propostas obtiveram resultados de teor de Fe e de SiO<sub>2</sub> no concentrado maiores que 65% e menores que 3% (como os especificados para o produto comercial *pellet feed fines*) para a fração entre “38-10 $\mu$ m”. Entretanto, o mesmo não ocorreu para as frações mais grosseiras, “>38 $\mu$ m” e “>10 $\mu$ m”. Por esta razão, testes de liberação e dispersão foram realizados a fim de analisar a sua influência na separação magnética.

A figura 5.13 representa a curva granulométrica do material moído. Nela é possível observar que o d<sub>90</sub> é de 53 $\mu$ m, cerca de 50% é menor que 38 $\mu$ m, e aproximadamente 10% está abaixo de 10 $\mu$ m.

As figuras 5.11 e 5.12 trazem os testes de dispersão realizados no Tubo de Galery. A primeira traz a relação entre Grau de dispersão (GD) e pH (alterado pela adição de NaOH). Observa-se que o GD do material com pH natural é o menor dentre os estudados, alcançando cerca de 9%. O aumento do pH faz com que o GD da amostra aumente. A dispersão máxima ocorre em pH 9,5, de aproximadamente 18%. Após este ápice, a curva apresenta uma queda, com valores próximos aos 18% para 10,0, 10,5 e 11,0 e de quase 16% para 11,5.

Não foram realizados testes com valores de pH mais ácidos que o natural, pois sabe-se que nessas condições os principais minerais constituintes da polpa possuem cargas opostas, o que promove a agregação das partículas (quartzo está negativo e hematita e goethita estão carregadas positivamente). Com o aumento do pH as cargas superficiais assumem o mesmo sinal promovendo a repulsão, ou seja, dispersão entre as partículas.

A segunda figura compara grau de dispersão, reagente e dosagem utilizada. Os dois dispersantes utilizados, hexametáfosfato e poliacrilato de sódio apresentam o maior GD para 900g/t, de cerca de 19 e 21% respectivamente, e o menor para 400g/t, de 14 e 13% nesta ordem, apontando melhores resultados do que o aumento de pH.

Os resultados encontrados evidenciam que a deslamagem previamente feita pode ser melhorada, uma vez que em pH 10,5, a polpa se encontra mais dispersa que em pH natural mas não alcança o GD máximo.

Com o intuito de se avaliar o efeito da dispersão em polpas na separação magnética, foram realizados novos testes de concentração. Ainda que, dentre os dispersantes propostos, o poliacrilato tenha apresentado o melhor valor de dispersão, alcançando 21%, contra 18% do NaOH e 19% do hexametáfosfato de sódio (pH 10,5/ 900g/t), estes dois últimos foram incrementados na rota C (figura 4.4) por serem reagentes comuns no ambiente industrial.

A tabela 5-VII contém os resultados da análise química para os testes magnéticos. Já a figura 5.14 traz a representação gráfica da tabela 5-VII com os respectivos valores de recuperação metálica para os testes realizados com o material “>10 $\mu$ m”.

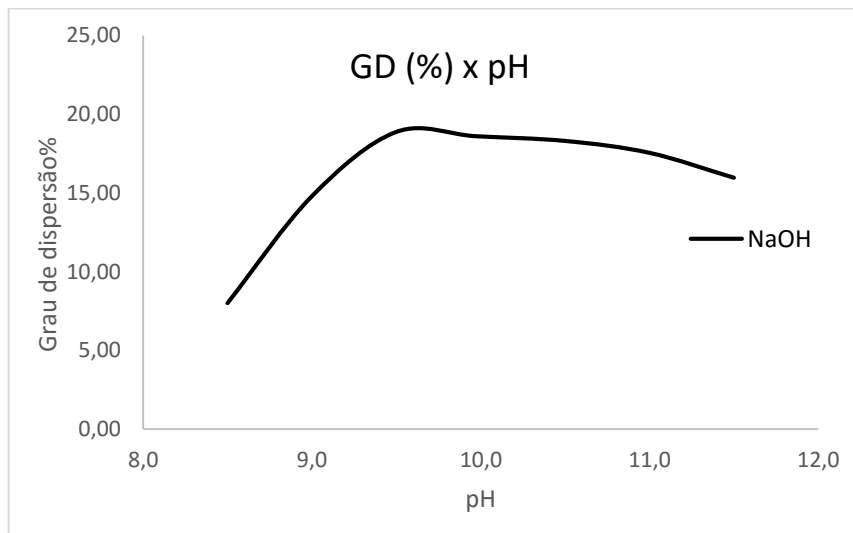


Figura 5.11: Grau de Dispersão (GD) X pH (adição de NaOH)

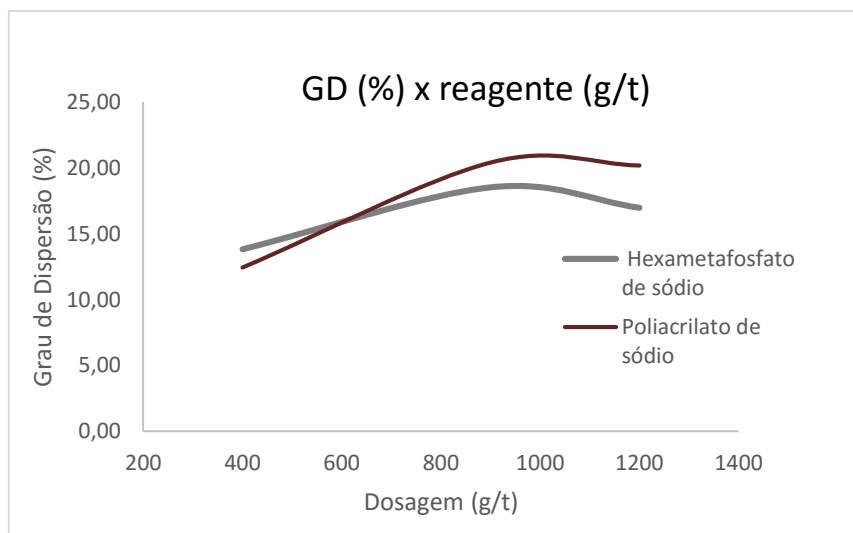


Figura 5.12: Grau de Dispersão (GD) x reagente (Hexametáfosfato e Poliacrilato de sódio nas dosagens de 400, 900 e 1200g/t)

