

REDEMAT

Rede Temática em Engenharia de Materiais



Dissertação de Mestrado



“CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA E ESTUDO TERMOMAGNÉTICO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO”

Área de concentração: Processos de Fabricação



Aluno: Anderson Alves Cunha

Orientador: Prof.Dr. Fernando Gabriel da Silva Araujo

Coorientador: Prof.Msc. Jefferson Januario Mendes



Ouro Preto, 30 de Dezembro de 2015.

REDEMAT

Rede Temática em Engenharia de Materiais



Anderson Alves Cunha

***“CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA E ESTUDO
TERMOMAGNÉTICO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE
FERRO”***

Dissertação de mestrado apresentado no programa de pós-graduação de Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Fernando Gabriel da Silva Araujo

Ouro Preto, 30 de Dezembro de 2015

C972c

Cunha, Anderson Alves.

Caracterização tecnológica e estudo termomagnético de rejeitos de minério de ferro [manuscrito] / Anderson Alves Cunha. - 2015.

96f.: il.: color; grafis; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Gabriel Silva Araujo.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Rede Temática em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Processos de Fabricação.

1. Minerios de ferro. 2. Variometro magnetico . 3. Resíduos industriais. I. Araujo, Fernando Gabriel Silva. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 662.341:620.1



“Caracterização Tecnológica e Estudo Termomagnético de Rejeitos de Minério de Ferro”

Autor: Anderson Alves Cunha

Dissertação defendida e aprovada, em 30 de dezembro de 2015, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Fernando Gabriel da Silva (Doutor) – Orientador
Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Cristovam Paes de Oliveira (Doutor)
Fundação Gorceix

Prof. Wilson Trigueiro de Souza (Doutor)
Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Jefferson Januário Mendes (Mestre)
Instituto Federal de Minas Gerais-Campus Ouro Preto

"If we all did the things we are really capable of doing, we would literally astound ourselves."

Thomas Alva Edison

Agradecimentos

A Deus, minha estrutura.

A minha mãe, Eliezia, por me ensinar que o mais importante é a integridade.

A minha esposa Emanuelle pela paciência, amor e companheirismo nessa jornada.

Ao meu amigo, orientador, Prof. Fernando Gabriel, pela objetividade, orientação técnica e por oferecer uma oportunidade ímpar de aprendizagem.

Ao meu amigo, co-orientador desta dissertação, Prof. Jefferson, pela orientação técnica e principalmente pela confiança depositada no nosso trabalho.

À Fundação Gorceix, especialmente ao DEPEC, onde encontrei apoio de uma verdadeira equipe: Eduardo, Gabriel, Paollo, Blenio, Adriana, Fabiana, Domingos, Chiquinho, Danubia, Alexandra, Luiza, Vilma, Alex, Raissa.

À REDEMAT, aos professores, à colaborada Ana e aos amigos adquiridos durante o curso.

Ao Prof. César Mendonça Ferreira, pelas valiosa contribuição na análise mineralógica.

Aos grandes mestres Fernando Krüger e Ruben Sole, pelo apoio técnico no desenvolvimento do trabalho.

Ao amigo, Ney, pela amizade e orientação técnica na microscopia eletrônica.

Ao amigo, Adriano, pela amizade e ajuda técnica na difração de raios X.

À UFOP e ao CNPQ entidades que beneficiaram essa jornada científica.

À minha família presente em todos os momentos de minha vida.

Sumário

AGREDECIMENTOS	i
SUMÁRIO.....	ii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	vi
RESUMO.....	vii
ABSTRACT	viii
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVO.....	3
2.1 Geral	3
2.2 Específicos.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Minério de Ferro.....	4
3.1.1 Mineralogia	5
3.1.2 Reserva e produção de minério de ferro	9
3.1.3 Quadrilátero Ferrífero	10
3.2 Beneficiamento de minério.....	12
3.3 Influência da lama no processo de concentração por flotação.....	15
3.4 Concentração por flotação	18
3.4.1 Etapas da flotação	20
3.4.2 Dupla camada elétrica (DCE)	23
3.4.3 Propriedades das interfaces	24
3.5 Rejeito de minério de ferro	26
3.6 Caracterização tecnológica	30
3.6.1 Cyclosizer	30

3.6.2	Espectrometria de fluorescência de raios X (FRX)	33
3.6.3	Picnomêtro de hélio	35
3.6.4	Difração de raios X	36
3.6.5	Microscopia óptica	38
3.6.6	Microscópio eletrônico de varredura - microsonda EDS	39
3.6.7	Susceptilímetro magnético.....	40
3.7	Fundamentos de magnetismo.....	41
3.7.1	Diamagnetismo e paramagnetismo	42
3.7.2	Ferromagnetismo.....	45
3.7.3	Ferrimagnetismo e Antiferromagnetismo	45
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
4.1	Caracterização tecnológica	48
4.1.1	Análise Granulométrica	50
4.1.2	Análise química	51
4.1.3	Densidade real.....	51
4.1.4	Identificação de fases cristalinas	51
4.1.5	Mineralogia quantitativa e grau de liberação do quartzo	52
4.1.6	Microscópio eletrônico de varredura - microsonda EDS	52
4.2	Ensaio termomagnético.....	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
5.1	Caracterização tecnológica	53
5.1.1	Análise granulométrica	53
5.1.2	Análise química	54
5.1.3	Densidade real.....	57
5.1.4	Identificação de fases cristalinas	58
5.1.5	Mineralogia e grau de liberação do quartzo.....	61
5.1.6	Microscópio Eletrônico de Varredura com microsonda EDS	64

5.2	Ensaio termomagnético.....	68
6	CONCLUSÕES	73
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	75
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrutura da hematita	5
Figura 2. Estrutura da magnetita.....	6
Figura 3. Estrutura da goethita	7
Figura 4. Estrutura do quartzo.....	8
Figura 5. Estrutura da caulinita.....	8
Figura 6. Quadrilátero Ferrífero, geologia simplificada desenvolvida por Dorr em 1969	11
Figura 7. Fluxograma típico de beneficiamento de minério.....	14
Figura 8. Possíveis efeitos das partículas ultrafinas na flotação	16
Figura 9. Influência do %lama adicionado na flotação	17
Figura 10. Princípio da flotação.....	19
Figura 11. Representação esquemática do ângulo de contato	21
Figura 12 – Dupla Camada elétrica	24
Figura 13. Estimativa da contribuição média da geração de resíduos sólidos para cada substância	27
Figura 14. Quantidade média de rejeitos gerada nos processos de beneficiamento	28
Figura 15. Gráfico da produção de minério de ferro, fosfato, cobre, carvão e ouro em 2013.	29
Figura 16. Desenho esquemático do cicloclassificador	32
Figura 17. Esquema de um fluxo dentro de um ciclone inserido no cicloclassificador ..	33
Figura 18. - Representação esquemática da fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda e dispersão de energia.	34
Figura 19. Desenho esquemático da difração	38
Figura 20. Sinais emitidos e volume de interação na amostra	40

Figura 21. Configuração dos dipolos em um material diamagnético, (a) sem presença de campo externo (b) com presença de campo externo.....	43
Figura 22. Configuração dos dipolos em um material paramagnético, (a) sem presença de campo externo (b) com presença de campo externo.....	44
Figura 23. Configuração dos dipolos em um material ferromagnético. (a) sem presença de campo externo (b) com presença de campo externo, H.	45
Figura 24. Comparativo dos diferentes momentos magnéticos e da magnetização espontânea dos materiais ferromagnéticos, antiferromagnéticos e ferrimagnéticos.	46
Figura 25. Estrutura magnética dos principais minérios de ferro do Brasil	47
Figura 26. (a) homogeneização da amostra (b) pilha alongada	48
Figura 27. Fluxograma para caracterização tecnológica e ensaios termomagnéticos das amostras.....	49
Figura 28. (a) peneiramento a úmido (b) cyclosizer	50
Figura 29. (a) bombona com o material passante no último ciclone (b) filtros de pressão	50
Figura 30. Distribuição granulométrica das amostras	53
Figura 31. Difrátogramas de raios X global e das 11 faixas granulométricas do rejeito de flotação. Q = quartzo, H = hematita e C = Caulinita.	59
Figura 32. Difrátogramas de raios X global e das 11 faixas granulométricas do rejeito ultrafino. Q = quartzo, H = hematita e C = Caulinita.	60
Figura 33. Fotomicrografias das frações do rejeito flotação, imagens: (a) -150µm +106µm; (b) -45µm +33µm; (c) 21µm +15µm; (d)-4 µm.....	65
Figura 34. . Fotomicrografias das frações do rejeito ultrafino, imagens: (a) -150µm +106µm; (b) -45µm +30µm; (c) -19µm +14µm; (d)-4 µm.....	67
Figura 35. Curvas termomagnéticas do rejeito da flotação	69
Figura 36. Curvas termomagnéticas do rejeito ultrafino (deslamagem).	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais óxidos e oxidróxidos de ferro	5
Tabela 2. Dados da reserva e produção de minério de ferro.	9
Tabela 3. Coluna estratigráfica simplificada para o Quadrilátero Ferrífero.	12
Tabela 4. Susceptibilidade de alguns minerais paramagnéticos e diamagnéticos	44
Tabela 5. Análise química global e por faixa granulométrica do rejeito ultrafino	55
Tabela 6. Análise química global e por faixa granulométrica do rejeito de flotação ..	56
Tabela 7. Densidade real das amostras globais e por faixas granulométricas.....	57
Tabela 8. Mineralogia quantitativa do rejeito de flotação.	62
Tabela 9. Mineralogia do rejeito ultrafino	63
Tabela 10. Grau de liberação do quartzo	64
Tabela 11. Análise EDS dos pontos indicados na figura 33.....	66
Tabela 12. Análise EDS dos pontos indicados na figura 34.....	67

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BIF - *Banded Iron Formation*

CA - Câmera de amostra

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Naturais (Nome fantasia),
denominado de Serviço Geológico do Brasil

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral

EDS - *Energy Dispersive Spectrometer*

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

MEV - Microscópio eletrônico de varredura

MG - Minas Gerais

NRM - Norma Regulamentadora de Mineração

PPC - Perda por calcinação

UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto

FRX - Fluorescência de raios X

ROM - *Runf of Mine*

CSN - Companhia Siderúrgica Nacional

RESUMO

Diante do cenário macroeconômico internacional, o setor mineral busca soluções inovadoras e sustentáveis para seus processos produtivos. Uma dessas soluções é, sem dúvida, aumentar a recuperação do mineral de interesse presente no rejeito, proveniente de operações de beneficiamento de baixa recuperação metalúrgica. Outro princípio é a aplicação de técnicas para a produção mais limpa, na qual se identificam as fases do processo em que os resíduos são gerados e qual a tecnologia necessária para seu reaproveitamento, seja no próprio sistema produtivo ou em um sistema produtivo diverso, estabelecendo-se o conceito de sustentabilidade na mineração com resíduo zero.

Contudo, para direcionar esse material para uma determinada tecnologia é fundamental conhecer suas características e propriedades específicas. O presente trabalho busca extrair informações significativas a respeito das diversas faixas de tamanhos de partículas existentes no rejeito de flotação e da deslamagem do beneficiamento de minério de ferro. As amostras utilizadas foram provenientes de uma mineradora do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Para isso, foram utilizadas técnicas de caracterização tecnológica, como classificação granulométrica (peneiramento a úmido e *cyclosizer*), fluorescência de raios X, difração de raios X, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura com microsonda EDS acoplada, picnômetro de hélio e ensaios termomagnéticos por meio de susceptímetro magnético.

Os resultados mostram que as distribuições granulométricas das amostras variam de 100 μ m até valores menores que 4 μ m, com presença significativa de óxidos de ferro e quartzo, além de pequenas quantidades de contaminantes, como alumina e fósforo. Os minerais de ferro identificados foram hematita, martita, goethita e magnetita e os de ganga foram quartzo e caulinita. As curvas termomagnéticas geradas permitiram identificar o efeito de Hopkinson, juntamente com as temperaturas de Curie da magnetita e hematita, e indicam também que o potencial magnético de cada faixa granulométrica está diretamente relacionado com o volume de magnetita presente.

Palavras-chave: minério de ferro, caracterização tecnológica, susceptibilidade magnética.

ABSTRACT

Within the international macro-economic scenario, the mineral sector is seeking innovative and sustainable solutions for its productive processes. Without doubt, one of these sought after solutions is for the increase and recovery of marketable ore from the tailings of beneficiary operations with low metallurgical recovery. Another sought after solution is for cleaner production techniques, including the process phases in which the residuals are generated, along with the necessary technology for the recycling of these residuals, whether it be in the productive system itself or other complementary one, by which the concept of zero waste from sustainable mining would be achieved. However, to be able to direct this waste material towards a determined technology, it is fundamental to know its characteristics and specific properties. The objective of the study presented herein was to extract significant information regarding the various ranges of particle size existing within the tailings from iron ore processing. For this, technical characterization techniques were used, such as: granulometry (humid sieving and cyclosizer), X-ray fluorescence, X-ray diffraction, optical microscopy, scanning electronic microscopy (SEM) coupled to an EDS microsoundhelium pycnometry, and thermomagnetic tests by means of magnetic susceptibility. The results demonstrate that the granulometric distributions of the samples vary from 100 μ m to values of less than 4 μ m, with a significant presence of iron oxides and quartz, along with a small fraction of contaminants, such as alumina and phosphorus. The iron ore minerals identified were: hematite, *martita*, goethite and magnetite, and in the gangue were encountered quartz and kaolinlimestone. The thermomagnetic curves generated permitted identification of the Hopkison Effect, together with the Curie temperatures for magnetite and hematite. They also indicate that the magnetic potential for each granulometric range is directly related to the volume of magnetite present.

Keywords: mineral processing waste, magnetic susceptibility, technological characterization

1 INTRODUÇÃO

O tratamento do minério de ferro tem gerado, durante décadas, um resíduo sólido com significativo teor de minerais de ferro. Devido à limitação tecnológica do beneficiamento e inexistência de tecnologia economicamente viável para o seu aproveitamento, estes são depositados em pilhas ou em barragens de rejeitos. Segundo a FEAM (2013), existem em Minas Gerais, Brasil, 706 barragens cadastradas, dentre estas, 340 são barragens de rejeito de minério de ferro, que provocam um impacto ambiental significativo, além do risco de segurança associado às barragens.

Para mitigar esse impacto, é importante buscar novas metodologias, com a aplicação de técnicas para a produção mais limpa, nas quais se identifiquem as fases do processo em que os resíduos são gerados, e se determinem as tecnologias necessárias para seu reaproveitamento, seja no próprio sistema produtivo ou em um sistema produtivo diverso, estabelecendo-se o conceito de sustentabilidade na mineração com resíduo zero, buscando obter maiores benefícios ambientais e econômicos nos projetos em operação.

As características físicas e químicas dos rejeitos dependem do tipo de minério e do processamento. Basicamente, os rejeitos de minério de ferro itabiríticos depositados em barragens são a soma de dois materiais provenientes de etapas diferentes do processo de tratamento, um oriundo da etapa de deslamagem (retirada de partículas com granulometria muito fina, indesejável para o processo de concentração) e o outro resultante da etapa de concentração (rico em quartzo).

A deslamagem é uma etapa usual no tratamento, devido ao fato de que as partículas ultrafinas provocam redução da eficiência e seletividade na operação de concentração. Sivamohan (1990) fez uma abordagem completa sobre a recuperação de partículas muito finas no processamento mineral e afirma que o problema é consequência da pequena massa e alta superfície específica.

A flotação é um processo de concentração dos mais utilizados na indústria mineral e tem por objetivo separar seletivamente os constituintes por meio da diferença entre as propriedades de superfície das substâncias minerais contidas no minério. Na indústria de minério de ferro, a flotação reversa de quartzo é aplicada para faixas entre 10 e 150 μ m.

Vieira (2005) pesquisou o efeito da granulometria na flotação. Os resultados mostraram que a baixa recuperação de partículas finas é atribuída a uma menor probabilidade de colisão dessas partículas com as bolhas de ar, enquanto que, para as partículas grossas, o decréscimo na recuperação é explicado pela ruptura do agregado partícula-bolha, devido ao tamanho, ao peso e à insuficiente cobertura hidrofóbica nas partículas grossas.

Por causa da rejeição de partículas ultrafinas na etapa de deslamagem e da não seletividade na operação de concentração, o rejeito do processamento mineral possui teor de ferro significativo e alto grau de liberação dos minerais, exibindo grande potencial para obtenção do ferro, necessitando apenas de uma nova tecnologia de separação que permita tratar partículas ultrafinas.

Teoricamente, o rejeito deveria possuir baixo teor do mineral de interesse, porém, as caracterizações tecnológicas de rejeitos de minérios de ferro de diversos autores identificaram um teor considerável de ferro. Analisando esses resultados, é plausível entender o porque do interesse em pesquisar e desenvolver novas tecnologias de concentração para a indústria mineral.

O presente trabalho foca na caracterização tecnológica e no estudo termomagnético de rejeitos de minério de ferro. As amostras de rejeitos utilizadas foram coletadas de uma mineração no Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais, sendo a primeira o rejeito de um processo de concentração por flotação e a segunda a lama que advém da etapa de deslamagem (ultrafinos).

2 OBJETIVO

2.1 Geral

Realizar a caracterização tecnológica de rejeitos de minério de ferro originados na etapa da flotação e da deslamagem, juntamente com um estudo termomagnético, com foco na avaliação das características magnéticas em diferentes faixas granulométricas do material.

2.2 Específicos

- I. Avaliar as características dos rejeitos de minério de ferro por meio de diferentes técnicas experimentais de análise de materiais;
- II. Realizar ensaios termomagnéticos em diferentes faixas granulométricas;
- III. Identificar os efeitos da temperatura sobre as características magnéticas dos rejeitos de minério de ferro;
- IV. Realizar um estudo comparativo da susceptibilidade magnética das diferentes faixas granulométricas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Minério de Ferro

O ferro é o quarto elemento mais abundante na crosta terrestre, matéria-prima essencial para fabricação do aço. Possui número atômico 26, massa atômica 55,85g, ponto de fusão 1585°C, densidade 7,87 g/cm³, é maleável, opaco, possui brilho metálico e magnético até 770°C, temperatura na qual ocorre perda da magnetização (DANA, 1978).

O minério de ferro mais abundante e importante é a Hematita Fe₂O₃ (DANA, 1978). O termo minério de ferro deve ser utilizado, preponderantemente, referindo-se a um agregado de minerais que está sendo ou poderá vir a ser explorado com vantagem econômica devido ao seu conteúdo de ferro (MAPA, 2006).

O ferro encontrado nos compostos possuem dois estados de valência, Fe²⁺ (ferroso) e Fe³⁺ (férico), o número de associações minerais que o ferro é encontrado são grandes, porém, os principais portadores são os das classes dos óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos.

A tabela 1 demonstra especialmente os óxidos e hidróxidos de ferro de maior importância, sendo que nos depósitos brasileiros a Hematita (Fe₂O₃), Magnetita (Fe₃O₄) e Goethita (FeOOH) são os principais.

Tabela 1. Principais óxidos e oxidróxidos de ferro (CORNEL & SCHWERTMAN, 1996)

Oxihidróxidos		Óxidos	
Fórmula	Mineral	Fórmula	Mineral
α -FeOOH	Goethita	α -Fe ₂ O ₃	Hematita
β -FeOOH	Akaganeíta	γ -Fe ₂ O ₃	Maghemita
γ -FeOOH	Lepidocrocita	Fe ₃ O ₄	Magnetita
δ -FeOOH	Feroxihita		
Fe ₉ HO ₈ 4H ₂ O	Ferrihidrita		

3.1.1 Mineralogia

Os principais minérios que contêm ferro são: Hematita, Goethita e Magnetita. Os minerais de ganga presentes no minério de ferro são: Quartzo, Caulinita e Gibbissita. Segue abaixo as características dos minerais.

A hematita é o mineral de ferro de maior importância e está amplamente distribuído em rochas de todas as idades, sua fórmula molecular pura é Fe₂O₃, com 69,94% de Ferro e 30,06% de oxigênio. Possui dureza 5,5 – 6,5, densidade 4,9 – 5,3, ferromagnética, cristaliza-se no sistema hexagonal, brilho metálico nos cristais e opaco nas variedades terrosas (DANA, 1978). A figura 1 exibe a estrutura da hematita.

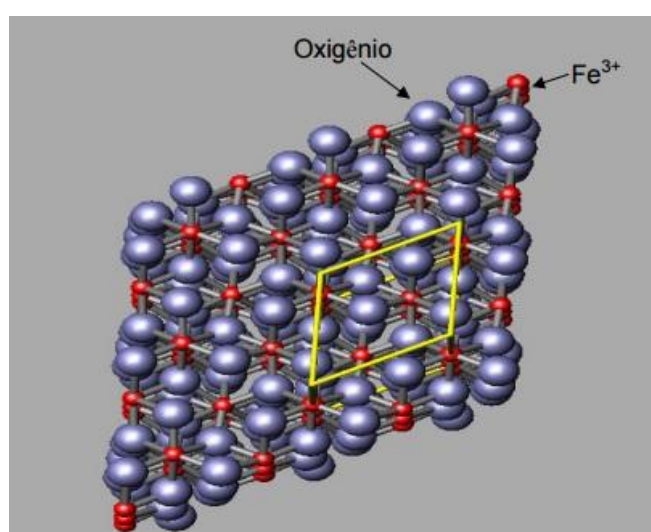


Figura 1. Estrutura da hematita (MAGALHÃES, 2008).

