



SEPARAÇÃO MAGNÉTICA A ÚMIDO DE MINÉRIOS DE FERRO ITABIRÍTICOS

Ligia Mara Gonzaga

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Rio de Janeiro

Junho de 2014

SEPARAÇÃO MAGNÉTICA A ÚMIDO DE MINÉRIOS DE FERRO ITABIRÍTICOS

Ligia Mara Gonzaga

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Examinada por:



Prof. Luís Marcelo Marques Tavares, Ph.D.



Prof. Ericksson Rocha e Almendra, D.Sc.



Dr. Reiner Neumann, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2014

Gonzaga, Ligia Mara

Separação Magnética a úmido de Minérios de Ferro Itabiríticos / Ligia Mara Gonzaga. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

XXI, 163p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Luís Marcelo Marques Tavares

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 120 - 125.

1. Separação Magnética 2. Caracterização de minérios Itabiríticos 3. Modelagem Matemática I. Tavares, Luís Marcelo Marques. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

DEDICATÓRIA

A meu amado Manuel, pelo carinho e incentivo durante essa minha trajetória, pois sem seu apoio, não teria chegado ao término deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao concluir este SONHO, lembro-me de muitas pessoas a quem ressalto reconhecimento, pois, esta conquista concretiza-se com a contribuição de cada uma delas, seja direta ou indiretamente. No decorrer dos dias, vocês colocaram uma pitada de amor e esperança para que neste momento findasse essa etapa tão significativa para mim.

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado à oportunidade e me cercado de pessoas que contribuíram para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Agradeço à Universidade Federal do Rio de Janeiro, ao Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais e ao Laboratório de Tecnologia Mineral, por terem acreditado e dado à oportunidade de aprimorar e aprender muitos conhecimentos acadêmicos importantes para o desenvolvimento de minha formação profissional.

Agradeço aos autores do livro Tratamento de Minérios e ao Science Direct pelas autorizações do uso de imagens.

Ao meu admirado orientador, Prof. Luís Marcelo Marques Tavares por sua convicção da arte de ensinar, por sua vitalidade no trabalho, agradeço as cobranças, exigências, dinamismo e por me permitir aprender a cada dia com ele.

Aos meus pais e meus irmãos, que foram à base de tudo pra mim, apoiando-me nos momentos difíceis com força, confiança e amor, ensinando-me a persistir nos meus objetivos e ajudando a alcançá-los.

Ao meu amado Manuel, homem que adentrou em minha vida e me faz crescer como mulher, como pessoa, que dentre suas possibilidades me fez enxergar um mundo novo. Espero tê-lo sempre perto de mim. A você, o meu muito obrigado, mesmo ciente de que quaisquer que sejam as palavras, jamais conseguirão expressar toda a minha admiração por ti.

Aos meus sogros, pelas palavras de incentivo e encorajamento, agradeço pelas muitas orações feitas em meu nome.

Aos Doutores Antônio Campos, Reiner Neumann, Otávio da Fonseca e Silvia França, pelo apoio e pelo incentivo. Em especial ao Dr. Reiner Neumann que gentilmente permitiu a realização dos ensaios de caracterização em seu laboratório, contar com sua colaboração foi decisiva e de grande contribuição para minha dissertação.

Aos meus queridos amigos, Ayane, Alana, Sandra, Jorge, João Vitor, Jack, Barbara, Giancarlos, Paula, Paola, Lizthe e Osca. Em especial, gostaria de agradecer a Sandra, para mim, mais que amiga, uma irmã. Deus na sua infinita sabedoria cruzou nossos caminhos, possibilitando esta amizade sólida, honesta e verdadeira. Sou muito grata por tê-la presente em minha vida.

A minha segunda mãe e amiga Nilma e Ailma que mesmo longe sempre me apoiando e me dando força quando eu precisei. A vocês meu muito obrigado.

Aos técnicos do LTM: Rangler, Francis, Augusto, Daniel, Débora, Everton e Wesley, aos técnicos do CETEM, Adalto, Josimar, Nininho, Tio e Odilon a Rosangela Técnica do LabESTE, quero agradecer-lhes por tudo, pois vocês fazem parte da minha conquista.

Aos colegas e funcionários do LTM, Anderson, Carla, Emerson, Juliana, Yency, Gabriel, Rodrigo, Wesley e Luís.

Aos membros da banca por ter aceitado o convite.

A CAPES pela bolsa de mestrado, à VALE por ceder o material para o desenvolvimento da pesquisa ao CETEM pelo uso de equipamentos do laboratório e da usina piloto, ao LabEST, ao laboratório da Geologia e ao projeto P9P da Amira pelo financiamento da pesquisa.

Nesta hora de encerramento de uma etapa muito especial, em que a alegria por estar terminando se junta ao cansaço, torna-se difícil lembrar-me de todos os amigos e colegas que participaram comigo dessa jornada, mas de uma maneira muito sincera, agradeço a todos que de uma forma ou de outra colaboraram para a realização desse trabalho.

A todos só posso dizer: Muito Obrigada!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

SEPARAÇÃO MAGNÉTICA A ÚMIDO DE MINÉRIOS DE FERRO ITABIRÍTICOS

Ligia Mara Gonzaga

Junho/2014

Orientadores: Luís Marcelo Marques Tavares

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

A separação magnética ocupa uma posição importante na concentração de minérios de ferro e há grande interesse em avaliar a sua aplicabilidade na etapa de projeto. Isso pode ser realizado por meio de uma caracterização adequada do minério e do uso de ensaios em bancada e/ou da simulação computacional. O presente trabalho visou aplicar uma metodologia baseada na caracterização e simulação na avaliação do potencial de aplicação da separação magnética a três minérios de ferro itabiríticos. Estudos detalhados de caracterização granulométrica, química e mineralógica de amostras, britadas a -1,18 mm foram realizados, que demonstraram as diferentes composições mineralógicas dos minérios, sobretudo no tocante aos teores de magnetita e hematita.

Planos fatoriais fracionários de experimentos foram utilizados para investigar as principais variáveis que influenciam a separação magnética de baixa intensidade no WDRE, bem como de alta no separador Rapid. Observou-se que não foi identificada significância de qualquer das variáveis estudadas na recuperação nem na razão de enriquecimento para as diferentes amostras no caso do WDRE, enquanto observou-se influência significativa do tempo de lavagem e, secundariamente, da intensidade do campo na recuperação de ferro. Com relação à razão de enriquecimento, observaram-se efeitos significativos do *gap* da matriz e da taxa de alimentação. Um modelo empírico, baseado naquele proposto por King, bem como em resultados de análises de separabilidade magnética por tamanho de partícula obtidos no separador isodinâmico Frantz, foi aplicado com sucesso na previsão da separação magnética nos dois estágios de separação.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

WET MAGNETIC SEPARATION OF ITABIRITE IRON ORES

Ligia Mara Gonzaga

June/2014

Advisor: Luís Marcelo Marques Tavares

Department: Metallurgical and Materials Engineering

Magnetic separation occupies an important role in the concentration of iron ores and there is great interest in assessing its applicability in the design stage. This may be carried out by a combination of appropriate ore characterization, bench-scale testing and/or computer simulation. The present study aimed at applying a methodology that is based on the use of characterization and simulation for evaluating the potential of applying magnetic separation to three itabirite iron ores. Detailed analyzes of the texture and of the chemical and mineralogical composition was carried out with the samples crushed minus 1.18 mm. The analyzes showed the different mineralogical compositions of the ores, especially in regard to magnetite and hematite contents.

Fractional factorial designs were used to investigate the main variables that influence the low intensity magnetic separation in WDRE, as well as high intensity magnetic separation in the RAPID. It was concluded that none of the variables exerted significant influence on either the recovery or the enrichment ratio in the WDRE, whereas a significant influence was found for the washing time and, secondarily, the magnetic field intensity on the iron recovery. Regarding the enrichment ratio significant influences were found for the matrix gap and the feed rate. An empirical model, based on the expression proposed by King, along with results from magnetic separability analyzes as a function of particle size obtained in the Frantz isodynamic magnetic separator, was successfully applied to the prediction of magnetic separation in the two stages for the three samples, showing a good predictive ability.

SUMÁRIO

Resumo	vii
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS	xx
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2.....	3
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1- Principais Tipos e Morfologias de Minerais de Ferro	3
2.2 – Jazidas de Minério de Ferro e o Quadrilátero Ferrífero do Brasil	6
2.3- Técnicas de caracterização para minério de ferro.....	6
2.3.1- Técnicas de Microscopia Óptica	8
2.3.2- Difração de Raios-X.....	9
2.3.3- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	11
2.3.4-Análise Química.....	12
2.4- Separação Magnética: princípios e teoria	13
2.4.1. Aspectos gerais.....	13
2.4.2- Descrição das grandezas magnéticas	13
2.4.3 Propriedades Magnéticas dos Minerais	15
2.5- Separadores Magnéticos	20
2.5.1. Classificação.....	20
2.5.2-Principais Separadores Magnéticos Industriais.....	22
2.5.3- Separador Magnético WDRE.....	24
2.5.4- Separador Magnético Tipo Jones.....	26
2.5.5- Separador Ferrous Wheel.....	28
2.5.6- Supercondutores Magnéticos	29
2.5.6.1- Separadores Magnéticos de Alto Gradiente.....	30

2.5.6.2- Separador Magnético de Gradiente Aberto.....	30
2.5.7- Análise da separação magnética em bancada	30
2.5.7.1- Separador Isodinâmico Frantz	30
2.5.7.2- Tubo Davis	34
2.5.7.3- Separador L4	34
2.5.7.4- Separador Magnético de alto gradiente RAPID.....	35
2.5.7.5-Satmagan	36
2.6- Modelagem e Simulação	36
2.6.1- Aspectos gerais	36
2.6.2- Modelagem da separação magnética	37
2.6.2.1-Modelos empíricos	37
2.6.2.1.1-Modelo de Dobby-Finch	37
2.6.2.1.2-Modelo de Tucker	41
2.6.2.1.3- Modelo de King	44
2.6.2.2- Modelos Fenomenológicos	45
2.6.2.2.1- Modelo de Hopstock	46
2.6.2.2.3- Modelo de Napier-Munn e Rayner	50
2.6.2.2.4- Modelo Schneider e Calixto.....	53
2.6.2.3-Modelos Mecanicistas.....	54
CAPÍTULO 3.....	56
MATERIAIS E MÉTODOS	56
3.1- Preparações das Amostras	56
3.2- Caracterização das Amostras	59
3.2.1- Análise Granulométrica	59
3.2.2- Análise Químicas e Granuloquímicas.....	60
3.2.2.1- Análise Química por Absorção Atômica	60
3.2.2.2- Análise Química por Fluorescência de Raios-X.....	61

3.2.3- Análises Mineralógicas	62
3.2.4- Caracterização utilizando o Separador Magnético Frantz Isodinâmico	65
4.3- Ensaio de Concentração Magnética	68
4.3.1 Separador Magnético de Tambor WDRE	68
4.3.2 Separador Magnético RAPID.....	71
CAPÍTULO 4.....	74
RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
4.1- Caracterização das amostras de itabiritos	74
4.1.1- Análises granulométricas e massa específica.....	74
4.1.2- Análises Químicas.....	76
4.1.3 – Mineralogia	79
4.1.3 – Análise no Separador Isodinâmico Frantz.....	101
4.3-Análise fatorial da separação magnética de baixa-média intensidade....	106
4.3.1- Resultados Gerais.....	106
4.3.2- Análise Estatística	108
4.4-Análise fatorial da separação magnética de alta intensidade.....	109
4.4.1- Resultados Gerais.....	109
4.4.2- Análise Estatística	111
4.4- Modelagem da Separação Magnética	113
CAPÍTULO 5.....	118
CONCLUSÕES	118
CAPÍTULO 6.....	119
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	119
CAPÍTULO 7.....	120
BIBLIOGRAFIA	120
ANEXO 1	126

ANEXO 2	128
ANEXO 3	129
ANEXO 4	130
ANEXO 5	132
ANEXO 6	134
ANEXO 7	136
ANEXO 8	141

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Identificação e quantificação dos óxidos presentes em minérios de ferro... 10	
Figura 2.2- Campo magnético uniforme (A) e campo convergente (B), ilustrado o gradiente de campo (Sampaio <i>et al.</i> , 2010)	20
Figura 2.3- Fluxograma de características, classificação e aplicação dos separadores magnéticos (Sampaio <i>et al.</i> , 2010)	21
Figura 2.4- Métodos de concentração de minérios de ferro no Brasil (Figura modificado de Araujo <i>et al.</i> , 2008)	22
Figura 2.5- Separador magnético de tambor WDRE (Marques, 2013)	24
Figura 2.6- Variação da percentagem de massa magnética no rejeito de um WDRE em escala piloto em função da percentagem de sólidos (modificado de Marques, 2013) ...	25
Figura 2.7- Variação da percentagem de massa magnética no rejeito de um WDRE em escala piloto em função da frequência de rotações do tambor (modificado de Marques, 2013).....	26
Figura 2.8-Separador magnético tipo JONES (Marques, 2013).....	27
Figura 2.9- Impacto da percentagem de sólidos da alimentação na recuperação mássica e no teor do concentrado (Marques, 2013)	27
Figura 2.10- Impacto da pressão de água na recuperação mássica e no teor da sílica do produto na separação magnética no JONES em escala piloto (Marques, 2013)	28
Figura 2.11- Ferrous Wheel (Inbras 2013)	29
Figura 2.12- Relação entre intensidade de corrente e de campo magnético para o Frantz Isodinâmico modelo L-1 (www.sgfrantz.com)	31
Figura 2.13- Peças que compõem o Separador Isodinâmico Frantz L-1	33
Figura 2.14- Tubo Davis (Marques, 2013)	34
Figura 2.15- Separador L4 (Marques, 2013)	35
Figura 2.16- Separador Magnético Rapid	35
Figura 2.17- Satmagan 135 (Rapiscan Systems, 2013)	36
Figura 2.18- Relação entre RMe as variáveis de operação (Dobby e Finch, 1977)	39
Figura 2.19- Curvas de probabilidade de transferência (Tucker, 1994)	41
Figura 2.20 -Comparação entre resultados medidos e ajustados para o modelo de Tucker (Tucker, 1994).....	66
Figura 2.21- Diagrama esquemático de um separador magnético de tambor a seco (modificado de King, 2001).....	46

Figura 2.22- Teor de partículas mistas de magnetita-ganga para as quais as forças magnéticas e centrífugas estão em equilíbrio para uma frequência de rotação (Hopstock, 1975).....	48
Figura 2.23- Relação entre perda de magnetita e a susceptibilidade magnética nos rejeitos para uma alimentação com alta densidade de polpa (Napier-Munn e Rayner, 1999).....	50
Figura 2.24- Relação entre a perda magnetita e o tamanho de partícula no rejeito para uma alimentação com alta densidade de polpa (Napier-Munn e Rayner, 1999).....	51
Figura 2.25- Efeito do campo magnético aplicado sobre o grau de floculação das partículas ferromagnéticas (Napier-Munn e Rayner, 1999)	52
Figura 3.1– Fluxograma de preparação da amostra.....	57
Figura 3.2- Britador de Mandíbulas DENVER 5”x6” instalado no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) - UFRJ.....	58
Figura 3.3- Britador de Rolos DENVER 10”x11” instalado no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) - UFRJ.....	58
Figura 3.4- Pilha longitudinal (alongada).....	59
Figura 3.5- Espectrômetro AA6800	61
Figura 3.6- Espectrômetro de fluorescência de raios X (EDX-720)	61
Figur 3.7- Politriz automática StruersTegra (A) e, amostras polidas (B).....	63
Figura 3.8- Microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta 400 instalado no CETEM	63
Figura 3.9- McCrome Micronizing Mill (A), DRX (B), amostras secas após a pulverização (C), Suporte para as pastilhas (D)	65
Figura 3.10- Separador magnético Frantz. Separação magnética (A), e descarga do material magnético e não magnético (B).....	66
Figura 3.11- Funil de alimentação do Separador Isodinâmico Franz.....	67
Figura 3.12- Separador magnético de tambor WDRE.....	69
Figura 3.13- Gaussímetro (Gass/Teslameter).....	70
Figura 3.14- Circuito Magnético do WDRE	70
Figura 3.15- Separador magnético Rapid.....	73
Figura 4.1- Distribuições granulométricas das amostras ensaiadas	74
Figura 4.2- Percentagem mássica e do ferro contido para o minério “A” em função da faixa de tamanhos	75

Figura 4.3- Percentagem mássica e do ferro contido para o minério “B” em função da faixa de tamanhos	76
Figura 4.4- Percentagem mássica e ferro contido para o minério “C” em função da faixa de tamanhos	76
Figura 4.5- Teores dos principais constituintes por fração granulométrica para o minério “A”	77
Figura 4.6- Teores dos principais constituintes por fração granulométrica para o minério “B”	78
Figura 4.7- Teores dos principais constituintes por fração granulométrica para minério “C”	78
Figura 4.8- Correlação entre as variáveis químicas sílica e ferro total.....	79
Figura 4.9- Espectro da difração de raios-x referente à amostra de cabeça para o minério “A” mostrando a reconstrução pelo método de Rietveld	80
Figura 4.10- Espectro da difração de raios-x referente à amostra de cabeça para o minério “B” mostrando a reconstrução pelo método de Rietveld	80
Figura 4.11- Espectro da difração de raios-x referente à amostra de cabeça para o minério “C” mostrando a reconstrução pelo método de Rietveld	80
Figura 4.12- Quantificação em termos de minerais ferrosos para cada fração analisada (DRX).....	84
Figura 4.13- Comparação entre resultados de análises químicas calculados pelo método de Rietveld e os obtidos por FRX.....	86
Figura 4.14- Teores de PPC (perda por calcinação) em cada fração granulométrica de todos os minérios estudados	87
Figura 4.15- Relação entre o PPC e a percentagem de goethita para cada fração analisada	87
Figura 4.16- Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados fração 0,600 x 0,300 mm para o minério “A”	90
Figura 4.17- Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados fração 0,075 x 0,038mm para o minério “A”	90
Figura 4.18 - Imagens de um campo da seção polida em (A) fração 0,600 x 0,300 mm observado com aumento de 5x, (B) fração 0,075 x 0,038mm observado com aumento de 10x para o minério “A”	91

Figura 4.19- Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados fração 0,600 x 0,300 mm para o minério “B”.....	93
Figura 4.20- Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados fração 0,075 x 0,038mm para o minério “B”.....	94
Figura 4.21 - Imagens de um campo da seção polida em (A) fração 0,600 x 0,300 mm observado com aumento de 5x, (B) fração 0,075 x 0,038mm observado com aumento de 10x para o minério “B”	94
Figura 4.22- Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados (fração 0,600 x 0,300 mm) para o minério “C”.....	96
Figura 4.23- Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados (fração 0,075 x 0,038mm) para o minério “C”.....	96
Figura 4.24 - Imagens de um campo da seção polida em (A) fração 0,600 x 0,300 mm observado com aumento de 5x, (B) fração 0,075 x 0,038mm observado com aumento de 10x para o minério “C”	97
Figura 4.25- Espectro de liberação aparente para o minério “A”.....	99
Figura 4.26- Espectro de liberação aparente para o minério “B”	99
Figura 4.27- Espectro de liberação aparente para o minério “C”	100
Figura 4.28- Relação entre os valores da separação Magnética no Frantz considerando a percentagem de massa e Fe reportados para o concentrado para o minério “A”	103
Figura 4.29- Relação entre os valores da separação Magnética no Frantz considerando a percentagem de massa e Fe reportados para o concentrado para o minério “B”	103
Figura 4.30- Relação entre os valores da separação Magnética no Frantz considerando a percentagem de massa e Fe reportados para o concentrado para o minério “C”	104
Figura 4.31- Comparação dos resultados de concentração de média e alta intensidade para o minério “A”	105
Figura 4.32- Comparação dos resultados de concentração de média e alta intensidade com para o minério “B”.....	105
Figura 4.33- Comparação dos resultados de concentração de média e alta intensidade para o minério “C”.....	105
Figura 4.34- Recuperações obtidas para todos os ensaios de concentração de baixa/média intensidade	107
Figura 4.35- Razões de enriquecimento para todos os ensaios de concentração de baixa/média intensidade	108

Figura 4.36-Recuperações obtidas para todos os ensaios de concentração alta intensidade	110
Figura 4.37- Razões de enriquecimento para todos os ensaios de concentração de alta intensidade	111
Figura 4.38- Curva de partição para os separadores WDRE e RAPID	114
Figura 4.39- Curvas relativas aos dois estágios de concentração para o minério “C” as linhas representam os modelos e os pontos os dados experimentais.....	115
Figura 4.40- Curvas relativas aos dois estágios de concentração para o minério “B” as linhas representam os modelos e os pontos os dados experimentais.....	116
Figura 4.41- Curvas relativas aos dois estágios de concentração para o minério “A” as linhas representam os modelos e os pontos os dados experimentais.....	116
Figura 4.42- Comparação entre os valores de massa do concentrado medidos e ajustados pelo modelo para os três minérios estudados	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1– Alguns dos principais minerais de ferro e suas classes (Modificado de Dana & Hulburt, 1984)	4
Tabela 2.2- Principais morfologias de cristais de óxidos e hidróxidos de ferro.....	4
Tabela 2.3- Técnicas de mineralogia de uso mais difundido na caracterização de minérios (modificado de Neumann <i>et al.</i> , 2010).....	8
Tabela 2. 4- Fatores de conversão para converter do sistema emu para o sistema	14
Tabela 2.5- Susceptibilidade magnética dos minerais (modificado de Lawver e Hopstock 1974)	17
Tabela 2.6- Faixas de campo onde dentro das quais os minerais podem ser separados pelo processo de separação magnética (Sampaio <i>et al.</i> , 2010).....	19
Tabela 2.7- Utilização de concentração magnética nas principais minas de minério de ferro no Brasil (modificado de Oliveira, 2006)	23
Tabela 2.8- Influência da abertura do gap na separação magnética no separador JONES em escala piloto (Marques, 2013).....	28
Tabela 2.9- Condições usadas para o modelo de recuperação magnética	39
Tabela 2.10- Parâmetros do modelo WDM2 utilizado por Queiroz (2008).....	45
Tabela 2.11- Composição média de cada classe de associação mineral, na alimentação da concentração magnética (Queiroz, 2008)	45
Tabela 2.12- Comparação entre os dados calculados e simulados a partir da granulomineralogia (Schneider e Calixto 2006).....	54
Tabela 3.1- Relação entre as intensidades de corrente, as intensidades de campo estimadas e a suscetibilidade magnética das partículas separadas.	68
Tabela 3.2- Matriz do planejamento fatorial dos ensaios de concentração no WDRE ..	71
Tabela 3.3- Relação intensidade de corrente e intensidade de campo magnético.....	72
Tabela 3.4- Matriz do planejamento fatorial para a concentração no Rapid.....	73
Tabela 4.1- Indicadores das análises granulométricas e massas	75
Tabela 4.2- Teores de cabeça das amostras estudadas	77
Tabela 4.3 – Análise quantitativa das fases presentes (% em massa) referente à análise de cabeça comparada com os seus respectivos valores reconstituídos a partir das análises granulométricas.....	81
Tabela 4.4 – Análise quantitativa das fases presentes (% em massa) nas alíquotas referentes as demais frações analisadas para o minério “A”	81

Tabela 4.5– Análise quantitativa das fases presentes (% em massa) nas alíquotas referentes as demais frações analisadas para o minério “B”	82
Tabela 4.6 – Análise quantitativa das fases presentes nas alíquotas referentes as demais frações analisadas para o minério “C”	82
Tabela 4.7- Comparação entre teores de ferro e sílica estimados por mineralogia e análises químicas para o minério “B”	85
Tabela 4.8- Comparação entre teores de ferro e sílica estimados por mineralogia e análises químicas para o minério “C”	85
Tabela 4.9- Análise EDS 0,600 x 0,300 mm minério “A” (Figura 4.16).....	91
Tabela 4.10- Análise EDS 0,600 x 0,300 mm minério “B” (Figura 4.19)	92
Tabela 4.11- Percentuais em massa das classes minerais por análise de imagem.....	97
Tabela 4.12- Percentuais em massa das classes minerais analisados por DRX	98
Tabela 4.13- Comportamento no separador isodinâmico Frantz das principais fases minerais presentes nas amostras estudadas compilado de Parfenoff (1970).....	102
Tabela 4.14- Resultado da separação magnética utilizando o separador WDRE para os três minérios estudados.....	107
Tabela 4.15- Resultado da análise estatística da recuperação no separador WDRE....	109
Tabela 4.16- Resultado a análise estatística considerando o índice de seletividade no separador WDRE.....	109
Tabela 4.17- Resultado da separação magnética utilizando o separador Rapid para os minérios estudados	110
Tabela 4.18- Resultado da análise estatística considerando a recuperação no separador Rapid.....	112
Tabela 4.19- Resultado a análise estatística considerando o índice de seletividade do separador Rapid	112
Tabela 4.20- Valores de suscetibilidade magnética e percentagem mássica utilizados para simular os dois estágios de concentração (faixa de 1,18 x 0,600mm).....	113
Tabela 4.21- Parâmetros utilizados para modelar os separadores	115

LISTA DE SÍMBOLOS

B	indução magnética
b	espessura da camada
D	diâmetro do tambor
d_p	tamanho da partícula
d_w	diâmetro do arame da matriz
F_c	força centrífuga
F_{Gr}	componente radial da força gravitacional
F_m	força magnética
F_r	componente radial da força sobre uma partícula próxima a superfície do tambor
F_u	força hidrodinâmica
H	campo magnético
H'	campo magnético no interior da partícula
H_0	força de campo na superfície do tambor
H_r	componente radial do campo magnético
H_s	força de campo magnético de saturação dentro do material da matriz
H_φ	componente angular do campo magnético
J	polarização magnética
J'	indução magnética que resulta da magnetização da partícula ou medida do dipolo magnético que é induzido no material da partícula
K	susceptibilidade magnética específica por volume
L_m	carregamento da matriz ou a fração de massa magnética na alimentação/ massa da matriz
M_{50}	ponto de corte magnético no qual a recuperação é 0,5
N	fator geométrico que depende da forma da partícula
$p(f_m)$	função de propriedade distributiva para a densidade de força magnética dentro do leito de partículas sobre a superfície do tambor
$p(V_m g)$	distribuição condicional do volume magnético para partículas de teor g

R	raio do tambor
$R_M(\chi, d_p)$	recuperação de partícula em um separador magnético tipo WHIMS
r	distância do centro do tambor
u	velocidade média da polpa
V_m	volume do material magnético na partícula
Y_T	recuperação mássica para o rejeito produção total de sólidos para a fração magnética em um separador magnético tipo WHIMS (separador mag. a úmido de alto gradiente)
γ	magnético tipo WHIMS (separador mag. a úmido de alto gradiente)
μ	permeabilidade magnética
μ_0	permeabilidade do meio no vácuo
μ_r	permeabilidade magnética relativa
v_p	volume da partícula
ρ_b	densidade aparente da camada
ρ_p	massa específica de partícula
φ	variável angular em coordenada cilíndrica
χ	susceptibilidade mássica
ω_{Crit}	velocidade de rotação crítica para o desprendimento de uma partícula
$sen\varphi_d$	ângulo teórico de desprendimento de uma partícula

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Grande parte dos recursos extraídos pelo homem da natureza é de origem mineral. Todavia estes recursos não são renováveis e não se encontram em seu jazimento em condições de serem diretamente utilizados na obtenção de bens de consumo e de produção. A fim de adequá-los à produção desses bens os minerais precisam ser submetidos a algum tipo de beneficiamento, pelo qual eles são modificados, purificados e transformados (Luz *et al.*, 2010).

As operações de tratamento ou beneficiamento de minérios consistem em aplicar aos bens minerais operações que visam modificar a granulometria e a concentração relativa das espécies minerais, sem modificar a identidade química ou física dos minerais que o compõem.

Para que um mineral seja concentrado, é necessário que o mineral esteja fisicamente liberado, ainda que apenas parcialmente. Para atingir a liberação do mineral, o minério é submetido a operações de redução de tamanhos, isso é de britagem e/ou moagem. As operações de redução de tamanhos são muito dispendiosas, pois envolvem elevados consumos de energia, desgastes de revestimentos e corpos moedores, devendo-se fragmentar apenas o suficiente para as operações subsequentes.

A fim de evitar cominuição excessiva, faz-se uso de operações de separação por tamanho ou classificação (Luz *et al.*, 2010).