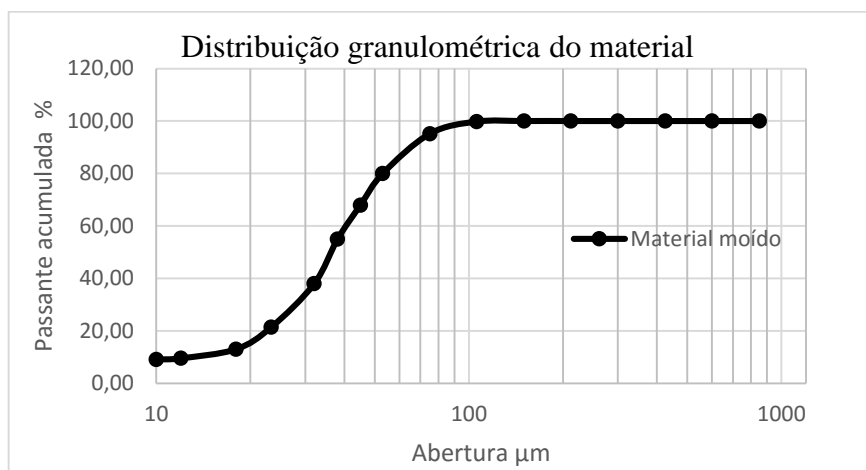


Figura 5.13: Distribuição granulométrica do material moído

Observa-se através da tabela 5-VII, para o material  $>10\mu\text{m}$ , que em comparação ao teste inicial (Rota C), tanto o corte em  $150\mu\text{m}$  (teste 41) quanto a moagem (teste 44) aumentam o teor de ferro e diminuem o de sílica no concentrado, apresentando valores de Fe de 63,88, 64,99 e 65,58% e de  $\text{SiO}_2$  de 3,72, 3,48 e 3,24%, nessa ordem; o que enfatiza a importância da liberação para a concentração de ferro.

O ajuste de pH demonstrado nos testes 42 e 45 foi responsável pelo aumento do teor de ferro, entretanto, para o primeiro, houve também uma maior porcentagem de sílica no concentrado.

A adição do dispersante hexametáfosfato de sódio indica os melhores resultados de teor no concentrado, obtendo valores aproximados de 65% de Fe e 3% de  $\text{SiO}_2$ , como os especificados para o produto comercial *pellet feed fines*. O teste 43, com o corte em  $150\mu\text{m}$  e adição do reagente apresentou teores finais de 65,63% de Fe e 2,84 de  $\text{SiO}_2$ . Já o 46, que além do corte e do dispersante, passou por moagem, obteve valores de 65,91% de Fe e 2,70% de  $\text{SiO}_2$ , resultados mais expressivos que o 43, uma vez que a cominuição do material promove uma maior liberação.

Os testes realizados com o ajuste de pH e adição de hexametáfosfato de sódio apresentaram melhores resultados que a Rota C inicial, confirmando a influência positiva da dispersão para processos de concentração de ferro.

Ainda que os testes realizados para o material  $>38\mu\text{m}$  (47, 48 e 49) também indiquem que a liberação e a dispersão são fatores que interferem na separação magnética, e apesar do alto teor de ferro alcançado, os valores de  $\text{SiO}_2$  estão acima do esperado.



Tabela 5-VII: Análises químicas dos testes de liberação e dispersão na rota magnética C

Teste	Amostra	Preparação da amostra para a rota magnética C				Análise Química (%)	
		Corte em 150µm	Moagem	pH 10,5	Dispersante	Fe	SiO <sub>2</sub>
<b>Rota C</b>	<b>&gt;10µm</b>	-	-	-	-	<b>63,88</b>	<b>3,72</b>
41	>10µm	x	-	-	-	64,99	3,48
42	>10µm	x	-	x	-	65,06	4,92
<b>43</b>	<b>&gt;10µm</b>	<b>x</b>	-	-	<b>x</b>	<b>65,63</b>	<b>2,84</b>
44	>10µm	x	x	-	-	65,58	3,24
45	>10µm	x	x	x	-	65,83	3,16
<b>46</b>	<b>&gt;10µm</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	-	<b>x</b>	<b>65,91</b>	<b>2,70</b>
<b>Rota C</b>	<b>&gt;38µm</b>	-	-	-	-	<b>63,82</b>	<b>3,72</b>
47	>38µm	x	-	-	-	63,99	3,50
48	>38µm	x	-	x	-	64,22	3,90
49	>38µm	x	-	-	x	64,02	3,64

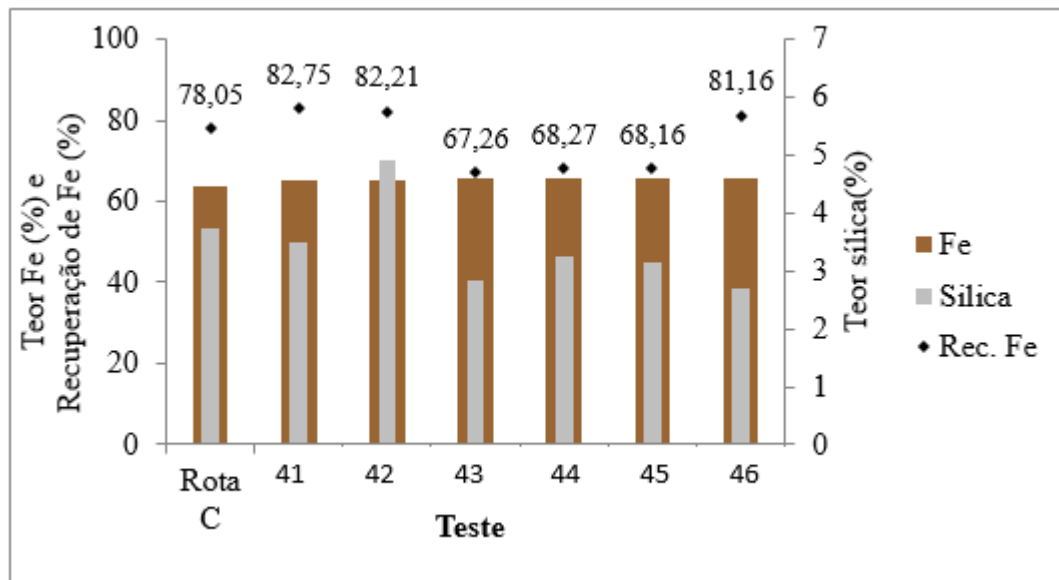


Figura 5.14: Resultado dos testes de liberação x dispersão na separação magnética

A tabela 5.VIII resume os parâmetros investigados neste trabalho. De uma maneira geral, pode-se dizer que quanto maior a seletividade do concentrado, menor será a sua recuperação mássica. Uma maior liberação, dispersão, pressão de lavagem e diluição da polpa promovem um concentrado mais rico. Dentre todos os testes realizados, o 46 foi o que apresentou os melhores resultados, com 65,91% Fe, 2,70% SiO<sub>2</sub>, e recuperação de Fe aproximada de 80%. Esses resultados foram conseguidos com moagem (maior liberação do material) e adição do dispersante hexametáfosfato de sódio.