A magnetita é um óxido de ferro formado por íons de Fe^{2+} e Fe^{3+} . Sua fórmula molecular é Fe_3O_4 , podendo ser escrita também como $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, devido os dois tipos de íons de ferro presentes em sua estrutura. A figura 2 exibe sua estrutura, formada por sítios tetraédricos, representados pela letra A, e octaédricos, representados por B. Cátions Fe^{3+} ocupam os sítios tetraédricos, enquanto que, nos sítios octaédricos tanto os cátions Fe^{2+} quanto os Fe^{3+} podem ser ocupados

A magnetita apresenta composição química com 72,4% de ferro e 27,6% de oxigênio. Possui dureza 6,0, densidade 5,2, cor preta, fortemente magnética, comporta-se como um ímã natural, brilho metálico, opaca e seus cristais freqüentemente de hábito octaédrico (DANA, 1978).

Em geral, a magnetita apresenta granulação média, comumente mais grossa que o quartzo, hematita e silicatos de ferro, com os quais coexiste. A oxidação a baixa temperatura, freqüentemente relacionada à lixiviação ou movimento do lençol d'água, usualmente converte o cristal de magnetita a grãos de hematita, conservando a morfologia octaédrica da magnetita. Essa forma de hematita é denominada martita, que é, portanto, pseudomorfa da magnetita (GOMES, 2009).

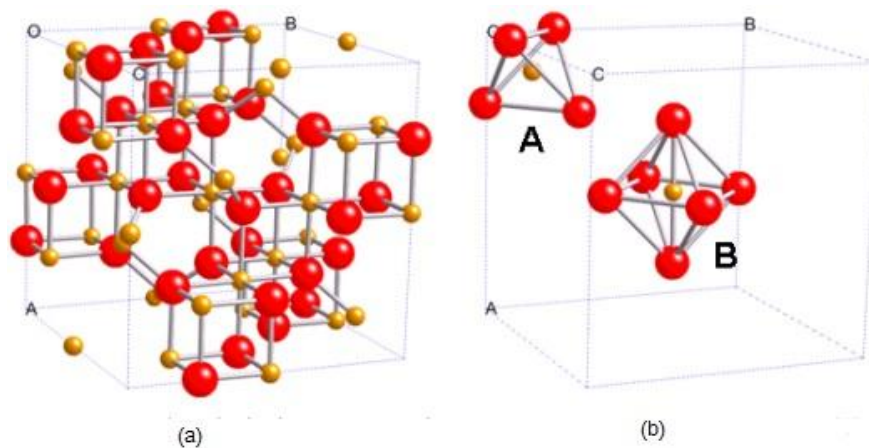


Figura 2. Estrutura da magnetita (MAGALHÃES, 2008).

A goethita é um dos minerais mais comuns e se forma, sob condições de oxidação, como produto de intemperismo dos minerais que contem Ferro. Sua fórmula química pura é HFeO_2 , com 62,9% de ferro, 27,0% de oxigênio e 10,1% de

água. Possui dureza 5,0 – 5,5, densidade 4,0 – 4,4, sistema cristalino ortorrômbico, brilho adamantino, é opaca com fratura fibrosa e quebradiça (DANA, 1978).

A goethita é antiferromagnética e termicamente estável, mas quando aquecida a temperaturas superiores a 200°C, sofre desidroxilação formando hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) (MAGALHÃES, 2008).

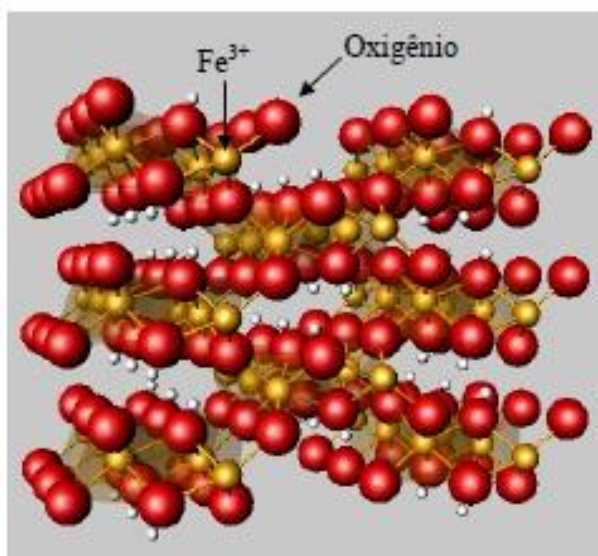


Figura 3. Estrutura da goethita (MAGALHÃES, 2008).

O quartzo é a fase estável da sílica à temperatura ambiente e é o principal minério de ganga presente nos minérios. É composto pelos dois elementos mais abundantes na crosta terrestre e sua fórmula química pura é SiO_2 , com 46,7% de silício e 53,3% de oxigênio. Sistema cristalino hexagonal e densidade 2,65. Existem em uma ampla variedade de formas cristalinas e não cristalinas, isso se deve a flexibilidade de ligação entre os tetraedros de SiO_2 (SCHACKELFORD *et al.*, 2008). A estrutura do quartzo é mostrada na figura 4.

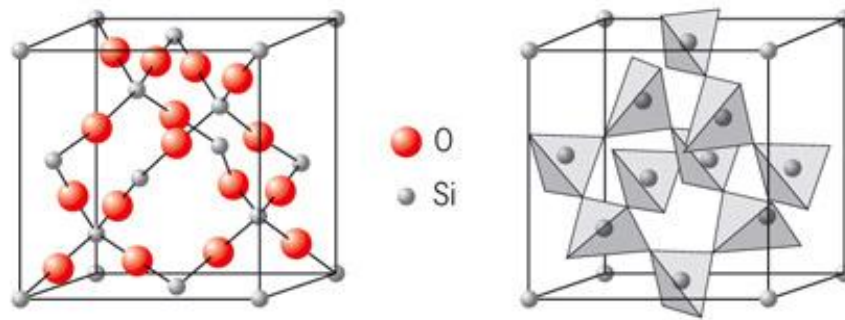


Figura 4. Estrutura do quartzo.
(Química 12ºAno, 2016).

A caulinita é um silicato de alumínio hidratado, sua fórmula química é $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, com 46,5% de sílica, 39,5% de alumina e 14,0% de água, sua fórmula mineral equivalente é $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Sistema cristalino triclinico e densidade de 2,6. É um produto da intemperização química do feldspato (SCHACKELFORD *et al.*, 2008). A figura 5 demonstra a estrutura da caulinita.

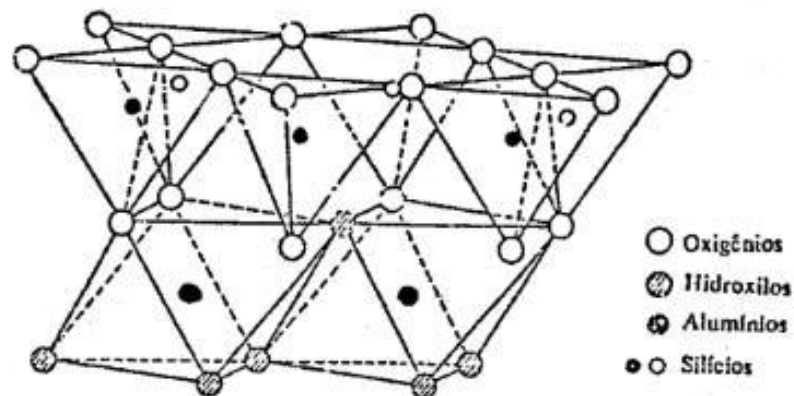


Figura 5. Estrutura da caulinita.

3.1.2 Reserva e Produção de minério de ferro

De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2014) em 2013, o Brasil produziu 386 milhões toneladas de ferro, correspondendo 13,1% da produção mundial, posicionando-se como 3º maior produtor mundial. As maiores empresas produtoras de ferro no país foram: Vale S/A, Samarco Mineração S/A, Companhia Siderúrgica Nacional-CSN, Mineração Usiminas S/A, Itaminas Comércio de Minérios, MMX Sudeste Mineração e Anglo Ferrous Amapá Mineração que, juntas, foram responsáveis por 89,9% da produção, com destaque para Minas Gerais com 68,8% da produção nacional, seguida do Pará (27,3%), Mato Grosso do Sul (2%) e Amapá (1,2%).

As reservas mundiais de minério de ferro totalizam 170 bilhões de toneladas, sendo que as reservas lavráveis do Brasil correspondem 23 bilhões de toneladas ou 13,6% das reservas mundiais (DNPM, 2014). A tabela 2 apresenta os dados das reservas e produções de cada país em 2013.

Tabela 2. Dados da reserva e produção de minério de ferro (DNPM, 2014)

(1) Reserva lavrável; (2) Estimativa de produção da china baseada em minério bruto; (e) dados estimados, exceto Brasil.

Discriminação	Reservas (10 ⁶ t)	Produção (10 ³ t)	
		2013 ^(e)	(%)
Países			
Brasil ⁽¹⁾	23.126,00	400.627	13,1
China	23.000,00	1.310.000	44,7
Austrália	35.000,00	521.000	18
India	8.100,00	144.000	5,1
Rússia	25.000,00	105.000	3,5
Ucrânia	6.500,00	82.000	2,7
Outros Países	49.274,00	367.373	12,9
Total	170.000	2.930.000	100

3.1.3 Quadrilátero Ferrífero

O Quadrilátero Ferrífero está localizado na porção central do estado de Minas Gerais e é considerado uma das mais importantes províncias minerais do Brasil devido às suas jazidas de ouro, ferro, manganês, topázio imperial e bauxita (CPRM, 2015).

O Quadrilátero Ferrífero compreende-se como uma estrutura geológica cuja forma se assemelha a um quadrado, perfazendo uma área de aproximadamente 7.000 km², que se estende entre as cidades de Belo Horizonte, Itabira, Ouro Preto e Congonhas. Seu embasamento e áreas circunvizinhas são compostos de gnaisses tonalítico-graníticos, acima destes encontram-se três unidades de rochas metassedimentares supracrustais: o supergrupo arqueano Rio das Velhas, o supergrupo proterozóico Minas e o grupo proterozóico Itacolomy (ROESER & ROESER, 2010).

A figura 6 exibe um esquema simplificado do Quadrilátero Ferrífero realizado por Door (1969), a qual pode visualizar o Supergrupo Minas, Supergrupo Rio das Velhas e a área composta de granitos - gnaisses.

O Supergrupo Rio das Velhas, é composto de metassedimentos vulcanoclásticos, químicos e pelíticos. Neste supergrupo ocorrem as jazidas de ouro em sua paragênese clássica de sulfetos. O supergrupo Minas, que possui até 6.000 m de espessura, é composto principalmente de metassedimentos pelíticos e quartzosos e coloca-se discordante acima do cinturão verde Rio das Velhas. Dentre os seus quatro grupos, o de Itabira é o mais significativo em termos econômicos, contendo os minérios de ferro, localmente denominados itabiritos, internacionalmente conhecidos como *banded iron formations (BIF's)* (ROESER & ROESER, 2010).



Figura 6. Quadrilátero Ferrífero, geologia simplificada desenvolvida por Dorr em 1969 (ROESER & ROESER, 2010).

A tabela 3 exemplifica a estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero segundo o Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2015) , na escala regional.

Tabela 3. Coluna estratigráfica simplificada para o Quadrilátero Ferrífero (CPRM, 2015).

	COBERTURAS SEDIMENTARES RECENTES		
PROTEROZOICO	SUPERGRUPO ESPINHAÇO	Grupo Conselheiro Mata	Formação Cambotas
	Grupo Itacolomi		
	SUPERGRUPO MINAS	Grupo Sabará	
		Grupo Piracicaba	Formação Barreiro
			Formação Taboões
			Formação Fecho do Funil
			Formação Cercadinho
Grupo Itabira		Formação Gandarela	
Formação Cauê			
Grupo Caraça	Formação Batatal	Formação Moeda	
ARQUEANO	SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS	Grupo Maquiné	Formação Casa Forte
			Formação Palmital
		Grupo Nova Lima	Xisto metassedimentar e metavulcânico
	Grupo Quebra-Osso	Associação metavulcânica máfica-ultramáfica	
TERRENOS GRANITO-GNÁISSICOS-ARQUEANOS			

3.2 Beneficiamento de minério

Os minerais geralmente não se encontram de forma utilizável na natureza, seja pela granulometria ou pela associação a outros minerais indesejáveis no produto final. Sendo assim, surge o Tratamento ou Beneficiamento de minérios que tem por objetivo adequar os minerais para determinados processos extrativos, em que se obtém o produto com as características e propriedades desejadas.

O processo de beneficiamento é regulamentado pela NRM-18:

Para efeito das NRM entende-se por beneficiamento de minérios ao tratamento visando preparar granulometricamente, concentrar ou purificar minérios por métodos físicos ou químicos, sem alteração da constituição química dos minerais (NRM, 2002).

De acordo com Luz e Lins (2010) o beneficiamento do minério consiste de um conjunto de operações que visa modificar a granulometria, a concentração das espécies minerais presentes ou a forma, sem contudo modificar a identidade química ou física dos minerais.

As operações unitárias inseridas no Tratamento de Minérios são ordenadas e classificadas da seguinte forma (LUZ & LINS, 2010):

1. Cominuição: Britagem e Moagem;

Consiste na redução do tamanho das partículas com o objetivo de obter a liberação mineral, a qual é necessária para realizar a separação das espécies de interesse e de ganga.

2. Peneiramento (separação por tamanhos) e Classificação (ciclonação);

Tem o objetivo de separar as partículas pela diferença de tamanho.

3. Concentração: gravítica, magnética, eletrostática, flotação, etc;

O principal objetivo dessa etapa é separar por espécie os minerais contidos no minério e obter duas frações com características físicas e químicas diferentes: o concentrado (rico no mineral de interesse) e o rejeito (rico em minerais de gangas).

4. Desaguamento: espessamento e filtração;

Na maioria dos casos, a concentração é realizada a úmido. Antes de enviar o concentrado para a indústria química ou para obtenção do metal por meio da Metalurgia Extrativa é necessário eliminar parte da água do concentrado, com operações de desaguamento e secagem.

5. Secagem: secador rotativo, spray dryer, secador de leito fluidizado;

6. Disposição de rejeito.

Em razão da grande diversidade dos rejeitos de mineração, as características dos materiais depositados podem conter variações significativas, como por exemplo,

o comportamento reológico, podendo os rejeitos depositados ser muito plásticos (argilas/lamas) ou não plásticos (areias/materiais grossos).

Com relação aos aspectos de disposição dos rejeitos, devem ser devidamente avaliados os processos de segregação do material, a inclinação dos depósitos formados pelo material, seu adensamento e a clarificação das águas.

A segregação do material lançado é um processo natural, segundo o qual a separação dos sedimentos contidos no rejeito se dá em função de sua densidade, granulometria e forma das partículas.

A figura 7 exibe um fluxograma típico de beneficiamento de minério, a qual identifica o material passante (-) para as etapas posteriores, e o material retido (+) que retorna para etapa anterior de cominuição (britagem ou moagem) com o objetivo de ajustar a granulometria.

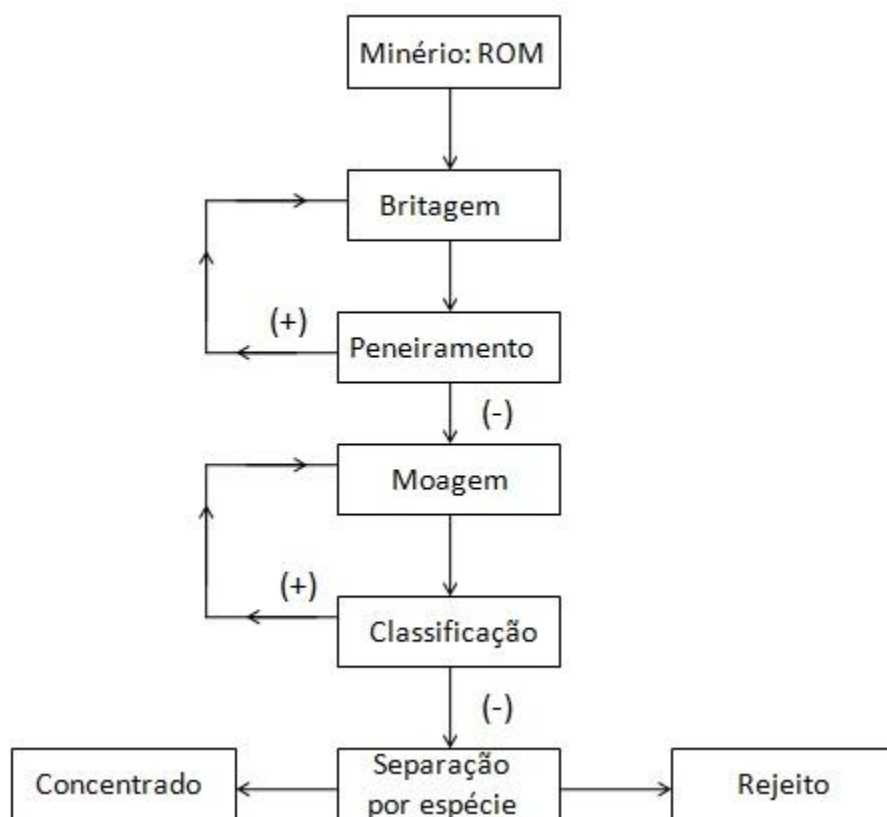


Figura 7. Fluxograma típico de beneficiamento de minério

3.3 Influência da lama no processo de concentração por flotação

A classificação das partículas com base em seu tamanho e comportamento em meio aquoso foi estabelecido por Somasundaran (1980), conforme abaixo:

- (i) finos - partículas que não são facilmente separáveis por processos físicos de concentração e cujo tamanho médio está compreendido entre 10 μ m e 100 μ m;
- (ii) ultrafinos - partículas que não são fáceis de separar por processos convencionais e por flotação, e cujo tamanho médio está compreendido entre 1 μ m e 10 μ m;
- (iii) colóides - partículas com tamanho médio inferior a 1 μ m;
- (iv) lamas - misturas de colóides, ultrafinos naturais e aqueles gerados em processos de cominuição.

As lamas têm um efeito negativo na seletividade e na recuperação metalúrgica no processo de flotação, portanto, a retirada desse material na etapa de deslamagem é uma operação lógica e necessária nas plantas de beneficiamento de minério de ferro.

Materiais terrosos finos, argilosos e/ou aluminosos, estão geneticamente relacionados aos depósitos de minério de ferro brasileiros. Diversos problemas no processamento destes minérios atribuem-se à presença deste material terroso (OLIVEIRA, 2006). Uma outra situação, é a geração de partículas finas durante as operações de lavra e das operações de cominuição do minério.

Sivamohan (1990) estudou o problema da recuperação de partículas ultrafinas no processamento mineral e concluiu que as dificuldades apresentadas são consequência da pequena massa e alta superfície específica.

Na flotação, por exemplo, partículas com pequena massa possuem baixo momento, provocam arraste de partículas de ganga no concentrado, tem baixa probabilidade de colisão com a bolha e coagulação heterogênea. A alta superfície específica conduz à alta taxa de dissolução em água, adsorção elevada de reagentes, rigidez da camada de espuma, aumento da viscosidade da polpa e

revestimento das partículas de interesse por partículas de ganga ultrafinas (SIVAMOHAN, 1990).

O desempenho da operação de flotação está vigorosamente relacionado à eficácia de remoção de lamas na etapa de deslamagem. A figura 8 apresenta um esquema dos possíveis efeitos das partículas muito finas na flotação.