A separação magnética é um método bastante utilizado e bem estabelecido na área de processamento de minérios para a concentração e purificação dos minerais, sendo amplamente utilizada na concentração de minerais ferrosos. A separação magnética evoluiu de modo que permite separar desde materiais fortemente magnéticos até fracamente magnéticos.

Essa técnica tem à sua disposição a força magnética, que pode ser controlada ao longo de um grande intervalo de valores, permitindo uma separação seletiva.

A forma e a eficiência com que partículas são separadas e o modo como elas interagem quando são submetidas a um campo magnético podem ser compreendidas por meio de experimentação apoiada no uso de ferramentas de modelagem matemática.

A grande vantagem dos modelos matemáticos é que eles podem, após a devida calibração, ser usados para fazer previsões quantitativas sobre o comportamento futuro de um sistema. Dessa maneira eles contribuem como ferramentas de grande valia no

projeto de novas instalações industriais. No contexto de minérios de ferro brasileiros, o uso adequado de ferramentas de simulação da separação magnética, aliada a métodos apropriados de caracterização de minérios, ou seja, determinação de propriedades físicas, químicas e mineralógicas, permite potencialmente ao engenheiro avaliar a eficácia do uso dessa operação em uma usina de processamento mineral. Sendo assim, a caracterização de minérios é uma etapa fundamental para o aproveitamento de um recurso mineral de forma otimizada (Neumann *et al.*, 2010).

Os minérios de ferro brasileiros são constituídos basicamente por hematita, magnetita, goethita, além de alguns minerais de ganga, principalmente quartzo. Todavia, podem apresentar diferentes texturas.

Nesse contexto os itabiritos são minérios de baixo teor, os quais representam grande parte das reservas atualmente disponíveis no Estado de Minas Gerais (DNPM, 2013). Como tal, o seu aproveitamento invariavelmente passa por uma etapa de concentração mineral, que pode ser realizada utilizando diversos processos, incluindo a separação magnética, além da separação gravimétrica e flotação. De fato, a separação magnética tem sido muito utilizada no Brasil para a separação de hematita e magnetita do quartzo, se destacando a separação magnética a úmido, de alta intensidade empregada em várias usinas da Vale.

O objetivo deste trabalho foi a caracterização de minérios de ferro itabiríticos visando o aproveitamento dos recursos minerais de forma otimizada e analisar a influência de variáveis na separação magnética a úmido de baixa-média e alta intensidade em laboratório para três amostras de minérios de ferro. A partir dessas informações foi realizada a modelagem matemática dos processos aplicados à separação de minérios de ferro itabiríticos.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- Principais Tipos e Morfologias de Minerais de Ferro

Os minerais de ferro se encontram na forma de rochas a partir das quais pode ser obtido o ferro metálico de maneira economicamente viável. O ferro encontra-se geralmente sob a forma de óxidos, como a hematita, a magnetita ou ainda como óxido-hidróxido de ferro. (Dana *et al.*, 1984).

Apesar da ampla distribuição dos minerais de ferro, apenas poucas classes minerais são consideradas economicamente explotáveis. Isso ocorre pela quantidade de ferro presente nesses minerais ou pela concentração desses minerais nas rochas, que formam os corpos de minérios. Os minérios de ferro considerados economicamente explotáveis são agrupados de acordo com a sua composição química, nas classes: óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos, sendo essa última de menor expressão econômica.

Os minerais de ferro considerados economicamente explotáveis pertencem às classes acima citadas. Cada classe de minerais pode ser representada por um ou mais minerais, sendo que, apenas os minerais de ferro da classe dos óxidos, explorados economicamente, nas condições atuais. A Tabela 2.1 apresenta alguns dos principais minérios de ferro e suas classes.

A hematita Fe_2O_3 é o principal mineral de ferro, devido a sua larga ocorrência sendo encontrada na forma de óxido e com diferentes morfologias conforme Tabela 2.2 (Gomes *et al.*, 2013). A hematita também pode ser encontrada com hábito de magnetita, essa forma é chamada de pseudomorfismo, ou seja, a forma herdada de outro mineral, esta geração de hematita é resultado da oxidação e recristalização da magnetita (Neumann, 2014).

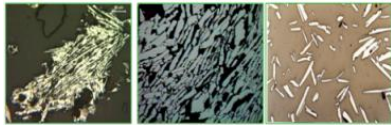
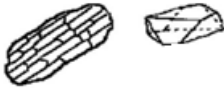
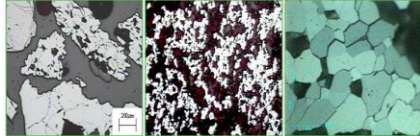
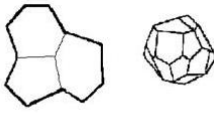
A Magnetita é um mineral formado pelos óxidos de ferro II e III, cuja fórmula química é Fe_3O_4 . O mineral apresenta forma cristalina isométrica, geralmente na forma octaédrica, e caracteriza-se por forte magnetismo.

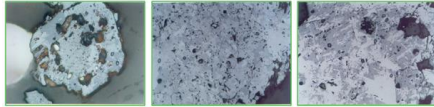
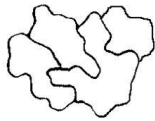
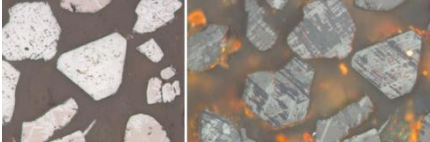

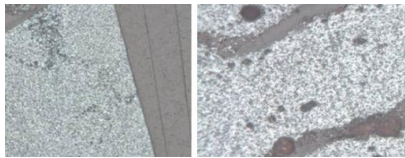

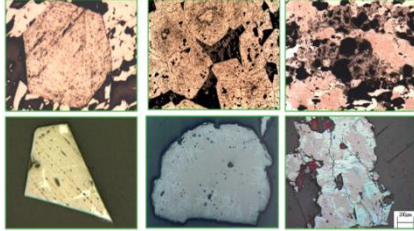



A Goethita $FeO(OH)$, que é produto de alteração de minerais que contêm ferro. É enriquecida por processos supergênicos (lixiviação), encontrando-se nas formas maciças e terrosas.

Tabela 2.1– Alguns dos principais minerais de ferro e suas classes (Modificado de Dana & Hulburt, 1984)

Classes	Minerais	Composição Química	Teor de Fe (%)	Designação
Óxidos	Magnetita	Fe_3O_4	72,4	Óxido ferroso-férrico
	Hematita	Fe_2O_3	69,9	Óxido férrico
	Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$	62,8	Hidróxido de ferro
	Lepidocrosita	$\text{FeO}(\text{OH})$	62,9	Hidróxido de ferro
Carbonato	Siderita	FeCO_3	48,2	Carbonato de Ferro
Sulfetos	Pirita	FeS_2	46,5	
	Pirrotita	FeS	63,6	
Silicatos	Fayalita	$\text{Fe}_2^{2+}(\text{SiO}_4)$	54,81	Grupo da olivina
	Greenalita	Fe^{2+} $2,3\text{Fe}^{3+}_{0,5}\text{Si}_{2,2}\text{O}_5$ $(\text{OH})_{3,3}$	44,14	Grupo da Serpentina
	Grunerita	$\text{Fe}^{2+}_7(\text{Si}_8\text{O}_{22})$ $(\text{OH})_2$	39,03	Grupo dos Anfibólios

Tabela 2.2- Principais morfologias de cristais de óxidos e hidróxidos de ferro (modificado de Gomes *et al.*, 2013)

Tipo	Característica	Forma/ Textura	Ilustração Esquemática
Hematita Especular	Porosidade: compacta Contatos: laterais retilíneos Granulometria: fina (0,01 a 0,03mm) grossa (>0,22mm)		
Hematita Granular	Porosidade: compacta Formatos: regulares Contatos: retilíneos Granulometria: fina (0,01 a 0,03mm) grossa (>0,22mm)		

<p>Hematita Sinuosa ou Lobular</p>	<p>Porosidade: compacta Contatos: irregulares, entrelaçados Aspectos: granular com cristais irregulares Granulometria: fina (0,01 a 0,03mm) média (0,04 a 0,11mm)</p>		
<p>Hematita Martitica</p>	<p>Porosidade: porosos Contatos: laterais retilíneos preserva o hábito da magnetita Aspecto: granular Granulometria: fina (0,01 a 0,03mm) grossa (>0,22mm)</p>		
<p>Hematita Microcristalina</p>	<p>Textura: Porosa Contatos: Pouco desenvolvidos Granulometria: (0,01mm)</p>		
<p>Magnetita</p>	<p>Cristais: euédricos isolados ou agregados Cristais: compactos Aspecto: retilíneo com cristais equidimensionais Granulometria: fina (0,01 a 0,03mm) grossa (>0,22mm)</p>		
<p>Goethita Botrioidal</p>	<p>Porosidade: compacto a poroso Contatos: irregulares, as vezes com aspecto alveolar ou fribosa Granulometria: muito fina (>0,01mm) muito grossa (>0,22mm)</p>		

2.2 – Jazidas de Minério de Ferro e o Quadrilátero Ferrífero do Brasil

As principais reservas de minério de ferro no Brasil são encontradas nos Estados do Pará, Minas Gerais e Mato Grosso, com uma produção em 2012 de 400,8 milhões de toneladas, sendo a Vale responsável por 50% da produção (DNPM, 2013). A Vale tem a sua produção de minério dividida em dois sistemas: Norte e Sul.

O Sistema Sul da Vale corresponde ao Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais. Suas unidades de operação são: Mina Águas Claras, Mina Mutuca, Mina Tamanduá, Mina Capitão do Mato, Mina Abóboras, Mina Jangada, Mina Mar azul, Mina Capão Xavier, Mina Pico, Mina Galinheiro, Mina Sapecado, Mina Fábrica e Mina Córrego do Feijão. A Mina Águas Claras, se encontra desativada, atualmente é uma base das atividades administrativas da empresa, enquanto a Mina Mutuca já encerrou suas atividades de lavra (Marques, 2013).

A grande variedade de microestruturas e texturas encontradas nos minérios de ferro gera uma ampla diversidade de propriedades físicas com importantes implicações para o seu beneficiamento. As reservas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero da Vale são responsáveis por 84,52% da produção brasileira no setor (IBRAM, 2012).

A região do Quadrilátero Ferrífero possui importantes depósitos de minério de ferro itabiríticos e hematíticos de alto teor ($Fe > 60\%$). Os itabiritos são constituídos por bandas ricas em minerais de ferro (principalmente hematita e magnetita) intercaladas com bandas ricas em quartzo. Os minérios de alto teor são compostos principalmente pela hematita (Rosière *et al.*, 1991).

2.3- Técnicas de caracterização para minério de ferro

A comercialização de minérios de ferro é realizada a partir da especificação de sua composição química e distribuição granulométrica. Nos últimos anos tem havido um crescente interesse por estudos de caracterização de minérios de ferro que levem em conta outras características, como a composição mineralógica e a microestrutura. Esse tipo de estudo contribui para propiciar melhorias na eficiência dos processos de beneficiamento mineral (Rosière *et al.*, 1993a).

Para o controle de qualidade desses materiais, é fundamental o conhecimento de sua microestrutura, necessitando-se de procedimentos de avaliação qualitativa e quantitativa. A caracterização tecnológica de minerais e análises mineralógicas

constitui-se em recursos essenciais na identificação dos constituintes e na determinação de suas propriedades. Essa etapa é fundamental para o aproveitamento de um recurso mineral de forma otimizada, pois fornece subsídios mineralógicos e texturais necessários à adequada seleção e ao correto dimensionamento de equipamentos a serem usados em uma rota de processo, possibilitando a otimização do rendimento global de uma usina.

A caracterização mineralógica de um minério permite identificar e quantificar toda a assembleia mineralógica, definindo quais são os minerais de interesse e de ganga, bem como a distribuição dos elementos úteis. Ela ainda permite definir o tamanho de partícula necessário para liberação dos minerais de interesse dos minerais de ganga, como também identificar e quantificar diversas propriedades físicas e químicas desses minerais, gerando informações potencialmente úteis na definição das rotas de processamento (Neumann *et al.*, 2010).

De maneira geral, as técnicas de estudo de caracterização de minérios são inúmeras e de graus de complexidade que variam desde análises granulométricas em peneiras ou análises químicas via úmida até o uso de microscópios eletrônicos avançados e tomógrafos computadorizados. As técnicas atualmente mais empregadas na caracterização são listadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3- Técnicas de mineralogia de uso mais difundido na caracterização de minérios (modificado de Neumann *et al.*, 2010)

Técnica		Propriedades
Microscopia Óptica	Microscópio estereoscópicos microscópios de polarização	Forma, cor, alterações, associações, propriedades ópticas
Difração de Raios X	Método do pó	Caracterização textural, identificação das espécies mineraias
Microscopia Eletrônica de Varredura	Microscópio eletrônico de varredura	Forma, associações, liberação
Sistema de Microanálise	Dispersão de energia (EDS) dispersão de comprimento de onda (WDS)	Composição química
Recursos Diversos	Fluorescência de Raios X	Composição química, identificação dos elementos presentes
Tomografia de Raios X	Tomógrafos	Reconstrução tridimensional das partículas, análise de liberação

A seguir, serão apresentadas as principais técnicas tradicionais relevantes a esta dissertação.

2.3.1- Técnicas de Microscopia Óptica

A microscopia é uma técnica bastante utilizada na caracterização de minérios de ferro. Os minerais são identificados pela cor, brilho, hábito, clivagem e fratura (Neumann *et al.*, 2008).

A microscopia óptica de luz transmitida (minerais transparentes) e de luz refletida (minerais opacos) são os métodos mais tradicionais e bastante utilizado em análises qualitativas. (Neumann *et al.*, 2010). A microscopia de luz refletida é usada na caracterização de minérios de ferro, pois as fases minerais mais comumente presentes, como hematita e magnetita podem ser visualmente identificadas. As observações em luz transmitida própria para minerais transparentes ou translúcidos exigem confecção de seções delgadas, os de luz refletida, recurso adequado para minerais opacos, exigem confecção de seções polidas, feitas a partir do corte e polimento de montagens dos grãos em resina.

A importância do conhecimento e das análises quantitativas das microestruturas tem levado a um contínuo desenvolvimento das técnicas experimentais, particularmente a microscopia.

2.3.2- Difração de Raios-X

A difratometria de raios-X é uma das principais técnicas utilizadas na caracterização textural, encontrando aplicação em diversos campos do conhecimento. A difratometria de raios-X permite a identificação das fases a partir de espectro gerado pela estrutura cristalina. Sendo uma ferramenta extremamente útil na identificação das espécies minerais, um método indispensável para a investigação, caracterização e controle de qualidade dos materiais.

A técnica permite visualizar padrões de difração de raios-X em todos os tipos de substância, mas a informação é mais rica no caso de análise de materiais cristalinos (Gomes, 1986). Quando uma substância cristalina é sujeita a um feixe de raios-X incidindo a um determinado ângulo, os diferentes planos ou camadas de átomos ou íons dos cristais refletem parte da radiação, sendo o ângulo de reflexão igual ao ângulo de incidência.

Para que as ondas refletidas pelos diferentes planos cristalinos estejam em fase, isso é, para que seja máxima a intensidade da radiação refletida, é necessário que se verifique certa relação entre o comprimento de onda da radiação, e a distância entre os planos dos cristais ou distância interplanar e o ângulo de incidência. A lei de Bragg fornece a base teórica desse método (Jenkins, 1986), dada por:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (\text{Eq.1})$$

na qual:

n = número inteiro (ordem de difração);

λ = comprimento de onda;

d = distâncias interplanares e;

θ = ângulo de reflexão.

A formação dos picos de difração se deve justamente à lei de Bragg quando vista em nível de planos cristalinos.

Quando uma amostra cristalina é submetida à análise são geradas automaticamente informações que serão utilizadas na construção de um gráfico da intensidade do feixe difratado pelo ângulo de difração 2θ . Dessa forma surgirão picos de alta intensidade quando a condição de difração de Bragg for satisfeita por algum conjunto de planos cristalográficos (Klug *et al.*, 1974). Logo, a identificação dos compostos é feita com a análise do difratograma, como pode ser observado na Figura 2.1.

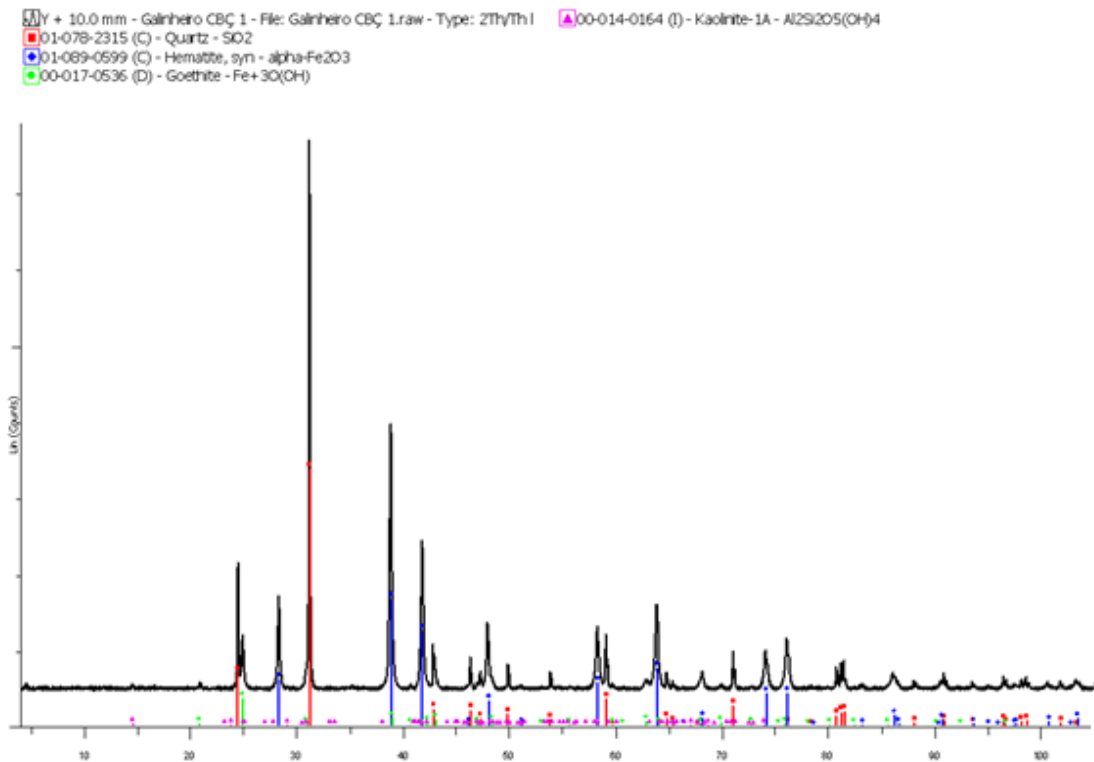


Figura 2.1- Identificação e quantificação dos óxidos presentes em minérios de ferro

A partir do difratograma é feita a medida das distâncias relativas entre os diferentes picos aos quais oferecem uma medida única da estrutura cristalográfica dos minerais.

A etapa de quantificação é de fundamental importância na caracterização de uma amostra, os procedimentos de quantificação mais comumente aplicados são: cálculos estequiométricos a partir de análise química e da composição mineralógica da amostra; método de refinamento de espectro de difração de raios-X multifásico total, ou o método de Rietveld (Neumann *et al.*, 2010).

O método de Rietveld é um método de refinamento de espectro multifásico total de difração de raios-X. De acordo com Neumann e colaboradores (2010), a grande vantagem do método para quantificação é justamente que se utilizam todos os pontos de um espectro, a superposição de picos, que usualmente inviabiliza outros métodos de quantificação por difração de raios-X.

2.3.3- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) se tornou um instrumento indispensável nas diversas áreas da engenharia, pois informações como características microestruturais podem ser observadas por meio dessa técnica.

O MEV tem seu potencial ainda mais desenvolvido com a adaptação na câmara da amostra de detectores de raios-X, permitindo a realização de análise química *in situ* na amostra em observação. A partir da captação pelos detectores e da análise dos raios-X característicos emitidos pela amostra, resultado da interação dos elétrons primários com a superfície, é possível obter informações qualitativas e quantitativas da composição da amostra na região de incidência do feixe de elétrons.

Atualmente quase todos os MEV são equipados com detectores de raios-X, devido à confiabilidade e principalmente devido à facilidade de operação. A grande maioria faz uso do detector de energia dispersiva (EDX) (Bozzola e Russell, 1999).

Na microscopia eletrônica de varredura os sinais de maior interesse para a formação da imagem são os elétrons secundários e os retro-espalhados. À medida que o feixe de elétrons primários vai varrendo a amostra esses sinais vão sofrendo modificações de acordo com as variações da superfície. Os elétrons secundários fornecem imagem de topografia da superfície da amostra e são os responsáveis pela

obtenção das imagens de alta resolução, já os retroespalhados fornecem imagem característica de variação de composição (Neumann *et al.*, 2010). A discriminação de hematita e magnetita em imagens de elétrons retro-espalhados requer um contraste muito grande na imagem. Contudo, essa condição de contraste impossibilita a segmentação de outras fases. Assim, a discriminação completa desses minerais, que apresentam números atômicos médios muito similares (Hematita: 20,59; Magnetita: 21,02), não é viável com esse tipo de microscopia. Assim, nem mesmo sistemas automatizados de MEV equipados com microanálise por dispersão de energia de raios-X (EDS) conseguem discriminar a hematita da magnetita.

Uma alternativa é utilizar microscopia óptica, que é capaz de discriminar as fases que não são distinguíveis por microscopia óptica (hematita e magnetita).

2.3.4-Análise Química

Análise química é o conjunto de técnicas de laboratório utilizadas na identificação das espécies químicas envolvidas em uma reação, como também a quantidade dessas espécies, de maneira que permite obter resultados quantitativos e qualitativos. Análise qualitativa permite identificar a composição química do material com a ajuda de instrumentos apropriados, sendo que o resultado é obtido geralmente pela adição de um padrão interno (Yepes, 2013).

É um método bastante conhecido e praticado durante muitos anos. O interesse pela determinação dos elementos em concentrações cada vez mais baixas levou ao aperfeiçoamento das técnicas instrumentais, sem, contudo abandonar os métodos clássicos (Ratti, 2001).

Atualmente a Vale, por exemplo, utiliza-se da análise química para validar os resultados obtidos pela quantificação mineralógica realizada pela microscopia (Marques, 2013).

Nos últimos anos a fluorescência de raios-X, tornou-se uma técnica bastante utilizada para análise de materiais, é uma técnica não destrutiva que permite não só uma análise qualitativa (identificação dos elementos presentes numa amostra) como também quantitativa, permitindo estabelecer a proporção em que cada elemento se encontra presente.

O princípio do método é muito simples. Utiliza-se uma fonte de radiação X para ionizar os níveis internos dos átomos constituintes da amostra, por efeito fotoelétrico. Na reorganização do átomo e regresso ao estado fundamental, estes átomos podem libertar o excesso de energia por meio da emissão de um fóton X, de energia igual à diferença de energia de ligação dos níveis entre os quais se deu a transição. Como esta radiação é característica de cada elemento químico, a detecção e análise do espectro permite a identificação e quantificação dos elementos constituintes da amostra (Cesareo *et al.*, 2010).

2.4- Separação Magnética: princípios e teoria

2.4.1. Aspectos gerais

A separação magnética é um método bastante utilizado na área de processamento de minérios para concentração e purificação de muitas substâncias minerais. Ela pode ser empregada, dependendo das diferentes respostas ao campo magnético associado às espécies mineralógicas, individualmente ou em conjunto a outras técnicas no beneficiamento de minério.

A separação magnética está relacionada a duas questões: a primeira se refere ao comportamento de diferentes partículas minerais quando são expostas a um mesmo campo magnético e a segunda refere-se às forças magnéticas que atuam sobre elas.

2.4.2- Descrição das grandezas magnéticas

Quando se descreve um campo magnético é comum se referir a duas grandezas: campo magnético H e indução magnética B (ou densidade do fluxo magnético). Ambas são vetores de campo, sendo caracterizadas não somente pela sua magnitude, como também pela sua direção no espaço (King, 2001).

Uma unidade comumente usada para H é o Oersted. Esta unidade refere-se ao sistema de unidades eletromagnético (e.m.u) e, embora esse sistema tenha sido substituído pelo sistema SI, quase todos os dados de propriedades magnéticas são ainda registradas na literatura no sistema e.m.u. Os fatores necessários para conversão do e.m.u para o SI são dados na Tabela 2.4. Note-se que no sistema SI: $T=Wb/m^2=kg/As=N/Am^2$, $Wb=Nm/A$, $H=Wb/A=m^2kg/A^2s^2$.

Tabela 2. 4- Fatores de conversão para converter do sistema emu para o sistema SI (King, 2001)

Variável	Unidade (emu)	Unidade (SI)	Fator de conversão
Força de campo magnético, H	Oersted	Amper/metro	$10^3/4\pi$
Indução magnética, B	Gauss	Weber/m ² (Tesla)	10^{-4}
Polarização magnética, J	Emu	Weber/m ² (Tesla)	$4\pi 10^{-4}$
Permeabilidade magnética, μ	Adimensional	Henry/metro	$4\pi 10^{-7}$
Susceptibilidade de volume, k	Emu/cm ³	Adimensional	4π
Susceptibilidade de massa, χ	Emu/g	m ³ /kg	$4\pi 10^{-3}$

Em qualquer região do espaço a indução magnética é relacionada com o campo magnético e é dada por:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{Eq.2})$$

na qual μ é a permeabilidade magnética do meio, sendo no vácuo $\mu = \mu_0$

Quando uma partícula mineral é exposta a um determinado campo H , em qualquer região do espaço o fluxo magnético B é acrescido de um valor J' , que é a indução magnética que resulta da magnetização da partícula. Assim, dentro de uma partícula o campo é dado por:

$$B = \mu_0 H' + J' \quad (\text{Eq.3})$$

A polarização magnética é proporcional à intensidade de campo dentro da partícula logo,

$$J' = \mu_0 k H' \quad (\text{Eq.4})$$

na qual k é a susceptibilidade magnética específica em relação ao volume do material. A permeabilidade magnética e a susceptibilidade não são independentes, pois:

$$B = \mu_0 H' + J' \quad (\text{Eq.5})$$

Logo, comparando as equações tem-se que:

$$\mu = \mu_0 (1 + k) \quad (\text{Eq.6})$$

Vários parâmetros são utilizados para descrever as propriedades magnéticas de um material, sendo que um desses parâmetros é a razão entre a permeabilidade magnética de um material e a permeabilidade no vácuo, ou seja,

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + k \quad (\text{Eq.7})$$

na qual μ_r é a permeabilidade relativa do material, que é um parâmetro adimensional. A permeabilidade relativa de um material é uma medida do grau segundo o qual um material pode ser magnetizado, ou da facilidade com que um campo pode ser induzido na presença de um campo externo.

Vale salientar que a polarização magnética e a magnetização dependerão não apenas da substância, como também da forma como a partícula é colocada no campo magnético externo. Materiais diamagnéticos e paramagnéticos possuem valores negativos e positivos de susceptibilidade magnética, respectivamente, e estes são independentes da intensidade de campo.

Materiais ferromagnéticos têm valores positivos de susceptibilidade magnética. Para um número de forma de partículas diferentes o campo magnético é dado por:

$$H' = \frac{H}{1+kN} \quad (\text{Eq. 8})$$

sendo:

H' a intensidade do campo magnético no interior de uma partícula;

H a intensidade do campo magnético externo;

k a susceptibilidade volumétrica;

N o fator de desmagnetização: um fator geométrico que depende da forma da partícula. Valores de 0,333 são usados para partículas esféricas, 0,27 para cilíndricas de comprimento igual ao seu diâmetro e 0,0172 para cilíndricas de comprimento igual a dez vezes o diâmetro (King, 2001).

2.4.3 Propriedades Magnéticas dos Minerais

O processo de separação magnética se baseia nas diferenças de susceptibilidade magnética das várias espécies minerais. A susceptibilidade magnética é uma propriedade de um mineral que determina seu comportamento quando submetido a um campo magnético (Svoboda, 1987), ou seja, seu grau de magnetização em resposta ao campo magnético aplicado, sendo definido segundo a equação:

$$K = \frac{M}{H} \quad (\text{Eq. 9})$$

sendo M a magnetização do mineral e H o campo magnético aplicado, ambas as grandezas são em (A/M) e a susceptibilidade magnética é um número adimensional.