Tabela 5-VIII: Parâmetros investigados na separação magnética

Parâmetro		%SiO <sub>2</sub>	Rec. Mássica
% sólidos	↕	↕	↕
GAP	1,5mm	↕	↕
	1,0mm	↕	↕
Matriz	Bolas	↕	↕
	Ranhurada	↕	↕
Pressão de lavagem	↕	↕	↕
pH	Natural	↕	↕
	10,5	↕	↕
Dispersante	Sem	↕	↕
	Com	↕	↕
Liberação	↕	↕	↕

Por fim, os testes realizados comprovaram que o material estudado proveniente de barragem de rejeitos (com teores iniciais de 36,53% Fe e 43,64% SiO<sub>2</sub>) alcançou as especificações do produto comercial de minério de ferro *pellet feed fines* (~ 65% Fe e 3% de contaminantes) por concentração magnética, chegando a teores máximos de 65,91% Fe e 2,70% SiO<sub>2</sub>. Contatou-se portanto que a barragem de rejeitos em questão pode ser reprocessada e o produto gerado pode ser utilizado pela empresa em alto forno, para redução direta ou como *blend* do minério que sai da usina de beneficiamento, por exemplo.

Os resultados obtidos mostraram que a separação magnética deste resíduo seria responsável pela recuperação de aproximadamente 50% de todo material estocado (1,4 x 10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> de rejeito) e 80% de Fe, o que, além de propiciar receita, diminuiria o dano ambiental associado;

## 6. Conclusão

Sobre a caracterização tecnológica feita com material estudado proveniente de barragem de rejeitos tem-se as seguintes conclusões:

- A densidade relativa encontrada da amostra foi de  $3,04\text{g/cm}^3$ ;
- Pela análise granulométrica, cerca de 100% do material está abaixo de  $150\mu\text{m}$ , o  $d_{90}$  é de aproximadamente  $75\mu\text{m}$ , o  $d_{50}$  equivale a  $45\mu\text{m}$ , 30% do material é menor que  $38\mu\text{m}$  e 5% está abaixo de  $10\mu\text{m}$ ;
- A ASE é de aproximadamente  $3,75\text{cm}^3/\text{g}$  para o material *in natura* e para faixas acima de  $38\mu\text{m}$ , evidenciando que o material não é poroso;
- A amostra original contém teores de Fe e  $\text{SiO}_2$  de 36,53% e 43,64% respectivamente, não caracterizando produto comercial de minério de ferro;
- Na difratometria de raios-X foram encontradas as fases majoritárias: quartzo, hematita e goethita, já a microscopia eletrônica permitiu a detecção das minoritárias: caulinita e óxido de manganês;
- Os testes exploratórios realizados em separador magnético de alta intensidade tipo Jones apresentaram resultados mais vantajosos que àqueles em equipamento de ímã permanente e baixa intensidade;
- Os resultados de dispersão indicam que tanto o aumento de pH quanto a adição de dispersante aumentam o GD da polpa mineral. Para a adição de NaOH o GD máximo (18%) foi alcançado com pH 9,5, já os dispersantes hexametáfosfato e poliácrilato de sódio demonstraram valores de GD de 19 e 21% para a dosagem de 900g/t. Estes resultados indicam que a eficiência da deslamagem pode ser melhorada.
- Dentre os 49 testes apresentados, o 46 foi o que revelou os melhores resultados (65,91% Fe e 2,70%  $\text{SiO}_2$ ), alcançando as especificações do produto comercial *pellet feed fines*. O teste foi realizado em Separador tipo Jones, etapas Rougher, Cleaner, Recleaner e Scavenger, com matriz ranhurada de GAP de 1,5mm, campo magnético de 10.000G, 30% sólidos,  $0,5\text{ kgf/cm}^2$  e 1L de pressão e água de lavagem e adição de hexametáfosfato de sódio (900g/t);
- Para os testes de separação magnética realizados no WHIMS, de uma maneira geral, pode-se dizer que quanto maior a seletividade do concentrado, menor será a sua recuperação mássica. Uma maior liberação, dispersão, pressão de lavagem e diluição da polpa promovem um concentrado mais rico;
- Os testes realizados comprovaram que o material estudado proveniente de barragem de rejeitos, com teores iniciais de 36,53% Fe e 43,64%  $\text{SiO}_2$  alcançou as especificações do produto comercial de minério de ferro *pellet feed fines* (~ 65% Fe e 3% de contaminantes) com concentração magnética. Constatou-se portanto que a barragem de rejeitos em questão pode ser reprocessada e o produto gerado pode ser empregado para uso em alto forno,

redução direta, ou como *blend* do minério que sai do beneficiamento. Cerca de 50% de todo material estocado ( $1,4 \times 10^6 \text{m}^3$  de rejeito) e 80% de Fe seria recuperado, o que, além de receita, diminuiria o dano ambiental associado;

- O presente trabalho mostra a viabilidade do aproveitamento do rejeito estudado e propõe como sugestões futuras a análise das variáveis aqui testadas em escala piloto, do comportamento da dispersão da polpa para os reagentes testados em outras dosagens, estudo econômico da adição de dispersantes na polpa e do emprego da parcela não recuperada (alto teor de  $\text{SiO}_2$ ) no ramo civil.

Por fim, devido as particularidades de cada minério, recomenda-se que toda empresa mineradora invista em meios de reaproveitamento dos seus rejeitos, já que aquelas que apostam na gestão dos mesmos contribuem para o desenvolvimento sustentável da comunidade onde estão inseridas, apresentam vantagens ambientais e econômicas principalmente devido a redução do volume de barragens de rejeitos.