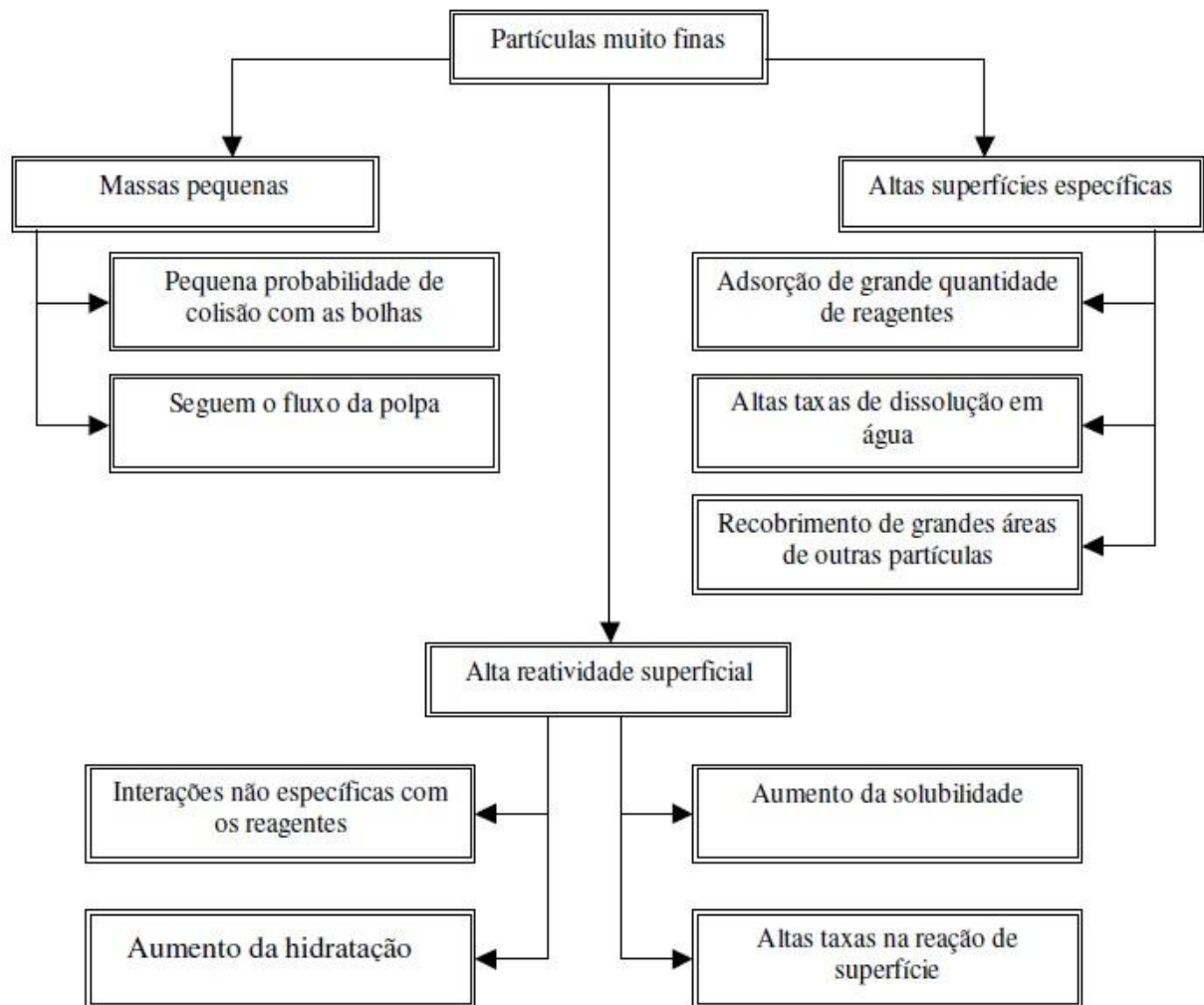


Figura 8. Possíveis efeitos das partículas ultrafinas na flotação (OLIVEIRA, 2006)

A figura 9 apresenta um gráfico mostrando a influência da adição de lamas na flotação, em relação ao teor de ferro no rejeito e da sílica no concentrado. Verifica-se que pequenas adições de lama na flotação catiônica reversa provocam grandes

perdas de ferro no rejeito, de outra maneira, têm-se um aumento menos acentuado da sílica no concentrado. De acordo com os dados obtidos, para adição de 8% em massa de lama, tem-se aproximadamente 32,5% de ferro no rejeito e 11% de sílica no concentrado.

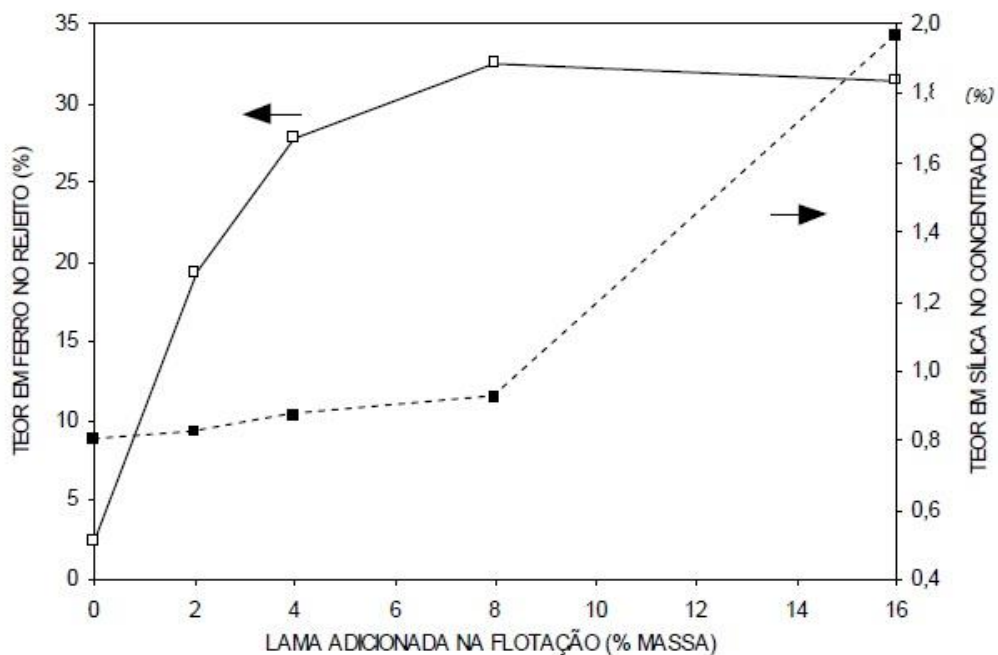


Figura 9. Influência do %lama adicionado na flotação (RABELO, 1994 apud SANTANA, 2012)

Segundo Queiroz (2003) a composição mineralógica da lama também influencia a flotação. Lamas constituídas exclusivamente por caulinita afetam muito menos a flotabilidade do quartzo com eteraminas que lamas naturais de minérios de ferro, constituídas por uma mistura de diversos minerais tais como goethita, hematita, caulinita e gibbsita.

3.4 Concentração por Flotação

Há diversas técnicas disponíveis no mercado para concentração de minerais, como exemplos: concentração gravítica/métodos densitários; carga elétrica (separação eletrostática); susceptibilidade magnética (separação magnética a seco ou a úmido) e propriedades de superfície (flotação e floculação).

Flotação em espuma, ou flotação, é uma operação unitária de separação de espécies minerais sólidas, a qual explora diferenças nas características de superfícies entre as várias espécies presentes. A grande vantagem da flotação em comparação com outros métodos é que as propriedades de superfície podem ser modificadas, tornando o processo muito versátil e de ampla aplicação.

De acordo com Peres *et al.* (2007) é preciso três condições básicas para que ocorra a concentração de minerais: liberabilidade, diferenciabilidade e separabilidade dinâmica. A liberação dos grãos dos diferentes minerais é obtida por meio de operações de cominuição (britagem e moagem). A separabilidade está relacionada com os equipamentos utilizados e a diferenciabilidade é a base seletiva do método.

A seletividade do processo de flotação se baseia no fato de que a superfície de diferentes espécies minerais pode apresentar distintos graus de hidrofobicidade. O conceito de hidrofobicidade de uma partícula está associado à sua umectabilidade ou “molhabilidade” pela água. Partículas mais hidrofóbicas são menos ávidas por água. O conceito oposto à hidrofobicidade é nomeado como hidrofiliabilidade (PERES, *et al.*, 2007).

O estudo teórico da flotação é complexo e envolve três fases (água, sólido e ar), sendo provido de subprocessos e interações que ainda não são totalmente compreendidos. A flotação é um processo de separação físico-química que utiliza a diferença das propriedades de superfícies dos minerais valiosos e dos minerais de ganga (ALEXANDER *et al.*, 2006).

A figura 10 exemplifica o princípio da técnica de concentração por flotação, a qual pode identificar as três fases presentes: o ar, responsável pela aeração do meio

e carregamento das partículas hidrofóbicas, a água, responsável pelas condições hidrodinâmicas do sistema e pelo carregamento das partículas hidrofílicas, e o sólido, constituído dos minerais de interesse e de ganga.

A flotação pode ser denominada como direta ou reversa, e aniônica e catiônica. A direta é utilizada quando o objetivo é flotar o mineral de interesse e de maneira oposta, a reversa consiste em flotar os minerais de gangas. O caráter catiônico e aniônico é ditado pela parte polar do coletor, se ela for básica, a flotação é catiônica, e se for ácida é aniônica (SANTOS, 2002).

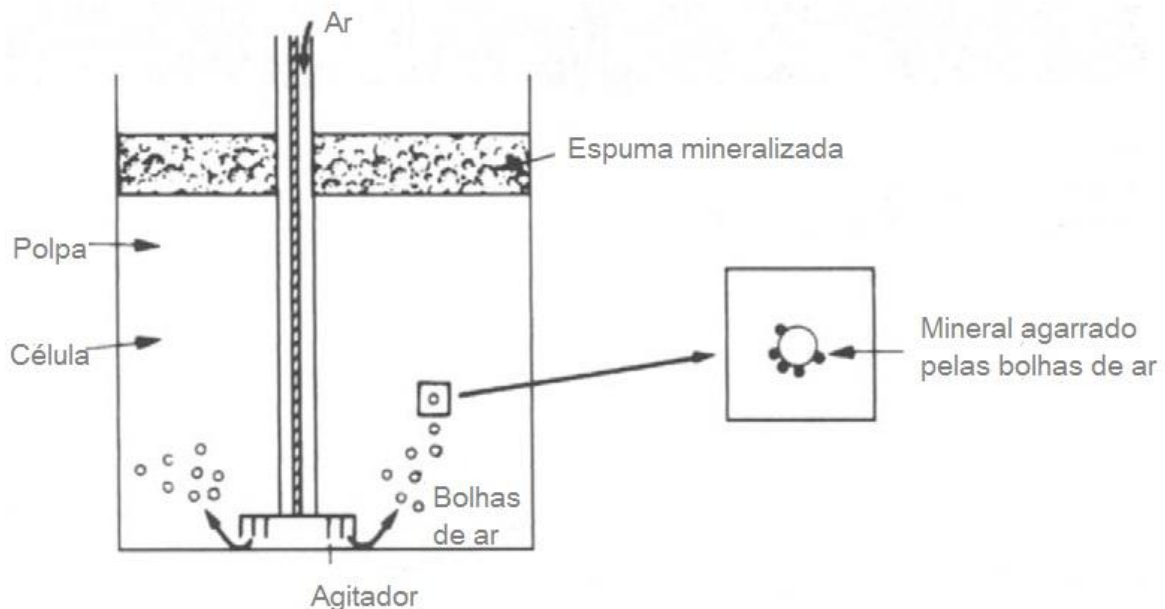


Figura 10. Princípio da flotação (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006)

A flotação pode ser afetada por muitos parâmetros que influenciam diretamente na seletividade e no rendimento metalúrgico. As principais variáveis que influenciam esta e que podem ser manipuladas são: dosagem e condicionamento dos reagentes; valor do pH; vazão de ar e profundidade da espuma; *hold up* do ar; tempo de residência; concentração de sólidos; tamanho de bolhas; velocidade do rotor; tamanho das partículas; água de lavagem e bias.

3.4.1 Etapas da Flotação

Segundo Baltar (2010) o processo de flotação desenvolve-se em três etapas, bem definidas, que ocorrem em seqüência: colisão, adesão e transporte. Dentro dessas etapas existem uma série de fatores que influenciam diretamente a eficiência do processo. Em resumo, a colisão depende das condições hidrodinâmicas, tamanho das partículas e das bolhas. A adesão depende de requisitos termodinâmicos, cinéticos e interações interfaciais das três fases presentes (gás, líquido e sólido). Por último, o transporte, que depende da estabilidade do agregado bolha-partícula para realizar o carregamento do mineral até a superfície da célula.

A probabilidade de flotação (P_f), para uma determina espécie mineral pode ser expressa por:

$$P_f = P_c \cdot P_a \cdot P_t \quad (I)$$

P_c é a probabilidade de colisão; P_a é a probabilidade de adesão e P_t é a probabilidade de transporte.

A colisão da partícula com a bolha só é possível a partir de uma determinada quantidade de movimento, a qual aumenta com: velocidade de agitação, o tamanho das partículas e a densidade das partículas. Foi estabelecido por Yoon e Luttrell (1989), citado por Baltar (2010), uma relação da probabilidade de colisão com o diâmetro da partícula (D_p) e o diâmetro da bolha (D_b).

$$P_c = (D_p/D_b)^2 \quad (II)$$

Com isso, a probabilidade de colisão (P_c) aumenta com:

- (1) o aumento da turbulência;
- (2) o aumento do tamanho das partículas;
- (3) a diminuição do tamanho das bolhas.

A probabilidade de adesão (P_a) está relacionada à seletividade do processo, para que essa etapa ocorra é necessário que o sistema satisfaça requisitos termodinâmicos e cinéticos.

A adesão de uma partícula mineral a uma bolha de ar implica no surgimento de uma interface gás-sólido. Essa nova interface substitui interfaces (sólido-líquido e líquido-gás) existentes no momento antecedente à colisão bolha-mineral. De acordo com os princípios da termodinâmica, para que ocorra essa adesão de forma espontânea no sistema é necessário que a energia livre da interface gás-sólido seja menor do que a soma das outras duas.

A variação da energia livre é dada pela equação de Dupré:

$$\Delta G = \gamma_{GS} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LG}) \quad (III)$$

Onde:

ΔG é a energia livre do sistema;

γ_{GS} é a tensão superficial nas interfaces gás-sólido;

γ_{SL} é a tensão superficial nas interfaces sólido-líquido;

γ_{LG} é a tensão superficial nas interfaces líquido-gás.

O contato do ar-mineral (adesão bolha-partícula) ocorre quando a água é deslocada a partir da superfície do sólido. Para que isso ocorra, deve existir um ângulo de contato finito entre as três fases (gás, sólido e líquido), como pode ser visto na figura 11.

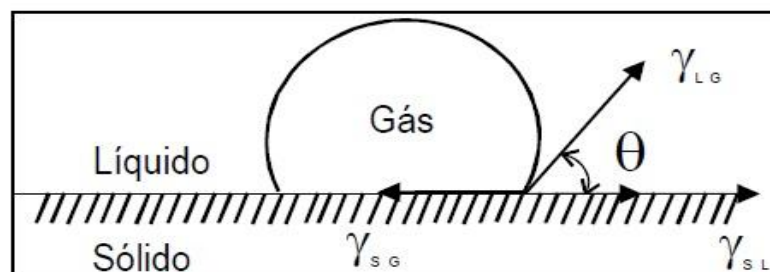


Figura 11. Representação esquemática do ângulo de contato (LUZ & LIMA, 2007)

A condição termodinâmica do contato entre as três fases (gás, sólido e líquido) é expressa em termos das respectivas tensões superficiais, conhecida como a equação de Young.

$$Y_{GS} = Y_{SL} + Y_{LG} \cos\theta \quad (IV)$$

Substituindo a equação (IV) em (III), obtêm-se a equação de Young-Dupré:

$$\Delta G = Y_{LG} (\cos\theta - 1) \quad (V)$$

Se $\Delta G < 0$, o processo de contato bolha-partícula é espontâneo. Nota-se na equação (V) que um ângulo de contato zero indica que não há diminuição da energia livre do sistema, devido a isso, não ocorre à adesão bolha-partícula.

Para concretizar a etapa de adesão existe um tempo de contato da partícula sobre a superfície da bolha e, nesse período dois eventos são necessários: (1) afinamento da película de água e (2) ruptura espontânea da película. O tempo necessário para que ocorram os dois eventos é denominado tempo de indução.

A probabilidade de adesão (P_a) aumenta com:

- (a) a diminuição do tamanho da partícula;
- (b) o aumento da velocidade de agitação (até um determinado limite);
- (c) a hidrofobicidade da superfície mineral;
- (d) a diminuição do tamanho da bolha (até um determinado diâmetro).

A probabilidade de transporte está intimamente relacionada com a estabilidade da bolha, que por vez, é dependente da intensidade da adesão e das condições hidrodinâmicas existentes na célula.

A probabilidade de transporte (P_t), aumenta com:

- (a) a diminuição da turbulência;
- (b) a hidrofobicidade da superfície mineral;

- (c) o aumento do tamanho da bolha;
- (d) a diminuição do tamanho da partícula.

3.4.2 Dupla camada elétrica (DCE)

A fragmentação dos minerais gera partículas com diferentes superfícies e com uma determinada energia livre superficial, proporcional à intensidade das ligações rompidas. Superfícies geradas a partir de ruptura de ligações frágeis (apolar) estarão próximas ao seu estado de equilíbrio. Ao contrário, as superfícies criadas a partir de ruptura de ligações fortes (polar) reagem, de forma espontânea com o meio, de acordo com a segunda lei da termodinâmica (BALTAR, 2010).

Partículas com excesso de carga superficial atraem espécies iônicas, com carga contrária (contra-íons). Esse fenômeno dá origem à formação da chamada dupla camada elétrica (DCE), constituída por uma camada interna (a superfície carregada) denominada Camada de Stern e outra externa (os contra-íons) chamada Camada de Gouy ou difusa, como pode ser visto na figura 12.

De acordo com Baltar (2010) a dupla camada elétrica tem grande importância em todas as etapas da flotação, uma vez que:

- I. influencia a adsorção de reagentes no caso de atração eletrostática;
- II. pode dificultar a adsorção de íons específicos;
- III. afeta fortemente o estado de dispersão das partícula.

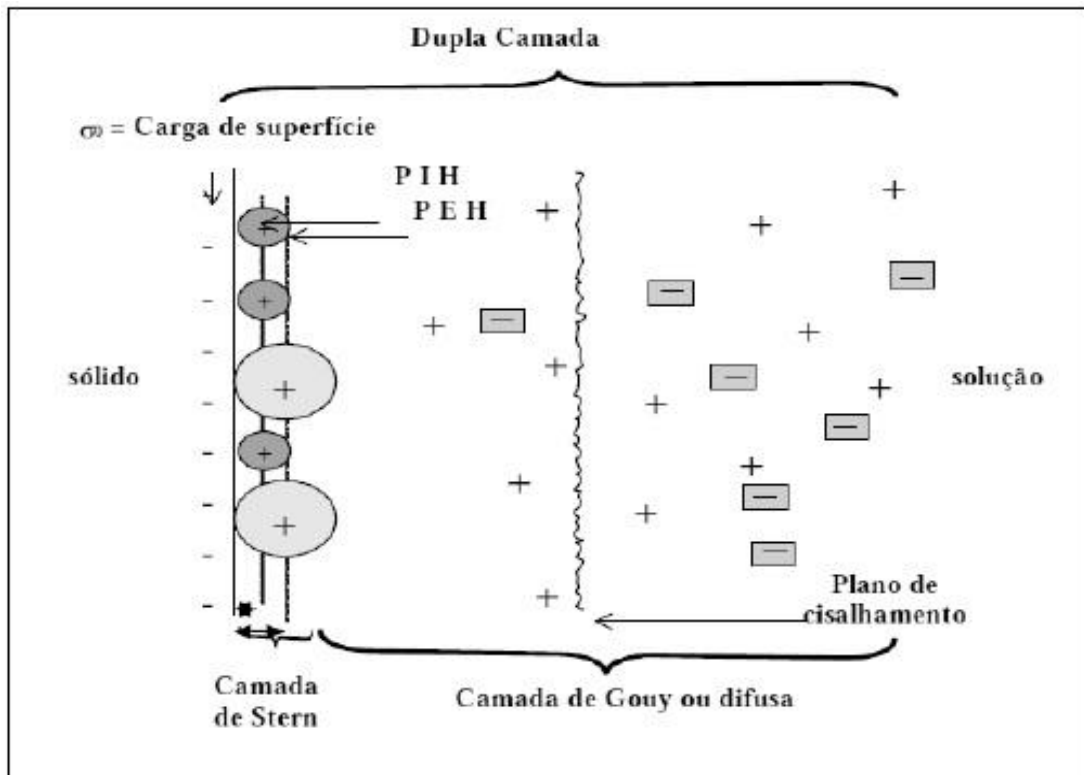


Figura 12 – Dupla Camada elétrica (PARKS, 1967).

3.4.3 Propriedades das Interfaces

O conhecimento sobre as propriedades das interfaces é fundamental para compreensão da propriedade diferenciadora no sistema de flotação. Nesse são encontrados cinco tipos de interface: sólido/sólido, sólido/líquido, sólido/gás, líquido/líquido e líquido/gás.

De acordo com Peres (2010) a interface sólido/sólido pode ser exemplificada por uma espécie mineral recoberta por lamelas de outra espécie, por meio de um mecanismo essencialmente de atração eletrostática “*slimes coating*”, sendo seu conhecimento de grande importância para a flotação já que a partícula muda sua característica superficial. A interface sólido/líquido pode ser caracterizada pela imersão de uma partícula mineral em meio aquoso. A interface sólido/gás pode ser visualizada quando uma bolha de gás é aderida a uma partícula mineral, supondo-se que no momento da adesão a película líquida que circunda a bolha sofre um

processo de afinamento até a ruptura. A interface líquido/líquido é representada pelos reagentes que são imiscíveis em água, para sua correta utilização é necessário sua emulsificação e, por último, a interface líquido/gás é exemplificada pela película líquida que envolve uma bolha.

Segundo Baltar (2010) a adsorção na superfície do mineral pode ser específica ou não, e a específica pode ser química ou física. A adsorção física está associada à presença de íons indiferentes na fase líquida e ocorrem por ação de forças eletrostáticas. Suas principais características são:

- I. adsorção pouca energética;
- II. pode ser reversível;
- III. pouco seletiva e
- IV. adsorção muito rápida.

A adsorção química é o resultado da afinidade química entre um íon específico, presente na fase líquida, e um determinado íon na superfície mineral, formando um composto químico na superfície. Suas principais características são:

- I. alto calor de adsorção;
- II. adsorção irreversível;
- III. atua de forma seletiva e
- IV. exige um tempo mínimo de condicionamento para a formação do composto

Quando duas fases diferentes são colocadas em contato físico, as propriedades da zona de fronteira entre elas dependem do grau de afinidade termodinâmica entre tais fases, não há fases completamente imiscíveis, já que haverá sempre, em maior ou menor grau, a região de transição. Essa região de transição é denominada interface. As moléculas e os átomos de cada fase sofrem atração mútua em decorrência das forças de dispersão London – van der Waals. A

resultante dessas forças provoca um desbalanceamento na interface das partículas (moléculas ou íons), o que leva ao surgimento da tensão superficial (LUZ & LIMA, 2007).