Na literatura é comum que essa propriedade seja expressa em valores de susceptibilidade magnética específica ou susceptibilidade magnética em massa (χ), expressa em m^3/kg , conforme o sistema internacional de unidades para eletromagnetismo (SI), ou cm^3/g , conforme valores CGS (Hopstock, 1985), definida por:

$$\chi = K/\rho \quad (\text{Eq. 10})$$

sendo ρ a massa específica do mineral em (m^3/kg ou cm^3/g).

De acordo com Hayes (1985) essa propriedade depende dos elementos presentes e da estrutura cristalina do mineral, não exercendo influência o tamanho e a forma das partículas.

Com base nessa característica diversas referências, como livros clássicos de mineralogia (Parfenoff *et al.*, 1970; Klein, 2002), de processamento mineral (Hopstock, 1985; Svodoba, 1987) e de metalurgia (Hayes, 1985; Chen, 1986), classificam os minerais em: ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos.

- Minerais Ferromagnéticos: apresentam magnetismo permanente, são fortemente atraídos na presença de um campo magnético aplicado. Ex: magnetita, ilmenita, pirrotita;
- Minerais Paramagnéticos: fracamente atraídos pelo campo magnético aplicado. Ex: hematita, olivina e diopsídio.
- Minerais Diamagnéticos: respondem de maneira negativa, sendo repelidos quando submetido a um campo magnético. Ex: calcita, albita, quartzo e apatita.

As diferenças de susceptibilidade dos minerais são exploradas na separação magnética, de maneira que as partículas com susceptibilidade alta respondem prontamente ao campo magnético. Como o campo magnético influencia na separação magnética dos diferentes minerais, o controle da intensidade de campo magnético permite uma separação seletiva das partículas minerais com diferentes valores de susceptibilidade magnética. Baixas intensidades de campo magnético são capazes de separar minerais com elevada susceptibilidade, enquanto altas intensidades são necessárias para separar minerais com valores de susceptibilidade baixo. O controle da intensidade do campo pode ser efetuado pelo emprego de eletroímãs, fazendo variar a corrente elétrica (King, 2001).

Lawver e Hopstock (1974) resumem dados disponíveis sobre os valores da susceptibilidade magnética dos minerais separados por métodos magnéticos, sendo alguns desses resultados apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5- Susceptibilidade magnética dos minerais (modificado de Lawver e Hopstock 1974)

Classificação	Mineral	Susceptibilidade Magnética m ³ /kg
Ferromagnético	Magnetita	14-18x10 ⁻⁴
	Ilmenita	13x10 ⁻⁷
	Pirrotita	2,3x10 ⁻⁷
Paramagnético	Anfibiólio	0,8-11,3x10 ⁻⁷
	Piroxênio	0,8-8,0x10 ⁻⁷
	Biotita	0,5-9,8x10 ⁻⁷
	Calcopirita	0,11-0,55x10 ⁻⁷
Diamagnético	Pirita	0,04-0,13x10 ⁻⁷
	Olivina	1,1-12,6x10 ⁻⁷
	Quartzo	-6,19x10 ⁻⁹

Portanto, a susceptibilidade magnética pode ser utilizada como um parâmetro diferencial para o beneficiamento de minérios, cuja eficiência de separação dependerá principalmente das propriedades magnéticas dos minerais e da granulometria da amostra, exercendo influência ainda o tempo de residência da amostra no campo magnético, o grau de liberação dos minerais presentes e as forças de gravidade e de atrito (Dahlin e Rule, 1993; Augusto *et al.*, 2002).

Com base nos dados da literatura sobre susceptibilidade magnética e na classificação dos minerais, Sampaio e colaboradores (2010), listam os principais minerais, indicando as faixas de campo magnético nas quais os mesmos podem ser separados (Tabela 2.6).

Os processos de separação magnética se baseiam fundamentalmente numa força de interação entre o campo magnético e um dipolo magnético. A partícula, quando submetida a um campo magnético, se torna magnetizada, e essa magnetização induzirá à formação dos polos magnéticos nos terminais da partícula que ficará orientada ao longo

das linhas do campo de magnetização. A partícula se tornará assim um dipolo magnético e a intensidade desse dipolo dependerá das características de cada partícula.

Para analisar as forças magnéticas que atuam em uma partícula, pode-se imaginar que uma partícula magnetizada comporta-se como uma barra magnética, na qual suas extremidades estão os polos norte e sul. Nos materiais ferromagnéticos o alinhamento dos dipolos é permanente, já nos materiais paramagnéticos esse alinhamento não é permanente, sendo induzido somente enquanto o campo é aplicado tornando-se aleatório na ausência do campo.

Quando um campo magnético uniforme é aplicado a uma partícula (Figura 2.2 A), as forças que atuam sobre os polos são iguais e opostas, sendo a resultante dessas forças nula. Se o campo aplicado nas extremidades difere em intensidade o resultado será uma força agindo sobre a partícula (Figura 2.2 B). Tal fato mostra que o campo possui uma variação que é função das dimensões do material. Esta variação de campo é chamada de gradiente, que resulta numa força que atua sobre o material, provocando atração ou repulsão (Sampaio *et al.*, 2010). A Figura 2.2 apresenta duas configurações para um campo magnético.

Tabela 2.6- Faixas de campo onde dentro das quais os minerais podem ser separados pelo processo de separação magnética (Sampaio *et al.*, 2010)

Grupo 1- Ferromagnéticos – Faixas de Campo de 500 a 5.000 G		
Ferro	Magnetita	
Grupo 2- Magnéticos – Faixa de Campo de 5.000 A 10.000 G		
Ilmenita	Pirrotita	Franklenita
Grupo 3- Fracamente Magnéticos – Faixa de Campos 10.000 A 18.000 G		
Hematita	Mica	Calcopirita
Siderita	Molibdenita	Molibdenita
Rodonita	Cerargirita	Talco
Limonita	Huebnerita	Titanita
Braunita	Wolfranita	Calcocita
Corindon	Bornita	Cinábrio
Pirolusita	Apatita	Gesso
Manganita	Tetrahedrica	Zincita
Calamita	Willemita	Ortoclásio
Esfarelita	Cerussita	Epidoto
Siderita	Dolomita	Fluirita
Rodocrosita	Psilomelano	Augita
Granada	Arsenopirita	Homblenda
Serpentinita	-	-
Grupo 4- Muito Fracamente Magnético – Faixa de Campo acima de 18.000 G		
Pirita	Serpentinita	Cobalita
Smithonita	Nicolita	Safira
Esfalerita	Diopsídio	Cassiterita
Estibinita	Turmalina	Ortoclásio
Criolita	Cuprita	Dolomita
Enargita	Galena	Spinélio
Berílio	Whiterita	Rubi
Magnesita	Crisocola	Covelita
Azurita	Rutilo	Feldspato
Gesso	Mica	Zircão
Malaquita	-	-
Grupo 5- Não Magnéticos e Diamagnéticos		
Barita	Corindon	Apatita
Bismuto	Topázio	Aragonita
Calcita	Galena	Grafita
Fluorita	Antimônio	Quartzo

Fonte catalogada: Catálogo EriezMagnetic

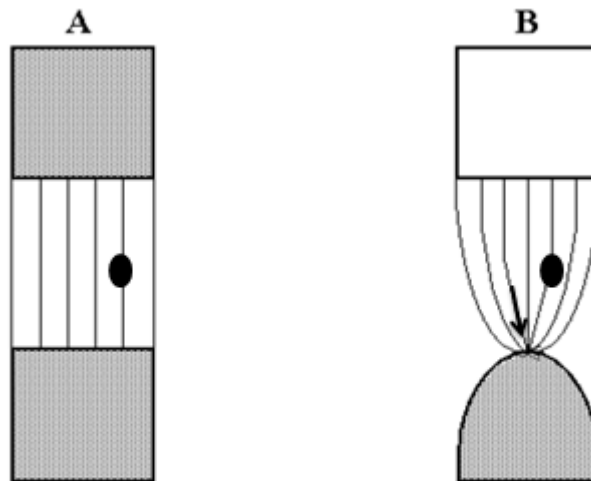


Figura 2.2- Campo magnético uniforme (A) e campo convergente (B), ilustrado o gradiente de campo (Sampaio *et al.*, 2010)

As forças que atuam em uma determinada partícula, colocada em um campo magnético, em um equipamento de separação são: a força magnética; a força de gravidade, a força de arraste hidrodinâmico e forças interparticulares.

Da composição dessas forças, e da ação de cada uma delas sobre as partículas de características diferentes, resultarão trajetórias distintas. A resultante entre a força magnética e as forças competitivas é que irá determinar a viabilidade de uma partícula magnética ser recuperada em um separador magnético. As forças existentes entre as partículas magnéticas e não magnéticas são determinantes da qualidade da separação.

2.5- Separadores Magnéticos

2.5.1. Classificação

Existe no mercado uma variedade de separadores magnéticos, sendo classificados de acordo com o uso, podendo ser a úmido ou a seco. De acordo com as características do campo de indução, os separadores são subdivididos em separadores de alta e baixa intensidade.

Na essência, qualquer separador magnético opera aplicando uma força sobre as partículas de maior susceptibilidade magnética a fim de separá-las das partículas com menor susceptibilidade magnética.

A escolha da classe de um separador é ditada por inúmeras considerações, tais como, a distribuição do tamanho das partículas e, as propriedades magnéticas das partículas a serem separadas entre outras. A Figura 2.3 classifica os diferentes separadores magnéticos, indicando suas aplicações principais.

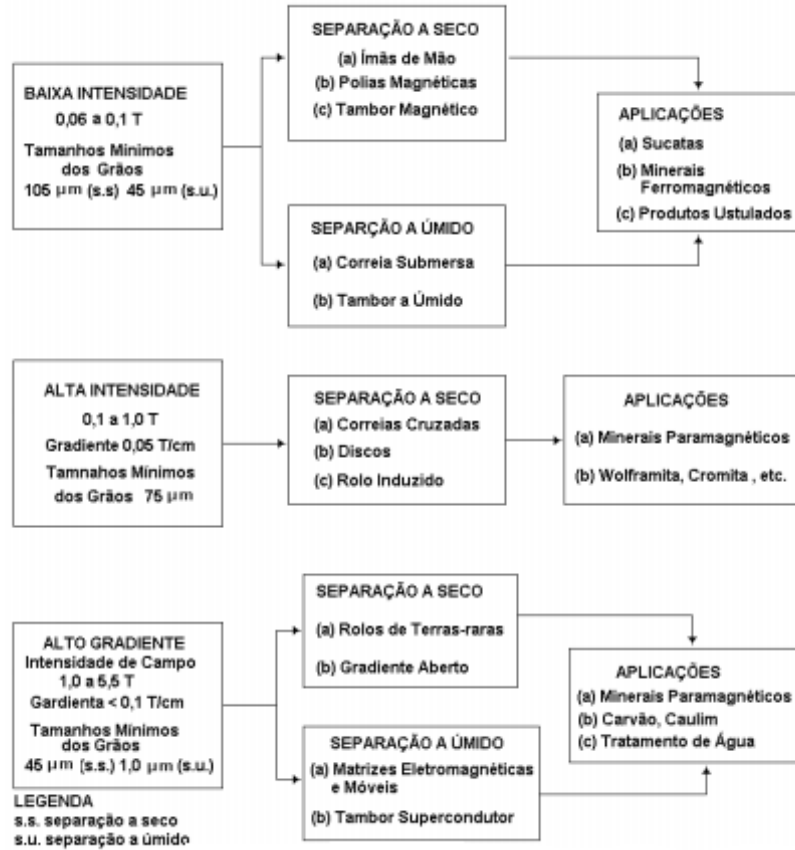


Figura 2.3- Fluxograma de características, classificação e aplicação dos separadores magnéticos (Sampaio *et al.*, 2010)

A Figura 2.4, por outro lado, compara o intervalo de tamanhos de aplicação da concentração magnética em comparação a de outros processos de concentração para o caso de minérios de ferro do Brasil.

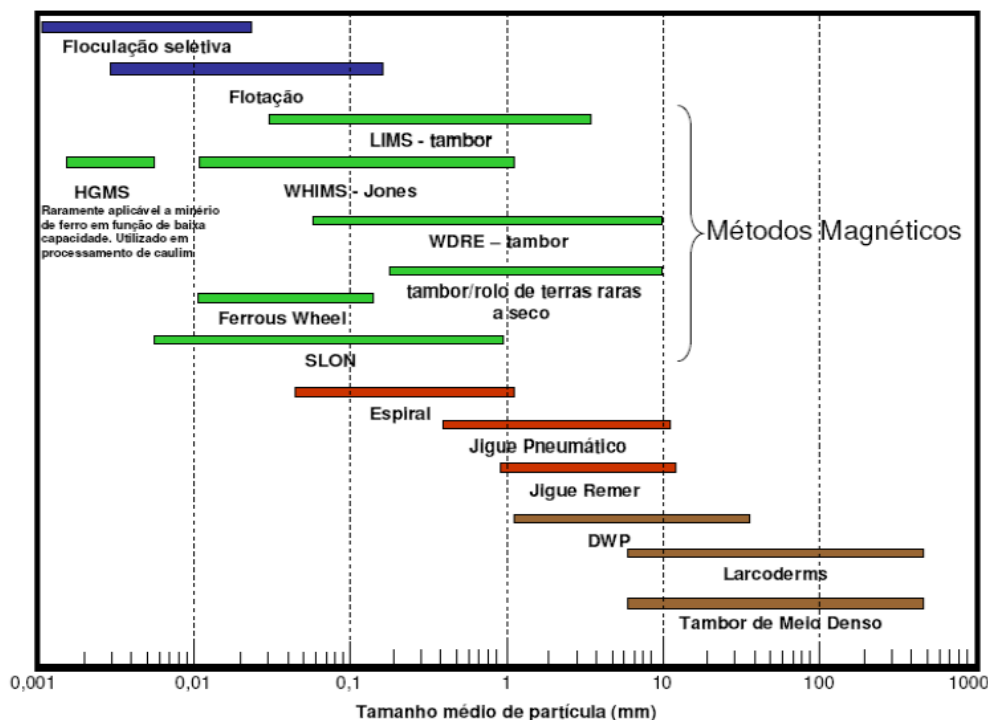


Figura 2.4- Métodos de concentração de minérios de ferro no Brasil (Figura modificado de Araujo *et al.*, 2008)

2.5.2-Principais Separadores Magnéticos Industriais

Os separadores magnéticos têm sido muito utilizados no Brasil para a separação de magnetita e hematita de quartzo, destacando-se a separação magnética a úmido, de alta intensidade empregada nas usinas de minério de ferro no Brasil.

A aplicação da separação magnética na indústria do minério de ferro do Brasil alcançou patamares mais elevados com o advento das matrizes ferromagnéticas e, com a disponibilização do separador Jones. Devido ao sistema de matrizes e à grande eficiência da separação nas faixas granulométricas finas, o equipamento proporciona vantagens significativas comparadas aos demais. A sua aplicação, devido à operação sempre com alta intensidade restringe-se em geral, aos minerais paramagnéticos (Sampaio *et al.*, 2010).

Na área de concentração de minérios, a principal aplicação da separação magnética é a úmido e de alta intensidade, caso no qual se enquadraram separadores de tambor WDRE e os separadores tipo JONES na concentração da hematita.

Vale a pena destacar outros equipamentos desenvolvidos recentemente que podem ser aplicados para minérios de ferro, que são: Slon (procedência chinesa comercializado pela Outotec no Brasil) o qual é um separador a úmido de alta intensidade e alto campo (mas de eixo horizontal), FerrousWhells e os supercondutores magnéticos. Além desses existem os concentradores magnéticos de bancada como o Isodinâmico Frantz, Tubo Davis, o L4, o Rapid, entre outros. A Tabela 2.7 lista a utilização de concentração magnética nas principais minas de minério de ferro no Brasil.

Tabela 2.7- Utilização de concentração magnética nas principais minas de minério de ferro no Brasil (modificado de Oliveira, 2006)

Mina	Equipamento	Alimentação (mm)	Campo Magnético (G)
Cauê	Jones DP317 Grossos	-1,00+0,15	9.000
Cauê	Jones DP317 Finos	-0,15	9.000
Conceição	Jones DP317 Grossos	-1,00+0,15	9.000
Conceição	Jones DP317 Finos	-0,15	9.000
Timbopeba	WDRE	-1,00	6.000
Fábrica	Jones DP317 Finos	-1,00	9.000
Feijão	Jones DP317 Grossos	-1,00	9.000
Brucutu	WDRE	-1,00+0,15	9.000
Alegria	Jones DP317 Grossos	-1,00+0,15	9000
Mutuca	Ferrous Wheel	0,15	12.000
Jangada	WDRE	-1,00+0,15	6.000
Jangada	Ferrous Wheel	0,15	12.000
Pico	WDRE	-1,00	6.000

2.5.3- Separador Magnético WDRE

É um concentrador magnético de tambor, via úmida de média intensidade de ímãs permanentes, podendo ser fornecido com três tipos de tanques: concorrentes, contracorrente e contra rotação.

O tanque tipo contra rotação é recomendado para a aplicação onde se requer altas recuperações e não há necessidade de um concentrado de alta pureza. O tanque do tipo contracorrente é aplicado como último estágio de concentração, onde se requer um concentrado bastante puro, porém se aceita uma capacidade de alimentação relativamente baixa, o que pode inviabilizar a usina em alguns casos. Já o tanque concorrente é muito eficiente para produzir um concentrado magnético a partir de materiais relativamente mais grossos, na faixa de “*sinterfeed*”, com alta capacidade, sendo normalmente o tipo recomendado para operações de concentração de minério de ferro segundo o manual do fabricante.

O circuito magnético do equipamento é constituído por um conjunto de ímãs permanentes, que é montado sobre o eixo, no interior do tambor magnético, se estendendo por uma região que abrange um arco de aproximadamente 120° e pode ser posicionado manualmente por meio de um dispositivo instalado em uma das laterais do tambor magnético. A Figura 2.5 ilustra o separador magnético de tambor WDRE em escala piloto.



Figura 2.5- Separador magnético de tambor WDRE (Marques, 2013)

De acordo com Marques (2013) as principais variáveis operacionais desse equipamento são:

- Percentagem de sólidos na alimentação: quanto maior a percentagem de sólidos, maior arraste e a perda de massa magnética para o rejeito Figura 2.6.
- Distância entre o tambor e o fundo da bacia: essa distância pode ser aumentada ou diminuída conforme a necessidade do processo. Quanto mais próximo o tanque se encontrar da face inferior do tambor, menor “gap” entre eles e mais intenso o campo magnético aplicado sobre a polpa de minério, sendo, portanto, obtida uma maior atração dos minerais ferrosos na direção do tambor
- Frequência de rotação do tambor (RPM): maior frequência de rotação do tambor resulta em menor recuperação mássica (rendimento), maior teor do concentrado e menor arraste de massa magnética para o rejeito (Figura 2.7).
- Taxa horária da alimentação: é muito importante introduzir uma alimentação de polpa constante ao longo de toda a largura do tambor, sem sobrecarga, com variação máxima de capacidade de até 10%. Polpas muito diluídas implicarão em uma redução na capacidade do separador e se forem utilizadas altas percentagens de sólidos, acima de 45%, ocorrerá arraste de minerais não magnéticos para o concentrado, tendo como consequência a queda no teor do produto.

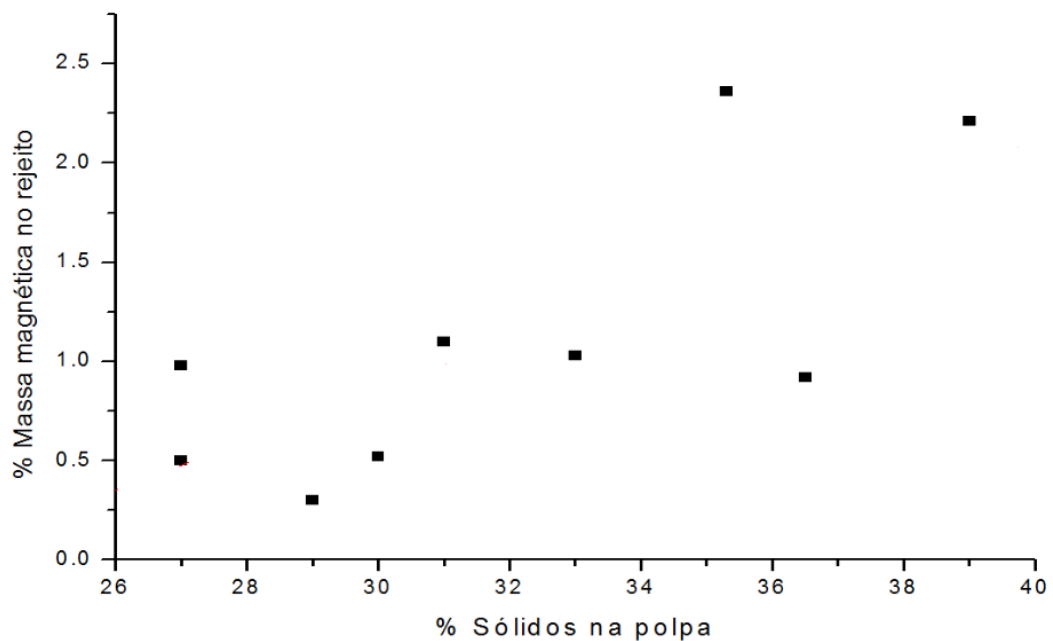


Figura 2.6- Variação da percentagem de massa magnética no rejeito de um WDRE em escala piloto em função da percentagem de sólidos (modificado de Marques, 2013)

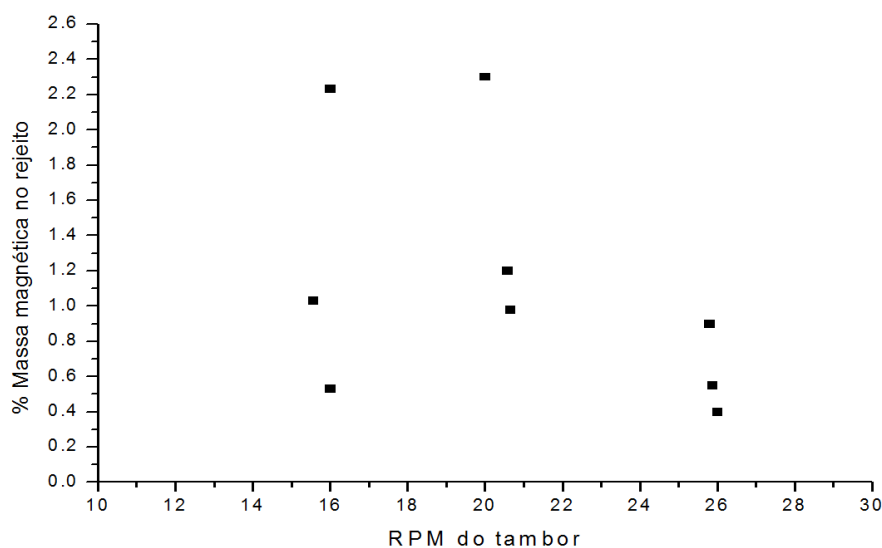


Figura 2.7- Variação da porcentagem de massa magnética no rejeito de um WDRE em escala piloto em função da frequência de rotações do tambor (modificado de Marques, 2013)

2.5.4- Separador Magnético Tipo Jones

A primeira aplicação do separador JONES, foi na CVRD, atual Vale, no Brasil em 1972, onde esse tipo de separador magnético de alta intensidade foi usado com sucesso na concentração de minério de ferro (Steinberg *et al.*, 2012).

É um concentrador eletromagnético de carrossel, via úmida de alta intensidade de campo magnético.

O separador magnético Jones caracteriza-se (Figura 2.8) por um campo magnético de alta intensidade criado por eletroímã. O aparelho tem dois níveis que trabalham de forma simultânea, sendo que, em cada nível, existem diversas caixas de trabalho (contendo as matrizes magnéticas). Essas caixas de trabalho são constituídas por um conjunto de placas dispostas de forma paralela, que recebem a polpa de alimentação.

As partículas paramagnéticas são atraídas para a superfície das placas, ficando presas. O movimento rotatório leva esse material a um ponto onde há um fluxo de água descendente atravessando as placas para a retirada de um produto com características intermediárias (médios), ainda sob a ação do campo. O próximo ponto alcançado já se encontra fora da ação do campo e um novo jato de água faz a retirada do concentrado.



Figura 2.8-Separador magnético tipo JONES (Marques, 2013)

De acordo com Marques (2013) as principais variáveis desse equipamento são:

- Percentagem de sólidos na alimentação: quanto maior a percentagem de sólidos maior existe uma tendência do rejeito e do concentrado serem pobres, e maior recuperação mássica (Figura 2.9).
- Abertura efetiva das placas (Gap): quanto maior a abertura do gap, menor recuperação mássica e enriquecimento do concentrado e rejeito (Tabela 2.8).
- Pressão de água de lavagem do médio: quanto maior a pressão da água, maior a tendência de enriquecimento do concentrado e redução da recuperação mássica (Figura 2.10).

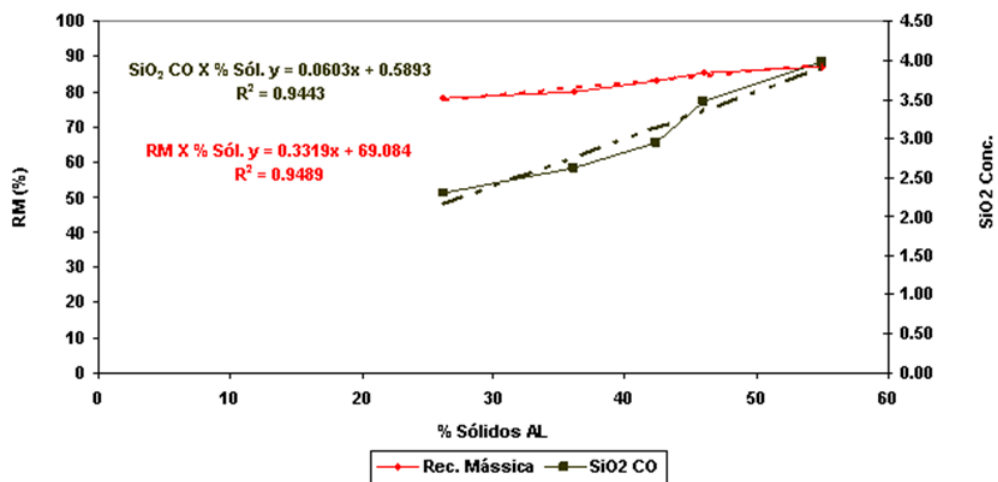


Figura 2.9- Impacto da percentagem de sólidos da alimentação na recuperação mássica e no teor do concentrado (Marques, 2013)

Tabela 2.8- Influência da abertura do gap na separação magnética no separador JONES em escala piloto (Marques, 2013)

Alimentação: 42-43% sólidos, 54% Fe, 22,2% SiO ₂		Gap/ Taxa horária de alimentação	
		2,5mm/137,06 (kg/h)	3,8mm/248,07 (kg/h)
Concentrado	Recuperação mássica	81,83	56,31
	Fe %	63,59	65,5
	SiO ₂	8,88	6,36
Médio	Recuperação mássica	11,6	7,2
	Fe %	41,94	38,22
	SiO ₂	37,42	42,87
Rejeito	Recuperação mássica	6,58	36,49
	Fe %	6,57	37,32
	SiO ₂	88,95	43,47

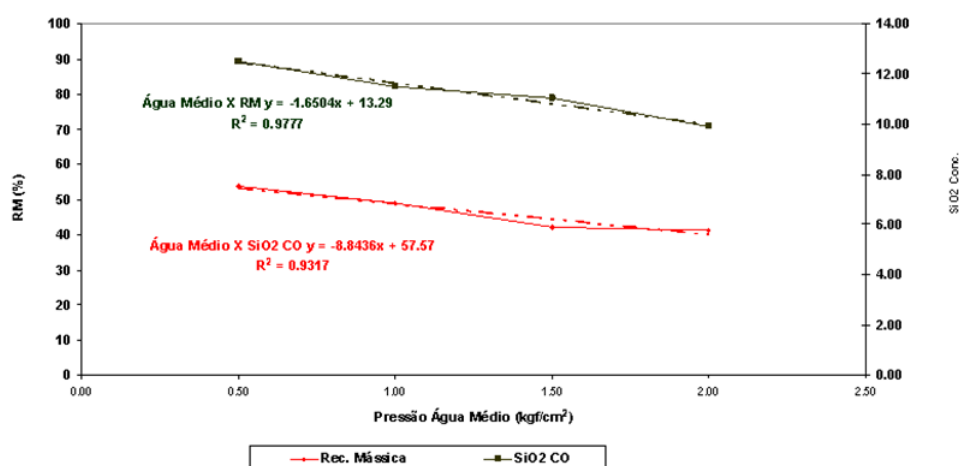


Figura 2.10- Impacto da pressão de água na recuperação mássica e no teor da sílica do produto na separação magnética no JONES em escala piloto (Marques, 2013)

2.5.5- Separador Ferrous Wheel

É um equipamento de concentração magnética de alto gradiente, utilizado industrialmente para minério de ferro de baixo teor, e que se caracteriza por apresentar custo mais baixo quando comparado a outros concentradores de alta intensidade (Figura 2.11).