## 7. Referências Bibliográficas

ABREU, A.F. **Recuperação de Finos de Barragens no Complexo Paraopeba I**. Belo Horizonte: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.60 p. (Dissertação de Mestrado).

ADIANSYAH, J. S.; ROSANO, R.; VINK, S.; KEIR, G. **A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies**. Journal of Cleaner Production, 108 (2015), 1050 – 1062.

AGUIAR, F. L. **Redução do Impacto Ambiental Através da Recuperação dos Ultrafinos de Minério de Ferro – Uma Revisão**. Belo Horizonte. Curso de pós-graduação em Engenharia de Recursos Minerais, Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.73p. (Dissertação de Mestrado).

ANDRADE, L.C R. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, IN natura e segregados para aplicação como material de construção civil Viçosa**. Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa, 2014. 112p. (Tese de doutorado).

AZCUE, José M. 5. ed. **Environmental impacts of mining activities: emphasis on mitigation and remedial measures**. Springer Science & Business Media, 2012.

BARROS, Raphael Tobias de Vasconcelos. **Elementos de Gestão de Resíduos Sólidos**. 1. ed. Belo Horizonte : Jessitura, 2012. 423 p.

BENJAMIN, A. H. V. **O Princípio Poluidor-Pagador e a Reparação do Dano Ambiental**. Palestra proferida no Encontro Nacional da Associação Brasileira de entidades de Meio-Ambiente, pela secretaria do Meio-Ambiente do estado de São Paulo. São Paulo,1992.

BHAGAT, R. P; PATHAK, P.N. **The effect of polymeric dispersant on magnetic separation of tungsten ore slimes.** Mineral Processing, 1995, 47, 213-217.

BRANDAO, P. R. G.; SANTOS, L. D. **Caracterização mineralógica de minérios de ferro enfatizando a determinação de fases aluminosas.** Metalurgia e Materiais, São Paulo, SP, v. 58, n.519, p. 12-17, 2002.

BORGES, A. A. **Caracterização da parcela magnética de minério fosfático de carbonatito** Ouro Preto, REM - Revista Escola de Minas, v. 61, n.1, p.29-34, 2008.

BRASIL. **Lei 12.334**, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000.

CARVALHO FILHO, A; CURI, N; MARQUES, J. J. G. S. M; SHINZATO, E; FREITAS, D. A. F; JESUS, E. A.; MASSAHUD, R. T. R. **Óxidos de Manganês em Solos do Quadrilátero Ferrífero (MG).** Revista Brasil. Ciência do Solo, 35.793-804,2011.

CARVALHO, P. S. L; SILVA, M. M; ROCIO, M. A. R; MOSZKOWICZ, J. **Minério de ferro.** In: Insumos Básicos BNDES setorial 39, p.197-234,2014.

COSTA, A.V; GUMIERI, A.G.; BRANDÃO, P. R. G. **Piso intertravado produzido com rejeito sinter feed.** IBRACON: Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. Volume 7, Number 2, 228-259 p. abril, 2014.

DAMASCENO, E. C; DAMASCENO, P.F.T; DAMASCENO, A. H. T. **A mineração no Século XX.** Brasil Mineral, n 245, 34 -64 p. novembro, 2005.

DANA, J. D.; HURLBUT, J. C. S. **Manual de Mineralogia**. 1. Ed.1 -Livros técnicos e científicos Ed. S.A, Rio de Janeiro, 1974.642 p.

DIJKEMA, G.P.J, REUTER, M.A, VERHOEF, E.V. **A new paradigma for waste management**. Waste Management 20 (2000) 633±638.

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral.. **Cadastro Nacional de Barragens de Mineração**, 2014. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/assuntos/barragens/arquivos-barragens/cadastro-nacional-de-barragens-de-mineracao-dentro-da-pnsb>>. Acesso em janeiro de 2016.

DNPM- Departamento Nacional de Produção Mineral. **Classificação das Barragens de Mineração**, 2012. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=947>>. Acesso em janeiro de 2016. Acesso em janeiro de 2016.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário mineral/2016**, 2016. Disponível em: < [http://www.dnpm.gov.br/dnpm/informes/informe\\_mineral\\_2\\_2016](http://www.dnpm.gov.br/dnpm/informes/informe_mineral_2_2016)>. Acesso em janeiro de 2017.

DOWN, C. G; STOCKS, J. **Environmental Impact of Mining**. London: Applied Science Publisher LTD, 1977, 371 p.

DUARTE, A. P. **Classificação das Barragens de Contenção de Rejeitos de Mineração e de Rejeitos de Mineração e de Resíduos Industriais no Estado de Minas Gerais em Relação ao Potencial de Risco**. Belo Horizonte: Curso de pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.114p. (Dissertação de Mestrado).

EDRAKI, M; BAUMGARTL, T; MANLAPIG,E; BRADSHAW, D; FRANKS, D.M; MORAN, C. J. **Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: A review of alternative approaches**. Journal of Cleaner Production, (2014), 84 (1), pp. 411-420.

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Inventário de Barragens do ano de 2014**. Belo Horizonte: Feam, 2014. 44 p.

GALERY, R; VALADÃO, G. E. S; MONTENEGRO, L.C.M. **Separação por Tamanho**. In: George Eduardo Sales Valadão; Armando Corrêa de Araujo. (Org.). Introdução ao Tratamento de Minérios. 1ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007, v. 1, p. 61-84.

GOMES, C. B. **Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1984, 251p. ]

GOMES, M.A. (2009). **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro** Ouro Preto. Pós-graduação em Engenharia Mineral. Universidade Federal de Ouro Preto, 2009. 89p. (Dissertação de mestrado).

IBRAM- Instituto Brasileiro de Mineração. **Gestão para a sustentabilidade na mineração – 20 anos de história**. 1. ed. Brasília, 2013. 168 p.

HENRIQUES, A. B. **Caracterização e estudo das propriedades eletrocínéticas dos minerais de ferro: Hematita, goethita e magnetita**. Belo Horizonte. Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. 223p. (Tese de doutorado).

JONES, H; BOGER, D. V. **Sustainability and waste management in the resource industries**. Ind. Eng. Chem. Res., 51 (2012), pp. 10057–10065

KITOBO, W; LUNGA, A; FRENAY, J; GAYDARDZHIEV, S; BASTI, D. **Bacterial leaching of complex sulphides from mine tailings altered by acid drainage**. In Hydrocopper 2009; Santiago, Chile, 2009; pp. 365–373.