O potencial zeta (ou eletrocinético) é o potencial elétrico na superfície de cisalhamento da dupla camada elétrica da interface. Essa está relacionada com as cargas elétricas de interfaces e com o pH do sistema, sua alteração influencia diretamente na flotação dos minerais (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

Por conseqüência das múltiplas interações das fases (ar, água e sólido) somado às diversas variáveis de operação e controle, a seletividade do processo fica dependente da combinação perfeita dos parâmetros, que na verdade não é o que ocorre, pois o processo de flotação é dependente também, das características físicas e químicas do minério, com limitação para partículas abaixo de 10 μ m. Sendo assim, é inevitável a geração de rejeitos contendo uma certa quantidade de minerais de interesse.

3.5 Rejeito de minério de ferro

No processo do tratamento do minério gera-se dois materiais com diferentes características físicas e químicas: um é o concentrado, rico no teor do mineral de interesse, e o outro é o rejeito, rico em minerais e elementos indesejáveis para os processos de metalurgia extrativa. Esse último é produzido em grandes quantidades, provocando impactos ao meio ambiente e ocasionando custos onerosos para as mineradoras.

O Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012) realizou uma pesquisa com o objetivo de estimar a produção de resíduos sólidos gerados na exploração de várias substâncias. A figura 13 exhibe a estimativa de contribuição média de cada substância na geração de resíduos sólidos no período de 2010-2030.

Contribuição média de cada substância (2010-2030)

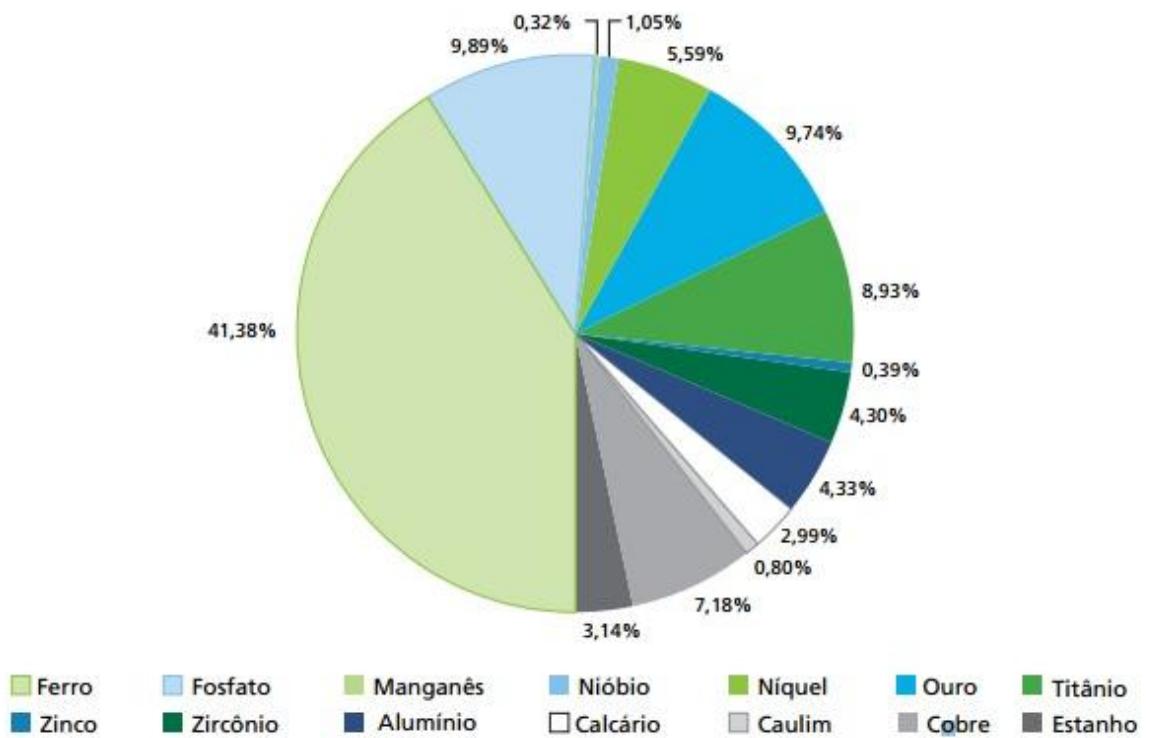


Figura 13. Estimativa da contribuição média da geração de resíduos sólidos para cada substância (IPEA, 2012)

A geração de resíduos sólidos na mineração de ferro destaca-se no meio dos outros metais, com uma estimativa de contribuição média de 41,38% no intervalo analisado. Com os resultados obtidos, é notável a importância do reaproveitamento dos rejeitos provenientes do beneficiamento do minério de ferro.

A quantidade de rejeitos, gerados na indústria mineral, depende de dois fatores: o primeiro é a taxa de produção nas usinas de beneficiamento do determinado mineral, o segundo, a quantidade intrínseca de geração de rejeitos no processo, o qual depende do teor da jazida.

A figura 14 mostra um gráfico comparativo do beneficiamento de cinco recursos naturais. Embora o beneficiamento do minério de ferro seja a maior contribuição na geração de resíduos sólidos, devido principalmente às altas taxas de

produção, o seu tratamento em si, comparado com o carvão, fosfato, cobre e ouro, possui a menor relação rejeito/produto.

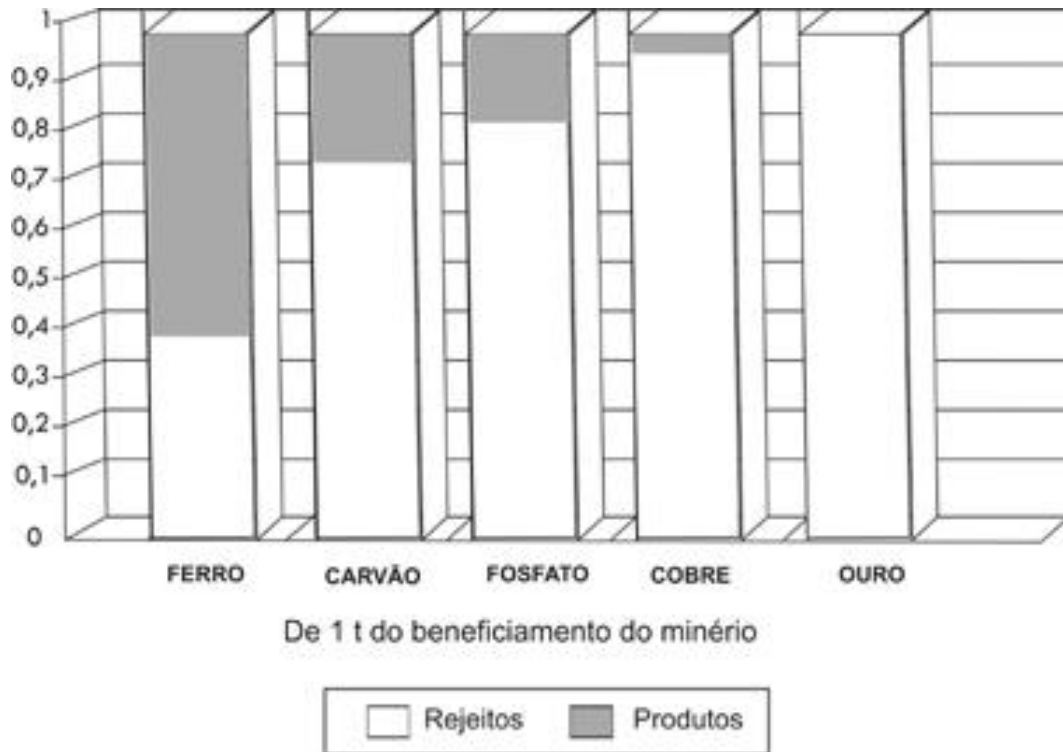


Figura 14. Quantidade média de rejeitos gerada nos processos de beneficiamento (LUZ E LINS, 2010)

A produção dos cinco recursos naturais pode ser visualizada na figura 15, em que se verifica a grande diferença entre a produção do minério de ferro e dos demais.

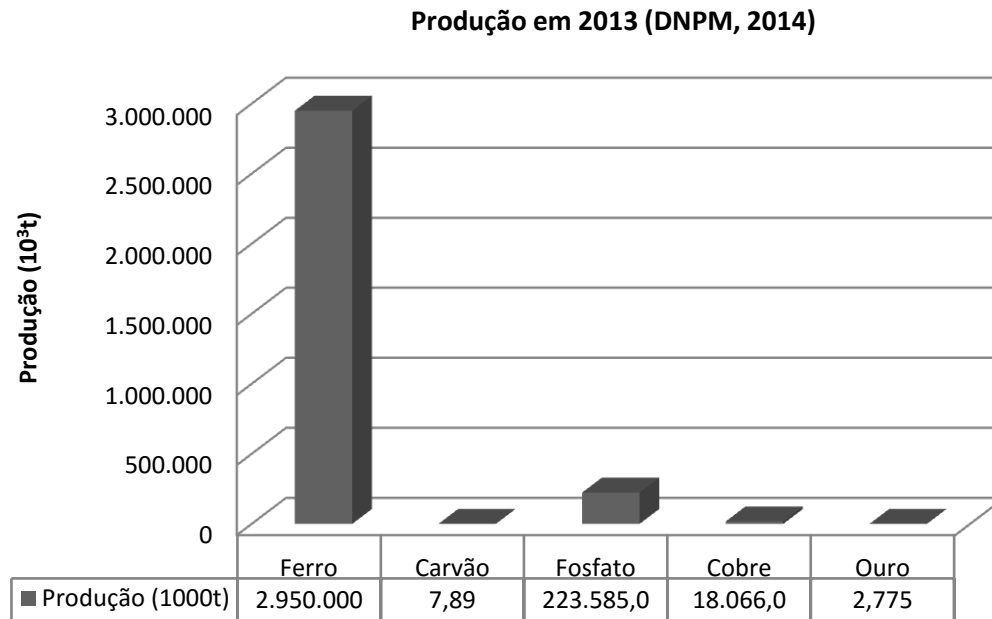


Figura 15. Gráfico da produção de minério de ferro, fosfato, cobre, carvão e ouro em 2013 (DNPM, 2014).

As propriedades e características do rejeito dependem, num primeiro momento, das características de beneficiamento e do tipo de mineral lavrado.

Wolff *et al.* (2011) estudaram amostras coletadas no underflow dos espessadores de rejeitos de várias plantas de tratamento de minério de ferro, onde o teor global de ferro identificado variou de 44,8% a 64% e o d_{80} (tamanhos de partícula que respondem por 80% da massa) variou de 10 a 27 μ m. Com as análises granulométricas das amostras, verificaram-se que os materiais apresentaram na fração >9 μ m teores de ferro acima do global, enquanto a alumina e o fósforo se concentraram na fração <9 μ m. Esses resultados podem ser atribuídos à limitação tecnológica em concentrar seletivamente partículas abaixo de 10 μ m.

Gomes (2009) caracterizou o rejeito estocado na barragem proveniente da usina de tratamento de minério da mina do Córrego do Feijão. A análise química global do ferro apresentou uma média calculada de 48,08%, com 58,81% das partículas abaixo de 48 μ m.

Os resultados desses trabalhos permitiram consolidar a visão de que os rejeitos constituem-se como uma grande fonte de ferro.

3.6 Caracterização Tecnológica

A caracterização tecnológica é uma etapa fundamental para se obter a máxima recuperação metalúrgica e seletividade nas operações de tratamento de minério. De maneira geral, o objetivo consiste em obter os seguintes dados:

- I. Identificação do mineral (análise qualitativa);
- II. Proporção mineral (análise quantitativa);
- III. Composição mineral;
- IV. Grau de liberação dos minerais de interesse e de ganga;
- V. Identificação dos constituintes químicos do minério (elementos de interesse e deletérios);
- VI. Distribuição granulométrica.

A seguir, será apresentado uma breve revisão das principais técnicas utilizadas nesse trabalho.

3.6.1 Cyclosizer

O cyclosizer, denominado de cicloclassificador, é utilizado na determinação da distribuição granulométrica de amostras de minérios para faixas entre 50 μ m a 10 μ m, dependendo da densidade do material, pode chegar a 4 μ m. Sua grande vantagem, comparado com outros equipamentos modernos de classificação, é a separação das partículas em frações distintas, permitindo a análise dos teores dos minérios por faixa granulométrica (BRAGA & COUTO, 2007).

O cicloclassificador é constituído de cinco hidrociclones, instalados em série e com posições invertidas. No processo aplica-se a Lei de Stokes juntamente com a ação de campos centrífugos.

A operação do clicloclassificador consiste, basicamente, que a fração grossa, resultante do processo de classificação em cada hidrociclone é armazenada em câmeras de amostras (CA), situadas logo acima do apex dos hidrociclones. A fração fina é descarregada pelo vórtice do hidrociclone, que alimenta o seguinte e, assim, sucessivamente. A figura 16 mostra um desenho esquemático do cicloclassificador.

Os hidrociclones possuem dimensões limites de separação de acordo com os valores padrão de operação. A correção das variáveis é feita por meio de gráficos, dos quais se obtém um fator de correção para cada variável, dentro da faixa operacional especificada.

As variáveis que afetam a dimensão efetiva são:

- I. vazão da água;
- II. temperatura da água;
- III. massa específica e ;
- IV. tempo de elutriação.

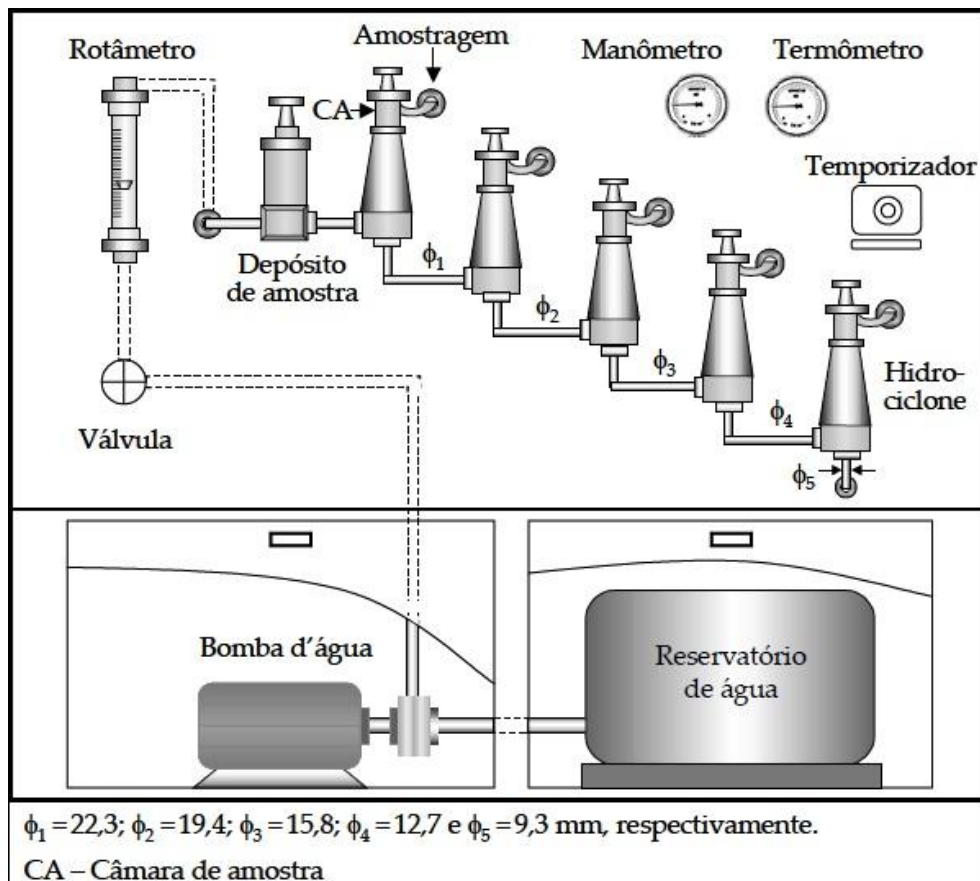


Figura 16. Desenho esquemático do cicloclassificador (COTA & BRAGA, 2007)

Segundo Braga & Couto (2007) para classificar as partículas no cyclosizer, introduz-se uma suspensão de partículas sólidas num líquido sob pressão, através da abertura de alimentação, sendo que a entrada tangencial e a forma cilíndrica submetem as partículas a uma aceleração centrífuga. Essa aceleração faz com que as partículas de maior diâmetro atinjam a parede externa mais rapidamente, em função do movimento helicoidal ascendente, descarregando as partículas grossas pela abertura do *apex*. O líquido remanescente com as partículas mais finas será descarregado pela saída do *vortex*, segundo as espirais descendentes na parte interna do hidrociclone.

A figura 17 mostra um fluxo padrão de polpa se comportando dentro de um ciclone no sistema do cyclosizer.

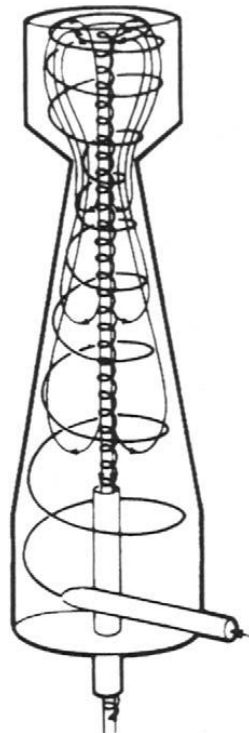


Figura 17. Esquema de um fluxo dentro de um ciclone inserido no cicloclassificador (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006).

3.6.2 Espectrometria de fluorescência de raios X (FRX)

A fluorescência de raios X é uma técnica analítica não destrutiva aplicada em várias áreas da ciência, a qual permite analisar amostras sólidas e líquidas. A FRX é um método de análise direta, onde a amostra geralmente não precisa de uma preparação especial e também possibilita analisar vários elementos químicos majoritários presentes na amostra em uma única análise. Sua abrangência vai desde o magnésio até o urânio. Suas vantagens, em comparação com outras técnicas disponíveis no mercado, são análises rápidas e com custos baixos.

A técnica baseia-se na excitação dos elétrons, das camadas internas, dos átomos presentes na amostra por meio de raios X. Os elementos constituintes ao

serem excitados, pelos raios X primários emitidos por tubos de raios X, emitem uma radiação característica de cada elemento (espectros característicos). Essa radiação é utilizada para identificação (análise qualitativa) e quantificação (análise quantitativa) dos elementos presentes na amostra.

Segundo Batista (2012), a caracterização química de amostras por meio da fluorescência de raios X é realizada em três etapas:

- I. Excitação dos elementos que constituem a amostra;
- II. Dispersão dos raios X característicos emitidos pela amostra;
- III. Detecção desses raios X.

Os métodos de dispersão utilizados nos espectrômetros de raios X podem ser classificados em duas categorias: dispersão por comprimento de onda (WD-XRF, abreviação de *wavelength dispersive X-ray fluorescence*) e dispersão de energia (ED-XRF, *energy dispersive X-ray fluorescence*).

A figura 18 exibe um esquema da fluorescência por dispersão por comprimento de onda e por dispersão de energia.

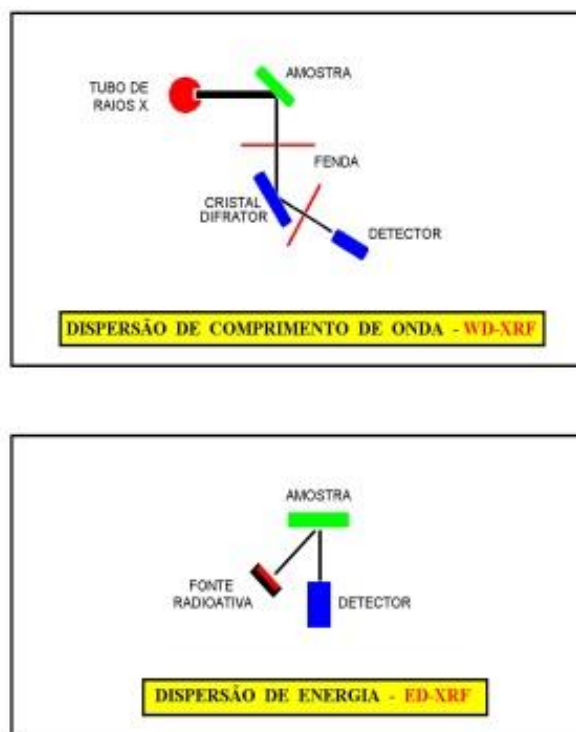


Figura 18. - Representação esquemática da fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda e dispersão de energia (FILHO, 1999).

De acordo com Filho (1999), no método dispersão por comprimento de onda (WD-XRF), os raios X característicos são selecionados por um cristal difrator de acordo com seus comprimentos de onda, obedecendo à lei de Bragg da difração.

Neste caso, o comprimento de onda selecionado ou difratado pode ser calculado pela equação da lei de Bragg:

$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \Theta \quad (VI)$$

Onde,

λ = comprimento de onda dos raios X;

d = distância interplanar do cristal difrator (em nm);

Θ = ângulo entre a direção do feixe de raios X incidente e superfície do cristal, ou ângulo de incidência, e;

n = número inteiro = 1, 2, 3, ..., também chamado de ordem.