Sua principal vantagem é o baixo custo operacional, por não demandar energia elétrica na geração de campo magnético. O equipamento é de fácil operação e,

dependendo do circuito, pode ser utilizado como *rougher* ou *rougher/cleaner*, no mesmo equipamento. Os polos magnéticos são construídos com ímãs permanentes de terras raras, operando com matrizes de separação, o que propicia a geração de campos magnéticos de alto gradiente, com campos magnéticos de 2.200 G, os quais são ampliados pelo uso de matrizes, criando campos magnéticos de até 12.000 G (Oliveira, 2006).



Figura 2.11- Ferrous Wheel (Inbras 2013)

2.5.6- Supercondutores Magnéticos

Esses separadores geram um campo magnético no mesmo sentido do fluxo com que os solenoides elétricos normais. A grande diferença destes e o solenoide é que as bobinas são feitas de um material supercondutor e uma liga supercondutora. Porém uma desvantagem é que este material deve manter-se a baixas temperaturas para manter seu estado supercondutor (Fuerstenau *et al.*, 2003).

Existem muitos materiais que podem ser usados como supercondutores nesses equipamentos, sendo que a opção preferida é mais econômica são as ligas de nióbio e titânio, as quais são também as mais comuns. Entretanto, a escolha mais importante é a do sistema de resfriamento, pois este indicará o quão economicamente viável a separação.

2.5.6.1- Separadores Magnéticos de Alto Gradiente

Esse separador magnético supercondutor funciona mediante a captura de partículas em uma matriz ferromagnética. Ele tem como principal vantagem a geração de um campo magnético de indução muito forte que ajuda a capturar partículas fracamente magnéticas. O sistema é responsável por um consumo de energia considerável, não podendo operar de maneira contínua, pois a matriz deve ser desmagnetizada para que o material seja solto (Svoboda, 1987).

2.5.6.2- Separador Magnético de Gradiente Aberto

A diferença em relação ao anterior é que este supercondutor tem um ímã que proporciona uma região magnetizada em um espaço aberto com um campo altamente divergente. Qualquer material que passa por essa região e seja susceptível magneticamente é capturado pela força do ímã.

Para torná-lo um dispositivo mais compacto é adicionado um sistema criogênico, uma estrutura de resfriamento indireto para proporcionar simplicidade e economia. O dispositivo simplificado proporciona um campo de 4T (40.000 G), sendo usado na separação magnética de minerais com baixa susceptibilidade magnética (Svoboda, 1987).

2.5.7- Análise da separação magnética em bancada

2.5.7.1- Separador Isodinâmico Frantz

É conhecida uma ampla variedade de separadores magnéticos que podem ser utilizados no fracionamento de amostras para a caracterização. O mais comumente utilizado em laboratório é o aparelho Frantz Isodinâmico modelo L-1, pioneiro na linha de equipamentos de bancada, devido à sua versatilidade e à existência de diversos dados publicados sobre sua aplicação.

O Frantz Isodinâmico realiza operações a seco, e consiste basicamente de uma calha vibratória, com inclinações longitudinal e lateral variáveis (0 a 90°), situada entre os polos de um eletroímã gerador de campo magnético.

A calha é o local onde efetivamente ocorre a separação entre minerais fortemente magnéticos e fracamente magnéticos. Sua inclinação, tanto lateral quanto

longitudinal, e vibração são importantes para determinar o tempo de exposição dos minerais ao campo magnético, influenciando diretamente na eficiência da separação, principalmente em função da massa específica e tamanho das partículas.

O separador Frantz pode gerar densidades de fluxo magnético de 0 até 20.000 G, essa última equivalente à intensidade de corrente máxima atingida pelo equipamento, que é de 1,8 A (www.sgfrantz.com). A relação entre a intensidade de corrente e de campo magnético é ilustrada na Figura 2.12.

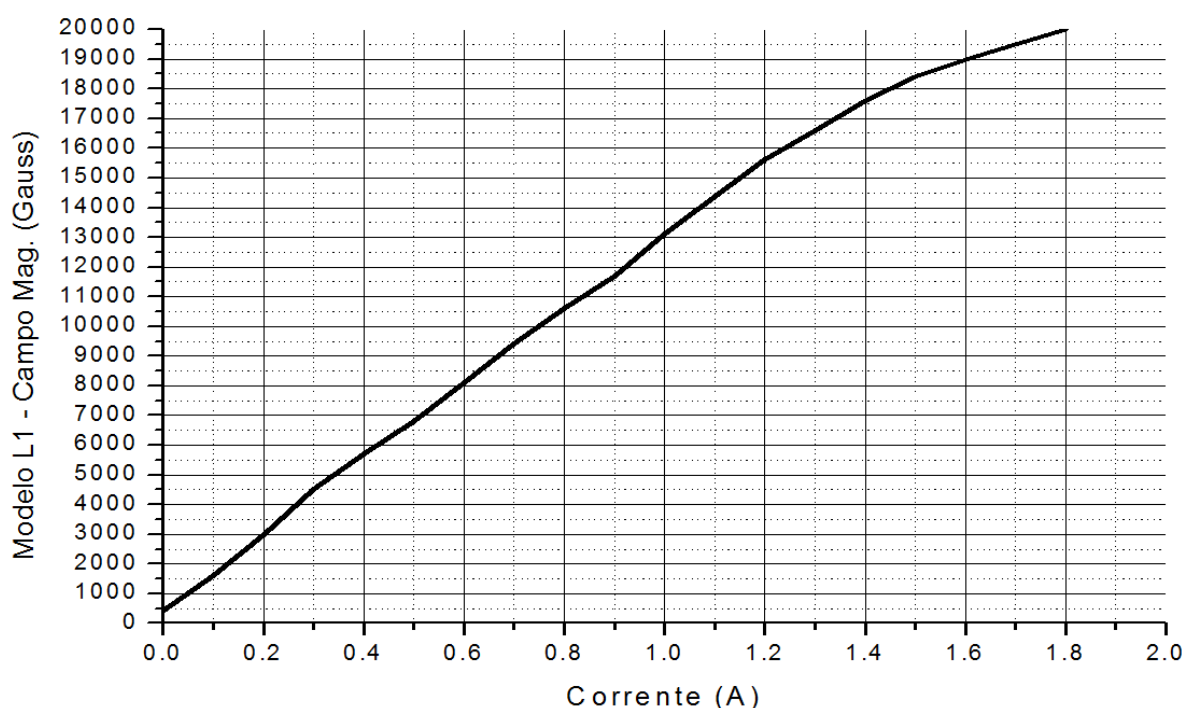


Figura 2.12- Relação entre intensidade de corrente e de campo magnético para o Frantz Isodinâmico modelo L-1 (www.sgfrantz.com)

O equipamento pode processar com eficiência partículas com tamanhos entre 833 e 74 μm . Para partículas maiores que 833 μm , há um limite físico para o seu escoamento (para chegar a esse valor o furo de alimentação do funil deve ser aumentado). No caso do limite inferior, a eficiência pode ser boa quando usado para partículas menores, mais isso dependerá das características do minério (Neumann *et al.*, 2010).

Uma classificação por tamanho de boa qualidade é um pré-requisito básico para seu bom funcionamento do separador Frantz, sendo ainda mais importante no caso da separação de partículas mais finas. O material também deve estar bem seco, de modo

que permita um bom escoamento. Uma regulagem otimizada da vibração da calha e da quantidade de material alimentado pelo funil fazem uma grande diferença na eficiência de separação (Neumann *et al.*, 2010).

Segundo Parfenoff e colaboradores (1970) os principais fatores que influenciam na separação magnética dos minerais no Separador Isodinâmico Frantz são a intensidade de corrente e a inclinação lateral.

A Figura 2.13 mostra as partes que compõem o separador Isodinâmico Frantz L-1 que são:

1. Sistema de controle de vibração;
2. Base ajustável para calibrar o equipamento;
3. Amperímetro;
4. Indicador de incêndio do equipamento;
5. Controle da amperagem;
6. Controle da inclinação lateral;
7. Indicador do grau para a inclinação lateral;
8. Vibrador;
9. Alimentador;
10. Polos dos ímãs;
11. Núcleo;
12. Trilho separador;
13. Recipientes de coleta dos materiais;
14. Controle da inclinação frontal (encontrado na parte de trás do equipamento).

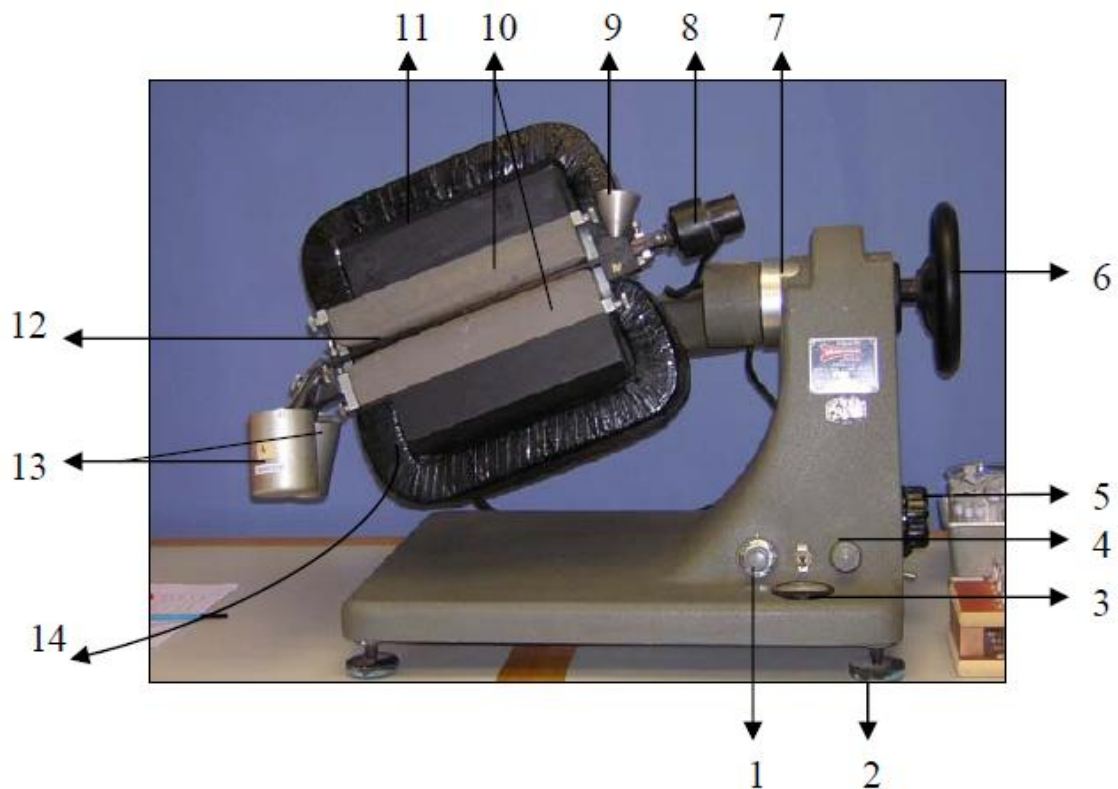


Figura 2.13- Peças que compõem o Separador Isodinâmico Frantz L-1

Segundo Hess (1959) uma determinação aproximada da susceptibilidade mássica de qualquer material passado no separador Frantz pode ser feita por aplicação da equação:

$$\chi = \frac{20 \cdot 10^{-6} \cdot \text{sen } \alpha}{I^2} * 4\pi \times 10^{-3} \quad (\text{Eq.11})$$

sendo:

χ = susceptibilidade mássica (em m³/kg);

α = ângulo de inclinação lateral;

I = intensidade de corrente em (A).

Essa equação pode ser aplicada para os casos em que $\chi \ll 1$, não podendo ser usada para valores de χ muito elevados, como no caso da magnetita. Para valores de corrente de 1,3 A, ocorre a saturação, de maneira que o equipamento deve ser utilizado para correntes menores que esse valor.

Uma importante aplicação para esta regra é que uma vez que o valor de χ para qualquer mineral é conhecido, a corrente na qual o mineral é atraído pode ser calculada com qualquer outra inclinação lateral.

2.5.7.2- Tubo Davis

É um concentrador eletromagnético em escala de bancada utilizado para estimar o teor e a recuperação mássica (rendimento) na etapa de separação de baixa intensidade de campo magnético. O Tubo Davis (Figura 2.14) é constituído por um eletroímã que pode gerar um campo magnético de até 4.000 G.

O equipamento possui um tubo de separação de vidro e um mecanismo de agitação motorizado. O tubo é colocado entre os polos do ímã a um ângulo de aproximadamente 45°, o qual pode ser variado. Durante a operação um pequeno motor elétrico aciona o mecanismo de agitação que suporta o tubo de vidro, de maneira que o tubo move-se para frente e para trás enquanto gira. As partículas magnéticas presentes na amostra são direcionadas para a zona de maior intensidade do campo, enquanto que as partículas não magnéticas são direcionadas para fora do tubo.

Um concentrado fica então disponível para determinação da percentagem de material magnético, que é feita por meio de uma análise química (Sepor, 2013).



Figura 2.14- Tubo Davis (Marques, 2013)

2.5.7.3- Separador L4

É um concentrador eletromagnético em escala de bancada que possui uma matriz de separação fixa entre dois polos magnéticos induzidos, conforme ilustra a Figura 2.15. É utilizado com boa eficiência na estimativa de qualidade e recuperação metalúrgica, para as etapas de separação com campos magnéticos de baixa, média e alta intensidade. Utilizando uma matriz de separação com abertura de 1,5mm, permite atingir campos magnéticos de até 13.000 G (Marques, 2013).



Figura 2.15- Separador L4 (Marques, 2013)

2.5.7.4- Separador Magnético de alto gradiente RAPID

O separador magnético de alta intensidade Rapid (Figura 2.16) opera com o material na forma de polpa. O valor do campo magnético varia com a intensidade da corrente e com a grade utilizada no processo de separação, podendo atingir até 2,1 T (21.000 G) de campo magnético.

O separador magnético Rapid trata pequenas quantidades de material, em decorrência do tamanho de suas matrizes. Contudo, são equipamentos práticos e versáteis, que proporcionam resultados qualitativos confiáveis a baixo custo.



Figura 2.16- Separador Magnético Rapid

2.5.7.5-Satmagan

O Satmagan é um método fácil e rápido de operar, usado para medir o teor de material magnético da amostra (Figura 2.17). Diferentes dos mencionados anteriormente, ele é um analisador, não um separador. O tempo de medição do Satmagan é de apenas um minuto com uma precisão dentro de 0,4% (Stradling, 1991). O princípio por trás do Satmagan é a medição da força que atua na amostra em um campo magnético com um gradiente espacial.

Uma vez calibrado é rápido de utilizar, tornando-o um instrumento ideal para a análise de misturas magnéticas e não magnéticas (Rapiscan Systems, 2013).



Figura 2.17- Satmagan 135 (Rapiscan Systems, 2013)

2.6- Modelagem e Simulação

2.6.1- Aspectos gerais

A modelagem e a simulação são excelentes ferramentas de apoio para desenvolvimento de novos processos e equipamentos, bem como a otimização do desempenho de operações já existentes. Modelar diz respeito à tentativa de dar forma a algum objeto de interesse (King, 2001). Um modelo surge da demanda investigativa de se criar uma estrutura capaz de descrever o comportamento de um objeto ou um fato do mundo real. Um modelo só ganha significado quando consegue descrever, imitar a natureza, e para tanto é necessário criar, uma rotina um ciclo investigativo, a qual é constituída de análises e observações de experimentos.

Logo, para descrever adequadamente a realidade a modelagem não dispensa resultados experimentais, de maneira que apenas os dados experimentais podem permitir a validação ou a rejeição do modelo criado. Não é possível, portanto, fazer

modelagem sem experimentação, de modo que modelagem sem experimentação é apenas uma especulação.

2.6.2- Modelagem da separação magnética

2.6.2.1-Modelos empíricos

Diz-se que um modelo é empírico quando as equações utilizadas para descrever as relações observadas entre as diversas variáveis do problema são postuladas, não havendo qualquer pressuposto teórico que justifique a princípio a relação utilizada. Em síntese, um modelo empírico consiste em analisar dados experimentais, fazendo algumas suposições (quase sempre muito simples) na forma de conjunto de equações ou mesmo de explicações intuitivas, que poderão ser usadas como um modelo matemático e com os dados de uma forma conveniente (Sodré, 2007).

São revisados a seguir os modelos matemáticos propostos por Dobby e Finch, Tucker e King, os quais podem ser enquadrados nessa categoria.

2.6.2.1.1-Modelo de Dobby-Finch

Dobby e Finch (1977) desenvolveram um modelo empírico para descrever a operação de separador magnético de alta intensidade a úmido. Eles mostraram que a recuperação de partículas magnéticas depende da susceptibilidade magnética e do tamanho de cada partícula, e que a probabilidade de captura é proporcional à força magnética de captura e a força hidrodinâmica, que tende a desalojar a partícula de modo que a força magnética F_m é proporcional a $d_p^3 \rho \chi H G / d_\omega$ e a força hidrodinâmica F_u é proporcional a $d_p \mu u_f$.

Sendo:

$$G = H \text{ se } H < H_s \text{ ou } G = H_s \text{ se } H > H_s$$

d_ω = o diâmetro do arame da matriz;

H_s = a intensidade do campo magnético de saturação dentro do material da matriz;

u = a velocidade média da polpa.

A recuperação de uma partícula de tamanho d_p e susceptibilidade magnética χ deve ser uma função de:

$$\frac{F_m}{F_H} = \frac{d_p^2 \rho \chi H^2}{\mu u} \quad (\text{Eq.12})$$

na qual os dados experimentais são melhor correlacionados de acordo com:

$$M_L = \frac{GH(\rho\chi)^{1.2} d_p^{2.5}}{u^{1.8} L_m^{0.8}} \quad (\text{Eq.13})$$

sendo L_M (*Rendimento da matriz*) = $\frac{\text{fração de massa magnética na alimentação}}{\text{massa da matriz}}$

A regressão linear (Figura 2.18) foi utilizada para desenvolver um modelo de recuperação utilizando as variáveis: tamanho de partícula, susceptibilidade, intensidade do campo, velocidade da polpa e a matriz de carregamento, sendo que a matriz de carregamento é a relação do peso na alimentação e o peso da matriz. Os ensaios foram realizados com as condições expressas na Tabela 2.9.

Logo, a recuperação de partículas de tamanho d_p e susceptibilidade magnética volumétrica k é modelada por:

$$R_M(\chi, d_p) = 0,5 + B \log_{10} \left(\frac{M_L}{M_{50}} \right), \text{ para } M_{50} 10^{-0,5/B} \leq M_L \leq M_{50} 10^{0,5/B} \quad (\text{Eq.14})$$

sendo:

$$R_M(\chi, d_p) = 0 \text{ para } M_L < M_{50} 10^{-0,5/B} \quad R_M(\chi, d_p) = 1,0 \text{ para } M_L > M_{50} 10^{0,5/B}.$$

M_{50} é o ponto de corte magnético no qual a recuperação é 0,5. M_{50} e B são parâmetros específicos de cada separador em particular, mas que independem do material que é tratado. Dobby e Finch encontraram $B = 0,348$ e $M_{50} = 1,269 \times 10^{-2}$ para o caso de um separador magnético supercondutor com sistema criogênico.

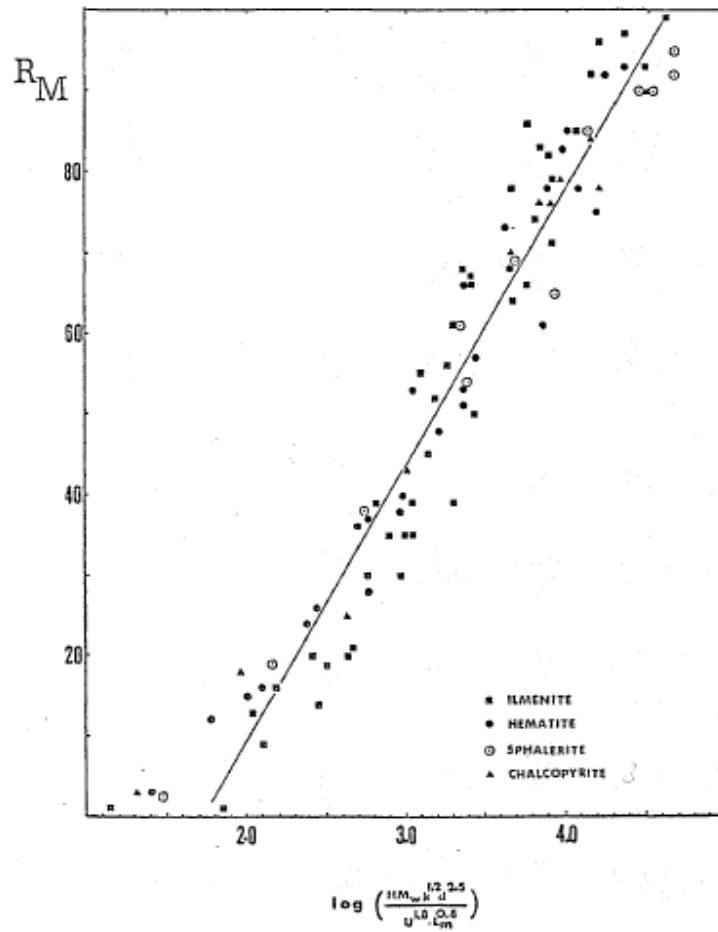


Figura 2.18- Relação entre R_M e as variáveis de operação (Dobby e Finch, 1977)

Tabela 2.9- Condições usadas para o modelo de recuperação magnética (Dobby e Finch, 1977)

Magnitude	Intervalo	Unidade de Medida
Intensidade do Campo (H)	0,4 a 20	kG, Gauss
Susceptibilidade Volumétrica (k)	$0,25 \times 10^{-4}$ a $8,0 \times 10^{-4}$	emu/cm^3
Tamanho de partícula (d_p)	8,5 a 35	μm
Velocidade média da polpa (U)	2,9 a 15,6	cm/s
Fração de massa magnética na matriz (L_m)	0,083 a 1,0	-
Recuperação de partícula no produto magnético (R_m)	10 a 90	-

As partículas na alimentação de um separador magnético são distribuídas dentro de um intervalo de valores de χ e d_p , sendo o rendimento total de sólidos para a fração magnética dada por:

$$\gamma = \sum_i \sum_j R_m(\chi(g), d_p) p_{ij}\left(\frac{g}{d_p}\right) p_j(dp) + \sum_j R_p(d_p) p_j(d_p) \quad (\text{Eq.15})$$

sendo, R_p a retenção fracionária de partículas de tamanho d_p por aprisionamento físico. Comumente é mais fácil medir a distribuição de susceptibilidade magnética em uma amostra do material diretamente em experimentos de laboratório, usando o separador isodinâmico Frantz ou separador de tambor rotativo e, então, determinar o valor médio do teor g para cada fração em separado. A distribuição de teores de partículas em cada fração magnética pode ainda ser determinada por técnicas de análise de imagem, conforme discutido no item (2.2). O rendimento do produto magnético é dado por:

$$Y = \sum_k \sum_i \sum_j R_m(\chi, d_p) p_{kij}\left(\frac{\chi}{g}, d_p\right) p_{ij}\left(\frac{g}{d_p}\right) p_j(d_p) \quad (\text{Eq.16})$$

$$p_{kij}(\chi, d_p) p_{ij}\left(\frac{g}{d_p}\right) = p_{ikj}\left(\frac{g}{\chi}, d_p\right) p_{kj}\left(\chi, \frac{\chi}{d_p}\right) \quad (\text{Eq.17})$$

O modelo empírico de Dobby e Finch para separadores magnéticos de alta intensidade a úmido usado para previsão de desempenho se encontra disponível no simulador de processo ModsimTM.

Esse modelo apresenta vários parâmetros que precisam ser calibrados a partir de dados experimentais, sendo apenas empregado na modelagem da separação de partículas com tamanhos inferiores a 35 μ m (Tabela 2.9).

2.6.2.1.2-Modelo de Tucker

Tucker (1994) desenvolveu um modelo matemático para um separador magnético de alto gradiente, baseado no modelo de concentração gravimétrica previamente desenvolvido no Warren Spring Laboratory. Nessa metodologia a separação é representada por um conjunto de coeficientes de transferência (T_{ij}), que foram descritos como funções da intensidade do campo aplicado para cada tamanho e susceptibilidade magnética de partícula.

O modelo prevê que uma partícula será capturada pela matriz se a força magnética excede as forças opostas gravitacionais e hidrodinâmicas.

Uma abordagem empírica mostrou que a seguinte equação proporciona uma boa previsão de H_0 (campo de captura limite):

$$H_0 = a + \frac{Pl}{k_j^b} + \frac{c}{dp_i^2} \quad (\text{Eq.18})$$

sendo, k_j e dp_i as susceptibilidades magnéticas da partícula e tamanho de partícula, respectivamente, a uma constante relacionada com o tipo de matriz, b uma constante e Pl é um dos parâmetros do modelo. C é um coeficiente de escala que faz com que o terceiro termo seja desprezível para partículas com tamanhos superiores a 20 micrometro. A dispersão estatística ao redor de H_0 foi modelada pela soma de duas funções de distribuição (Figura 2.19).

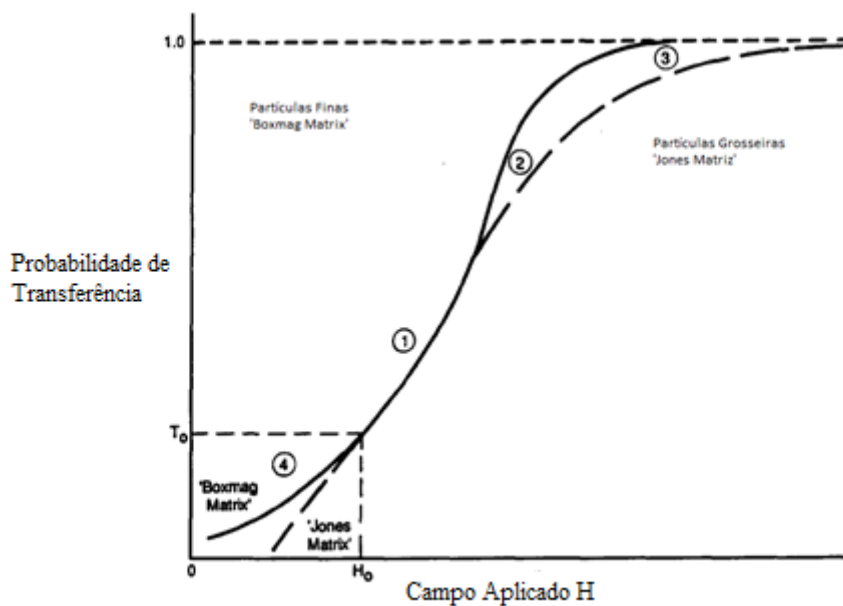


Figura 2.19- Curvas de probabilidade de transferência (Tucker, 1994)

Fazendo uma análise das regiões do gráfico da Figura 2.19 para $H > H_0$ tem-se que:

$$T_{IJ} = T_0 + (1 - T_0) \tanh\{f[g_1(H - H_0) + g_2(H - H_0)^2]\} \quad (\text{Eq.19})$$

O termo $g_1 \cdot [H - H_0]$ é dominante na região (1) da curva da Figura 2.19. O coeficiente pode ser representado por uma equação da forma:

$$g_1 = V_1 + \frac{k_j - V_2}{V_3} \quad (\text{Eq.20})$$

sendo, V_1, V_2, V_3 constantes de escala. O termo $g_2 [H - H_0]^2$ (Eq.19) fornece a concavidade da região (2) da curva da função de probabilidade de transferência. Uma curva mais côncava é observada para as partículas mais finas (Figura 2.19). O coeficiente g_2 controla o grau de concavidade e é representado no modelo pela relação:

$$g_2 = a_2 \cdot \left(1 - \tanh\left[\frac{dp_1}{50}\right]\right) \quad (\text{Eq.21})$$

sendo, a_2 uma constante relacionada com o tipo de matriz.