KLEIN, C; DUTROW, B. **Manual de Ciências dos Minerais**. Tradução e revisão técnica: Rualdo Menegat. – 23.ed – Porto Alegre: Bookman, 2012.; pp 395 -426.



LAGE, E. A. **Separadores Magnéticos: Experiência em minério de ferro na Herculano Mineração**. Ouro Preto. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, 2010. 28p.

LINS, Fernando Antônio de Freitas. Histórico da Mineração nos países Latino-americanos. In: LINS, F. A. **Brasil 500 anos – a construção do Brasil e da América Latina: histórico, atualidade e perspectivas**. Rio de Janeiro: CETEM, 2000. p 25 -44.

LOZANO, F. A. E. **Seleção de Locais para Barragens de Rejeitos Usando O Método De Análise Hierárquica**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. 142 p. (Dissertação de mestrado).

LU, S; PUGH, R.J; FORSSBERG, E. Chapter 9 – **Magnetic co-aggregation and combined aggregation**. Studies in Interface Science. v. 20, p497-516. 2005.

LUZ, A. B; LINS, F. A. F. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. In: Adão Benvindo da Luz; João Alves Sampaio; Sílvia Cristina A. França (Org.). Tratamento de Minérios. 5 ed. CETEM, 2010, v. 1, p. 3 -18.

MANGABEIRA, A. P. A. **Avaliação do efeito da porosidade nas etapas de beneficiamento de minério de ferro da Samarco**. Belo Horizonte. Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, de Materiais e Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. 199p. (Dissertação de mestrado).

MAPA. P. S. **Rota de processo para o underflow da deslamagem de minério de ferro do concentrador da Samarco Mineração S.A**. Belo Horizonte. Programa de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, 2006. 190p. (Dissertação de mestrado).

MENEGAKI, M; and D. Kaliampakos. **"Dealing with NIMBYism in Mining Operations."** *Mine Planning and Equipment Selection*. Springer International Publishing, 2014. 1437-1446.

MINÉRIOS & MINERALES. (2015). **200 Largest Brazilian Mines**, São Paulo. Ano XXXIX, n 375.

MOSS, R; DE LA CERDA, R. P. **Technical Review of Operations at Minera Valle Central**(2006), p. 94.

NASCIMENTO, D. R. **Flotação aniônica de minério de ferro**. Ouro Preto. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, 2010. 116p. (Dissertação de Mestrado).

NETO, R.O; PETTER, C.O. **A abordagem da economia ambiental no contexto da mineração**. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 58(1): 71-75, mar. 2005.

NEUMANN, R; SCHENEIDER, C.L; NETO, A. A. **Caracterização Tecnológica de Minérios, Tratamento de Minérios**, Rio de Janeiro, capítulo 3, p. 55 a 109, dezembro, 2004.

NUNES, Paulo Henrique Faria. **Meio Ambiente & Mineração – O Desenvolvimento Sustentável**. 1. Ed. Curitiba: Juruá Editora, 2006. 241 p.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Desenvolvimento sustentável**. Disponível em: < <https://nacoesunidas.org>>. Acesso em 06 de dezembro de 2015.

PERES, A. E. C; ARAUJO, A. C. **A flotação como operação unitária no Tratamento de Minérios**. In: Arthur Pinto Chaves. (Org.). *Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: Flotação - O estado da arte no Brasil*. 2ed.São Paulo: Signus, 2009, v. 4, p. 1-29.

PEREZ, L. A; ROE, D; POLOZZOTTI, D. Estados Unidos **Magnetic Separation of Ores Using Sulfonated Polymers**. US 2003/ 0066787 A1, 2003.

PORPHÍRIO, N. H; BARBOSA, M. I. M; BERTOLINO, L. C; **Caracterização Mineralógica de Minérios. Tratamento de Minérios**. In: Tratamento de Minérios, 3. ed. Luz, A. B. et al. CETEM capítulo 3, p. 55 a 84, 2010.

QUEIROZ, L. A; BRANDÃO, P. R. G. **Aspectos mineralógicos relacionados à concentração magnética de minério de ferro itabirítico**. Metalurgia e Materiais, v. 65, n. 148, p. 148-54, abr. 2009.

REIS, N. L; BARRETO, M. L. **Desativação de empreendimento mineiro no Brasil**. São Paulo: Signus Editora, 2005. 48p.

ROCHA, L. **Estudo do aproveitamento econômico das lamas de uma mineração de ferro, através de concentração por flotação catiônica reversa**. Belo Horizonte: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.126p. (Dissertação de Mestrado).

SALES C. G. **Rotas de beneficiamento para recuperação de minerais portadores de ferro do underflow do espessador de lamas da usina de Brucutu**. Belo Horizonte. Programa de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. 152p. (Dissertação de mestrado).

SANTOS, A. L. A; BRANDÃO, P.R.G; ROCHA, S.D.F. **Influência do Caráter Magnético no Estado de Agregação/Dispersão de polpas de Minério Laterítico de Níquel**. XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2016. Fortaleza. Disponível em: <<https://proceedings.galoa.com.br/cobeq/cobeq-2016/trabalhos/influencia-do-carater-magnetico-no-estado-de-agregacaodispersao-de-polpas-de-minerio-lateritico-de>>. Acesso em janeiro de 2017.

SANTOS, L. D; BRANDÃO, P.R.G. **Morphological varieties of goethite in iron ores from Minas Gerais, Brazil.** Minerals Engineering, vol 16, p. 128 -1289, 2003.

SANTOS, P. E. **Alternativas para tratamento de ultrafinos de minério de ferro da mina do Pico/MG por flotação em coluna.** Porto Alegre. Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.136p. (Dissertação de mestrado).

SAMPAIO, J. A; LUZ, A. B. **Separação Magnética e Eletrostática.** In: Tratamento de Minérios, 3. ed. LUZ, A. B. et al. CETEM/MCT, capítulo 8, 303-335, 2010.

\*SILVA, G. R. **Caracterização, estudos fundamentais e flotação de minério de ferro goethítico.** Belo Horizonte. Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, 2014. 215 p. (Dissertação de mestrado).

SILVA, J. P. M. **Aplicação de separação magnética de alta intensidade (WHIMS) no beneficiamento de itabiritos pobres.** Belo Horizonte. Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, 2014. 129p. (Dissertação de mestrado).