O método por dispersão de energia (ED-XRF) os raios X são selecionados por meio dos pulsos eletrônicos produzidos em um detector apropriado, sendo estes pulsos diretamente proporcionais às energias dos raios X, que é característico de cada elemento (FILHO, 1999).

3.6.3 Picnômetro de Hélio

O picnômetro de hélio é uma técnica especificamente projetada para medir o volume real de várias quantidades de materiais sólidos e consiste na medida do volume pelo deslocamento de um fluido pelo princípio de Arquimedes.

O fluido deslocado é um gás que pode penetrar os poros mais finos do material, de forma a assegurar uma ótima precisão na medida. Devido as exigências do gás, foi utilizado o hélio, que possui pequenas dimensões atômicas, o qual pode penetrar em trincas e poros com dimensões extremamente pequenas.

O método determina o volume real de uma amostra de um sólido pulverizado, medindo a diferença de pressão quando uma quantidade conhecida de hélio sob pressão é deixada escoar de um volume de referência (V_R) exatamente conhecido para uma célula que contém a massa conhecida do material em análise.

A técnica utiliza-se da equação (VII) para determinar o volume real do pó:

$$V_p = (V_c - V_r) \times \left[(P_1/P_2) - 1 \right] \quad (VII)$$

Onde:

V_p = volume do pó;

V_c = volume da célula;

V_r = volume de referência;

P_1 = pressão no momento 1;

P_2 = pressão no momento 2.

3.6.4 Difração de Raios X

A difração de raios X é um método que se aplica para determinação de estruturas cristalinas. As substâncias amorfas, carente em periodicidade nos arranjos atômicos, não pode ser identificada por essa técnica, uma vez que é necessário uma rede que permita a difração dos raios X incidentes na amostra.

Os raios X são radiações eletromagnéticas com comprimento de onda entre 10^{-11} e 10^{-8} m. Assim, o comprimento de onda desta radiação é da mesma ordem de grandeza dos parâmetros de rede dos cristais (os comprimentos de onda de raios X,

utilizados em difração, estão na faixa de 0,5 a 2,5Å). Este fato faz com que seja possível haver difração de raios X nos cristais (ERDÓCIA, 2011).

Em 1913, William H. Bragg e William L. Bragg descobriram que substâncias que apresentavam formas macroscópicas cristalinas forneciam padrões notavelmente característicos quando sujeitos a incidência de raios X. Determinaram então, uma relação entre as camadas atômicas intercristalinas, o comprimento de onda da radiação incidente e o ângulo de difração, por meio da equação (VI), já citada na discussão da fluorescência de raios X. A Figura 19 mostra o esquema da difração em cristais.

Cada elemento químico emite raios X com um comprimento de onda característico. A radiação produzida pela transição de elétrons da camada L para a camada K é denominada de K_{α} e da camada M para a camada K de K_{β} . Existem outras linhas de intensidades bem menores no espectro de emissão, porém estatisticamente K_{α} e K_{β} são as que mais contribuem.

O princípio básico de funcionamento dessa técnica consiste na incidência de raios X com certo comprimento de onda (λ) nos planos sistemáticos do retículo cristalino. Essa interação de ondas fornece informações sobre os raios X incidentes e os raio-x difratados.

Aplicando-se a Lei de Bragg, obtêm-se as distâncias interplanares (d) que é característico para cada mineral, e estão tabuladas em diversas referências, sendo a mais difundida e utilizada a do ICDD (*International Center for Diffraction Data*).

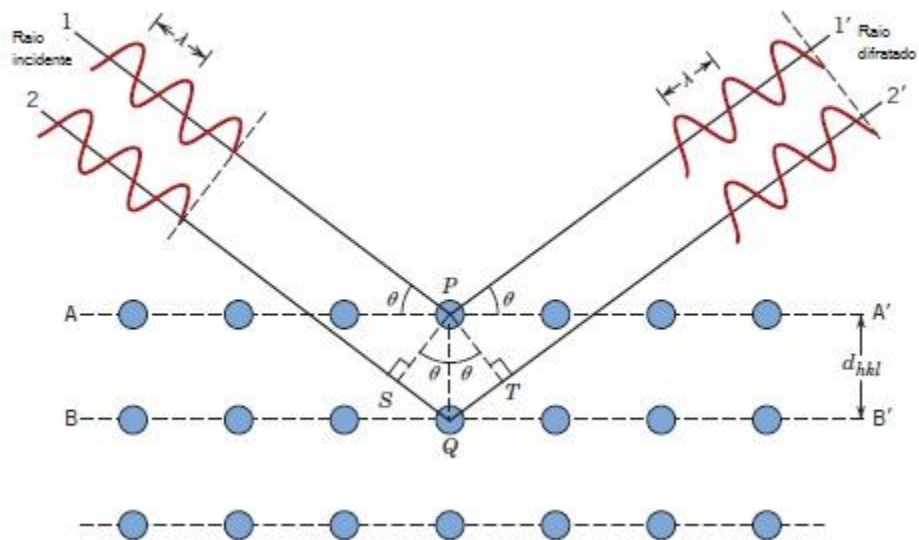


Figura 19. Desenho esquemático da difração (CALLISTER, 2006)

3.6.5 Microscopia Óptica

O microscópio óptico é um equipamento projetado para gerar imagens por meio da luz visível, com magnificação máxima de 2000 vezes. Para identificação de minerais são utilizados dois tipos: microscópio óptico de luz transmitida e de luz refletida. O primeiro é utilizado para amostras transparentes (onde a luz atravessa a amostra), o segundo, a luz incidente é refletida, minerais opacos.

A análise quantitativa na microscopia é feita por meio da análise modal (composição percentual das fases presentes, por meio da contagem de pontos, linhas e áreas), distribuição dos diâmetros dos grãos e forma dos grãos. O exame qualitativo é feito por meio da identificação dos minerais pelo conjunto de suas propriedades ópticas e mineralógicas (SANTOS, 2002).

3.6.6 Microscópio eletrônico de varredura - microsonda EDS

O MEV configura como uma das técnicas mais versáteis para visualizar e analisar características microestruturais de amostras sólidas, podendo chegar até 300.000 vezes de magnificação. O MEV juntamente com uma microsonda pode fornecer informações relevantes sobre a morfologia e identificação de elementos químicos de uma amostra mineral ou outra substância que se deseja analisar.

De acordo com Dedavid *et al.*, (2007), o princípio de um microscópio eletrônico de varredura consiste em utilizar um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície da amostra e transmitir o sinal do detector a uma tela catódica cuja varredura está perfeitamente sincronizada com aquela do feixe incidente. Na sua estrutura existe um sistema de bobinas de deflexão, onde o feixe pode ser guiado de modo a varrer a superfície da amostra. O sinal de imagem resulta da interação do feixe incidente com a superfície do material.

Quando o feixe primário incide na amostra, parte dos elétrons difunde-se e constitui um volume de interação cuja forma depende principalmente da tensão de aceleração e do número atômico da amostra. Diferentes sinais podem ser emitidos pela amostra, dentre os sinais emitidos, os mais utilizados para obtenção da imagem são originários dos elétrons secundários e/ou dos elétrons retroespalhados (DEVADID *et al.*, 2007).

A figura 20 exhibe os sinais emitidos e o volume de interação quando um feixe primário de elétrons é direcionado na amostra.

Os elétrons secundários no MEV resultam da interação do feixe eletrônico com o material da amostra, estes elétrons são de baixa energia (<50eV), e formam imagens com alta resolução (3-5nm). Os elétrons retroespalhados possuem energia que varia entre 50eV até o valor da energia do elétron primário, os quais sofreram espalhamento elástico. A imagem gerada por esses elétrons fornece diferentes informações de visuais, como exemplo: imagem topográfica (contraste em função do relevo) e uma imagem de composição (contraste em função do número atômico dos elementos presentes na amostra) (DEVADID *et al.*, 2007).

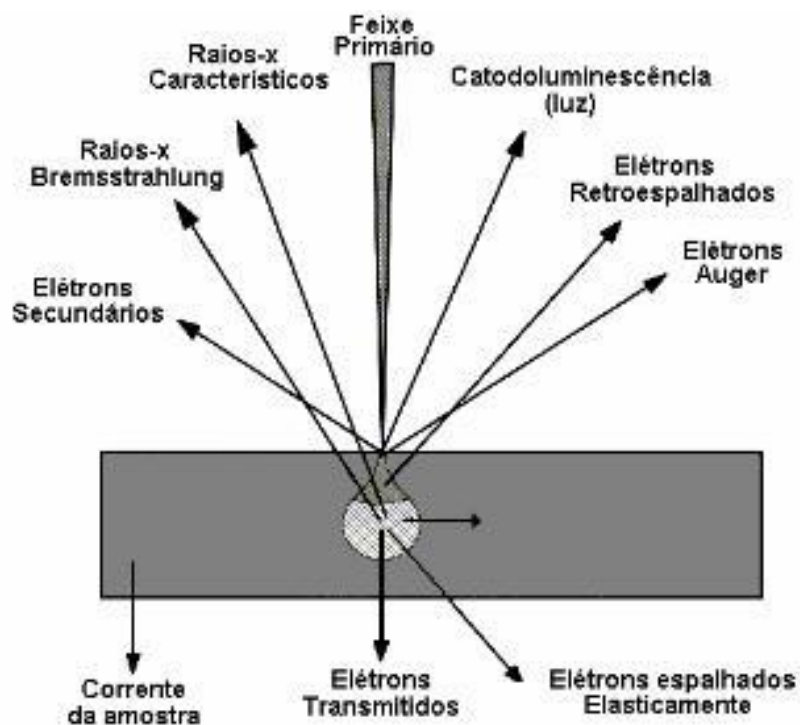


Figura 20. Sinais emitidos e volume de interação na amostra

A microsonda acoplada ao MEV é um importante instrumento para a microanálise química de materiais. Os raios X característicos emitidos pelos elementos presentes na amostra, podem ser analisados pelo método de dispersão de energia (EDS) ou por dispersão de comprimento de onda (WDS).

3.6.7 Susceptímetro Magnético

O susceptímetro magnético é uma técnica utilizada para determinar transformações de fases, temperaturas de Curie e/ou Néel e identificar minerais portadores magnéticos de uma amostra. Para isso, o equipamento opera gerando um campo magnético de corrente alternada de baixa frequência e baixa intensidade ao redor de um sensor. Quando a amostra é inserida no suporte, a alteração resultante do campo é identificada pelo sistema e convertida em susceptibilidade

magnética. É uma técnica não destrutível e as amostras não precisam de uma preparação especial.

3.7 Fundamentos de Magnetismo

Quando se aplica um campo magnético externo \vec{H} , também chamado de intensidade do campo magnético, em um determinado material, ocorre uma mudança nos dipolos magnéticos deste, proporcionando o surgimento de uma resposta macroscópica que é a magnetização \vec{M} (Momento magnético por unidade de volume).

A indução magnética, \vec{B} , é o campo proveniente da própria magnetização do material e do campo externo aplicado, sua relação, no Sistema Internacional, entre os três campos (B, H e M) é dada pela equação.

$$B = \mu_0 \cdot (H + M) \quad \text{(VIII)}$$

Onde,

B = indução magnética ou densidade de fluxo magnético, as unidades são tesla ou Wb/m²;

μ_0 = é a permeabilidade do vácuo, que é uma constante universal com o valor de $4\pi \times 10^{-7}$ H/m;

H = intensidade do campo magnético, a unidade é A/m;

M = momento magnético por unidade de volume.

A magnitude de M é proporcional ao campo aplicado da seguinte maneira:

$$M = k_m \cdot H \quad \text{(IX)}$$

Onde,

k_m = susceptibilidade magnética, adimensional.

Os materiais podem ser classificados de acordo com a orientação de seus momentos magnéticos em relação ao campo magnético externo. Essas classes são: diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, antiferromagnéticos e ferrimagnéticos.

3.7.1 Diamagnetismo e Paramagnetismo

Os materiais diamagnéticos apresentam susceptibilidade magnética negativa, enquanto que, nos materiais paramagnéticos a susceptibilidade é positiva.

O diamagnetismo, está presente, em maior ou menor grau em todos os materiais. Contudo, na maior parte deles, sua intensidade é muito baixa e só persiste enquanto um campo magnético externo estiver aplicado. Na ausência de campo externo, os átomos de um material diamagnético têm momento nulo. O fenômeno do diamagnetismo freqüentemente está mascarado por outros mais fortes, como paramagnetismo e ferromagnetismo.

A figura 21 demonstra a configuração de um material diamagnético com e sem aplicação de um campo externo. Verifica-se que a direção é oposta à direção do campo aplicado o que tende a enfraquecer o campo externo, já que irá repelir a substância diamagnética.

Segundo Dunlop e Ozdemir (1997), a maioria dos minerais não ferrosos como o quartzo, calcita e feldspato, são puramente diamagnéticos, com susceptibilidade magnética pequenas e independentes da temperatura. Sendo assim, se uma amostra contém baixa quantidade de minerais ferromagnéticos e paramagnéticos, em altas temperaturas, o momento magnético de uma amostra de quartzo poder ser verificado.

Arantes (2010) afirma que a susceptibilidade magnética dos materiais diamagnéticos praticamente não dependem da temperatura, devido ao fato que o diamagnetismo não surge da interação entre o campo magnético e o momento que pode ser desordenado com a temperatura, mas sim da interação do campo com as cargas eletrônicas alterando sua velocidade. Como a velocidade dos elétrons é uma

função dos estados eletrônicos, e estes são independentes da temperatura, isso faz com que a susceptibilidade também não dependa da temperatura.

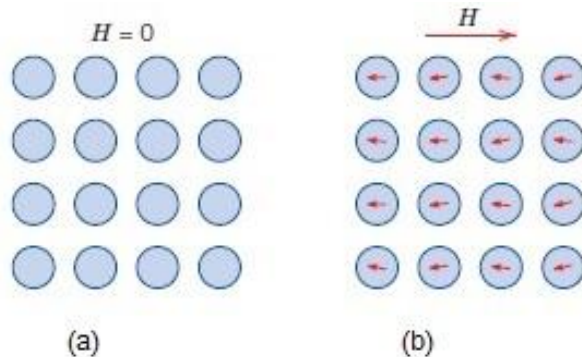


Figura 21. Configuração dos dipolos em um material diamagnético, (a) sem presença de campo externo (b) com presença de campo externo (CALLISTER, 2006).

Nos materiais paramagnéticos, os átomos individuais possuem momentos magnéticos, mas suas orientações ao acaso resultam em magnetização nula para um grupo de átomos, sendo dessa forma, não magnéticos na ausência de um campo externo e magnéticos sobre a influência de um campo magnético aplicado.

A resposta ao campo magnético externo nos materiais paramagnéticos é bem menos intenso que nos ferromagnéticos. A figura 22 exibe a configuração dos dipolos magnéticos para materiais paramagnéticos com e sem aplicação de um campo externo.

A susceptibilidade magnética do comportamento paramagnético é explicado de acordo com a equação (X), a qual é decrescente com o aumento da temperatura.

$$X_m = \frac{\mu_m^2 \cdot N_v \cdot \mu_o}{3 \cdot K_B \cdot T} \quad (X)$$

Onde,

X_m = susceptibilidade magnética, adimensional;

μ_m = magnitude dos momentos magnéticos presentes no material;

K_B = constante de Boltzmann;

T = temperatura absoluta;

μ_0 = permeabilidade no vácuo.

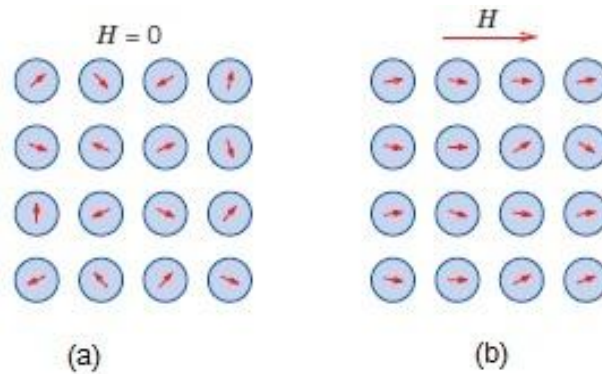


Figura 22. Configuração dos dipolos em um material paramagnético, (a) sem presença de campo externo (b) com presença de campo externo (CALLISTER, 2006).

A tabela 4 apresenta as susceptibilidade magnéticas de alguns minerais diamagnéticos e paramagnéticos.

Tabela 4. Susceptibilidade de alguns minerais paramagnéticos e diamagnéticos (DUNLOP & OZDEMIR, 1997).

Mineral	Susceptibilidade magnética (por unidade de massa)	
Diamagnético	$(10^{-5} \text{ emu/gOe})$	$(10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg})$
Quartzo (SiO_2)	-0,5	-0,62
Calcita (CaCO_3)	-0,38	-0,48
Forsterita (Mg_2SiO_4)	-0,31	-0,39
Água (H_2O)	-0,72	-0,90
Paramagnético		
Pirita (FeS_2)	+24	+30
Siderita (FeCO_3)	+98	+123
Ilmenita (FeTiO_3)	+ 80 a 90	+ 100 a 113
Fayalita (Fe_2SiO_4)	+100	+126

3.7.2 Ferromagnetismo

Materiais ferromagnéticos são magnéticos na ausência de um campo magnético externo aplicado. Quando um campo magnético é ausente, o material tem a magnetização espontânea, que é um resultado dos momentos magnéticos ordenados, ou seja, para o ferromagnetismo, os átomos são simétricos e alinhados na mesma direção, criando um campo magnético permanente.

Quando um campo magnético externo é aplicado em um material ferromagnético todos os seus momentos magnéticos continuam ordenados, mas agora na mesma direção e sentido do campo aplicado. Contudo, se diminuirmos o campo magnético, o fluxo magnético não reduzirá rapidamente como o campo, já que os materiais ferromagnéticos tem como característica a tendência de conservação de suas propriedades magnéticas mesmo na ausência do estímulo que as gerou.

Os materiais somente são ferromagnéticos abaixo de sua correspondente temperatura de Curie (temperatura na qual o material se torna paramagnético, pois os átomos perdem seus momentos magnéticos ordenados).

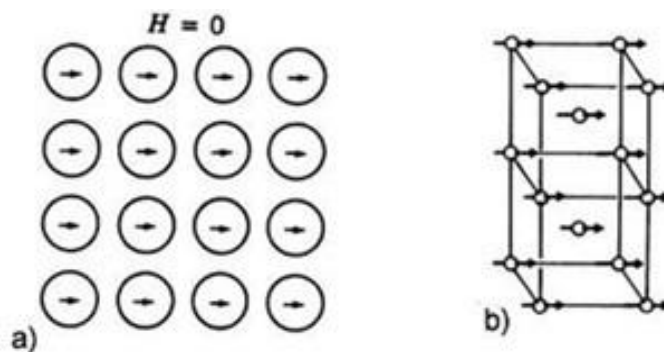


Figura 23. Configuração dos dipolos em um material ferromagnético. (a) sem presença de campo externo (b) com presença de campo externo, H.

3.7.3 Ferrimagnetismo e Antiferromagnetismo

Analogamente à temperatura de Curie, define-se a temperatura de Néel para o caso das substâncias antiferromagnéticas. Quando os momentos magnéticos cancelam-se totalmente, a estrutura é classificada como antiferromagnética. De maneira diferente, quando os momentos em uma direção excedem os da direção oposta, a estrutura é classificada como ferrimagnética.

Para os materiais ferrimagnéticos, quando não tem um campo magnético externo aplicado, o material tem um magnetismo espontâneo que é o resultado de momentos magnéticos ordenados. Nesse caso, existem momentos magnéticos de um íon que são alinhados em uma direção com certa magnitude, e outros que são alinhados na direção oposta, com uma magnitude menor, devido a isso há um campo magnético resultante presente.

Para os materiais antiferromagnéticos, os momentos magnéticos são iguais e são alinhados em direções opostas, resultando em um momento magnético espontâneo nulo em todas as temperaturas abaixo da temperatura de Néel. Esses materiais também são fracamente magnéticos na presença de um campo magnético aplicado.

A figura 24 mostra um comparativo da direção e intensidade dos momentos magnéticos das estruturas ferromagnéticas, ferrimagnéticas e antiferromagnéticas.

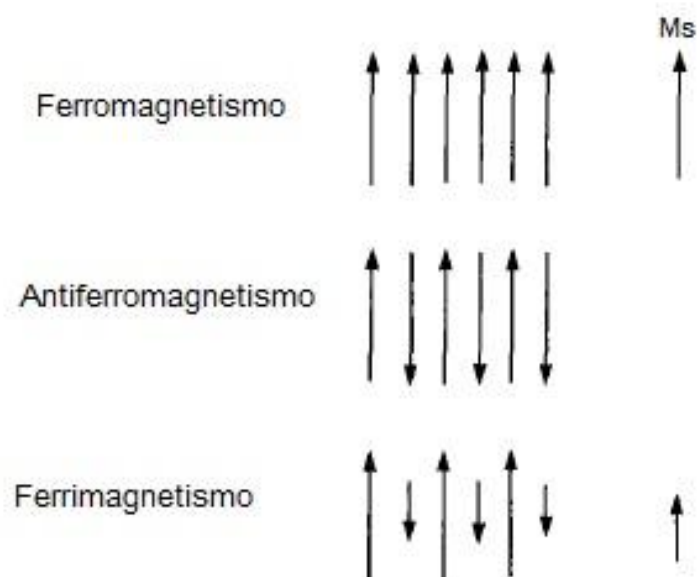


Figura 24. Comparativo dos diferentes momentos magnéticos e da magnetização espontânea dos materiais ferromagnéticos, antiferromagnéticos e ferrimagnéticos.