O coeficiente f controla a inclinação da curva de transferência, e é utilizado para enfraquecer o argumento da função tangente hiperbólica em campos magnéticos elevados, a fim de melhorar o ajuste da aproximação observada na região (3) da curva da Figura 2.19, a qual representa uma região de saturação. Essa saturação magnética é alcançada quando um aumento na aplicação do campo externo não é capaz de aumentar a magnetização do material, de modo que, o campo magnético aproxima-se a um valor máximo.

O coeficiente f toma uma forma exponencial:

$$f = w_1 \cdot \exp\left(-\frac{\left[\frac{dp}{75}\right]^{p_2}}{w_2}\right) \quad (\text{Eq.22})$$

para $d_p > 75$ micrometros e

$$f = w_1 \cdot \exp\left(-\frac{\left[\frac{75}{dp}\right]^{p_2}}{w_2}\right) \quad (\text{Eq.23})$$

com a restrição adicional: $0,15 \leq f_1 \leq 1,0$ e w_1, w_2, w_3 são constantes de escalas e p_2 é um parâmetro do modelo.

Para $H < H_0$ duas expressões são utilizadas de acordo com a matriz do equipamento, uma extrapolação linear $H = H_0$ com inclinação $(f \cdot g_1)$ para a matriz 'Jones' de placas triangulares, enquanto que a (Eq.23) produzirá uma cauda pronunciada característico da matriz 'Boxmag' (matriz de placas horizontais distribuídas em forma de carrossel).

$$T = \left(\frac{H}{H_0}\right)^{f \cdot g^1} \quad (\text{Eq.24})$$

O grau de arraste vai aumentar com a quantidade total de material capturado e geralmente é mais pronunciado para as partículas mais finas. A probabilidade de transferência por arraste (T') é dado empiricamente por:

$$T'_{ij} = \frac{E}{\log(dp_i)} \cdot (1 - T_{ij}) \quad (\text{Eq.25})$$

e

$$E = P_3 \cdot \frac{m}{F.M.(1-P_3)} \quad (\text{Eq.26})$$

sendo, m a quantidade total de material no produto magnético (capturado mais arrastado), F é o fluxo de massa da alimentação e P_3 é um parâmetro de arraste.

Os parâmetros do modelo podem ser derivados, para qualquer separação, por meio de regressão das equações a partir de dados obtidos experimentalmente. Uma vez calibrado, o modelo pode ser utilizado para prever o desempenho da separação para diferentes regimes de funcionamento.

A recuperação do mineral R_{ij} no produto magnético dado por:

$$R_{ij} = T_{ij} \cdot A_{ij} \quad (\text{Eq.27})$$

na qual A_{ij} corresponde à proporção do mineral A contido na fração de susceptibilidade, j no tamanho i na alimentação.

Observa-se na Figura 2.20 que os resultados ajustados são consistentes com os medidos. Assim, o modelo mostrou ser capaz de fazer uma boa previsão na recuperação de um concentrado magnético, ao longo de uma gama de intensidades de campo aplicado, conforme é mostrado na Figura 2.20.

Embora interessante, o modelo contém um grande número de parâmetros que demandam calibração, cujos valores não consta na publicação original.

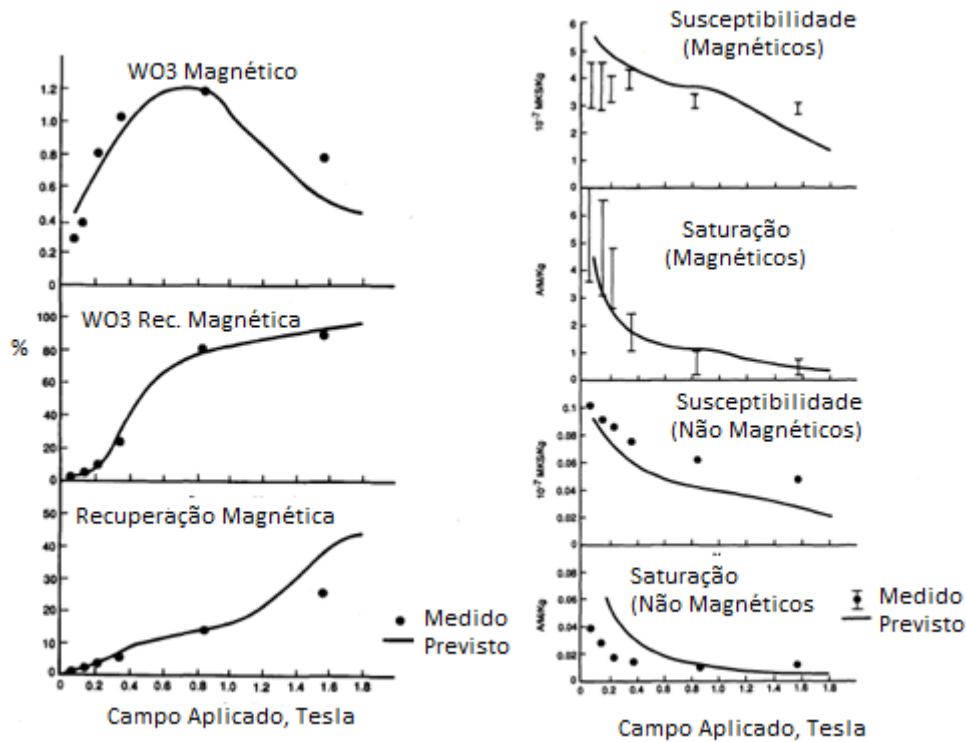


Figura 2.20- Comparação entre resultados medidos e ajustados para o modelo de Tucker (Tucker, 1994)

2.6.2.1.3- Modelo de King

King (Manual Modsim, 2001) desenvolveu o modelo matemático simples do concentrador magnético de tambor para processamento a úmido. O modelo utiliza a função de Rosin-Rammler para representação da curva de partição, no qual, a composição volumétrica da partícula é a variável que controla a separação. Neste modelo o curto-circuito para o produto não magnético aumenta exponencialmente à medida que o tamanho da partícula diminui.

A recuperação é dado por:

$$R_{ij} = \alpha_i + (1 - \alpha_i) \left[1 - \exp \left(-0,693 * \left(\frac{g_j}{p_1} \right)^{p_2} \right) \right] \quad (\text{Eq.28})$$

sendo,

$$\alpha_i = P_3 \exp \left[\frac{-P_4 * d_i}{0,001} \right] \quad (\text{Eq.29})$$

sendo:

R_{ij} = recuperação mássica de material da classe de tamanhos i e da classe de composição j de susceptibilidade magnética;

g_j = teor de mineral magnético na classe de composição j ;

d_i = tamanho representativo de partícula em mm;

p_1, p_2, p_3 e p_4 = Parâmetros do modelo.

Queiroz (2008) utilizou-se do modelo matemáticos proposto por King, para previsão de resultados nos processos de concentração de minério de ferro, utilizando o simulador de processo ModsimTM.

Os parâmetros utilizados por Queiroz para o WDM2 são apresentados na Tabela 2.10.

Tabela 2.10- Parâmetros do modelo WDM2 utilizado por Queiroz (2008)

p_1	p_2	p_3	p_4
0,9	0,346	0,15	20

Uma comparação entre os resultados medidos em teste de separação em escala piloto e os ajustados é mostrado na Tabela 2.11, que mostra uma boa aderência do modelo.

Tabela 2.11- Composição média de cada classe de associação mineral, na alimentação da concentração magnética (Queiroz, 2008)

Fluxo	Partição (%)		% Fe		% SiO ₂		% Al ₂ O ₃		% PPC	
	Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado
Alimentação WDRE	100,00	100,00	53,57	53,82	21,00	21,04	0,90	0,86	1,29	1,38
ConcentraçãoWDRE	16,44	16,14	67,09	67,89	2,44	1,02	0,37	0,75	1,93	1,20
Rejeito WDRE	83,56	83,79	50,91	51,12	24,66	24,90	1,00	0,80	1,08	1,41

Apesar do seu caráter empírico, a simplicidade e a aplicabilidade a diferentes tipos de separadores magnéticos tornam atrativa a sua utilização.

2.6.2.2- Modelos Fenomenológicos

Um modelo fenomenológico baseia-se na descrição dos fenômenos analisados além do uso de informações empíricas. O modelo é derivado a partir de pressupostos

teóricos fundamentais, como as leis de conservação de massa, energia e quantidade de movimento.

São revisados a seguir os modelos matemáticos propostos por: Hopstock, Napier-Munn e Rayner e por Schneider e Calixto.

2.6.2.2.1- Modelo de Hopstock

Hopstock (1975) desenvolveu um modelo matemático para um separador magnético de tambor a seco de baixa intensidade. O modelo foi descrito com base nos princípios físicos, resultando em um modelo simples, porém funcional. A Figura 2.21 mostra um arranjo simplificado para um separador magnético de tambor a seco.

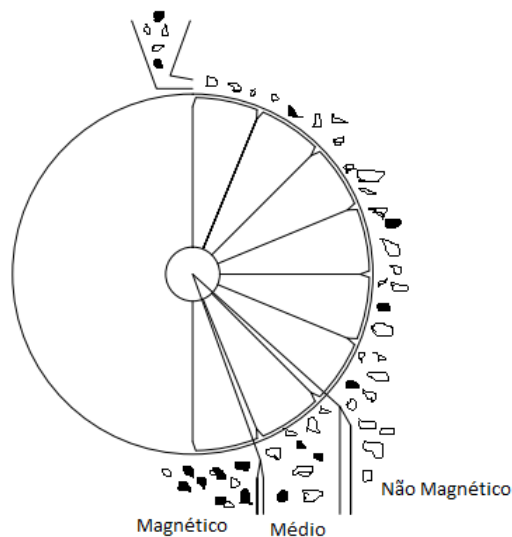


Figura 2.21- Diagrama esquemático de um separador magnético de tambor a seco (modificado de King, 2001)

O material particulado é alimentado no topo do tambor e é carregado para baixo à medida que o tambor gira. As partículas paramagnéticas são atraídas pelo campo magnético interno do tambor. As partículas não magnéticas tendem a ser projetadas da superfície do tambor pela força centrífuga. As partículas podem ser separadas, dependendo da posição de separação, em um rejeito, um produto médio (misturado) e um concentrado magnético.

O modelo baseia-se no conhecimento da força radial que uma partícula localizada próximo à superfície do tambor experimenta. Ela pode ser calculada como o produto da densidade de força magnética e o volume magnético da partícula. O quadrado da intensidade de campo próximo à superfície do tambor é obtido a partir das equações que descrevem as componentes em coordenadas cilíndricas do campo magnético (King, 2001):

$$H^2 = H_r^2 + H_\varphi^2 + H_z^2 \quad (\text{Eq.30})$$

$$H^2 = \exp\left(-\frac{2\pi(r-R)}{\varphi_0 R}\right) \quad (\text{Eq.31})$$

sendo:

H_0 = campo na superfície do tambor;

φ = variável angular em coordenadas cilíndricas;

φ_0 = espaçamento angular entre os polos magnéticos;

r = distância do centro do tambor;

R = raio do tambor.

A componente radial da força sobre uma partícula situada próximo à superfície do cilindro é dada por:

$$F_r = V_m \mu_0 \frac{\partial H}{\partial r} = -V_m \mu_0 H_0^2 \frac{\partial H}{\partial r} \exp\left(-\frac{2\pi(r-R)}{\varphi_0 R}\right) \quad (\text{Eq.32})$$

O sinal negativo indica que a componente radial da força em uma partícula paramagnética é dirigida para dentro. Na superfície do tambor $r = R$ logo,

$$F_r = -V_m \mu_0 H_0^2 \frac{2\pi}{\varphi_0 R} \quad (\text{Eq.33})$$

O componente radial da densidade de força magnética na superfície do tambor é:

$$f_m = \frac{2\pi \mu_0 H_0^2}{\varphi_0 R} \quad (\text{Eq.34})$$

O comportamento de uma partícula sobre a superfície do cilindro é regida por um equilíbrio de forças, no qual a força centrífuga é dada por:

$$F_c = \rho_p v_p \omega^2 R \quad (\text{Eq.35})$$

e a componente da força da gravidade é dada por:

$$F_{Gr} = \rho_p v_p g \sin\varphi \quad (\text{Eq.36})$$

de modo que a partícula se separa da superfície do tambor quando:

$$F_c + F_{Gr} > F_r \quad (\text{Eq.37})$$

A velocidade de rotação crítica para descolamento do volume magnético de uma partícula é obtida igualando as forças magnéticas e centrífugas:

$$\omega_{Crit} = \left(\frac{2\pi V_m \mu_0}{\varphi_0 \rho_p v_p} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{H_0}{R} \quad (\text{Eq.38})$$

Pelo fato da razão V_m/v_p ser independente do tamanho de partícula, esse modelo prevê que a ação da rotação do separador magnético de tambor seja independente do tamanho da partícula, sendo isso confirmado por experimentos em uma faixa de tamanho de 1,3 a 6,0 mm, como ilustrado na Figura 2.22. Assim, o ponto teórico de despreendimento de uma partícula de volume magnético V_m é dado por:

$$\text{sen} \varphi_d = \frac{V_m f m}{\rho_p v_p g} - \frac{\omega^2 R}{g} \quad (\text{Eq.39})$$

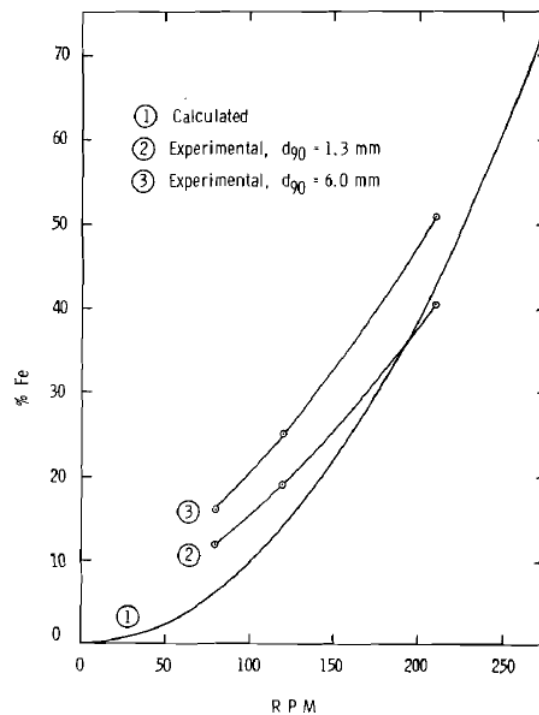


Figura 2.22- Teor de partículas mistas de magnetita-ganga para as quais as forças magnéticas e centrífugas estão em equilíbrio para uma frequência de rotação (Hopstock, 1975)

A Figura 2.22 mostra as curvas de separação correspondentes a um minério de ferro, no qual, o teor de ferro das partículas que se encontram em equilíbrio no separador é relacionado à velocidade de rotação. Segundo o modelo as partículas são liberadas do tambor com o aumento progressivo na frequência de rotação. A previsão teórica e os experimentos têm boa correspondência, o que é evidenciado pela relativa independência do tamanho da partícula.

Assim a velocidade de rotação pode ser escolhida de maneira a assegurar que apenas produtos de alta qualidade sejam mantidos aderidos ao cilindro e transportados para descarga do concentrado.

Na prática, o comportamento de materiais no separador magnético desvia do modelo previsto por uma série de razões. As interações partícula-partícula são desconsideradas nas análises, e isso pode ser significativo em um separador industrial, o qual precisa atingir altas taxas de produção para se tornar economicamente viável (King, 2001).

Variações significativas na intensidade de campo magnético sobre a superfície do tambor, causadas por ranhuras ou outra configuração de projeto utilizada para a intensificação de gradiente no campo magnético são outras causas potenciais de desvio entre resultados experimentais e o modelo.

A separação imperfeita do mineral, também resulta da correlação imperfeita entre a composição de partícula e a susceptibilidade magnética ou volume magnético de partícula. A função de distribuição condicional em relação ao volume magnético V_m , para partículas de teor mineral g deve ser refletida no modelo. Se $p(f_m)$ é a função de probabilidade na forma distribuída para a intensidade de campo magnético dentro do leito de partículas, sobre a superfície do tambor, e $p\left(\frac{V_m}{g}\right)$ é a distribuição condicional do volume magnético para partículas de teor g , o rendimento para o rejeito é dado por (King, 2001):

$$Y_T = \int_0^{\varphi t} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \text{sen}^{-1}\left(\frac{V_m f_m}{\rho_p v_p g} - \frac{\omega^2 R}{g}\right) p(f_m) p\left(\frac{V_m}{g}\right) P(g) df_m dV_m dg d\varphi \quad (\text{Eq.40})$$

Sendo a capacidade do separador rotativo do tambor dada por:

$$\text{Capacidade} = \omega R \rho_b b \quad (\text{Eq.41})$$

sendo, ρ_b a densidade aparente da camada e b a espessura da camada.

Para aumentar a capacidade do separador, o tambor deverá girar em uma velocidade próxima à crítica, a fim de tornar possível que partículas de teor mais baixo reportem ao rejeito.

Logo,

$$\text{Capacidade} = \rho_b b \left(\frac{\pi K \mu_0}{\varphi_0 \rho (1 + kN)} \right)^{\frac{1}{2}} H_0 \quad (\text{Eq.42})$$

A partir das equações descritas é possível calcular, por exemplo, a taxa de alimentação apropriada e a velocidade de rotação ótima do tambor. Porém testes devem ser conduzidos para encontrar condições ótimas na prática.

2.6.2.2.3- Modelo de Napier-Munn e Rayner

Napier-Munn e Rayner (2002) desenvolveram um modelo matemático para um separador magnético de tambor a úmido de baixa intensidade usado em circuito de recuperação de meio denso. O modelo foi proposto pressupondo que a captura das partículas magnéticas nesse tipo de separador ocorre por um processo de floculação, que nada mais é do que a aglomeração de partículas ferromagnéticas como resultado da magnetização por um campo magnético externo.

Partículas de materiais ferromagnéticos estão dispersas em um campo magnético. Por esse material irão passar linhas de força do campo magnético, gerando um gradiente de campo mais elevado nas partículas. Quando a suspensão de partículas magnéticas passa através de um campo externo as partículas se tornam magnetizadas. O resultado é que devido à proximidade umas com outras, as partículas passam a se atrair formando agregados de diferentes tamanhos e formas.

Esses agregados começam a juntar-se na superfície do tambor e são removidos para o concentrado magnético, de modo que, se a densidade da polpa é alta o processo de floculação ocorre mais rapidamente (Napier-Munn e Rayner, 2002). Por outro lado, se a densidade da polpa é baixa esse processo ocorre mais lentamente, conforme é ilustrado nas Figuras 2.22 e 2.24.

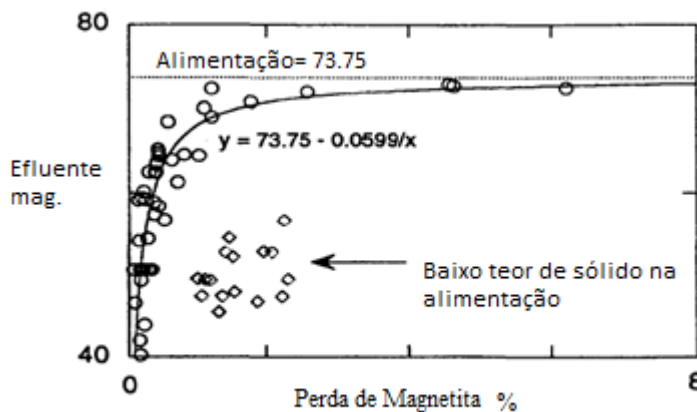


Figura 2.23- Relação entre perda de magnetita e a susceptibilidade magnética nos rejeitos para uma alimentação com alta densidade de polpa (Napier-Munn e Rayner, 1999)

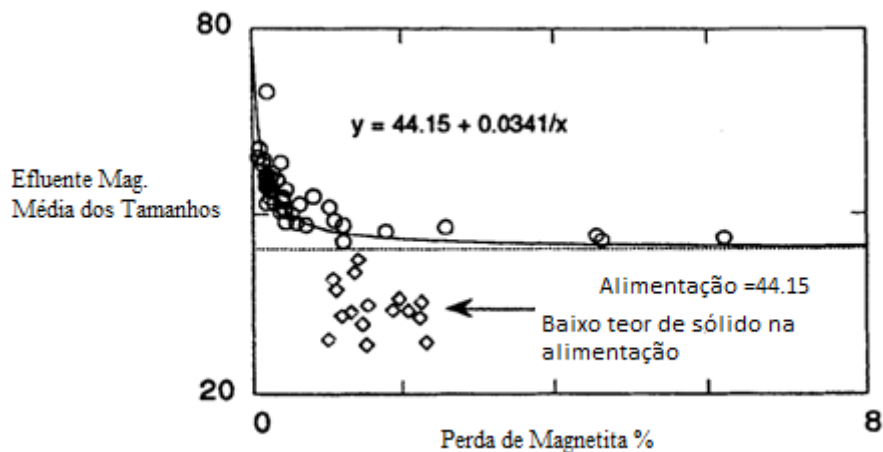


Figura 2.24- Relação entre a perda magnetita e o tamanho de partícula no rejeito para uma alimentação com alta densidade de polpa (Napier-Munn e Rayner, 1999)

A partir da análise das Figuras 2.23 e 2.24 pode-se perceber que a floculação magnética é limitada quando o conteúdo magnético da alimentação é muito baixo ou quando a concentração de sólidos da alimentação também é baixa. Nesses dois casos o número de partículas magnéticas é pequeno, reduzindo assim a probabilidade de ocorrência de floculação magnética.

Para a formação dos flocos o tempo de floculação deve ser mais curto que o tempo de permanência da partícula no tambor. Observou-se que um campo de 0,01T (100 G) é suficientemente grande para as partículas ferromagnéticas se associarem em longas cadeias. O tempo de floculação pode ser reduzido significativamente se a partículas forem exposta a um campo magnético relativamente intenso. A Figura 2.25 mostra que a floculação se torna quase completa para uma indução magnética de 70G (70mT).

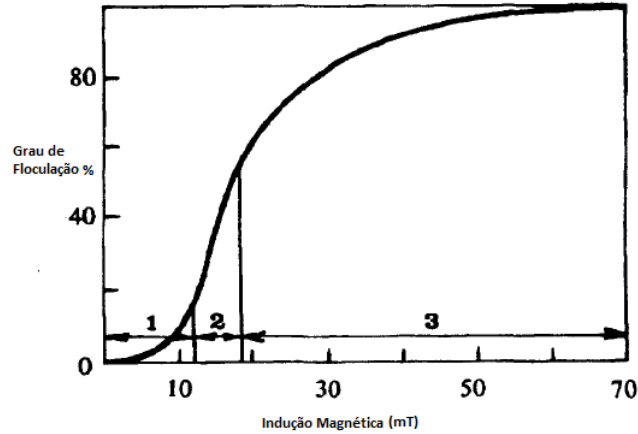


Figura 2.25- Efeito do campo magnético aplicado sobre o grau de floculação das partículas ferromagnéticas (Napier-Munn e Rayner, 1999)

O modelo matemático para um processo de floculação é descrito pela equação (Eq.43):

$$\frac{N}{N_0} = e^{-yt} \quad (\text{Eq.43})$$

sendo, N o número de partículas remanescente não floculadas, N_0 o número de partículas no início da floculação e y uma constante de velocidade de primeira ordem (s^{-1}) e t o tempo de floculação em segundos.

A recuperação magnética de um processo de floculação é a proporção de partículas não floculadas que é equivalente à perda. Assim, a perda de magnetismo (L) pode ser descrita por:

$$L = e^{-y\frac{V}{Q_f}} \quad (\text{Eq.44})$$

sendo, Q_f a taxa volumétrica de alimentação por unidade de comprimento ($m^3/h/m$) e V o volume da zona de separação por unidade de comprimento (m^3/m) que é dado por:

$$V = \theta D x_p \quad (\text{Eq.45})$$

sendo, θ a extensão angular da zona de separação (rad), D diâmetro do tambor (m) e x_p a abertura da zona de separação (m), f é uma taxa constante que pode ser representada em termos de variáveis de alimentação, variáveis de projeto e operação. O modelo foi parametrizado por meio de uma análise dimensional:

$$K = a \frac{Q_f}{D^2} C^b k^c \left(\frac{D^2 \omega}{Q_f}\right)^d \left(\frac{x_p}{D}\right)^e \left(\frac{\rho_p}{\rho_f}\right)^f \Phi^g \left(\frac{\rho_f Q_f}{\mu}\right)^h \quad (\text{Eq.46})$$

sendo, C a contaminação não magnética (em massa), k a susceptibilidade magnética volumétrica, D é o diâmetro do cilindro (m), ω a velocidade de rotação do tambor (rad

s^{-1}), \emptyset a concentração de sólidos em volume da polpa, ρ_s a massa específica do material magnético (kg/m^3), ρ_f é a massa específica da polpa de alimentação (kg/m^3), μ é a viscosidade da polpa na zona de captação (Pas), e $a - h$ são parâmetros de ajuste.

Note-se que o último termo na Eq.(45) é efetivamente o número de Reynolds. Assim, tem-se:

$$L = \exp \left[\left(-\frac{\theta D x_p}{Q_f} a \frac{Q_f}{D^2} C^b k^c \left(\frac{D^2 \omega}{Q_f} \right)^d \left(\frac{x_p}{D} \right)^e \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} \right)^f \emptyset^g \left(\frac{\rho_f Q_f}{\mu} \right)^h \right) \right] \quad (Eq.47)$$

Os termos não parametrizados $\frac{\theta D x_p}{Q_f} a \frac{Q_f}{D^2}$ cancelam $\frac{a \theta x_p}{D}$. Uma vez que a e θ não podem ajustar de forma independente, estes devem ser combinados com uma constante na qual pode ser chamada de a . Assim a equação torna-se:

$$L = \exp \left[\left(-a C^b k^c \left(\frac{D^2 \omega}{Q_f} \right)^d \left(\frac{x_p}{D} \right)^e \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} \right)^f \emptyset^g \left(\frac{\rho_f Q_f}{\mu} \right)^h \right) \right] \quad (Eq.48)$$

Os parâmetros nesse modelo são aqueles com base na análise dimensional utilizados na derivação da Eq.44.

Assim o modelo foi obtido pela análise dimensional, incorporando o processo de floculação. É razoável esperar que, a fim de aplicar o modelo para outras máquinas nem todos os parâmetros precisam ser re-estimados.

O modelo foi desenvolvido para a separação muito particular que ocorre em separadores de baixa intensidade para materiais completamente liberados.

2.6.2.2.4- Modelo Schneider e Calixto

Schneider e Calixto (2006) propuseram um modelo matemático conceitual para separadores magnéticos do tipo Jones para minério de ferro, baseado em alguns princípios básicos da separação magnética. Para descrever a aparente estratificação lateral que ocorre no leito, os autores utilizaram o modelo proposto por Tavares e King (1995), originalmente desenvolvido para descrever a separação em jiges, substituindo a força gravitacional pela magnética.

O resultado foi um modelo simples com apenas um parâmetro que foi denominado “Constante de estratificação magnética”. Os resultados mostram que quanto maior o valor da constante, maior a organização da camada coesa e maior a concentração de hematita para distâncias pequenas da placa, e quanto menor o valor da

constante menos organizada a camada e menor o teor de hematita nas imediações das placas.

O modelo é sensível aos valores de susceptibilidade magnética, de modo que não permite que uma mesma fase tenha mais de uma susceptibilidade magnética. O modelo permite a utilização de classes de teor específicas para cada fase.

Foram estudados os efeitos da intensidade de corrente e da densidade de polpa na alimentação. A Tabela 2.12 mostra os resultados medidos na usina, comparados com os resultados da simulação a partir dos dados de granulomineralogia. Pode-se verificar que os resultados simulados são muito próximos aos valores medidos, mostrando que o modelo de estratificação magnética é um bom modelo para o separador JONES.