SILVA, M. B. **Separação magnética de ultrafinos hematíticos.** Ouro Preto. Pós-graduação em Engenharia Mineral. Universidade Federal de Ouro Preto, 2012. 281p. (Dissertação de mestrado).

STRUTHERS, S; BRUMLE, J; TAYLOR, G. **An Integrated System for Recycling Base Metal Tailings.** Paper presented at the 1997 Annual Meeting of the American Society for Surface Mining and Reclamation Austin, Texas, May 11–16 (1997), pp. 579–592

SUBRAHMANYAN, T. V; FOSSEBERG, E. F. S. **Fine particle processing: shear flocculation and carrier flotation** – a review. International Journal of Mineral Processing, v.30, 1990, p. 265-286.

TOTOU, A. R; PEREIRA, C. A; MACHADO, P. G. F; BALTAR, C. A. M. **Efeito da dispersão em polpas de minérios itabirítico.** Ouro Preto, REM - Revista Escola de Minas, v. 64, n.2, 2008.

VALADÃO, G. E. S; ARAUJO, A. C. **Introdução ao Tratamento de minérios.** 1.ed. Belo Horizonte,2007. 233p.

VASCONCELOS, J. A; BRANDÃO, P. R. G; LEMOS, L.N. **Estudos de caracterização e concentração de itabirito compacto do complexo Serra Azul, MG..** Revista Technol. Metal. Mater. Miner, v. 9, n. 2, p. 89–94, 2012.

WILLS, B. A; NAPIER-MUNN, T. J. **Mineral Processing Technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery.** 2006, Oxford.

## 8. ANEXO I – Difratomogramas de raios-x

Seguem os demais difratogramas de raios-X feitos na caracterização tecnológica do material em estudo.

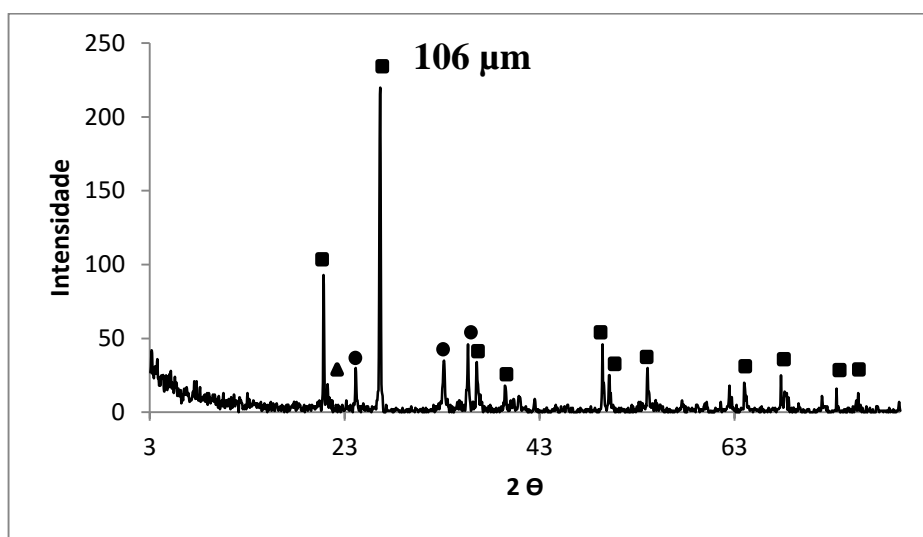


Figura 8.1: Difrátograma da faixa 106µm. Quartzo (■), Hematita (●), e Goethita (▲)

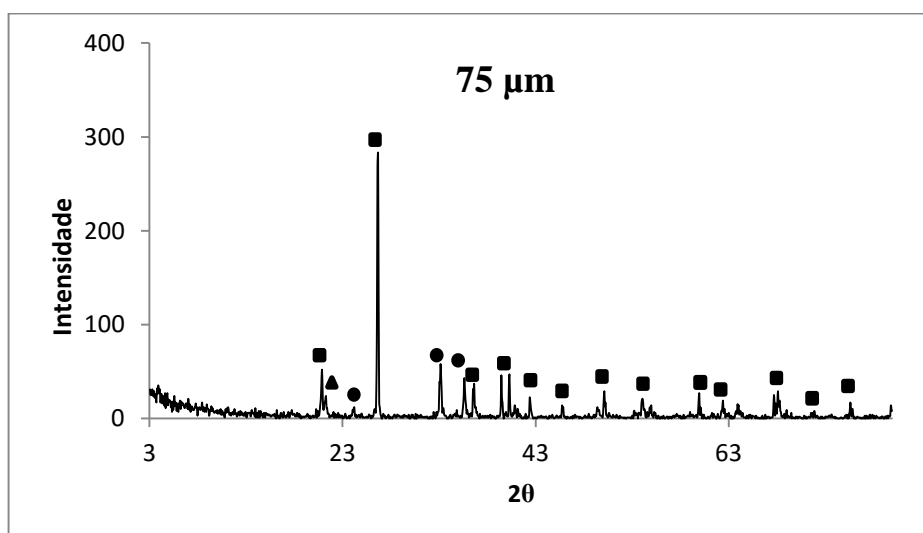


Figura 8.2: Difrátograma da faixa 75µm. Quartzo (■), Hematita (●), e Goethita (▲)

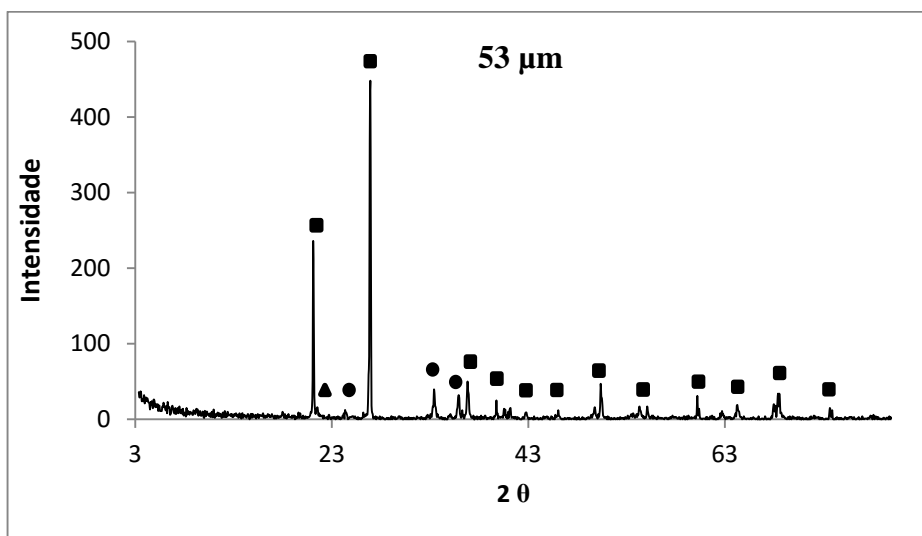


Figura 8.3: Difratoograma da faixa 53 $\mu$ m. Quartzo (■), Hematita (●), e Goethita (▲)