A figura 25 mostra a estrutura e classificação magnética dos principais minérios de ferro do Brasil.

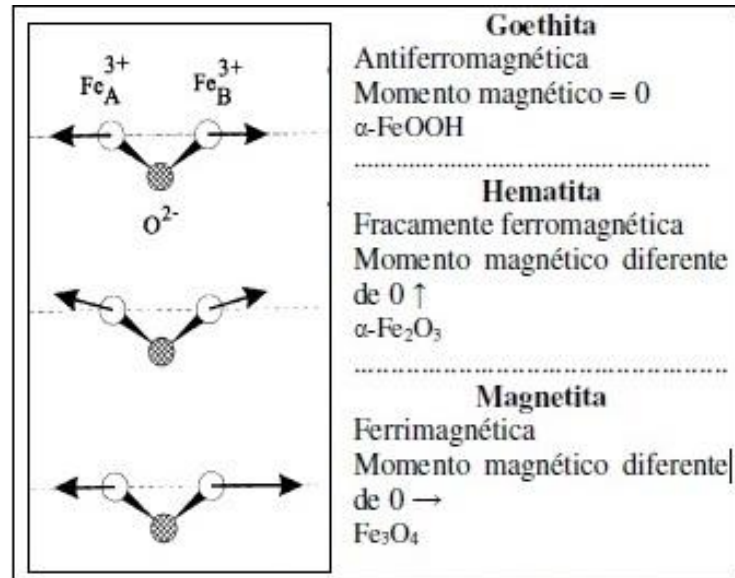


Figura 25. Estrutura magnética dos principais minérios de ferro do Brasil (WOLFF, 2009)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia para a realização desse trabalho contempla: preparação das amostras, caracterização tecnológica e ensaios termomagnéticos em diferentes faixas granulométricas.

Foram utilizadas duas amostras de rejeitos, com características físicas e químicas diferentes, coletadas em minerações no Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais, sendo a primeira o rejeito de um processo de concentração por flotação e a segunda a lama que advém da etapa de deslamagem (ultrafinos).

A preparação das amostras consistiu em realizar a secagem das amostras a 90°C durante 24 horas, em seguida, homogeneização e quarteamento para as devidas caracterizações e ensaios termomagnéticos.

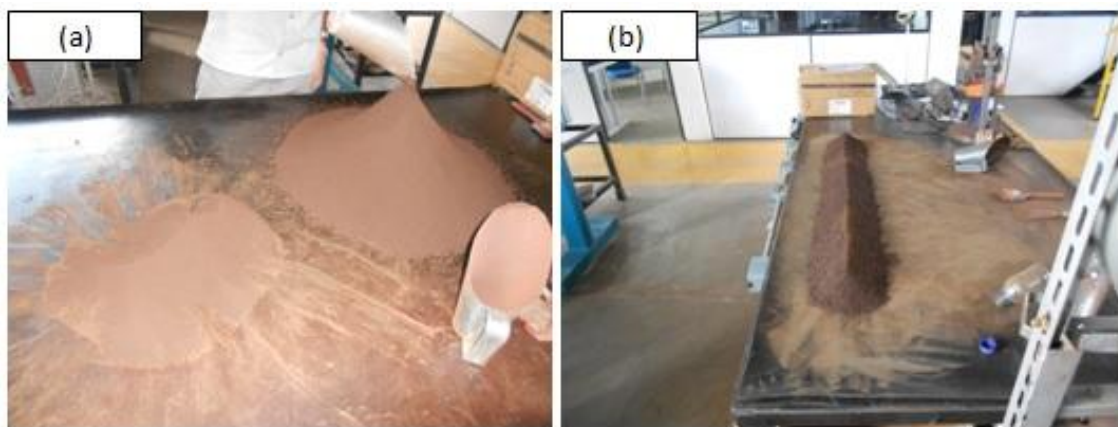


Figura 26. (a) homogeneização da amostra (b) pilha alongada

4.1 Caracterização Tecnológica

A caracterização de minérios é uma etapa essencial na operação de tratamento de minérios, pois fornece informações valiosas para o correto

dimensionamento da rota de processo. Por outro lado, a caracterização do rejeito proveniente do beneficiamento identifica as limitações tecnológicas dos processos comumente utilizados, como exemplo, a quantidade dos minerais de interesse que compõem o rejeito final.

A figura 27 exhibe o fluxograma para caracterização tecnológica das amostras, juntamente com os ensaios termomagnéticos. As caracterizações e os ensaios foram realizados tanto na porção global, quanto por faixa granulométrica.

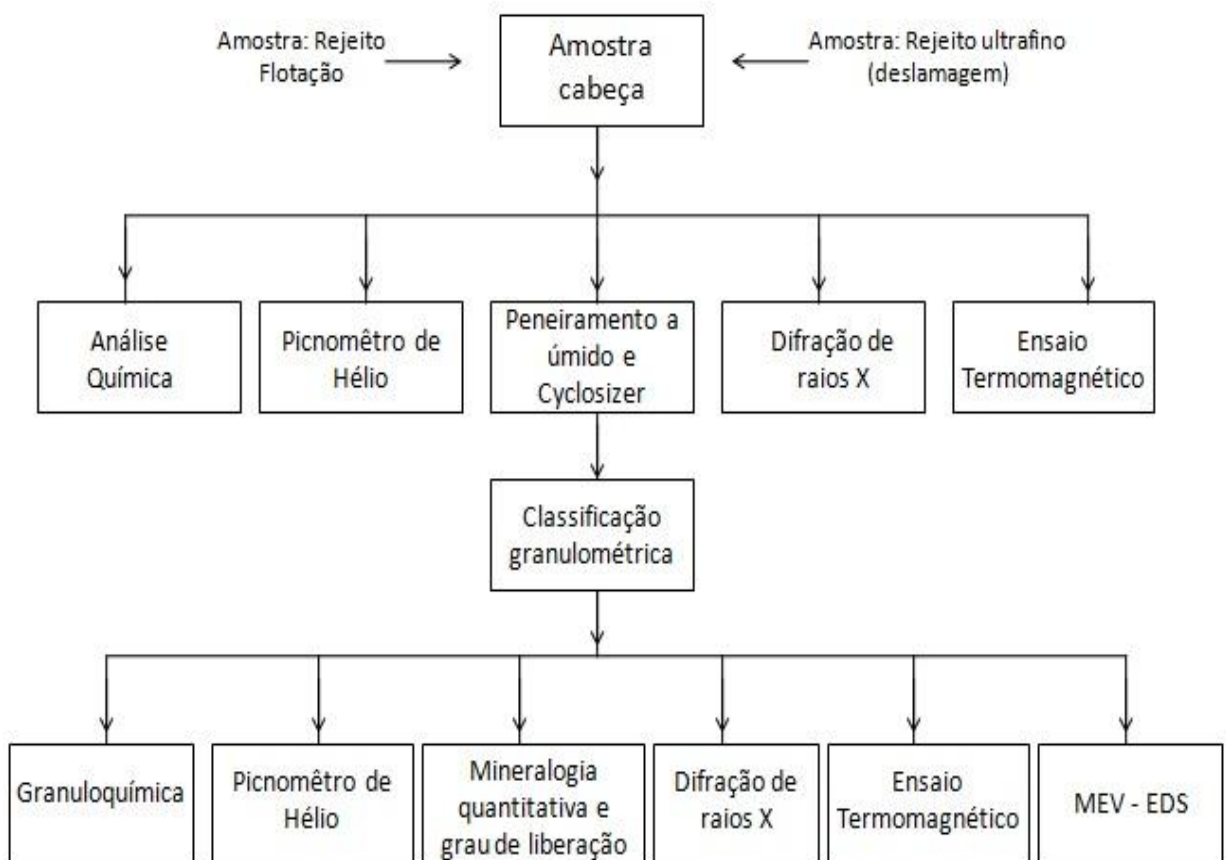


Figura 27. Fluxograma para caracterização tecnológica e ensaios termomagnéticos das amostras.

4.1.1 Análise Granulométrica

A análise da distribuição granulométrica foi realizada por peneiramento a úmido, utilizando peneiras da série Tyler, com aberturas de 150 μm , 106 μm , 75 μm , 53 μm e 45 μm . O material passante na última malha foi alimentado no *cyclosizer* (marca CDC, modelo CL-502) com tempo de lavagem de 6 minutos e elutriação por 10 minutos, totalizando a classificação de 11 diferentes faixas de tamanhos. O peneiramento a úmido juntamente com o *cyclosizer* é mostrado na figura 28.

O material passante no último ciclone do *cyclosizer* foi coletado em bombonas e filtrado em filtros de pressão, como pode ser visto na figura 29.



Figura 28. (a) peneiramento a úmido (b) cyclosizer



Figura 29. (a) bombona com o material passante no último ciclone (b) filtros de pressão

4.1.2 Análise química

As amostras cabeça e suas frações granulométricas foram pulverizados a 80% passante em 200 mesh e, em seguida, analisadas pela fluorescência de raios X utilizando o método da pastilha fundida para determinação de Fe, SiO₂, Al₂O₃, Mn, P, CaO, MgO, TiO₂, K₂O e Cr₂O₃. O índice de PCC foi determinado por calcinação em forno mufla, a 1000°C.

4.1.3 Densidade real

Foram separadas alíquotas das duas amostras, na porção global e nas 11 faixas granulométricas classificadas no peneiramento a úmido e no cyclosizer.

A densidade real foi realizada em triplicata pelo método do picnômetro de hélio, a média dos três testes compõem o resultado final. O equipamento é especificamente projetado para medir o volume real de um material sólido. Para se obter a densidade real basta dividir a massa do material (previamente pesado em uma balança de precisão) pelo volume obtido.

4.1.4 Identificação de fases cristalinas

As duas amostras cabeça e todas as suas frações granulométricas pulverizadas a um tamanho inferior a 0,045mm, foram devidamente preparadas e analisadas em um difratômetro de raios X, modelo XRD-6000 Shimadzu, equipado com tubo de Cu-K α ($\lambda = 1.54184 \text{ \AA}$) e monocromador de grafite. As medidas foram feitas entre 5° - 80° (2 Θ) com velocidade do goniômetro de 1°/min, pelo método do pó.

4.1.5 Mineralogia quantitativa e grau de liberação do quartzo

Foram elaboradas seções polidas das frações granulométricas de todas as amostras e estas foram então descritas com o auxílio de um microscópio ótico. Foi utilizado o método de contagem de grãos (mínimo de 500 grãos), possibilitando identificar a proporção em peso de cada fase mineralógica presente.

Foi determinado também o grau de liberação do mineral quartzo em todas as frações granulométricas analisadas. O método utilizado foi o método de Gaudin.

4.1.6 Microscópio eletrônico de varredura - microsonda EDS

Fotomicrografias e análises químicas pontuais foram realizadas pelo microscópio eletrônico de varredura, da marca Tescan, com espectrômetro de energia dispersiva de raios X da marca Oxford.

4.2 Ensaio Termomagnético

As curvas termomagnéticas foram geradas por meio do susceptímetro magnético Bartington MS3. As medidas foram feitas variando a temperatura desde ambiente até 720°C e em seguida retornando à temperatura ambiente, com taxas de aquecimento e resfriamento de 15°C/min. As análises termomagnéticas fornecem as temperaturas de Curie e/ou de Néel de cada fase magnética.

A determinação dessas temperaturas pela análise da variação da susceptibilidade em função da temperatura é o método mais usado para identificar os minerais portadores magnéticos de uma amostra.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização Tecnológica

Nesse tópico é apresentado os resultados, juntamente com as discussões, da caracterização tecnológica e dos ensaios termomagnéticos.

5.1.1 Análise Granulométrica

A figura 30 apresenta o comparativo da distribuição granulométrica das amostras obtidas por peneiramento a úmido e *cyclosizer*. Os valores de d_{80} e o percentual de lamas (fração menor que $10\mu\text{m}$) foram respectivamente: $18\mu\text{m}$ e 62% para rejeito ultrafino, $70\mu\text{m}$ e 15% para rejeito da flotação. O primeiro rejeito é comumente chamado de argiloso (partículas com granulometria de siltes e argilas), o segundo é arenoso (granulometria de areia médias e finas).

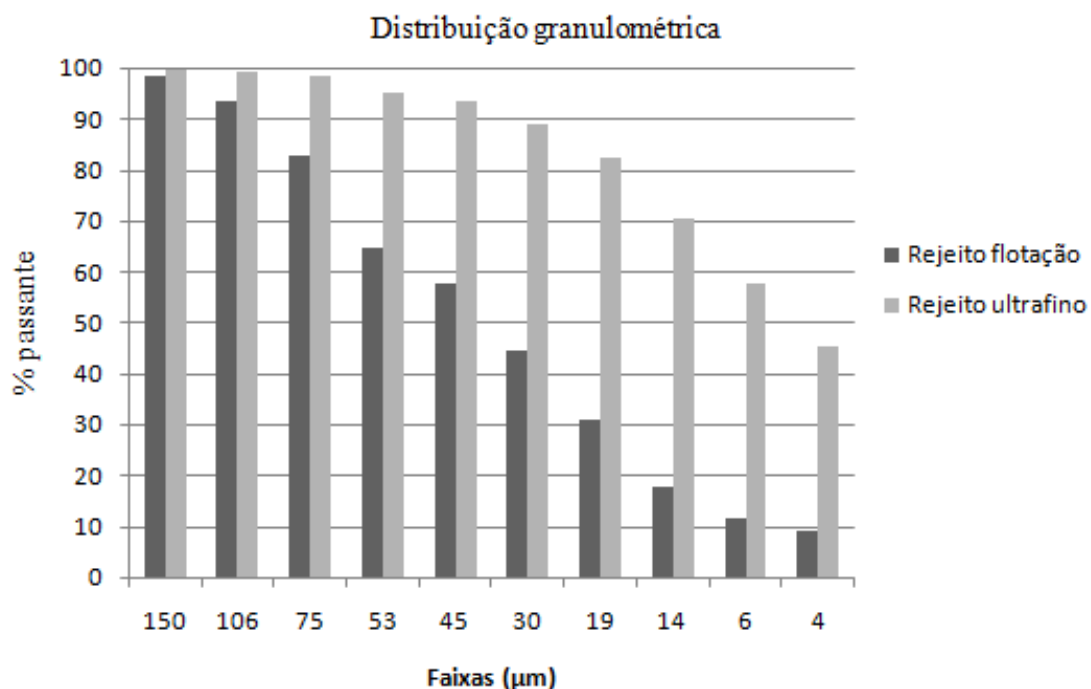


Figura 30. Distribuição granulométrica das amostras

5.1.2 Análise Química

As tabelas 5 e 6 mostram as composições químicas globais e por faixa granulométrica das amostras. Verifica-se o aumento da quantidade de ferro contido em frações inferiores a $45\mu\text{m}$, logo com a predominância do quartzo em frações superiores. Contaminantes como alumina e fósforo se concentram na fração menor que $4\mu\text{m}$. A perda por calcinação obteve os maiores valores abaixo de $4\mu\text{m}$, indicando presença de hidróxidos de ferro nessa faixa.

O rejeito da flotação apresenta 23,76% em peso de ferro em sua composição química global, ainda com 64,85% de quartzo, 0,55% de alumina e 0,025% de fósforo. Entretanto, no intervalo entre $15\mu\text{m}$ e $4\mu\text{m}$, tem-se em média um teor de 53,6% de ferro, 19,9% quartzo, 1,19% alumina e 0,04% de fósforo (tabela 5).

A composição global do rejeito ultrafino possui 44,4% em peso de ferro, 21,05% de quartzo, 5,88% de alumina e 0,142% de fósforo. No intervalo entre $14\mu\text{m}$ e $4\mu\text{m}$ tem-se em média 55,74% ferro, 30,81% quartzo, 1,33% alumina e 0,061% de fósforo (tabela 6).

Constata-se nas tabelas 5 e 6 que os contaminantes como fósforo e alumina apresentam altas concentrações na granulometria inferior a $4\mu\text{m}$.

Os resultados das análises químicas estratificados demonstram que, para ambos os resíduos, a faixa entre $15\mu\text{m}$ e $4\mu\text{m}$ contém material com teor de ferro acima de 53% e alto grau de liberação dos minerais. Entretanto, o comportamento e as características das partículas ultrafinas tornam-se obstáculos para a alimentação nos processos de concentração convencionais.

Tabela 5. Análise química global e por faixa granulométrica do rejeito ultrafino

Faixa (μm)	Fe %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Mn %	P %	CaO %	MgO %	TiO ₂ %	K ₂ O %	Cr ₂ O ₃ %	PPC %
Global	44,4	21,05	5,88	1,657	0,142	0,46	1,19	0,213	0,059	0,01	-
+ 150	43,64	32,08	2,72	0,944	0,084	0,327	0,61	0,222	0,046	0,024	-
- 150 + 106	32,21	51,8	0,76	0,292	0,045	0,232	0,29	0,135	<0,01	<0,01	-
- 106 + 75	28,03	57,48	0,59	0,22	0,032	0,202	0,23	0,104	<0,01	<0,01	-
- 75 + 53	23,73	63,29	0,69	0,2	0,033	0,262	0,39	0,095	<0,01	<0,01	0,98
- 53 + 45	20,05	68,85	0,65	0,189	0,03	0,3	0,34	0,084	<0,01	0,02	0,75
- 45 + 30	48,61	28,76	0,41	0,189	0,032	0,124	0,1	0,13	<0,01	<0,01	0,64
- 30 + 19	43,24	35,58	0,57	0,213	0,033	0,248	0,23	0,119	<0,01	<0,01	0,86
- 19 + 14	49,17	27,02	0,74	0,227	0,038	0,278	0,33	0,14	<0,01	<0,01	1,01
- 14 + 6	54,68	17,86	1,03	0,28	0,048	0,351	0,53	0,191	<0,01	<0,01	1,4
- 6 + 4	56,8	12,95	1,64	0,39	0,075	0,427	0,97	0,238	0,024	<0,01	1,96
- 4	38,15	15,51	12,38	3,442	0,242	0,221	2,03	0,27	0,133	0,014	9,34

Tabela 6. Análise química global e por faixa granulométrica do rejeito de flotação

Faixa (µm)	Fe %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Mn %	P %	CaO %	MgO %	TiO ₂ %	K ₂ O %	Cr ₂ O ₃ %	PPC %
Global	23,76	64,85	0,55	0,125	0,025	0,07	0,15	0,093	<0,01	<0,01	-
+ 150	3,336	94,78	0,26	0,038	0,008	0,12	<0,10	0,021	0,011	<0,01	-
- 150 + 106	1,548	97,6	0,14	0,014	0,007	0,049	<0,10	0,011	<0,01	<0,01	-
- 106 +75	2,685	96	0,17	0,021	0,007	0,039	<0,10	0,03	<0,01	<0,01	-
- 75 +53	6,073	91,07	0,25	0,027	0,011	0,043	<0,10	0,04	<0,010	<0,01	0,06
-53 +45	10,71	83,71	0,32	0,045	0,012	0,082	0,11	0,067	<0,01	<0,01	0,14
-45 +30	34,43	49,91	0,28	0,073	0,017	0,069	<0,010	0,11	<0,01	<0,01	0,15
-33 +21	28,28	58,31	0,39	0,078	0,023	0,075	<0,10	0,103	<0,01	<0,01	0,26
-21 +15	39,69	41,35	0,57	0,107	0,022	0,094	0,16	0,134	<0,01	0,011	0,48
-15 +7	51,805	23,47	0,96	0,187	0,03	0,142	0,36	0,171	0,018	0,011	0,78
-7 +4	55,5	16,34	1,42	0,28	0,051	0,28	0,65	0,237	0,032	0,013	1,3
-4	39,95	24,17	7,99	1,642	0,16	0,2	1,14	0,28	0,116	0,062	6,09

5.1.3 Densidade real

A tabela 7 apresenta a densidade real das amostras na porção global e por faixa granulométrica. Para ambas as amostras, a densidade aumenta para fração abaixo de $-45\mu\text{m}$, esse fato é explicado pela concentração de minerais portadores de ferro nessa faixa, os quais possuem densidades maiores que o quartzo, mineral predominante na fração acima de $-45\mu\text{m}$. Essa análise é comprovada avaliando a granulométrica das amostras (tabela 5 e 6), mineralogia (tabela 8 e 9) e os difratogramas de raios X (figura 31 e 32).

Tabela 7. Densidade real das amostras globais e por faixas granulométricas

Rejeito flotação		Rejeito ultrafino	
Faixa (μm)	Densidade real (g/cm^3)	Faixa (μm)	Densidade real (g/cm^3)
Global	3,22	Global	3,99
+ 150	2,73	+ 150	4,18
- 150 + 106	2,67	- 150 + 106	4,14
- 106 + 75	2,71	- 106 + 75	3,28
- 75 + 53	2,77	- 75 + 53	3,05
- 53 + 45	2,86	- 53 + 45	3,1
- 45 + 33	3,49	- 45 + 30	4,17
- 33 + 21	3,3	- 30 + 19	3,87
- 21 + 15	3,68	- 19 + 14	4,13
- 15 + 7	4,18	- 14 + 6	4,38
- 7 + 4	4,36	- 6 + 4	4,46
- 4	3,48	- 4	3,5

5.1.4 Identificação de fases cristalinas

Os difratogramas de raios X por faixa granulométrica para ambas as amostras (figura 2 e 3) identificaram redução da intensidade dos picos de quartzo e aumento dos picos de hematita à medida que a granulometria diminui. Os picos da caulinita se acentuam na fração menor que 4 μ m.