Tabela 2.12- Comparação entre os dados calculados e simulados a partir da granulomineralogia (Schneider e Calixto 2006)

Circuito/Amostra	Teor Quartzo Alimentação		Teor Quartzo Rejeito		Teor Quartzo Médio		Teor Quartzo Concentrado	
	Calculado	Simulado	Calculado	Simulado	Calculado	Simulado	Calculado	Simulado
Grossos/densidade	15,6	15,85	41,6	51,65	21,12	19,98	2,67	4,70
Grossos/amperagem	15,4	18,01	44,08	49,53	20,03	15,90	2,04	3,46
Finos/densidade	26,5	27,93	82,3	83,40	-	-	7,00	7,62
Finos/amperagem	28,1	27,67	75,9	77,38	-	-	5,99	6,05

2.6.2.3-Modelos Mecanicistas

São modelos desenvolvidos a partir da descrição do mecanismo físico que relaciona as variáveis do processo. Esse tipo de modelo é particularmente útil quando a disponibilidade de resultados de experimentos é limitada, sendo que o mesmo pode ser utilizado, potencialmente, na previsão de resultados fora do intervalo para o qual foram desenvolvidos (Tavares, 2014).

Diversos autores têm aplicado ferramentas computacionais para geração de modelos. Dentre esses pode-se destacar o estudo de Mishra e Mohanty (2011), que realizaram um estudo analisando as interações entre as forças hidrodinâmicas, gravitacionais e magnéticas, com o intuito de compreender o processo de separação, sendo desenvolvido um modelo matemático utilizando fluidos dinâmicos computacionais. Esse estudo foi realizado com o intuito de simular o comportamento uma partícula dentro de um separador magnético a úmido de alta intensidade.

Recentemente Steinberg e colaboradores (Steinberg *et al.*, 2012) simularam o comportamento do campo magnético em separadores magnéticos do tipo Jones usando o software ANSYS/MAXWELL.

Outro trabalho publicado foi o de Lindner e colaboradores (Johannes *et al.*, 2013) que estudaram a influência das propriedades magnéticas utilizando um separador de alto gradiente (HGMS), onde as forças magnéticas foram calculadas e simuladas utilizando o método dos elementos finitos (FEM) incorporado ao simulador que utiliza CFD e implementado através do método dos elementos discretos (DEM).

Assim como Johannes, Hourkumnuorad e colaboradores (Hourkumnuorad *et al.*, 2011) utilizaram o método dos elementos finitos para simular a distribuição de concentração de nano partículas em um separador magnético de alto gradiente (HGMS). Hayashi e colaboradores (Hayashi *et al.*, 2010) simularam o campo magnético e o fluido utilizando também o método dos elementos finitos.

Uma técnica que está sendo muito utilizada na simulação da separação magnética é o Método dos Elementos Discretos - DEM (*Discrete Element Method*), o qual tem sido amplamente usado na simulação de uma variedade de equipamentos de processamento mineral. Esse método, em princípio, também pode ser usado para simular como partículas se comportam dentro do separador e como elas são separadas umas das outras.

Chen (2009) simulou a deposição magnética sobre um fio utilizando o método dos elementos discretos (DEM).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira etapa do trabalho incluiu a caracterização detalhada das amostras selecionadas de minérios de ferro, tornando possível determinar as curvas de separabilidade para o material estudado com o auxílio do separador isodinâmico Frantz. Posteriormente, estas auxiliaram na avaliação da eficiência da separação.

As amostras de minério de ferro utilizadas neste trabalho foram fornecidas pela Vale, sendo itabiritos provenientes de três minas, localizadas no Estado de Minas Gerais.

A metodologia utilizada neste estudo envolveu quatro etapas:

- Preparação das amostras;
- Caracterização das amostras;
- Execução dos ensaios de concentração magnética;
- Modelagem e simulação.

3.1- Preparações das Amostras

Como recebidas, as amostras se encontravam em granulometrias menores que, aproximadamente, 25 mm.

A primeira etapa do trabalho constituiu na britagem primária e secundária das amostras em laboratório. Tal processo permitiu adequar a granulometria do material para as etapas subsequentes. Na Figura 3.1 é apresentado o fluxograma de preparação das amostras.

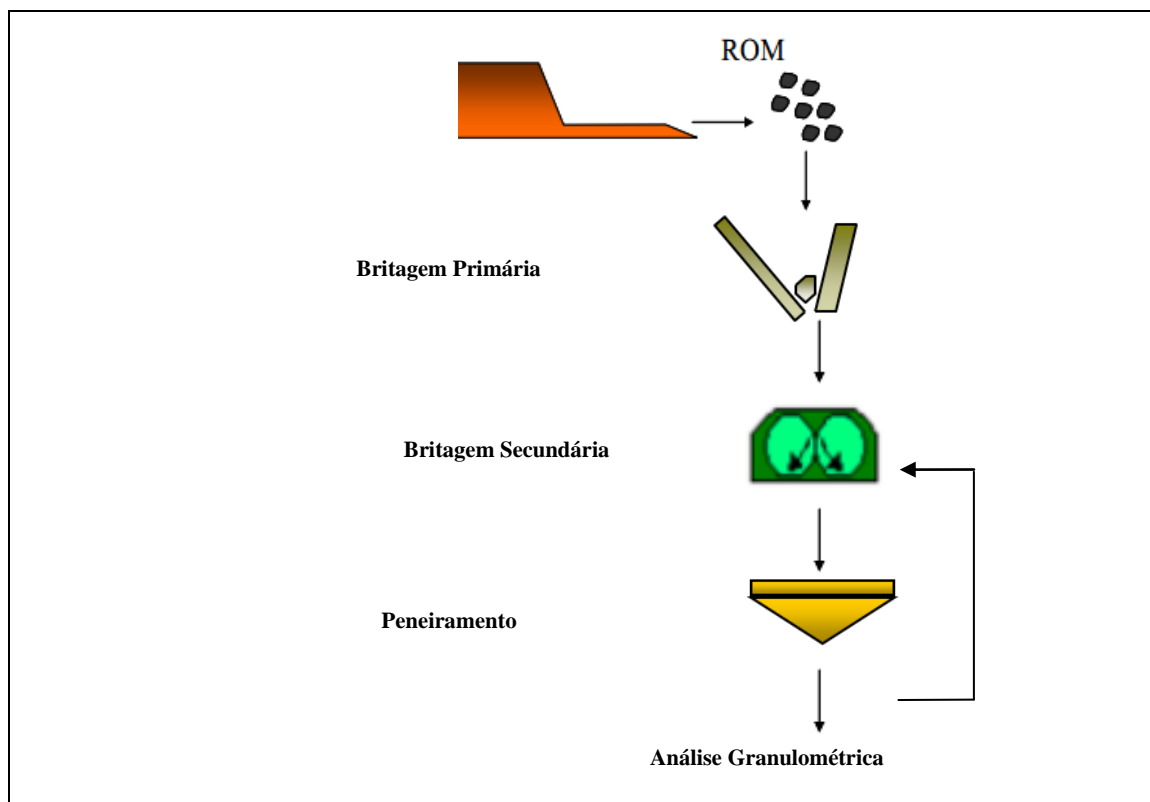


Figura 3.1– Fluxograma de preparação da amostra

Na britagem primária foi utilizado o britador de mandíbulas (DENVER 5”x6”), cuja especificação é dada em função do mecanismo de acionamento da mandíbula, da sua capacidade e tamanho máximo da alimentação. Na Figura 3.2 é apresentado o britador de mandíbulas localizado no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) – UFRJ, e, usado no presente trabalho.

Na britagem secundária foi utilizado o britador de rolos (DENVER 10”x6”), (Figura 3.3), também localizado no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) - UFRJ.



Figura 3.2- Britador de Mandíbulas DENVER 5"x6" instalado no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) - UFRJ



Figura 3.3- Britador de Rolos DENVER 10"x11" instalado no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) - UFRJ

Na primeira etapa, todo material foi conduzido à britagem primária para adequação da granulometria. Nessa etapa, gerou-se um produto com granulometria mais fina, que posteriormente, alimentou o britador de rolos, constituindo a britagem secundária.

Nessas etapas iniciais, o material foi todo peneirado abaixo de 1,18 mm, independentemente da malha ótima de liberação dos minérios. Desta forma, foram preparados, aproximadamente 60 kg de material proveniente da mina A, 70 kg de material proveniente da mina B e 68 kg de material proveniente da mina C, que foram utilizados para realização de todos os ensaios do projeto. Em seguida o material foi homogeneizado, por meio da formação de pilhas longitudinais, conforme mostra a Figura 3.4, a partir das quais foram retiradas amostras representativas para a realização dos ensaios.



Figura 3.4- Pilha longitudinal (alongada)

3.2- Caracterização das Amostras

Foram utilizados os seguintes métodos para a caracterização das amostras:

- Análise granulométrica;
- Análise química quantitativa;
- Análise mineralógica;
- Caracterização das amostras com o auxílio do separador magnético Isodinâmico Frantz.

3.2.1- Análise Granulométrica

A fim de analisar a distribuição granulométrica das amostras dos minérios estudados, foram realizados ensaios de peneiramento, sendo utilizadas as seguintes

peneiras com malhas (mm): 1,18; 0,850; 0,600; 0,425; 0,300; 0,212; 0,150; 0,106; 0,075; 0,053; 0,038. Primeiramente, foi realizado o peneiramento a úmido usando as peneiras de aberturas 0,053 e 0,038 mm. Em seguida, foi realizado o peneiramento a seco do material retido, durante 15 minutos utilizando o Ro-Tap[®].

3.2.2- Análise Químicas e Granuloquímicas

Análises químicas de amostras oriundas dos ensaios foram realizadas por espectroscopia de absorção atômica e fluorescência de raios-X. As análises por absorção atômica foram realizadas para quantificação direta do teor de ferro das amostras, tendo sido úteis quando o volume de amostras disponível era muito limitado. Por outro lado, análises de fluorescência de raios-X, as quais demandaram maiores volumes de material, permitiram a quantificação de vários óxidos presentes, com destaque para os óxidos de ferro e silício (sílica).

3.2.2.1- Análise Química por Absorção Atômica

Análises químicas por Espectroscopia de Absorção Atômica foram realizadas usando o espectrômetro Shimadzu (modelo AA6800), conforme Figura 3.5, que permitiu quantificar o teor total do elemento ferro (Fe). Para este procedimento, as amostras, foram moídas até 100% passante na peneira de 75 micrometros, e dissolvidas em ácido clorídrico com aquecimento sendo o comprimento de onda utilizado para a leitura de 248,3nm.



Figura 3.5- Espectrômetro AA6800

3.2.2.2- Análise Química por Fluorescência de Raios-X

Análises químicas por fluorescência de raios-X (Shimadzu EDX-720) (Figura 3.6) foram realizadas para os materiais provenientes da concentração magnética utilizando o separador WDRE e o Rapid. Essas análises foram realizadas com o propósito de determinar os teores dos principais óxidos, tendo sido analisados os óxidos SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO , P_2O_5 , MnO , CuO , ZnO e K_2O .



Figura 3.6- Espectrômetro de fluorescência de raios X (EDX-720)

O ensaio de perda ao fogo, realizado em mufla a 1000°C , forneceu informações relativas à presença de matéria orgânica e substâncias voláteis no material amostrado. O

ensaio consistiu em submeter uma massa representativa da amostra contendo aproximadamente 1g a variações crescentes de temperatura até atingir 1000°C, a uma taxa de aquecimento de 10°C/min com um tempo de residência de 20 min. O teor de perda ao fogo foi determinado em forma percentual por diferenças de massa antes e após a realização do processo, por meio da expressão:

$$PF(\%) = 100 \frac{(PCA-PCC)}{PCA-PCV} \quad (\text{Eq.49})$$

sendo:

PCV= massa do cadinho vazio, em gramas;

PCA= massa do cadinho mais a massa da amostra, em gramas;

PCC= massa do cadinho mais a amostra após calcinação, em gramas.

3.2.3- Análises Mineralógicas

Para caracterização mineralogia dos minérios foram utilizadas a difração de raios-X, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a microscopia ótica.

Inicialmente foram retiradas alíquotas representativas de cada material, nas faixas: 1,18 x 0,600 mm; 0,600 x 0,300 mm; 0,300 x 0,150 mm; 0,150 x 0,075 mm e 0,075 x 0,038 mm, para que fosse realizada a caracterização mineralógica, sendo realizado embutimento em resina de amostras contidas nas faixas de 0,600 x 0,300 mm e 0,075 x 0,038 mm. Após o embutimento, as amostras foram desbastadas e polidas com suspensões de diamante de 3 e 1µm, todo o trabalho foi realizado na politriz automática Struers Tegra no laboratório de caracterização do Centro de Tecnologia Mineral (Figura 3.7).

As seções polidas assim obtidas foram recobertas com carbono por evaporação do elemento, tornando-se adequadas para a aquisição de imagens no microscópio eletrônico de varredura.



Figura 3.7- Politriz automática StruersTegra (A) e, amostras polidas (B)

As análises foram efetuadas em microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta 400 com um sistema de microanálise química por dispersão de energia (EDS) Bruker Quantax 800 acoplado Figura 3.8. Este sistema conta com espectrômetro de energia dispersiva Bruker XFlash 4030, tecnologia SSD (*silicon drift detector*) que, com uma janela de 30 mm², permite contagens da ordem de 150 kcps com tempo morto de 8 a 10%, e resolução espectral melhor que 137 eV para Mn $\text{K}\alpha$.

As composições químicas quantitativas dos minerais foram medidas por EDS, no sistema Bruker Quantax, sendo utilizado o padrão de cobre para a calibração. As imagens do MEV foram geradas predominantemente por detector de elétrons retro-espalhados (*backscatter electrons detector* - BSD).



Figura 3.8- Microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta 400 instalado no CETEM

A fim de analisar a liberação, que é um parâmetro bastante importante no âmbito do tratamento de minérios, pois representa um pré-requisito importante para a utilização de métodos de concentração foi realizada a análise de imagens.

Inicialmente foram feitas aquisições automáticas das imagens no microscópio eletrônico de varredura nas frações de 0,600 x 0,300 mm e 0,075 x 0,038 mm.

Os procedimentos para análise das imagens e classificação foram desenvolvidos e implementados no ambiente Matlab[®], sendo processadas e analisadas no AxioVision Versão 4.8.2. Segundo Neumann e colaboradores em (2010) quando se analisa o espectro de liberação por meio da análise de imagens são geradas doze posições que representa as 12 classes de teores todas com igual importância: 0%, 0-10%, 10-20%, e assim por diante, até 90- 100% e 100%, sendo que a última inclui os minerais ferrosos liberados, assim como aquelas com menos de 10% de teor aparente de outros minerais.

Foram também realizadas aquisições de imagens no microscópio ótico Zeiss AxioImager M2m, utilizado o software Zeiss AxioVision.

O processo de aquisição de imagens no microscópio ótico utilizou as lentes objetiva de 5x, 10x, 20x e 50x de aumento. A resolução das imagens para lente de 5x, 10x, 20x e 50x foram de 1,08 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, 0,54 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, 0,27 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ e 0,105 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ respectivamente. As imagens foram utilizadas a fim de estabelecer uma comparação com as análises feitas no MEV e discriminar a hematita da magnetita.

Análises por difração de raios-X foram realizadas utilizando todas as frações citadas anteriormente.

Primeiramente o material foi pulverizado utilizando o McCrome Micronizing Mill por 15 minutos, em 15 mL de água deionizada, descarregando-se então a suspensão em placa de Petri de teflon, para secagem em estufa a 60°C. Depois de secas as amostras foram desagregadas manualmente com o auxílio de um gral de ágata. Em seguida foi montada no suporte do tipo *backload* (para preparação das pastilhas) de aço, e analisada no difratômetro de raios-X (Figura 3.9).

As análises por DRX, pelo método do pó, foram executadas no equipamento Bruker-D4 Endeavor, nas seguintes condições de operação: radiação Co K α (40kV/40mA), com passo de 0,02° 2 θ , tempo de contagem de 1 segundo por passo. O tempo total de aquisição do espectro, para esta etapa do trabalho, foi de 1 hora e 30 minutos. A interpretação qualitativa de espectro foi efetuada por comparação com

padrões contidos no banco de dados PDF04+ (ICDD, 2011) em software Bruker Diffrac EVA.

Análises quantitativas, a partir dos dados de raios-X, foram calculadas pelo método de refinamento de espectro multifásico total (método de Rietveld), com o programa Topas, v. 4.2.



Figura 3.9- McCrone Micronizing Mill (A), DRX (B), amostras secas após a pulverização (C), Suporte para as pastilhas (D)

3.2.4- Caracterização utilizando o Separador Magnético Frantz Isodinâmico

A fim de caracterizar a distribuição dos componentes magnéticos das diferentes amostras preparadas, foi realizado o seu fracionamento utilizando o separador magnético Isodinâmico Frantz, descrito em maior detalhe em (2.5.7.1). De maneira simplificada, o separador é composto por uma calha vibratória com inclinações nos seus sentidos longitudinal e transversal, localizada entre dois eletroímãs de corrente regulável, que definem a densidade de fluxo do campo magnético. A separação dos minerais se dá a seco em função do campo e da inclinação lateral da calha, e a velocidade de escoamento das partículas é escolhida em função da inclinação longitudinal, da intensidade de vibração da calha e da quantidade de material alimentado no funil.

As inclinações frontal e lateral foram padronizadas no presente trabalho em 25° e -15°, respectivamente, mas podendo ser variadas num eventual refinamento da separação, com uma vibração de calha de 75 mA no alimentador vibratório.

O Separador Frantz Isodinâmico, permitiu realizar separações a diferentes intensidades de corrente e observar o comportamento das amostras quando submetidas a um campo magnético. Conseqüentemente foi possível separar o material magnético do não magnético (Figura 3.10), viabilizando a separação de amostras em diferentes níveis de suscetibilidade magnética.



Figura 3.10- Separador magnético Frantz. Separação magnética (A), e descarga do material magnético e não magnético (B)

Em relação à eficiência e à versatilidade deste equipamento, a separação é muito lenta, de maneira que se trabalha com um volume muito pequeno de material. Os materiais separados no presente estudo foram quarteados das amostras de mais de 60 kg, conforme é descrito na seção 4.1. Assim, como as frações a serem separadas apresentam um volume muito grande de material, foi realizado quarteamento das mesmas, sem prejuízo da aplicação dos resultados para balanços de massas, metalúrgicos e mineralógicos (Neumann *et al.*,2010). Neste caso em particular, como o alimentador é muito pequeno, o eletroímã necessitaria de grandes intervalos de tempo para poder processar toda a amostra. As dimensões do alimentador podem ser visualizadas na Figura 3.11.

O procedimento adotado nos ensaios constituiu, inicialmente, no fracionamento das amostras por peneiramento usando as peneiras de aberturas de 0,6, 0,3, 0,15, 0,075 e 0,038 mm, sendo as análises realizadas separadamente para essas alíquotas.

Antes de iniciar os trabalhos no separador Frantz, foi necessário retirar as partículas ferromagnéticas da amostra, pois, se submetidas ao campo magnético, poderiam vir a entupir a calha, provocando a perda de amostra e sua conseqüente

descaracterização pelo transbordamento da calha. Esta separação prévia foi efetuada com o auxílio de um ímã de mão.

A primeira intensidade de corrente utilizada na operação com o Frantz foi de 0,1 A, como segurança, para retenção das partículas ferromagnéticas que não tivessem sido eliminadas na separação prévia usando o ímã de mão. Em seguida foram realizados ensaios com diferentes intensidades de corrente, 0,3, 0,5, 0,7 e 1,0 (A). A intensidade máxima de corrente do equipamento é de 2,0 A. Porém foi selecionado o valor máximo de 1,0 A, pois valores mais altos resultam em aquecimento da bobina, que resulta em dificuldades de manutenção da intensidade de corrente. A Tabela 3.1 mostra a relação entre as intensidades de corrente utilizadas, as intensidades de campo estimadas e a suscetibilidade magnética das partículas separadas.

Após a realização dos ensaios as massas das alíquotas foram pesadas, os materiais foram homogeneizados e alíquotas foram retiradas para análises químicas.



Figura 3.11- Funil de alimentação do Separador Isodinâmico Franz

Tabela 3.1- Relação entre as intensidades de corrente, as intensidades de campo estimadas e a suscetibilidade magnética das partículas separadas.

Intensidade de corrente (A)	Intensidade do campo magnético (G)	Suscetibilidade magnética (kg/m ³)
0,1	1.500	6,5 ^{x10-6}
0,3	4.500	7,2 ^{x10-7}
0,5	6.500	2,6 ^{x10-7}
0,7	9.500	1,3 ^{x10-7}
1,0	13.000	6,5 ^{x10-8}

Obs: Valores convertidos de CGS (cm³/g) em SI (m³/kg) segundo a equação: $4\pi \times 10^{-3}$ (Hopstock, 1985)

É importante ressaltar que, dados de diferentes publicações acerca da susceptibilidade magnética, são geralmente conflitantes devido à variedade composicional dos minerais, presença de inclusões e omissões de informações sobre as condições de medição da propriedade.

4.3- Ensaios de Concentração Magnética

Os ensaios de concentração magnética envolveram duas rotas: concentração magnética utilizando o separador magnético de tambor de média intensidade WDRE fabricado pela INBRAS-Eriez e concentração magnética utilizando o separador magnético Boxmag Rapid de laboratório.

4.3.1 Separador Magnético de Tambor WDRE

Para os ensaios de concentração magnética de baixa/média intensidade empregou-se o separador magnético a úmido de tambor rotativo INBRAS-Eriez (WDRE 24"x6"), com campo magnético fixo em um tanque do tipo concorrente, instalado no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). De acordo com o manual do fabricante esse tipo de tanque é ideal para produzir um concentrado magnético a partir de materiais relativamente grossos, na faixa de "sinterfeed", com alta capacidade, sendo normalmente o tipo recomendado para operações de concentração de minério de ferro.

Nesse trabalho trabalhamos com materiais com granulometria inferior a 1,18mm.

O circuito magnético do equipamento é constituído por um conjunto formado pelos polos de ímãs, placas de aço que são montadas sobre o eixo, no interior do tambor magnético, se estendendo por uma região que abrange um arco de aproximadamente 120° o qual pode ser instalado manualmente, sendo regulado de forma que seja possível posicioná-lo de modo a proporcionar a máxima eficiência na concentração.

Neste tanque concorrente, a polpa alimenta uma caixa de alimentação, posicionada em uma das laterais do separador que flui no mesmo sentido de rotação do tambor. Ao se iniciar a operação os minerais ferrosos foram imediatamente atraídos pela força de atração magnética gerada pelo tambor magnético, ficando presos à face do mesmo, que se encontra em rotação, sendo transportados até uma região onde cessava a ação do campo magnético. Nesse ponto eles eram descarregados sobre a calha de descarga do concentrador, posicionada na outra lateral do tambor, pela ação do jato de água do sistema de spray e pelo raspador, sendo descarregados por gravidade até o ponto de coleta do concentrado como mostra a Figura 3.12.

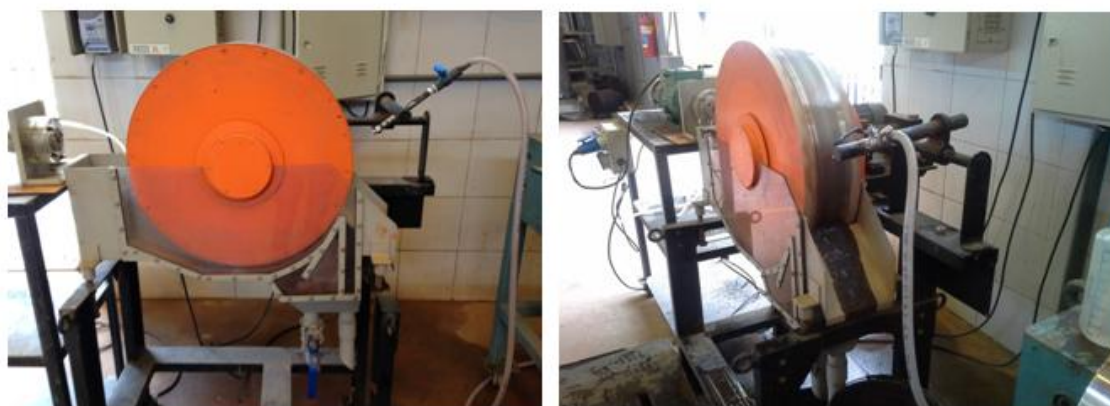


Figura 3.12- Separador magnético de tambor WDRE

Em seguida, após observar que a separação não estava mais ocorrendo, era aberto o bocal de descarga, para a coleta do material não-magnético. Os materiais provenientes da separação no WDRE eram então, secos, pesados e homogeneizados, retirando-se alíquotas para a realização de análises.

A fim de verificar o valor da intensidade do campo magnético, o mesmo foi medido com o auxílio de um gaussímetro (modelo 5080) F.W.BELL (Figura 3.13), em três pontos do circuito magnético, como mostra a parte hachureada da Figura 3.14,

sendo (D) a distância entre o tambor e o fundo da bacia. O valor encontrado foi de 1.337 G.



Figura 3.13- Gaussímetro (Gass/Teslameter)

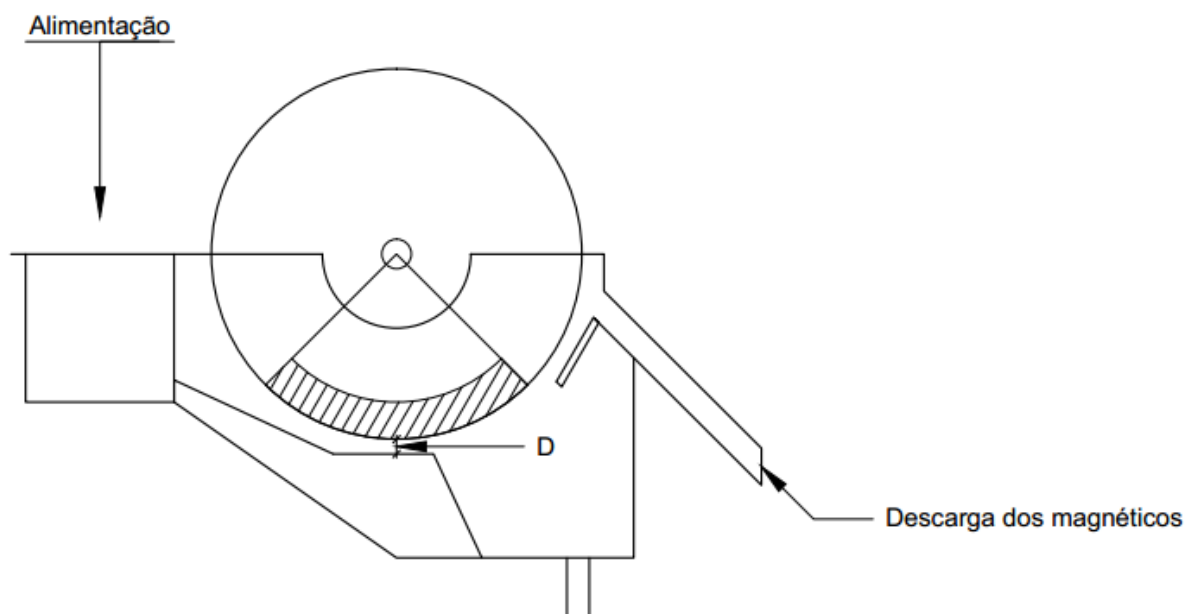


Figura 3.14- Circuito Magnético do WDRE

Foi utilizando um Planejamento Experimental do tipo fatorial fracionário 2^{k-2} (Montgomery *et al.*, 1998) no qual k é o número total de variáveis independentes

investigadas, cada uma em dois níveis com pontos centrais, sendo utilizado o Software Design-Expert® na montagem do plano. Para os ensaios de concentração no separador de tambor WDRE, estudaram-se os efeitos das variáveis: percentagem de sólidos, frequência de rotações do tambor, taxa horária de alimentação e distância do tambor ao fundo da bacia.

A Tabela 3.2 apresenta a matriz do planejamento experimental empregado nos ensaios. Os experimentos foram realizados segundo o planejamento fatorial 2^{5-3} com três pontos centrais.

Tabela 3.2- Matriz do planejamento fatorial dos ensaios de concentração no WDRE

Ensaio	% sólidos	Frequência de Rotação. (RPM)	Taxa horária de alim. (g/min)	Distância do tambor (mm)
1	30,0	25	1420	15,0
2	35,0	25	1420	10,0
3	32,5	30	980	12,5
4	32,5	30	980	12,5
5	32,5	30	980	12,5
6	35,0	25	440	15,0
7	35,0	35	440	10,0
8	35,0	35	1420	15,0
9	30,0	25	440	10,0
10	30,0	35	1420	10,0
11	30,0	35	440	15,0

4.3.2 Separador Magnético RAPID

Para os ensaios de separação magnética de alta intensidade utilizou-se o separador magnético Boxmag Rapid, instalado no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). Esses ensaios tiveram o objetivo principal de fornecer subsídios para compreender a influência das variáveis no processo.