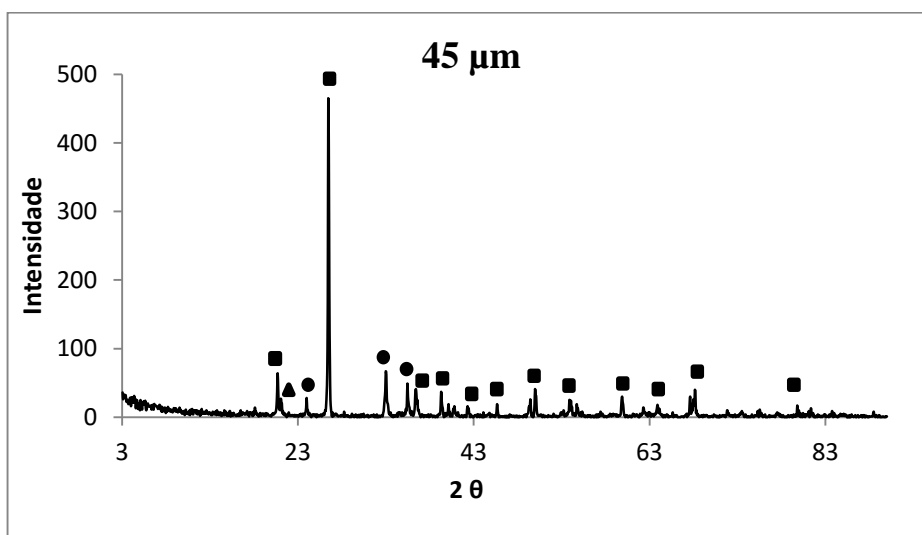


Figura 8.4: Difratoograma da faixa 45 $\mu$ m. Quartzo (■), Hematita (●), e Goethita (▲)

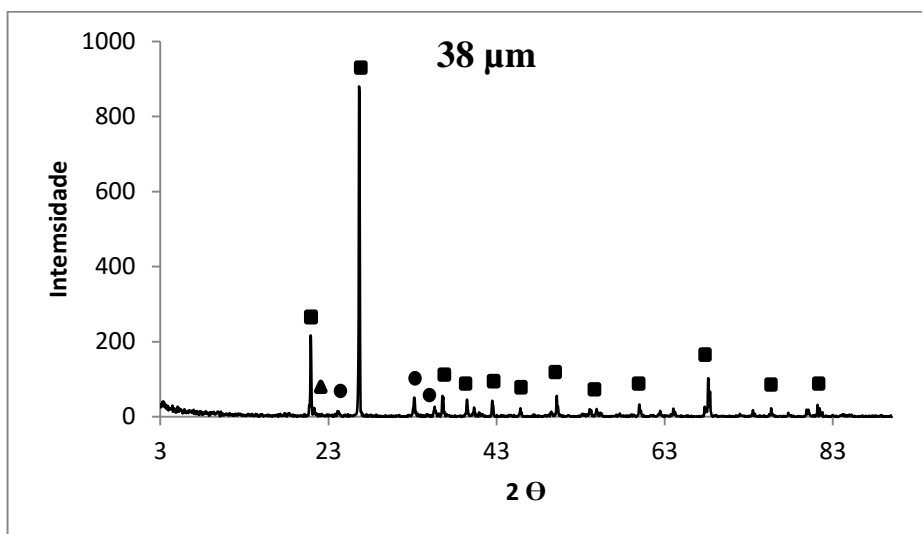


Figura 8.5: Difratoograma da faixa 38 $\mu$ m. Quartzo (■), Hematita (●), e Goethita (▲)

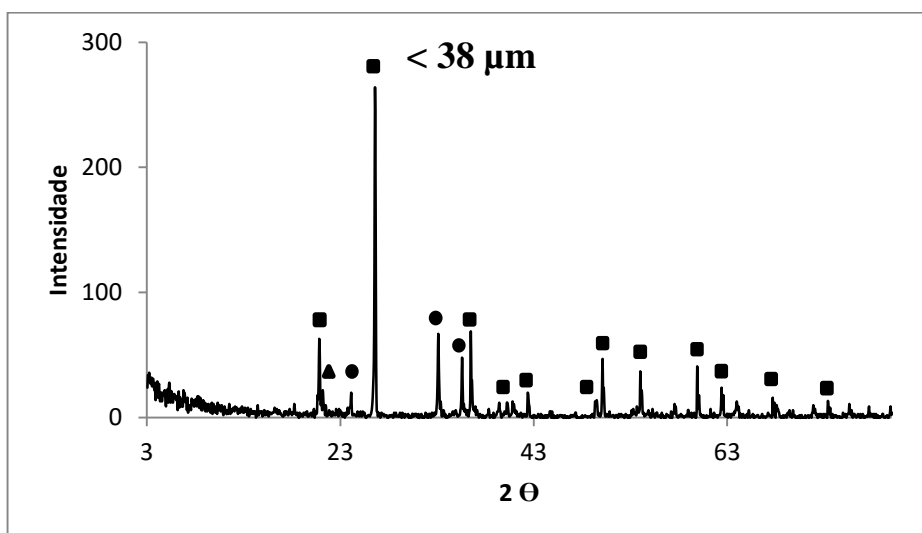


Figura 8.6: Difratoograma da faixa < 38 $\mu$ m. Quartzo (■), Hematita (●), e Goethita (▲)



## 9. ANEXO II – MEV/EDS

Seguem as demais imagens de microscopia eletrônica com elétrons retroespalhados e análises químicas pontuais EDS.