Os difratogramas confirmam as análises obtidas pela microscopia óptica, com a qual se obteve a mineralogia quantitativa das amostras. Verifica-se ainda na figura 31 a predominância do quartzo na amostra global do rejeito de flotação. De maneira diferente, a figura 32 apresenta a predominância da hematita na amostra global do rejeito ultrafino. Esses resultados são comprovados quantitativamente pela análise química global das amostras (Tabelas 5 e 6).

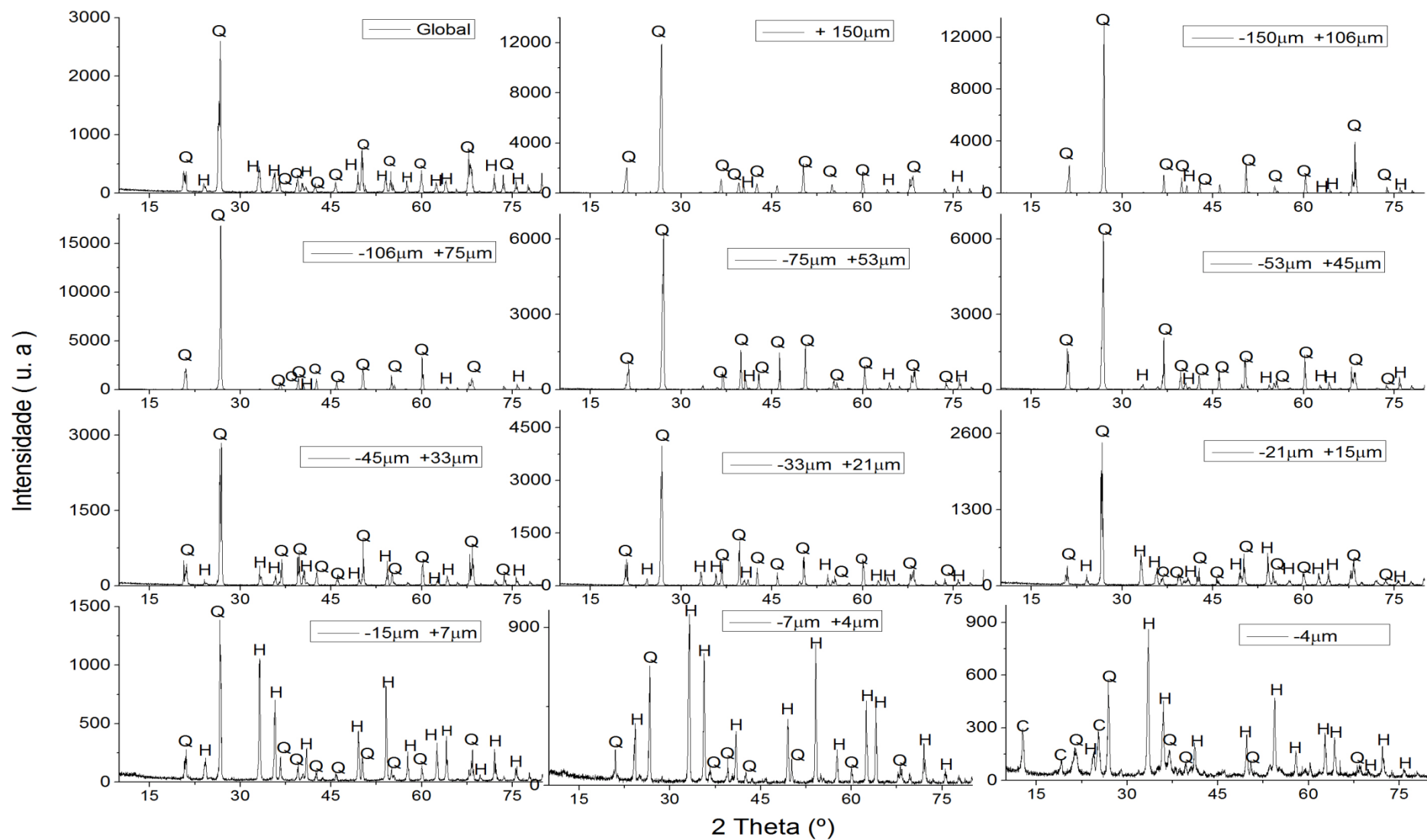


Figura 31. Difratogramas de raios X global e das 11 faixas granulométricas do rejeito de flotação. Q = quartzo, H = hematita e C = Caulinita.

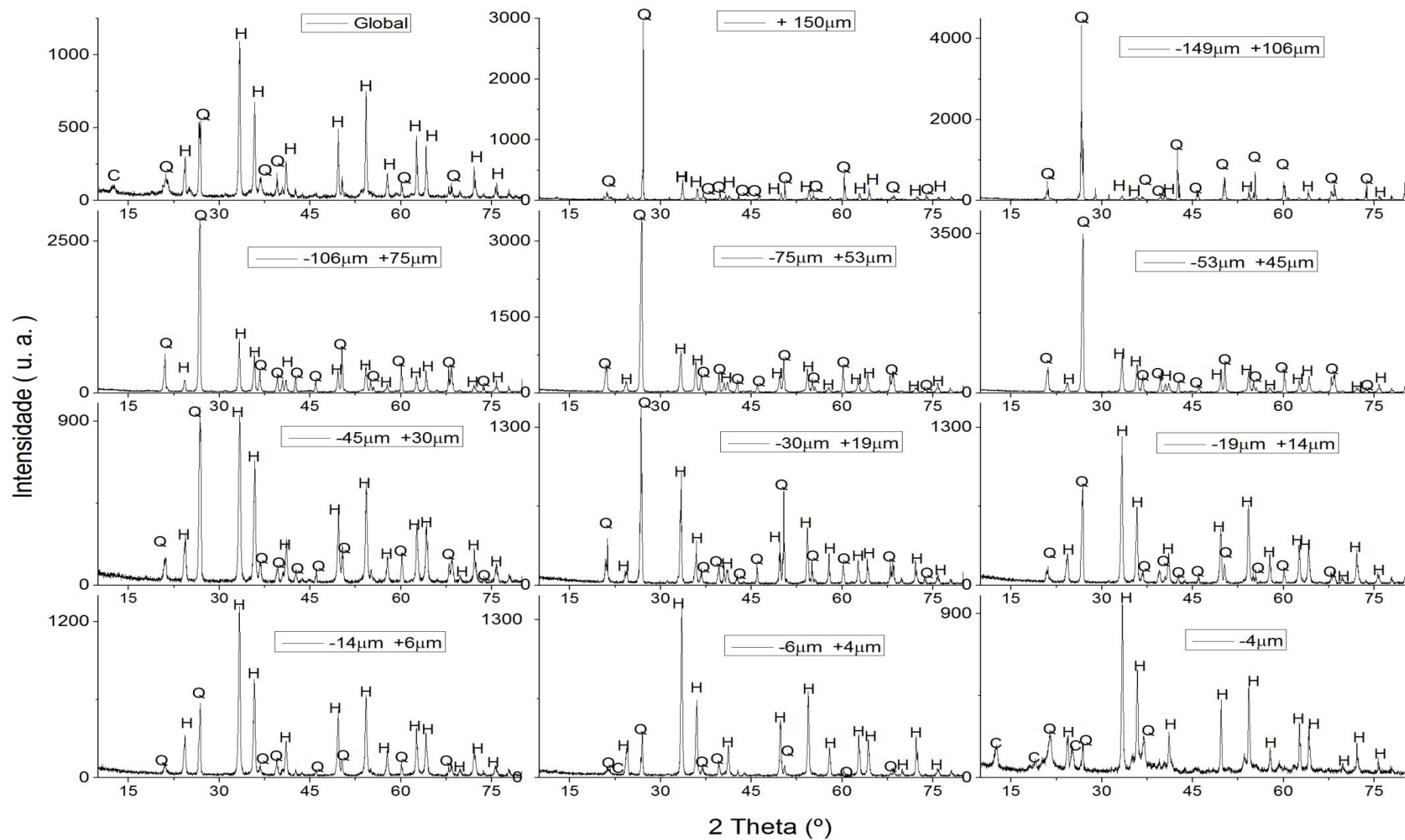


Figura 32. Difratoigramas de raios X global e das 11 faixas granulométricas do rejeito ultrafino. Q = quartzo, H = hematita e C = Caillinita.

5.1.5 Mineralogia e grau de liberação do quartzo

As tabelas 8 e 9 apresentam as principais fases mineralógicas identificadas nos resíduos de processamento de minério de ferro. O quartzo é a fase predominante nas frações grossas e a hematita nas frações mais finas. As fases mineralógicas de ferro mais abundantes nas amostras são hematita tabular monocristalina e hematita granular monocristalina.

A goethita apresenta-se em maior quantidade na faixa menor que $7\mu\text{m}$, em ambas as amostras. O rejeito ultrafino possui maior índice de PPC do que o rejeito da flotação (tabelas 5 e 6), devido principalmente ao conteúdo de goethita.

Tabela 8. Mineralogia quantitativa do rejeito de flotação.

Análise mineralógica: Rejeito de flotação											
Faixa (μm) / %massa	HTM	HGM	HTP	HGP	HL	MA	MG	GO	A	QZ	O
+ 150	0,0	0,0	0,0	0,0	0,38	0,0	0,38	0,38	0,19	98,46	0,19
- 150 + 106	0,0	0,0	0,0	0,0	0,57	0,0	0,0	0,19	0,0	99,05	0,19
- 106 +75	0,0	0,4	0,0	0,0	1,59	0,0	0,2	0,0	0,20	97,42	0,2
- 75 +53	1,67	1,12	0,0	0,0	3,53	0,19	0,0	0,19	0,19	92,94	0,19
-53 +45	3,23	2,85	0,57	0,0	4,17	0,0	0,0	0,57	0,57	86,91	1,14
-45 +30	31,45	12,24	0,38	0,0	10,73	1,32	0,19	0,19	0,0	43,31	0,19
-33 +21	30,99	10,92	0,0	0,0	4,87	0,39	0,19	0,0	0,0	52,44	0,19
-21 +15	41,69	9,47	0,17	0,0	2,66	0,33	0,0	0,17	0,17	45,18	0,17
-15 +7	56,27	25,49	0,0	0,0	1,18	0,59	0,0	1,96	0,0	14,12	0,39
-7 +4	65,80	17,56	0,0	0,0	0,55	1,66	0,0	4,81	0,0	8,32	1,29

HTM = Hematita tabular monocristalina; HGM = Hematita granular monocristalina; HTP = Hematita tabular policristalina
HGP = Hematita granular policristalina; HL = Hematita Lobular; MA = Martita; MG = magnetita;
GO = Goethita; A = Agregado; QZ = Quartzo; O = Outros.

Tabela 9. Mineralogia do rejeito ultrafino

Análise mineralógica: Rejeito ultrafino											
Faixa (μm) / %massa	HTM	HGM	HTP	HGP	HL	MA	MG	GO	A	QZ	O
+ 150	2,41	0,72	0,24	0,00	31,33	14,26	3,61	6,02	0,48	36,14	4,58
- 150 + 106	1,69	1,32	0,38	0,19	21,09	10,55	0,38	3,20	1,69	56,12	3,39
- 106 +75	1,31	1,31	0,37	0,00	26,59	7,68	0,37	3,00	0,56	57,49	1,31
- 75 +53	2,26	4,33	0,38	0,19	12,43	3,01	0,38	2,82	0,75	71,19	2,26
-53 +45	5,24	3,66	0,17	0,17	6,81	1,22	0,17	3,66	0,00	76,96	1,92
-45 +30	34,56	19,47	0,18	0,00	7,02	4,74	0,53	2,81	0,00	30,00	0,7
-30 +19	36,36	11,27	0,00	0,00	7,27	0,36	0,00	2,00	0,00	40,73	2
-19 +14	49,38	16,40	0,18	0,00	1,25	2,32	0,36	3,92	0,00	23,89	2,32
-14 +6	50,20	23,83	0,00	0,00	0,78	0,98	0,00	8,40	0,00	14,26	1,56
-6 +4	66,55	17,63	0,00	0,00	0,54	0,54	0,00	10,43	0,00	3,24	1,08

HTM = Hematita tabular monocristalina; HGM = Hematita granular monocristalina; HTP = Hematita tabular policristalina
HGP = Hematita granular policristalina; HL = Hematita Lobular; MA = Martita; MG = magnetita;
GO = Goethita; A = Agregado; QZ = Quartzo; O = Outros.

A tabela 10 exibe o grau de liberação do quartzo por faixa granulométrica. A liberação total dos grãos ficou abaixo de $-7\mu\text{m}$ para o rejeito da flotação e $-6\mu\text{m}$ para o rejeito ultrafino.

Tabela 10. Grau de liberação do quartzo

Rejeito flotação		Rejeito ultrafino	
Faixa (μm)	Grau de liberação (%)	Faixa (μm)	Grau de liberação (%)
+ 150	97	+ 150	94
- 150 + 106	94	- 150 + 106	95
- 106 + 75	95	- 106 + 75	93
- 75 + 53	96	- 75 + 53	92
- 53 + 45	86	- 53 + 45	88
- 45 + 33	94	- 45 + 30	91
- 33 + 21	88	- 30 + 19	92
- 21 + 15	96	- 19 + 14	95
- 15 + 7	97	- 14 + 6	89
- 7 + 4	100	- 6 + 4	100

5.1.6 Microscópio Eletrônico de Varredura com microssonda EDS

As figuras 33 e 34 apresentam as fotomicrografias das amostras de rejeito de flotação e rejeito ultrafino de minério de ferro, obtidas por microscópio eletrônico de varredura com detector de elétrons retroespalhados (BSE). As imagens permitem distinguir claramente as partículas que contêm maior teor de ferro (partículas claras) das de quartzo (partículas escuras). Na Figura 33, constata-se que à medida em que as frações vão reduzindo de tamanho há um aumento considerável de partículas claras (predominantemente hematita), o que está de acordo com os resultados de

análise química e mineralogia. O conteúdo de quartzo (partículas escuras) se apresenta majoritariamente em granulometrias maiores que as partículas da hematita.

A análise mineralógica por microscopia óptica (tabelas 8 e 9) quantificou a hematita preponderantemente na forma tabular, o que pode ser observado nas imagens obtidas pelo MEV, para ambas as amostras (figuras 33 e 34).

Na Figura 33, algumas partículas são identificadas por letras, que têm suas composições químicas mostradas na tabela 11, para confirmação da caracterização.

The figure consists of four scanning electron microscope (SEM) images arranged in a 2x2 grid. Each image shows a different size fraction of mineral particles. (a) Top-left: -150µm +106µm fraction, 500µm scale bar. Three particles are labeled with yellow arrows and letters: B (top-left), C (center), and A (right). (b) Top-right: -45µm +33µm fraction, 500µm scale bar. Two particles are labeled with yellow arrows and letters: D (top-right) and E (bottom-left). (c) Bottom-left: -21µm +15µm fraction, 100µm scale bar. One particle is labeled with a yellow arrow and letter: F (center). (d) Bottom-right: -4µm fraction, 20µm scale bar. Two particles are labeled with yellow arrows and letters: G (top-right) and H (center). The particles are generally dark and angular, with some lighter, more crystalline-looking particles.

Figura 33. Fotomicrografias das frações do rejeito flotação, imagens: (a) -150µm +106µm; (b) -45µm +33µm; (c) 21µm +15µm; (d)-4 µm.

65

Tabela 11. Análise EDS dos pontos indicados na figura 33

Análise EDS (%óxido)											
	Fe	Si	Al	P	Mn	Mg	Ca	Co	Cr	Ni	Cu
A	99,6	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	0,3	98,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	77,9	8,1	11,8	1,3	0,4	0	0,3	0	0	0	0
D	99,5	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	88	1,9	8	2,1	0	0	0	0	0	0	0
G	71,2	0,9	0	0	1,3	0	0	0	19	7,6	0
H	40,6	3,8	18	1,2	28	0	0,3	9,7	0	0	0,7

Na Figura 34 constata-se que as partículas claras (predominantemente hematita) estão presentes em quantidade significativa em todas as frações e em granulometrias próximas às do quartzo. Aqui, novamente, algumas partículas são identificadas por letras, que têm suas composições químicas mostradas na Tabela 12, para confirmação da caracterização.

Observa-se que a partícula B apresenta em sua composição os elementos Fe e Ti, característicos da titanomagnetita, a partícula E é uma partícula mista, contendo Fe, Al, Si, P, Mn e Ti. As partículas A, D, F e G representam o tipo predominante na amostra, pois são compostas, essencialmente, por óxido de ferro.

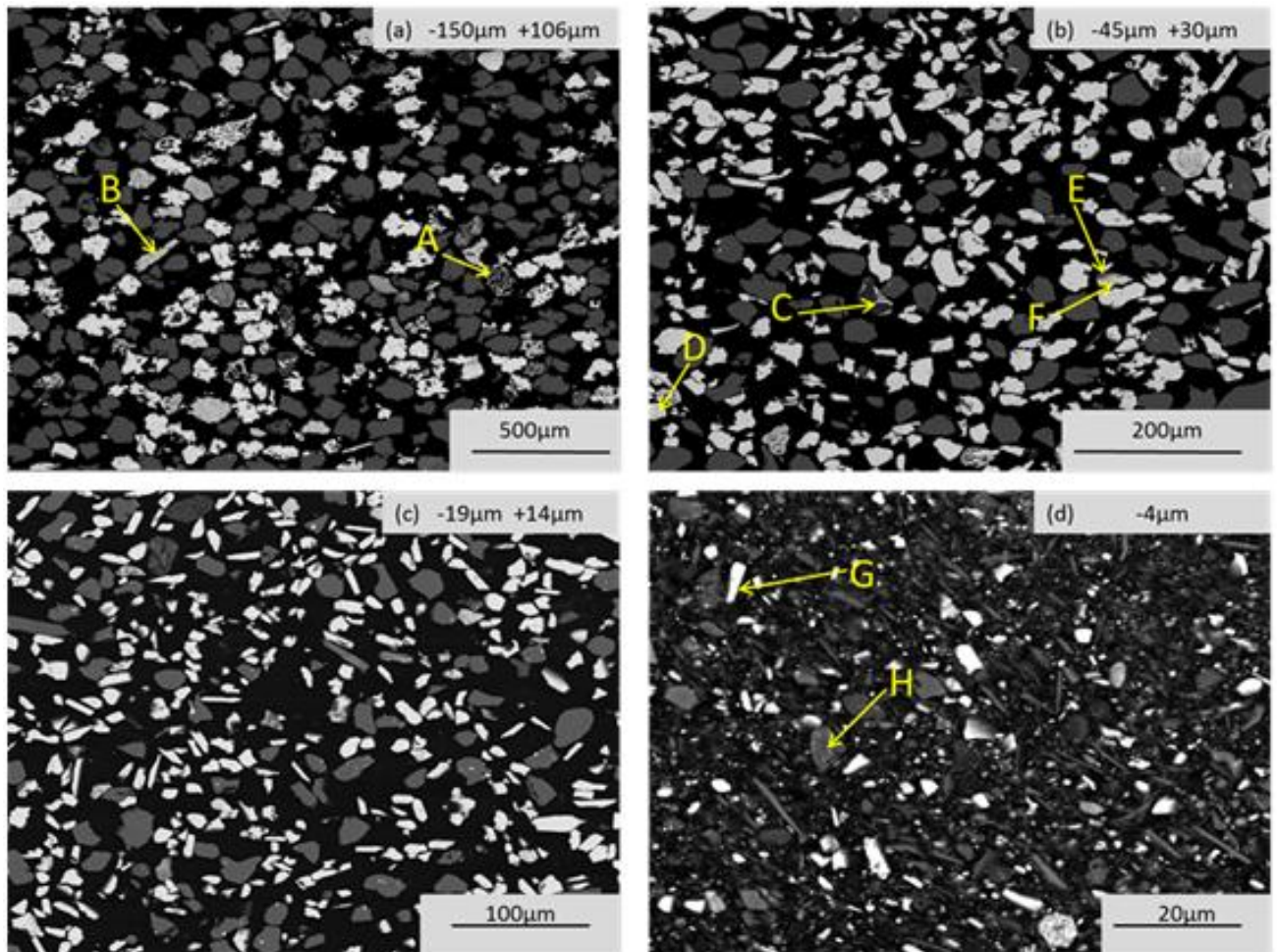


Figura 34. . Fotomicrografias das frações dorejeito ultrafino, imagens: (a) -150µm +106µm; (b) -45µm +30µm; (c) -19µm +14µm; (d)-4 µm.

Tabela 12. Análise EDS dos pontos indicados na figura 34.

Análise EDS (%óxido)											
	Fe	Si	Al	P	Mn	Mg	Ti	Co	Cr	Ni	Cu
A	88,7	4,7	3	1,1	0	1	0	0	0	0	0
B	72	0,8	0	0	0	0	27	0	0	0	0
C	1,2	0	98,8	0	0	0	0	0	0	0	0
D	100	0	0	0		0	0	0	0	0	0
E	27,8	35,7	31,4	0,5	3,8	0	0,8	0	0	0	0
F	96,5	0	1,4	0	0	0	1,4	0	0	0	0
G	98,1	0,9	1	0	0	0	0	0	0	0	0
H	12,8	45,6	41,3	0	0,3	0	0	0	0	0	0

5.2 Ensaio Termomagnético

O estudo termomagnético das amostras envolve um processamento térmico ao ar e sem adição de outros componentes químicos, com o qual foram determinadas as temperaturas de Curie da magnetita (580°C) e da hematita (675°C), evidenciadas pelo aumento de susceptibilidade próximo às temperaturas críticas de magnetização, denominado de efeito Hopkinson (DUNLOP & ÖZDEMIR, 1997).