O campo magnético do separador é produzido por eletroímãs, entre os quais situam-se as matrizes ferromagnéticas, como pode ser observado na Figura 3.15. Estas matrizes possuem, entre outras, a função de promover um elevado campo magnético por onde passa o minério, cujas partículas paramagnéticas são capturadas na própria matriz, por ação do campo magnético.

As matrizes são construídas, em metal, com baixa magnetização, em vários formatos. O separador Rapid, trata pequenas quantidades de material em decorrência do tamanho de suas matrizes (Figura 3.15). Os vários formatos na verdade se destinam a adequar as matrizes à distribuição de tamanho das partículas. Contudo, é um equipamento prático e versátil, que proporciona resultados quantitativos confiáveis.

Foram realizados ensaios com as intensidades de corrente de 10, 15 e 20 (A). Na Tabela 3.3 podem ser observadas as intensidades do campo magnético usado durante os ensaios.

Para cada corrente foi tomado três medidas do campo magnético entre os polos dos eletroímãs (Tabela 3.3) como ressalta a Figura 3.15, com o auxílio de um gaussímetro (modelo 5080) F.W.BELL.

Segundo o manual do equipamento a relação intensidade de corrente e intensidade de campo magnético (na ausência da matriz) pode ser descrita na Tabela 3.3. Observa-se que há alguma correspondência entre as medidas realizadas no presente trabalho e aquelas fornecidas pelo fabricante, principalmente comparando o valor máximo medido experimentalmente.

Tabela 3.3- Relação intensidade de corrente e intensidade de campo magnético

Intensidade de corrente (A)	Fabricante	Medidas usando Gaussímetro	
	Intensidade do campo magnético (G)	Valores (G)	Média (G)
10	11.600	11.000/9.100/7.300	9.133
15	13.800	12.000/9.800/9.550	10.450
20	15.600	15.900/13.500/12.490	13.963

A alimentação dos ensaios de concentração no Rapid correspondeu ao composto dos produtos não-magnéticos (rejeitos) dos ensaios de separação do WDRE. Os materiais provenientes desta separação foram secos, pesados e homogeneizados para retirada de alíquotas para análises granulométricas e químicas.

No caso dos ensaios de concentração no separador RAPID, estudaram-se os efeitos de: percentagem de sólidos, intensidade de corrente, taxa horária de alimentação, abertura do gap das matrizes de separação e tempo de lavagem.

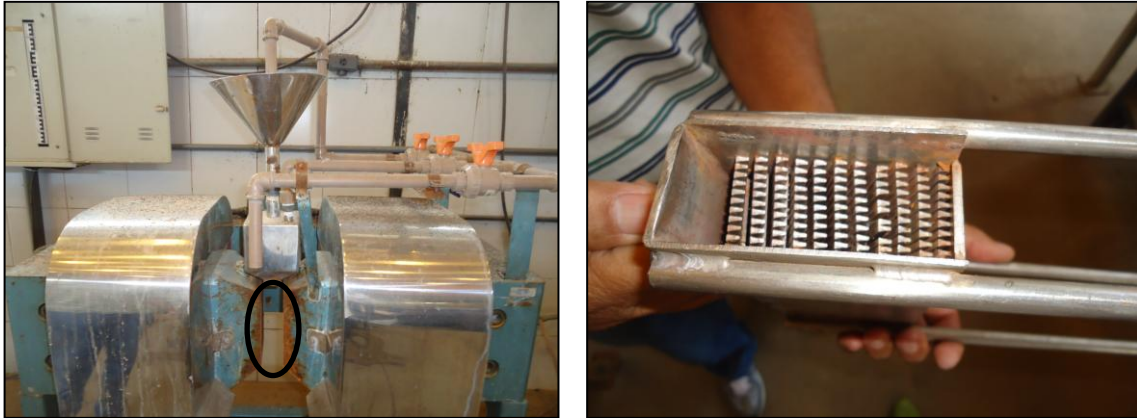


Figura 3.15- Separador magnético Rapid

Os experimentos seguiram um planejamento experimental do tipo fatorial fracionário 2^{k-2} (Montgomery, 1998) no qual k é o número total de variáveis independentes investigadas cada uma em dois níveis, sendo utilizado o Software Design-Expert[®].

A Tabela 3.4 apresenta a matriz do planejamento experimental empregado nos ensaios. Os experimentos foram realizados segundo planejamento fatorial 2^{5-3} com três pontos centrais.

Tabela 3.4- Matriz do planejamento fatorial para a concentração no Rapid

Ensaio	% sólidos	Intensidade de corrente (A)	Taxa de alimentação (g/min)	Abertura da matriz (polegadas)	Tempo de lavagem (s)
1	35,0	20	1820	2/4	15,0
2	35,0	10	700	1/2	10,0
3	32,5	15	1040	1,5/3	12,5
4	30,0	20	700	1/2	15,0
5	35,0	10	700	2/4	15,0
6	30,0	20	700	2/4	10,0
7	32,5	15	1040	1,5/3	12,5
8	30,0	10	1820	1/2	15,0
9	30,0	10	1820	2/4	10,0
10	32,5	15	1040	1,5/3	12,5
11	35,0	20	1820	1/2	10,0

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1- Caracterização das amostras de itabiritos

4.1.1- Análises granulométricas e massa específica

Os resultados da medida da distribuição granulométrica da amostra global, para os três minérios estudados são apresentados na Figura 4.1. Esses resultados mostram que há uma porção significativa de massa nas faixas (<0,150mm) para os três minérios. A Figura também destaca que o minério “C” amostra apresentou elevada proporção de finos (<0,038 mm) presentes, enquanto que o minério “B” se destaca pela distribuição granulométrica mais grossa que das demais. A Tabela 4.1 resume alguns valores das análises granulométricas que confirmam essas observações.

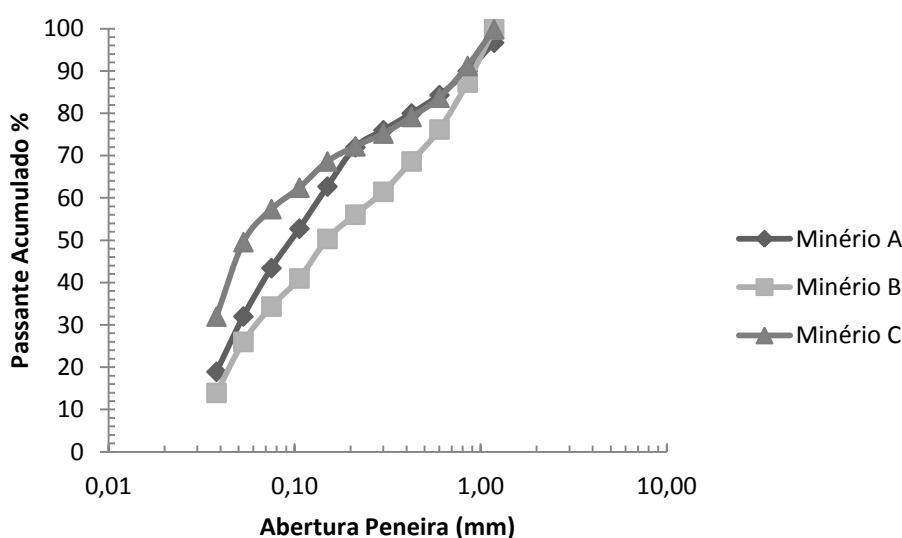


Figura 4.1- Distribuições granulométricas das amostras ensaiadas

As Figuras 4.2 a 4.4 apresentam as análises granulométricas na forma de histogramas. Na Figura 4.4 fica ainda mais evidente a concentração da massa nas faixas finas para o caso do minério “C”. No caso dos minérios “A” e “B”, a faixa que contém a maior parte da massa é a de 0,075 x 0,038 mm.

Tabela 4.1- Indicadores das análises granulométricas e massas

Amostra	P80 (mm)	P50 (mm)	Massa específica (g/cm ³)
Minério A	0,51	0,09	3,84
Minério B	0,73	0,13	3,83
Minério C	0,51	0,06	3,87

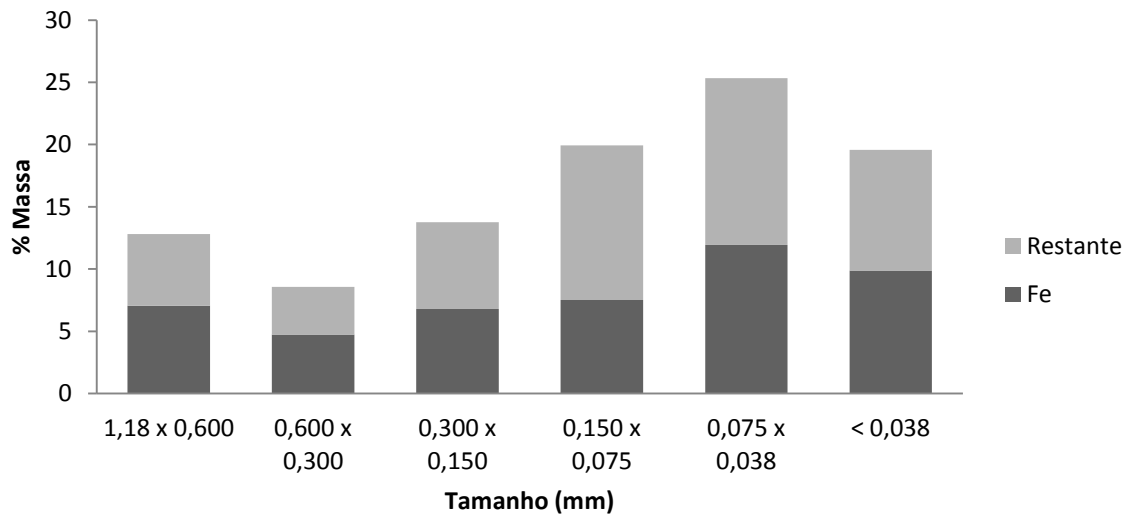


Figura 4.2- Percentagem mássica e do ferro contido para o minério "A" em função da faixa de tamanhos

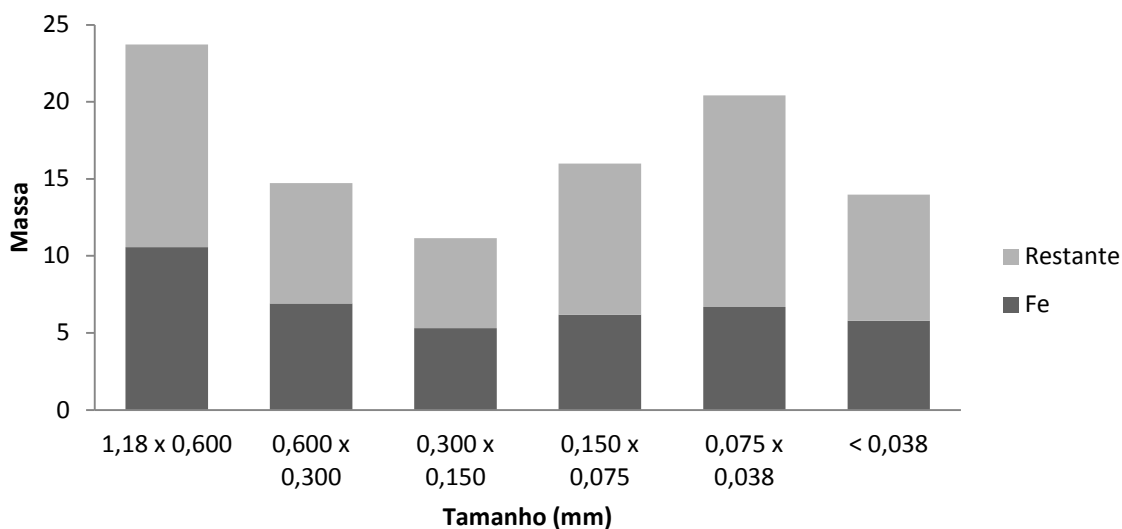


Figura 4.3- Percentagem mássica e do ferro contido para o minério “B” em função da faixa de tamanhos

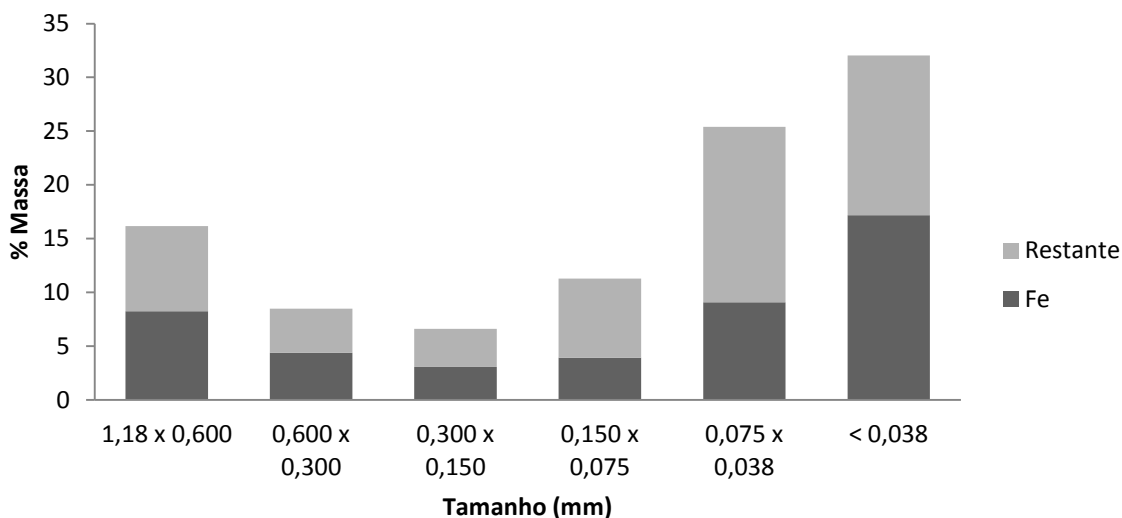


Figura 4.4- Percentagem mássica e ferro contido para o minério “C” em função da faixa de tamanhos

4.1.2- Análises Químicas

Resultados da análise química por Fluorescência de Raios X da amostra global são apresentados na Tabela 4.2, observa-se que o minério “B” apresenta teor de ferro marginalmente mais baixo que as demais e de sílica mais elevado.

Tabela 4.2- Teores de cabeça das amostras estudadas

Amostras	%Fe	% SiO ₂
Minério A	47,9	25,6
Minério B	41,5	36,1
Minério C	45,9	29,7

Análises granulométricas das amostras são apresentadas nas Figuras 4.5 a 4.7. Em todos os casos é evidente que as faixas compreendidas entre 0,150 e 0,038 mm têm os maiores teores de sílica e os menores teores de ferro. Esse efeito, entretanto, é mais evidente para o minério “C”.

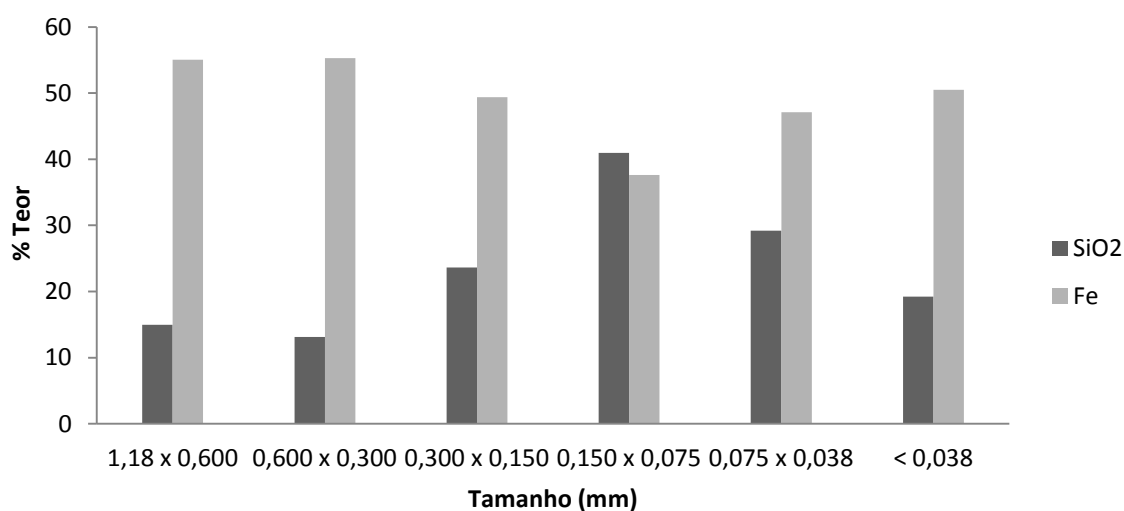


Figura 4.5- Teores dos principais constituintes por fração granulométrica para o minério “A”

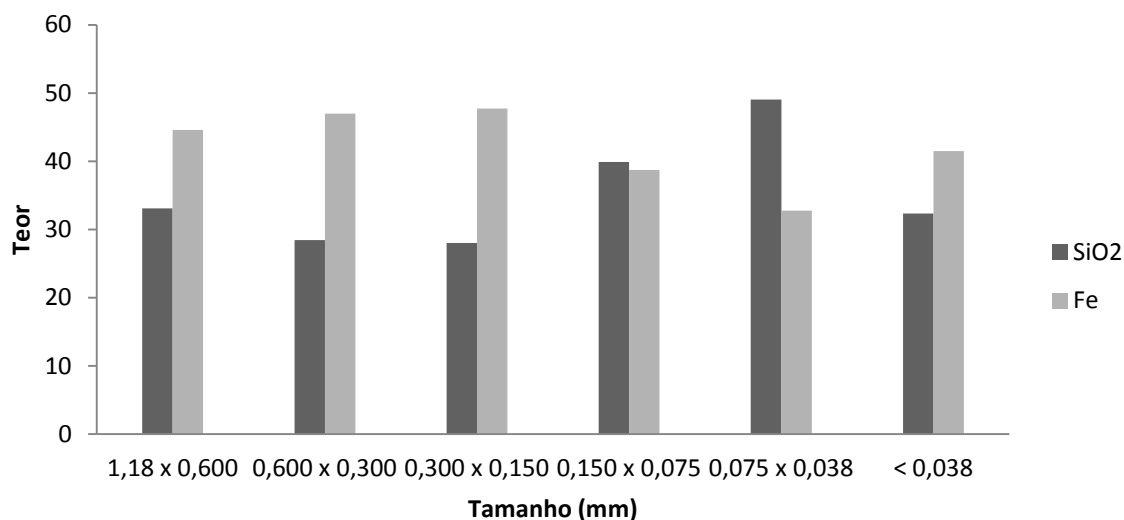


Figura 4.6- Teores dos principais constituintes por fração granulométrica para o minério “B”

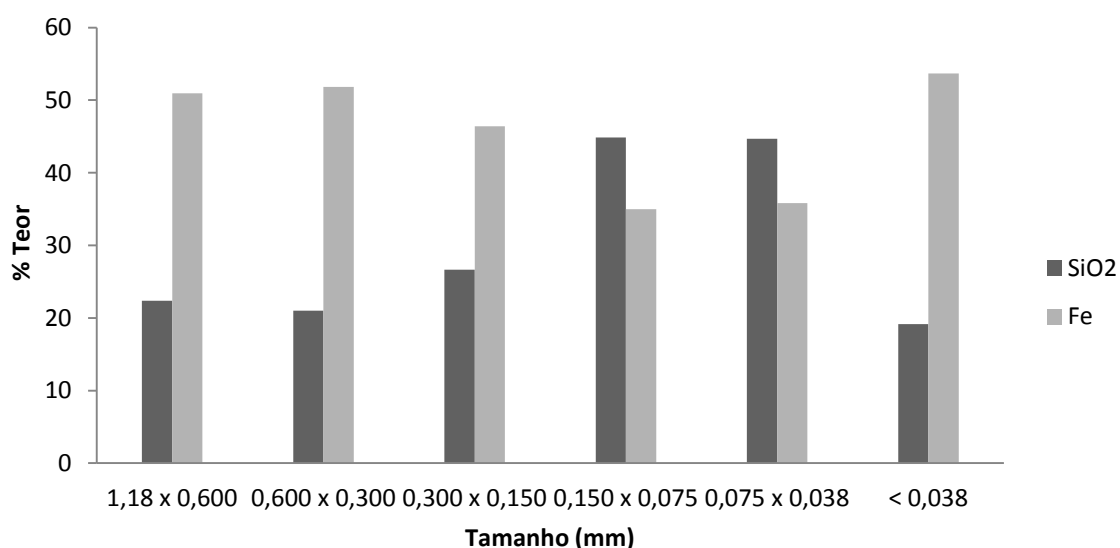


Figura 4.7- Teores dos principais constituintes por fração granulométrica para minério “C”

A Figura 4.8 mostra a clara relação inversa entre os teores de ferro e sílica para as amostras da análise granuloquímica. Desvios encontrados para os diferentes minérios estão associados às diferentes proporções entre os minerais ferrosos nas diferentes amostras. No anexo podem ser observados a presença de outros elementos.

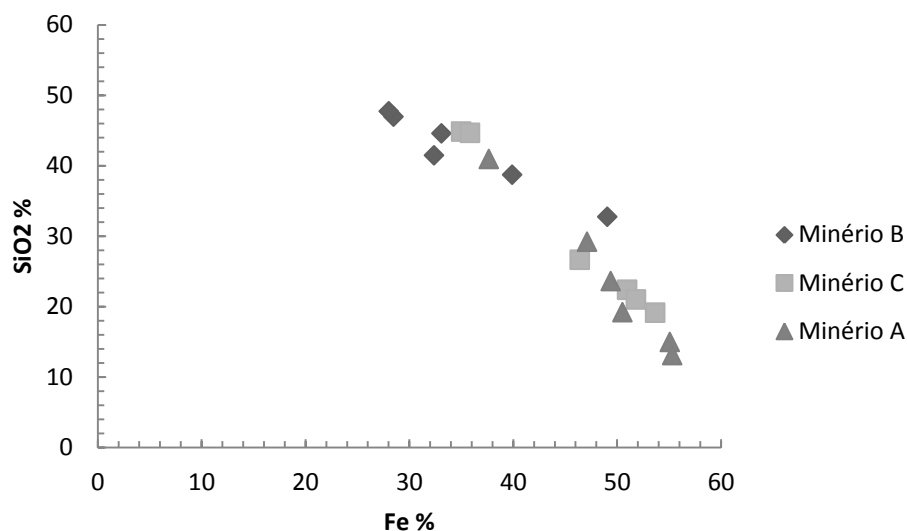


Figura 4.8- Correlação entre as variáveis químicas sílica e ferro total

4.1.3 – Mineralogia

4.1.3.1 – Identificação dos minerais: Difractometria de raios-X

A difratometria de raios-X (DRX) permitiu a identificação das espécies minerais presentes nas amostras estudadas.

As Figuras 4.9 a 4.11 mostram os espectros da difração de raios-X referente às amostras de cabeça. A interpretação qualitativa do espectro das amostras de cabeça efetuada por comparação com padrões contidos no banco de dados PDF04+ (ICDD, 2011) em software BrukerDiffrac EVA podem ser visualizadas no anexo 4.

As principais fases minerais presentes foram hematita, magnetita e goethita como era de se esperar. A Tabela 4.3 e as Tabelas 4.4 a 4.6 sintetizam as análises quantitativas, realizadas utilizando o método de Rietveld, para as fases minerais presentes nos minérios, obtidas no espectro das alíquotas referentes à amostra de cabeça e aquelas relativas às faixas de 1,18 x 0,600 mm; 0,600 x 0,300 mm; 0,300 x 0,150 mm; 0,150 x 0,075 mm, 0,075 x 0,038 mm e < 0,038 mm.

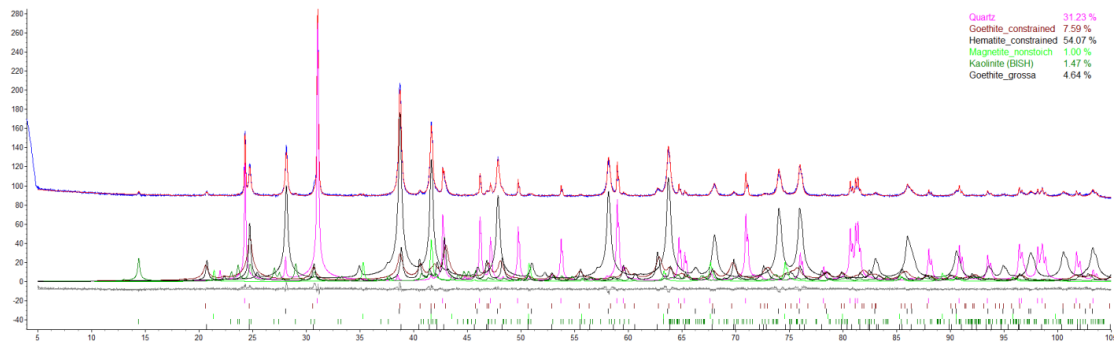


Figura 4.9- Espectro da difração de raios-x referente à amostra de cabeça para o minério “A” mostrando a reconstrução pelo método de Rietveld

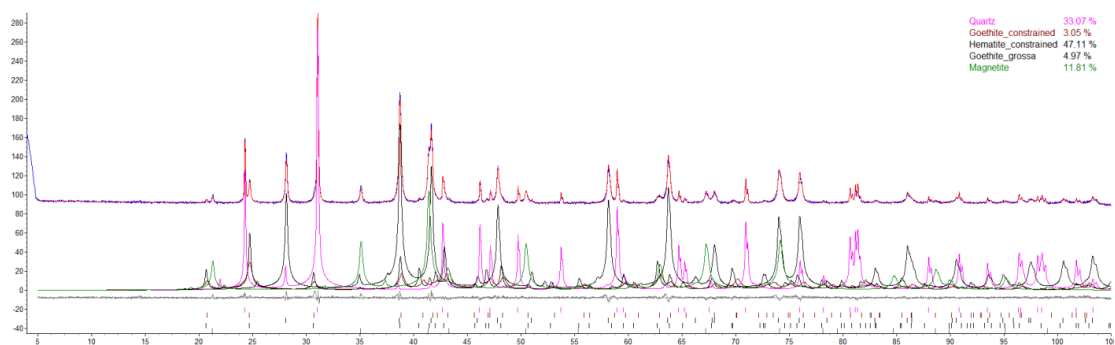


Figura 4.10- Espectro da difração de raios-x referente à amostra de cabeça para o minério “B” mostrando a reconstrução pelo método de Rietveld

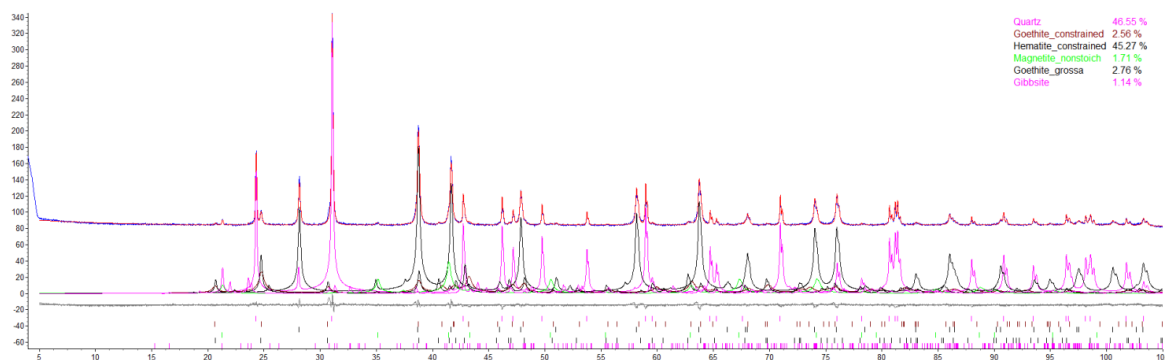


Figura 4.11- Espectro da difração de raios-x referente à amostra de cabeça para o minério “C” mostrando a reconstrução pelo método de Rietveld

Tabela 4.3 – Análise quantitativa das fases presentes (% em massa) referente à análise de cabeça comparada com os seus respectivos valores reconstituídos a partir das análises granulométricas

Mineral	Minério A		Minério B		Minério C	
	Cabeça	Reconstituído	Cabeça	Reconstituído	Cabeça	Reconstituído
Quartzo	31,1	27,6	33,1	31,9	46,6	34,1
Goethita	12,3	12,6	8,2	8,4	5,4	6,1
Hematita	54,1	56,5	46,9	47,4	45,3	56,2
Magnetita	1,0	1,1	11,9	10,9	1,7	1,9
Caulinita	1,4	2,2	-	1,1	-	0,6
Gibbsita	-	-	-	-	1,1	1,0
Talco	-	-	-	-	-	0,2

Tabela 4.4 – Análise quantitativa das fases presentes (% em massa) nas alíquotas referentes as demais frações analisadas para o minério “A”

Mineral	Fração 1,18 x 0,600 mm	Fração 0,600 x 0,300 mm	Fração 0,300 x 0,150 mm	Fração 0,150 x 0,075 mm	Fração 0,075 x 0,038 mm	Fração < 38 mm
Quartzo	6,8	8,1	26,3	45,9	32,6	23,5
Goethita	28,4	25,2	16,3	7,3	6,9	10,4
Hematita	61,4	63,2	54,8	44,6	57,8	60,9
Caulinita	2,4	2,7	1,7	1,3	1,5	4,1
Magnetita	0,9	0,9	0,9	1,0	1,2	1,2

Tabela 4.5– Análise quantitativa das fases presentes (% em massa) nas alíquotas referentes as demais frações analisadas para o minério “B”

Mineral	Fração 1,18 x 0,600 mm	Fração 0,600 x 0,300 mm	Fração 0,300 x 0,150 mm	Fração 0,150 x 0,075 mm	Fração 0,075 x 0,038 mm	Fração < 0,038 mm
Quartzo	25,1	24,0	24,6	39,1	49,2	30,2
Goethita	7,4	9,0	9,1	7,0	5,4	15,5
Hematita	50,1	51,8	53,8	46,1	40,4	43,3
Magnetita	16,5	14,2	11,8	7,3	5,0	5,6
Caulinita	0,9	1,0	0,8	0,6	-	3,6

Tabela 4.6 – Análise quantitativa das fases presentes nas alíquotas referentes as demais frações analisadas para o minério “C”

Mineral	Fração 1,18 x 0,600 mm	Fração 0,600 x 0,300 mm	Fração 0,300 x 0,150 mm	Fração 0,150 x 0,075 mm	Fração 0,075 x 0,038 mm	Fração < 0,038 mm
Quartzo	15,3	15,8	31,4	50,2	47,9	31,6
Goethita	10,9	11,7	7,4	5,7	3,5	4,6
Hematita	69,3	67,0	53,0	40,8	46,5	59,8
Magnetita	2,4	3,4	4,0	2,2	1,5	1,3
Caulinita	0,3	0,7	-	-	-	1,3
Gibbsita	1,7	1,5	1,1	1,1	0,6	0,8
Talco	-	-	-	-	-	0,5

A Tabela 4.3 apresenta os resultados das análises de cabeça das amostras. A comparação das análises mineralógicas das amostras de cabeça dos diferentes minérios mostra que o minério “C” se destaca pelo mais alto teor de quartzo, embora a estimativa do teor de cabeça provavelmente seja superestimada. Por outro lado o minério “B” se destaca pelo elevado teor de magnetita, enquanto o minério “A” pelo maior teor de hematita.