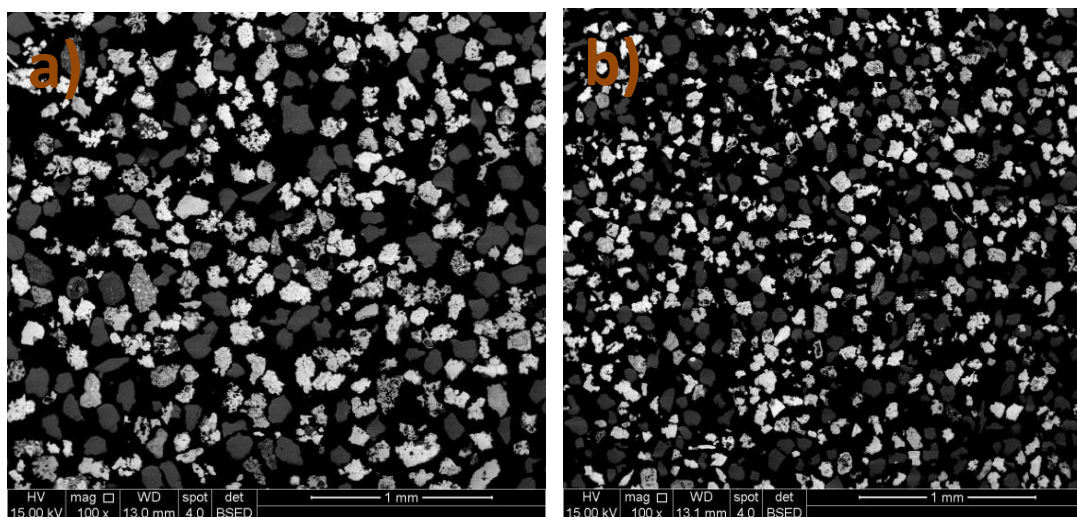
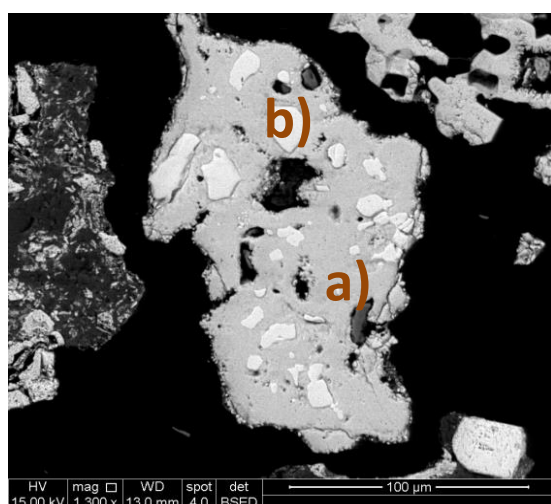
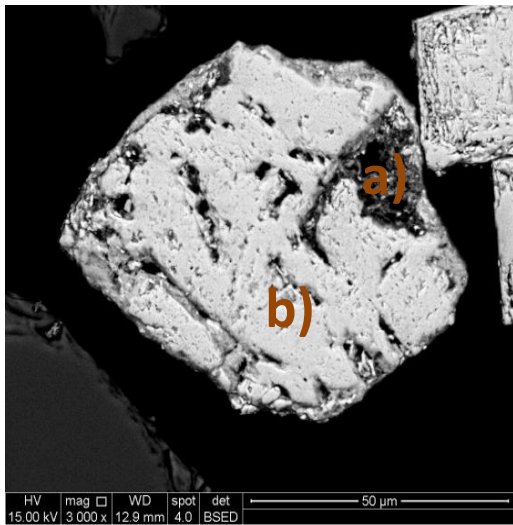


Figura 9.1: Análise de liberação – aumento de 100x: a) faixa 106 $\mu$  b) 75 $\mu$ m



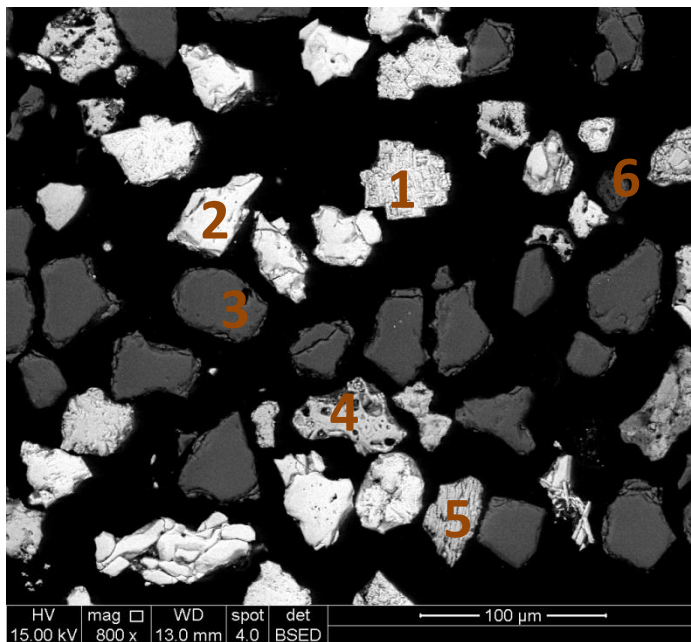
Análise	Partícula a		Partícula b	
Química	Elemento	Teor (%)	Elemento	Teor (%)
Alto	Fe	65,59	Fe	73,43
Médio	O	31,70	O	24,82
Baixo	Si	1,45	Al	0,60
Traço	Al/P	0,80/0,46	Si/P	0,59/0,56
Mineral	Goethita		Hematita	

Figura 9.2: Faixa 106 $\mu$ m – Partícula de Goethita e Hematita granular



Análise	Partícula a		Partícula b	
Química	Elemento	Teor (%)	Elemento	Teor (%)
Alto	Fe	66,35	Fe	72,55
Médio	O	24,34	O	24,62
Baixo	Al	3,77	-	-
Traço	Si/Ti	1,35/0,83	Si/Ti	0,60/0,60
Mineral	Goethita		Hematita	

Figura 9.3: Faixa 53µm - Partícula de Goethita e Hematita granular



Análise Química	
Partícula	Mineral
1	Hematita martita
2	Hematita granular
3	Quartzo
4	Goethita
5	Óxido de Manganês
6	Caulinita

Figura 9.4: Faixa 38µm – Variedades minerais encontradas