Para minerais ferromagnéticos saturados, as curvas de aquecimento e resfriamento são ditas reversíveis se não ocorrem transformações mineralógicas durante o aquecimento e irreversíveis no caso contrário. Deste modo, a partir da comparação da forma da curva de aquecimento e da curva de resfriamento, podemos inferir as eventuais transformações químicas estruturais.

A Figura 35 mostra os ensaios termomagnéticos ao ar da amostra global e das 11 faixas granulométricas do rejeito da flotação. A curva da amostra global demonstrou a presença de hematita e magnetita conforme apresentado na análise mineralógica. As curvas das frações demonstram o comportamento diferente da amostra global, devido às diferentes composições mineralógicas.

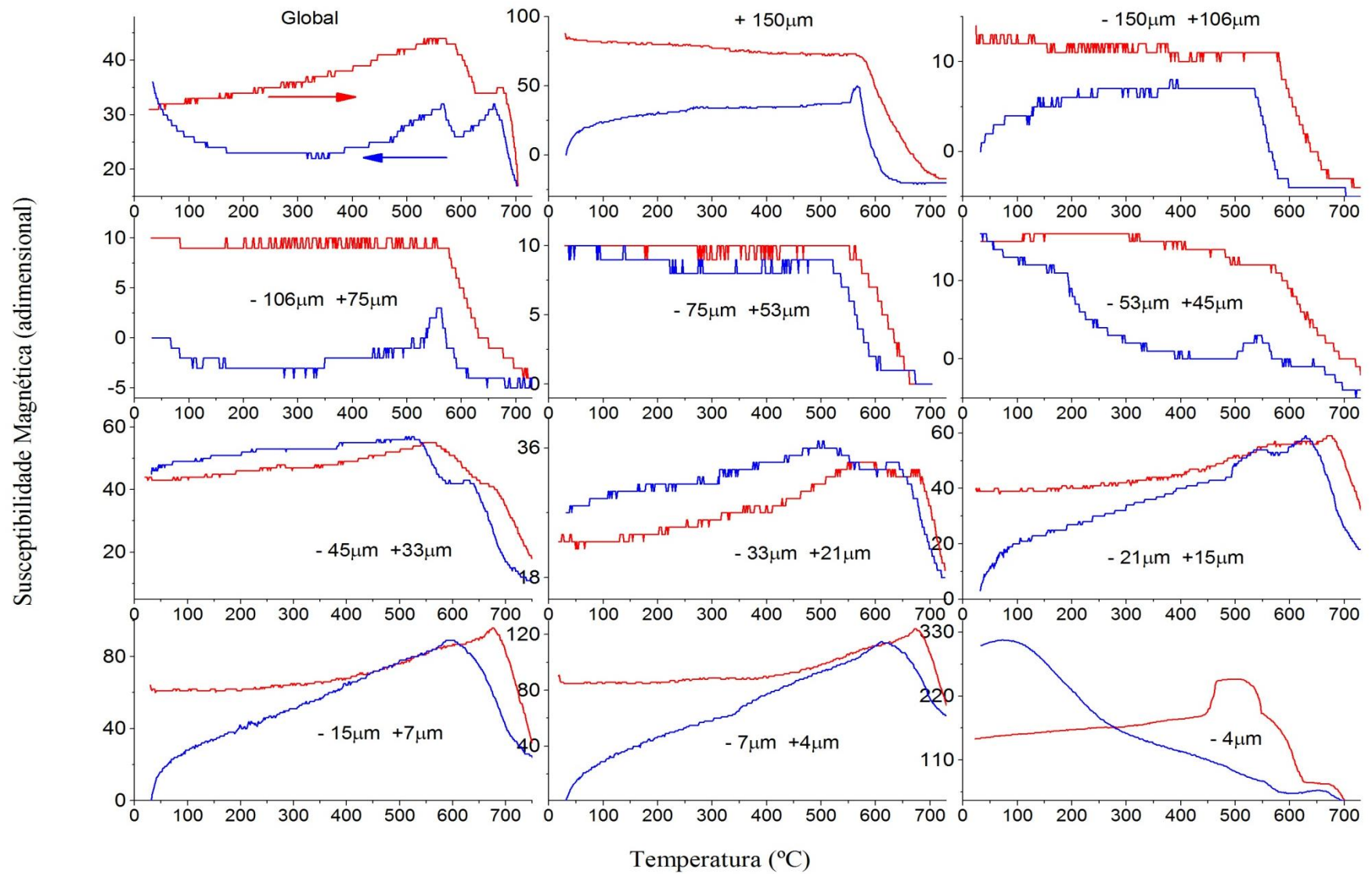


Figura 35. Curvas termomagnéticas do rejeito da flotação

Na Figura 35, verifica-se na fração +150 μ m um maior potencial magnético que as frações superiores a 4 μ m, relacionado ao volume de magnetita presente (0,38%) apesar da grande quantidade de quartzo (98,46%), portanto, verifica-se que o potencial magnético é influenciado principalmente pelo volume de magnetita. Observa-se o pico de Hopkinson (580°C) característico da magnetita nas frações.

Nas frações -150 +45 μ m as curvas de resfriamento apresentam índices de susceptibilidade magnética negativos, evidenciando o comportamento diamagnético do material, devido a predominância de quartzo nessas frações (tabela 8).

A mineralogia (Tabela 8) apresenta a magnetita nas frações +150 μ m (0,38%), -45+33 μ m (0,19%) e -33+21 μ m (0,19%), e a presença de hematita nas frações -45 +33 μ m (56,12%) e -33+21 μ m (47,17%), a qual foi identificada no estudo termomagnético pelo picos de Hopkinson característico, magnetita (580°C) e hematita (675°C). Neste caso específico, verifica-se que as curvas são consideradas reversíveis, ou seja, não houve transformação mineralógica durante o aquecimento.

Para as frações -21+15 μ m, -15+7 μ m e -7+4 μ m as curvas observadas no estudo termomagnético são consideradas irreversíveis, confirmando a transformação mineralógica, verifica-se ainda uma grande semelhança geométrica das curvas de aquecimento e resfriamento, evidenciando as semelhança mineralógica das frações.

A Figura 36 apresenta o ensaio termomagnético da amostra global e das 11 faixas granulométricas do rejeito ultrafino. A curva da amostra global demonstrou a presença de hematita e magnetita conforme apresentado na análise mineralógica. As curvas das frações desde +150 μ m até +6 μ m apresentaram comportamento diferente da amostra global, sendo que somente na fração -6 μ m o comportamento se assemelha ao da amostra global.

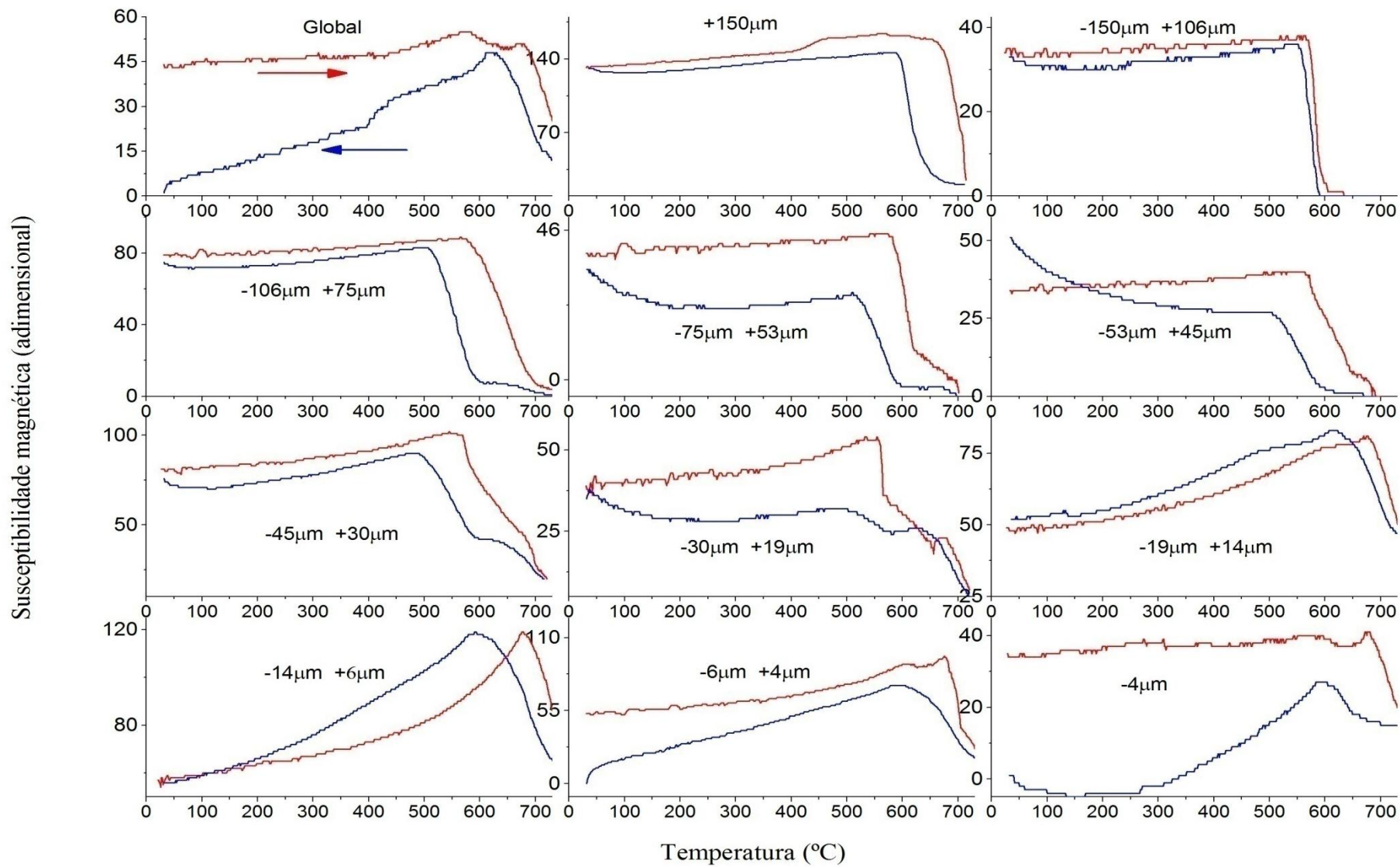


Figura 36. Curvas termomagnéticas do rejeito ultrafino (deslamagem).

Na Figura 36, observa-se também na fração +150 μ m um maior potencial magnético que nas frações menores que 150 μ m, devido a quantidade de magnetita presente (3,61%), valor muito superior às demais frações (Tabela 9).

Outra observação importante é a característica de reversibilidade das curvas, demonstrando que não houve transformação mineralógica nas frações +150 μ m até +6 μ m, apenas as frações menor que 6 μ m e global, apresentaram curvas irreversíveis.

6 CONCLUSÕES

Nesse estudo, a caracterização tecnológica de rejeitos de minério de ferro e o estudo termomagnético permitiram obter as seguintes conclusões:

1. Os resultados da granuloquímica comprovaram que apenas pela classificação, na faixa entre 21 μ m e 4 μ m, é possível obter, a partir do rejeito da flotação, um material com teor de ferro acima de 49% com alto grau de liberação dos minerais de ferro. A partir do rejeito ultrafino, na mesma faixa granulométrica, é possível obter um material com teor de ferro acima de 53%. Estes materiais poderão alimentar um determinado processo de concentração capaz de recuperar partículas ultrafinas.
2. A análise mineralógica identificou os principais minerais presentes nos rejeitos, sendo que no rejeito de flotação o quartzo é o mineral predominante nas frações grossas (+45 μ m) e a hematita nas frações mais finas (-45 μ m). No rejeito ultrafino o quartzo e os óxidos de ferro estão presentes em todas as faixas granulométricas estudadas, no entanto, o teor de ferro aumenta na medida em que diminui a granulometria desse material. Pela microscopia óptica determinou-se que, para ambos os materiais, a hematita se apresenta principalmente nas formas de hematita tabular monocristalina e hematita granular monocristalina, e comprovada nas imagens obtidas pela microscopia eletrônica.
3. O estudo termomagnético constatou que os rejeitos apresentam curvas de susceptibilidade magnética características de materiais contendo óxidos de ferro. O rejeito de flotação apresentou índices de susceptibilidade magnética negativos nas frações entre 150 e 45 μ m, evidenciando o comportamento diamagnético devido à predominância do quartzo. Nas frações entre 21 e 15 μ m, 15 e 7 μ m e 7 e 4 μ m, o material apresentou susceptibilidade magnética positiva e curvas termomagnéticas irreversíveis, que evidenciam

transformações mineralógicas. O rejeito ultrafino apresentou um maior potencial magnético que o rejeito da flotação, devido à quantidade de magnetita presente na amostra. Outra constatação importante é a característica de reversibilidade das curvas, demonstrando que não houve transformação mineralógica nas frações entre 150 μ m e 6 μ m, sendo que esta ocorreu apenas na fração menores que 6 μ m e na amostra global.

4. A investigação da susceptibilidade magnética do rejeito mostra-se como uma técnica importante para a caracterização tecnológica de materiais.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Avaliar a susceptibilidade magnética dos minérios e rejeitos de ferro no intervalo entre -200 e 750°C, com objetivo de identificar a transição de verwey em baixas temperaturas característica da magnetita.
2. Estudar e classificar os diferentes domínios magnéticos presentes em cada faixa granulométrica obtidas nos ensaios de peneiramento e cyclosizer.
3. Estudar a anisotropia magnética dos minérios e rejeitos de ferro por faixa granulométrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALEXANDER, D.; MANLAPIG, E.; BRADSHAW, D; HARBORT, G. Froth flotation. In: WILLS, B, A.; NAPIER-MUNN, T, J. Mineral Processing Technology - An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral, 2006, Cap. 12, p. 267 – 352. 7ª Ed.
2. ARANTES, F. R. .Estudo do comportamento magnético de nanopartículas de magnetita e nanofios de níquel diluídos em cristais líquidos liotrópicos. 117 f. Dissertação de Mestrado (Instituto de Física), Universidade de São Paulo, São Paulo. 2010.
3. BALTAR, C, A, M.; Flotação no Tratamento de Minérios. 2. Ed. Recife: UFPE, 2010. 238 p.
4. BATISTA, R. T. Caracterização de um sistema de fluorescência de raios X por dispersão em energia para análise quantitativa de ligas metálicas. 71p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Física, Universidade do Estado do Rio Janeiro, Rio de Janeiro. 2012.
5. BRAGA, P, F, A.; COUTO, H, J, B. Ensaio de classificação granulométrica por meio de cicloclassificador. In: SAMPAIO, J, A.; FRANÇA, S, C, A.; BRAGA, P, F, A. (Editores). Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. Cap. 4, p 73-97.
6. CALLISTER Jr., W.D. Materials Science and Engineering: An Introduction. 7th Edition. Ed John Wiley & Sons, 2006.
7. CORNELL, R. M., SCHWERTMANN, I. The Iron Oxides: Structure, properties, reactions, occurrence and uses. New York: VCH Publishers. 1996.

8. CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Excursão virtual pela estrada real no Quadrilátero Ferrífero: Aspectos Geológicos, Históricos e Turísticos. 2015.
9. DANA, J. D. Manual de mineralogia: revisto por Cornelius S. Hurlbut, Jr., tradução de Rui Ribeiro Franco. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1978, 2v.
10. DEDAVID, B. A., GOMES, C. I., MACHADO, G. Microscopia eletrônica de varredura: Aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. 1. Ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.
11. DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral 2014. Minas Gerais: DNPM/MG, 2014.
12. DORR, J.V.N.. Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. 1969.
13. DUNLOP, D. J. E ÖZDEMIR, Ö., Rock Magnetism Fundamentals and frontiers: Cambridge University Press, 1997.
14. ÉRDOCIA, F. A. . Difração de Raios X em minerais de bauxita e análise através de refinamento pelo método de Rietveld. 93 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Física), Universidade Federal do Para, Belém. 2011.
15. FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente, Inventário Estadual de Barragens do Estado de Minas Gerais – Belo Horizonte – 2013.
16. FILHO, V. F. N. Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raios X por dispersão de energia (ED-XRF) e por reflexão total (TXRF). Departamento de Ciência Exatas/ESALQ - Laboratório de Instrumentação Nuclear/CENA. 1999.

17. GOMES, M. A. Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro. 2009, 89p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
18. IPEA - Instituto de pesquisa econômica aplicada P N/ RS, 2012.
19. LUZ, A, B.; LINS, F, A, F. Introdução ao Tratamento de Minérios. In: LUZ, A,B.; SAMPAIO, J, A.; FRANÇA, S, C, A. (Editores). Tratamento de Minérios. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap. 1, p 3-18.
20. LUZ, J, A, M.; LIMA, R, M, F. Medida da tensão superficial. In: SAMPAIO, J, A.; FRANÇA, S, C, A.; BRAGA, P, F, A. (Editores). Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. Cap. 27, p 473-487.
21. MAGALHÃES, F. Síntese e Caracterização de Óxidos de Ferro e Compósitos para Aplicações no Tratamento Redox de Efluentes Aquosos. Dissertação de Mestrado. (Programa de Pós-Graduação Ciências-Químicas). Instituto de Ciências Exatas. Departamento de Química. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2008.
22. MAPA, P. S. Rota de processo para o underflow da deslamagem de minério de ferro do concentrado da Samarco Mineração S.A. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2006.
23. NRM - Normas Regulamentadoras de Mineração. DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. Normas reguladoras de Mineração: http://www.dnpm.pe.gov.br/Legisla/nrm_18.htm. 2002.

24. OLIVEIRA, M, L, M.; LUZ, J, A, M.; ROCHA, S, D.; SALUM, A. Flotação. Apostila do Curso de Flotação. UFOP, 2004.
25. OLIVEIRA, P. S. Rotas para recuperação de ferro fino contido no underflow do espessador de lama da usina de conceição. 128p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2006.
26. PARKS, G. A. Aqueous surface chemistry of oxides and complex oxides minerals; isoelectronic point and zero point of charge. In: GOULD, R. F. (Ed.). Equilibrium Concepts in Natural Water Systems. Washington: American Chemical Society, 1967. V. 67, p.121-160. (Advances in Chemistry Series).
27. PERES, A, E, C. Propriedade das interfaces. Belo Horizonte: UFMG. (Notas de Aula), 2010.
28. PERES, A, E, C.; SALUM, M, J, G.; VALADÃO, G, E, S.; ARAUJO, A, C. Métodos de Concentração. In: VALADÃO, G, E, S.; ARAUJO, A, C. (Org.). Introdução ao Tratamento de Minérios. Belo Horizonte: UFMG, 2007. Cap. 6, p. 105-139.
29. QUEIROZ, L. A. Emprego da atrição na deslamagem: efeitos na flotação reversa de minérios itabiríticos. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte. 2003.
30. Química. Projeto do 12º Ano. Disponível em: http://12q.te.pt/index.php?class_name=Conteudos&meth=showConteudo&id=4066. Acesso em 20 de Dezembro de 2015.
31. RABELO, P. J. B. (1994) Estudos de caracterização e redução do teor de fósforo do minério de ferro da mina de Alegria, Mariana, MG. Dissertação de

- Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.
32. ROESER, H. M. P., ROESER, P.A. O Quadrilátero Ferrífero - MG, BRASIL: Aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas ambientais relacionados. *Geonomos* 18 (1):33 - 37. 2010.
33. SANTANA, P. P. Flotação direta de minério de ferro itabirítico. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte. 2012.
34. SANTOS, L, D. Caracterização microestrutural de minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero - MG. 179 f. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2002.
35. SCHACKELFORD, J. F., RISBUD, S. H., DAVILA, L. P. Quartz and Silicas. In: SCHACKELFORD, J. F., DOVEMUS, R. H, (Ed.). *Ceramic and Glass Materials: Structure, Properties and Processing*. New York: Spring Science and Business Media, 2008. p.71-87.
36. SIVAMOHAN, R., The problem of recovering very fine particles in mineral processing - a review. *Int. J. Miner. Process*, 28 (1990) 247-288.
37. SOMASUNDARAN, P. (1980). Principles of Flocculation, Dispersion, and Selective Flocculation. In: SOMASUNDARAN, P. *Fine particles processing*, v.II c.48, p.948.
38. VIEIRA, A, M. Efeito da Granulometria na Flotação de Quartzo. 166 f. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2005.

39. WILLS, B. A., NAPIER-MUNN, T. J. Mineral processing Technology. An Introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. Elsevier, 7ª edição.
40. WOLFF, A. P. Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas). Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009, 107p.
41. WOLFF, A. P., Costa, G. M., Dutra, F. C., A comparative study of ultra-fine iron ore tailings from Brazil. Mineral Processing & Extractive Metall. Rev., 32 (2011) 47-59.
42. YOON, R. H.; LUTTRELL, G. H. The Effect of Bubble Size on Fine Particle Flotation. In.: Frothing Flotation, LASKOWSKI, J. J. (editor), Gordon and Breach Science Publishers. 1989. p. 101-122.