A análise mineralógica por faixa de tamanhos (Tabelas 4.3 a 4.5) indica outras diferenças importantes entre as amostras. Por exemplo, observa-se que para o minério “A” a hematita e a caulinita se concentram na fração 0,600 x 0,300 mm ao passo que a

goethita se concentra nas faixas mais grossa (1,18 x 0,600 mm), o que contrasta com o quartzo, que se concentra nas faixas mais finas.

Para o caso do minério “B” observa-se que a hematita apresenta uma maior distribuição para a fração 0,300 x 0,150mm, enquanto a goethita e a caulinita distribuíram-se em tamanhos de partículas tipicamente mais finos, da mesma maneira que o quartzo. Neste caso, entretanto, as diferenças entre as diferentes classes não foram tão significativas.

No caso do minério “C” observa-se que a hematita e a goethita encontram-se em maior quantidade nas frações mais grossas. Observou-se a presença de gibbistita nas frações mais grossas e uma pequena quantidade de talco na fração mais fina. O quartzo, assim como os demais contaminantes, também se concentrou nas frações mais finas.

No caso de todas as amostras, observou-se uma significativa concentração de caulinita na faixa mais fina (<0,038mm). Além disso, conclui-se que todas as amostras apresentaram algum teor de magnetita, umas com maiores percentuais que outras. Isso demonstra a necessidade do emprego de um separador magnético de baixa/média intensidade à aplicação da separação de alta intensidade a fim de garantir bons níveis de recuperação e, ao mesmo tempo, evitar problemas operacionais em equipamentos de intensidade de campo mais elevado.

A Figura 4.12 compara os teores combinados dos minerais ferrosos em função do tamanho de partícula, mostrando a concentração dos mesmos nas faixas mais grossa para todos os minérios estudados.

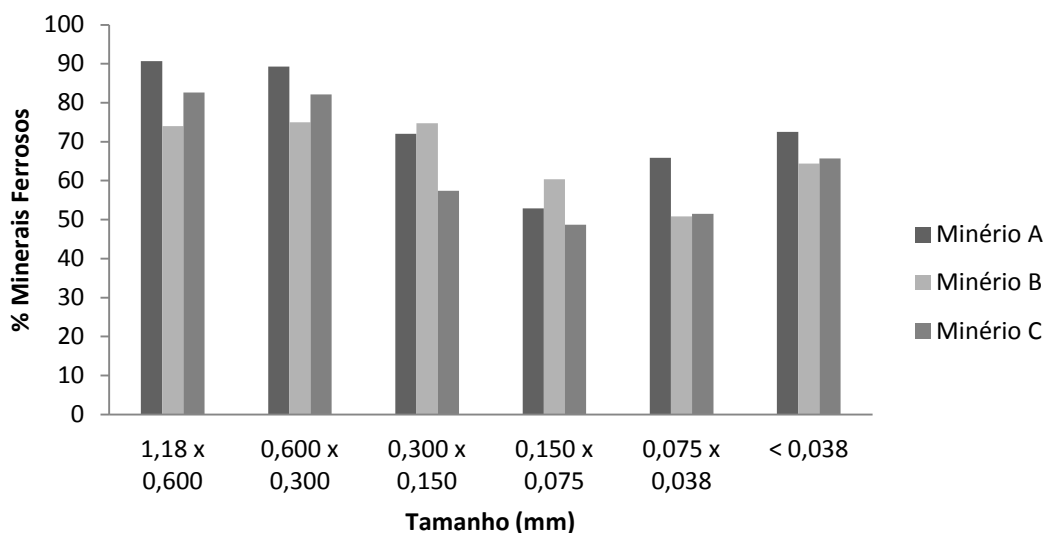


Figura 4.12- Quantificação em termos de minerais ferrosos para cada fração analisada (DRX)

Considerando os resultados de quantificação mineralógica, nas diversas frações granulométricas e minérios estudados tem-se que:

- O mineral hematita é o mineral mais abundante, encontrando-se distribuído em todas as frações, tendo maior concentração as frações mais grossas;
- A goethita distribui-se preferencialmente nas frações mais grossas;
- O quartzo concentra-se preferencialmente nas frações mais finas;

As Tabelas 4.6 a 4.8 apresentam uma comparação entre os teores obtidos a partir da análise química por FRX e os teores recalculados a partir da quantificação mineralógica, obtendo-se os seguintes resultados:

- Os teores de ferro são maiores nas frações mais grossas, justamente porque nessas faixas a predominância de minerais ferrosos o que é coerente com as Tabelas 4.4 a 4.6;
- Minérios com menor teores de Fe(t) são os que possivelmente têm maiores contribuições dos minerais hidratados em sua composição mineralógica;
- Os teores de Fe(t) em algumas frações ocorrem com maiores ou menores percentuais devido a menor ou maior presença de outros elementos nessas frações.

Tabela 4.6- Comparação entre teores de ferro e sílica estimados por mineralogia e análises químicas para o minério “A”

Amostra	% Fe		% SiO ₂	
	Mineralogia	Análise Química	Mineralogia	Análise Química
Cabeça < 1,18 mm	46,3	47,9	31,4	25,6
Reconstituído <1,18	48,2	47,9	27,6	25,7
1,18 x 0,600 mm	61,4	55,1	8,5	15,0
0,600 x 0,300 mm	60,4	55,3	9,8	13,1
0,300 x 0,150 mm	49,2	49,4	27,4	23,6
0,150 x 0,075 mm	36,4	37,6	46,6	41,0
0,075 x 0,038 mm	45,5	47,1	33,3	29,2
< 0,038 mm	49,9	50,5	25,5	19,2

Tabela 4.7- Comparação entre teores de ferro e sílica estimados por mineralogia e análises químicas para o minério “B”

Amostra	% Fe		% SiO ₂	
	Mineralogia	Análise Química	Mineralogia	Análise Química
Cabeça < 1,18 mm	46,5	41,5	33,1	36,1
Reconstituído <1,18	46,4	41,7	31,9	35,8
1,18 x 0,600 mm	51,6	44,6	25,8	33,1
0,600 x 0,300 mm	52,2	47,0	24,7	28,5
0,300 x 0,150 mm	51,9	47,7	25,2	28,0
0,150 x 0,075 mm	41,9	38,7	39,5	39,9
0,075 x 0,038 mm	35,3	32,8	49,3	49,0
< 0,038 mm	44,1	41,5	32,2	32,4

Tabela 4.8- Comparação entre teores de ferro e sílica estimados por mineralogia e análises químicas para o minério “C”

Amostra	% Fe		% SiO ₂	
	Mineralogia	Análise Química	Mineralogia	Análise Química
Cabeça < 1,18 mm	36,2	45,9	46,6	29,7
Reconstituído <1,18	44,4	46,4	34,1	29,1
1,18 x 0,600 mm	57,1	51,0	15,7	22,4
0,600 x 0,300 mm	56,6	51,8	16,4	21,0
0,300 x 0,150 mm	46,4	46,4	31,6	26,6
0,150 x 0,075 mm	33,7	35,0	50,4	44,8
0,075 x 0,038 mm	35,8	35,8	48,0	44,7
< 0,038 mm	45,7	53,7	32,3	19,1

A Figura 4.13 apresenta a comparação dos dados de composição química analisados pelo método de Rietveld e os dados analisados por fluorescência de raios X. Pode-se observar uma boa correspondência entre as técnicas.

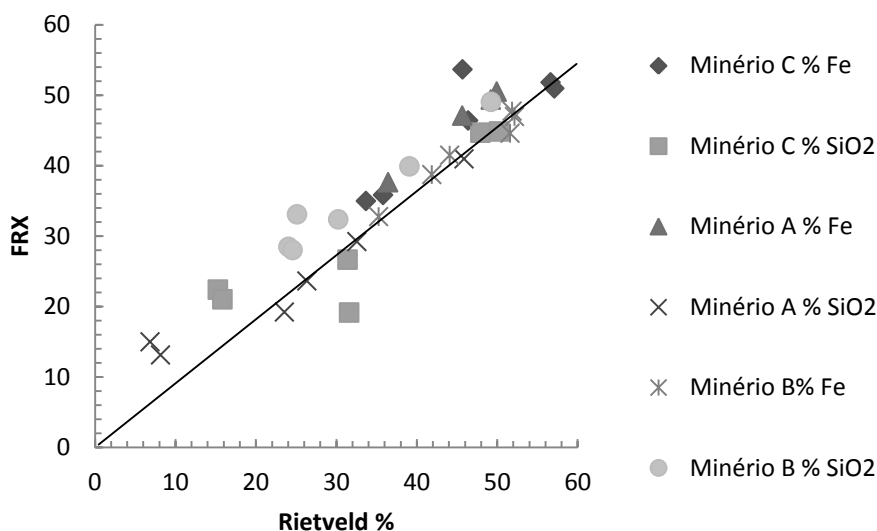


Figura 4.13- Comparação entre resultados de análises químicas calculados pelo método de Rietveld e os obtidos por FRX

Em relação à distribuição dos teores de perda por calcinação (PPC) para as amostras de cabeça os minérios de B e C apresentaram valores relativamente semelhantes (Figura 4.14). O minério A, por outro lado, como era de se esperar, apresentou um maior valor de PPC por apresentar maiores contribuições de minerais hidratados em sua composição mineralógica principalmente nas frações mais grossas. A Figura 4.15 apresenta uma comparação entres os percentuais de goethita nas várias frações analisadas e os receptivos valores de PPC.

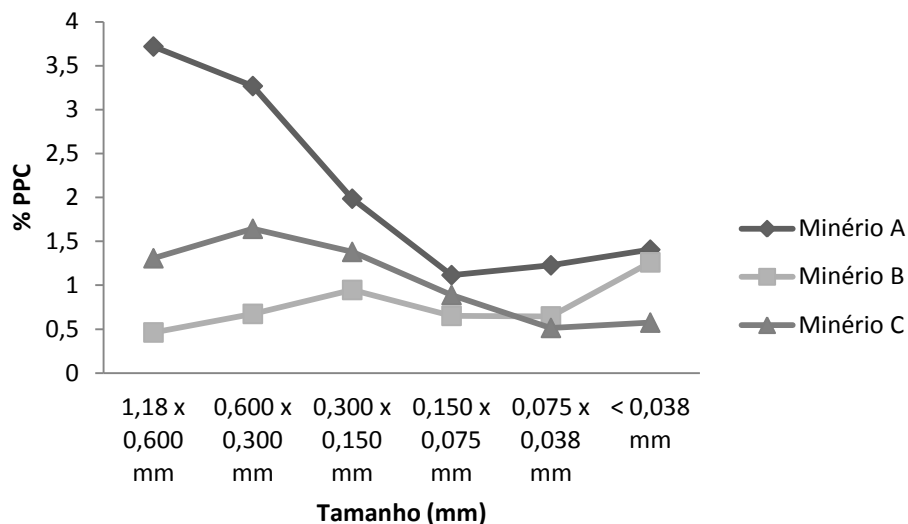


Figura 4.14- Teores de PPC (perda por calcinação) em cada fração granulométrica de todos os minérios estudados

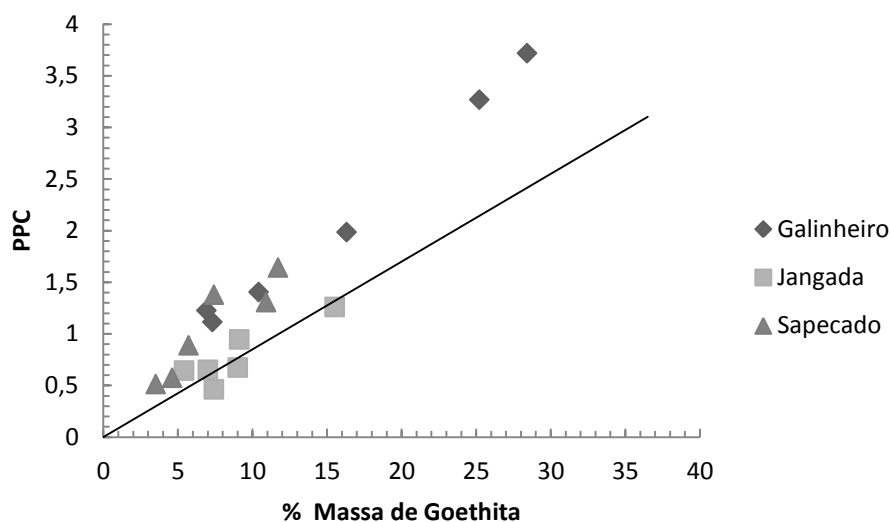


Figura 4.15- Relação entre o PPC e a percentagem de goethita para cada fração analisada

4.1.3.2 - Microscopia Eletrônica de Varredura MEV e Microanálise Química (EDS)

Um detalhamento na identificação das fases minerais presentes nas amostras de ROM, em cada fração granulométrica foi obtido por meio do estudo ao microscópio eletrônico de varredura associado à microanálise química.

A microscopia eletrônica de varredura permitiu a determinação da composição química de fases minerais com uma configuração de elétrons retroespalhados, que permitiu a individualização das principais fases por meio do contraste de tons de cinza em função do número atômico complementando a análise de DRX.

Levando em consideração o fato de que a discriminação entre a hematita e magnetita não ser prática com esse tipo de microscópio, foram adquiridas imagens utilizando o microscópio ótico com o propósito de discriminar a hematita da magnetita.

Os resultados obtidos por MEV são mostrados na forma de microfotografias e microanálises. Em algumas imagens foram selecionadas diferentes áreas, nas quais foram identificadas as espécies químicas presentes, utilizando microanálises EDS, e sua composição, de maneira a permitir a identificação das diversas fases minerais presentes nas amostras. Desse modo, foi possível a identificação mineralógica em cada área escolhida. Essas análises foram realizadas com o objetivo de mostrar a diversidade mineralógica apresentada nos minérios estudados. Para cada área analisada foi possível observar a composição química e, por meio destas, obtivemos a interpretação sobre qual espécie mineral ocorreu naquela área específica.

A Figura 4.16 apresenta uma imagem ao MEV em elétrons retroespalhados para o minério A, nas frações 0,600 x 0,300 mm e a Figura 4.17 apresenta imagens nas frações de 0,075 x 0,038 mm.

A mineralogia da amostra é simples, porém com complexa textura com alta porosidade. Esses poros normalmente são gerados durante o processo de transformação de um mineral para outro.

Na Figura 4.16 (A) o minério A, apresentou fraca liberação, podendo ser observada liberação de ganga e também de minerais de ferro, fato esse que também foi confirmado pela microscopia ótica (Figura 4.18). Em (B) uma partícula de hematita com hábito de magnetita. A partícula de hematita apresenta-se quase liberada, contendo pequenas inclusões de quartzo. Em (C) é identificado uma partícula de hematita com inclusões de goethita, mais precisamente duas gerações de goethita muito bem definidas sendo uma com aspecto maciço e uma com aspecto granular.

A Figura 4.17 apresenta as microfotografias para a fração de 0,075 x 0,038mm. Em (A) observa-se que boa parte das partículas encontra-se liberadas. Partículas de quartzo apresentam algumas inclusões, há pouca presença de goethita sendo essa,

reportada para o fino comprovado pelas análises de DRX (Tabela 4.4), e em (B) uma microfotografia de uma hematita com hábito de magnetita.

Além das feições identificadas utilizando o MEV as análises de microscopia ótica (Figura 4.18), identificaram a presença de partículas de hematita microcristalinas, já liberadas (Figura 4.17 A), presença de hematitas granular e compacta, e em (B) presença de uma diversidade de goethitas (terrosa, maciças, botrioidal) sendo possível ainda observar a presença da hematita (martita) com hábito de magnetita, esta forma é chamada de pseudomorfismo, ou seja, a forma externa herdada de outro mineral, esta geração de hematita é resultado da oxidação e recristalização da magnetita (Neumann 2014).

Para as análises de EDS (Tabela 4.9) foi possível observar que a hematita da Figura 4.16 (B) apresenta uma percentagem de ferro de 71,6% o que é bem próximo da percentagem de ferro da magnetita que de acordo com a Tabela 2.1 é de 72,4% Fe. Em relação às goethitas os teores de ferro se aproximam aos valores teóricos desse mineral (Tabela 2.1). As análises de EDS para as duas goethitas apresentaram teores de silício e alumínio diferentes, sendo que a goethita maciça apresentou teores de silício e alumínio bem baixos comparados com a goethita granulada, a qual apresentou teores de silício e alumínio um pouco mais alto apresentando também uma pequena quantidade de fósforo.

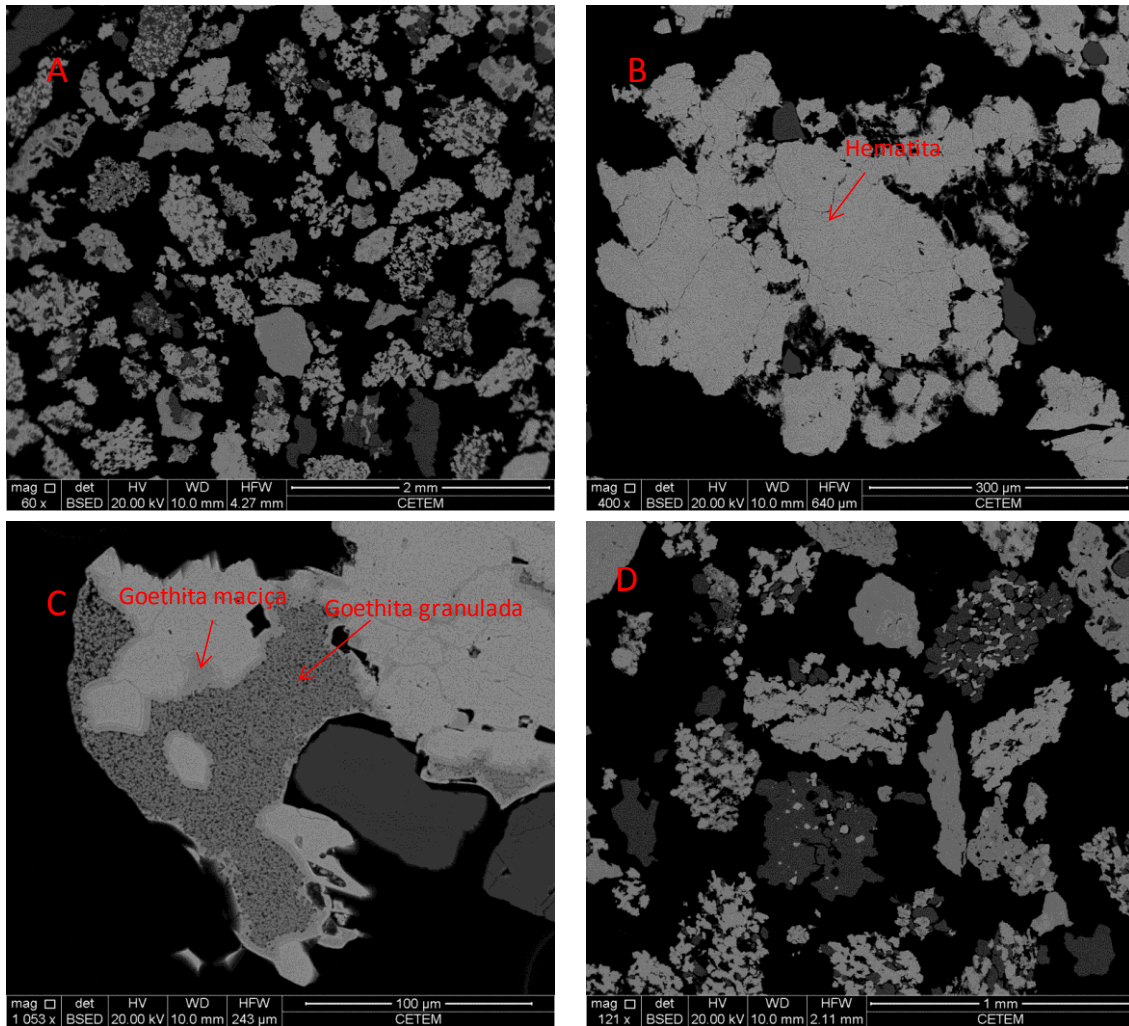


Figura 4.16- Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados fração 0,600 x 0,300 mm para o minério "A"

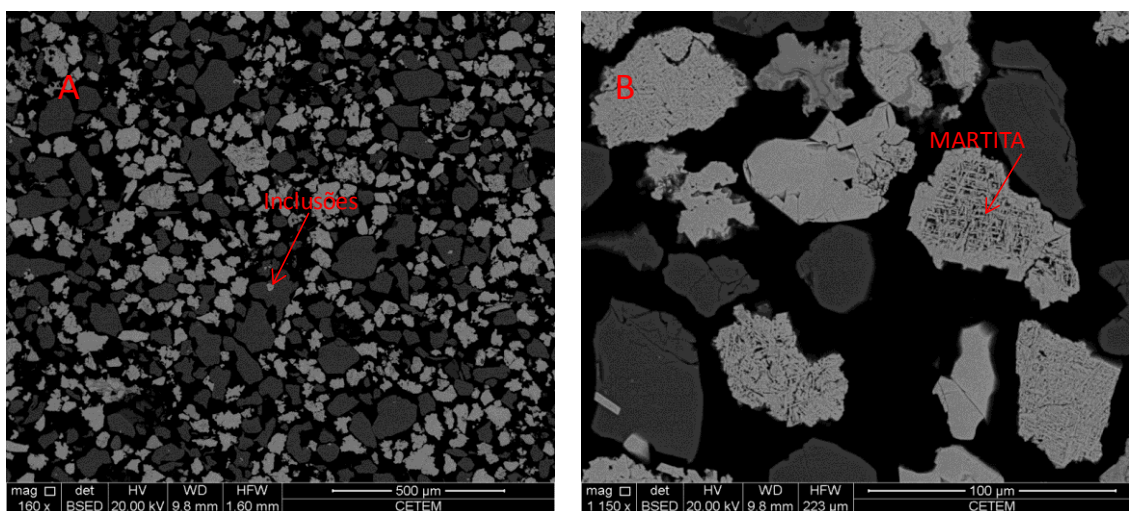


Figura 4.17- Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados fração 0,075 x 0,038mm para o minério "A"

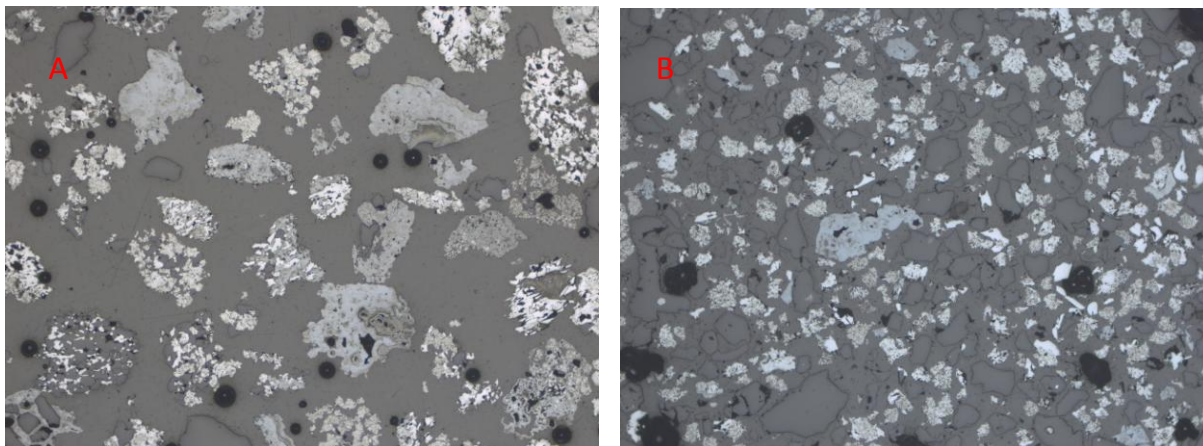


Figura 4.18 - Imagens de um campo da seção polida em (A) fração 0,600 x 0,300 mm observado com aumento de 5x, (B) fração 0,075 x 0,038mm observado com aumento de 10x para o minério “A”

Tabela 4.9- Análise EDS 0,600 x 0,300 mm minério “A” (Figura 4.16)

(%) massa			
Elemento	Hematita (A)	Goethita maciça (C)	Goethita granulada (C)
Oxigênio	28,28	35,31	32,29
Ferro	71,61	62,31	64,75
Silício	0,03	0,54	0,67
Alumínio	0,06	1,55	1,89
Fósforo	0,02	0,30	0,32
Cálcio	-	-	0,08

As Figuras 4.19 e 4.20 apresentam imagens de elétrons retroespalhados para a amostra do minério B, nas frações 0,600 x 0,300 mm e 0,075 x 0,038 mm, respectivamente.

Assim como o minério A, o minério B apresenta mineralogia simples, embora muito diferente em termos de textura e liberação (mais fina). Na Figura 4.19 (A) é possível observar que diferente do minério “A” que mesmo nessa faixa apresentou-se um pouco mais liberado, no minério “B” não se observa qualquer liberação na faixa de

0,600 x 0,300 mm. Em (B) é apresentado o detalhe de uma partícula de goethita acicular fibrosa apresentando uma certa orientação. Em (C) é destacada uma hematita maciça com bastante quartzo intercalado e a presença de goethita maciça em (D) detalhe da goethita acicular, e ao lado observa-se a ocorrência do mineral apatita, mais precisamente fluorapatita, um fosfato de cálcio cuja presença também foi confirmada na análise de FRX (Anexo 7).

A Figura 4.20 apresenta imagens nas frações de 0,075 x 0,038 mm, onde é possível observar uma razoável liberação (A), em (C) observa-se a presença do quartzo com inclusões de minério de ferro, em (B) uma hematita lamelar (especularita) com algumas inclusões de quartzo, e em (D) uma matriz de goethita junto à magnetita. Esses tipos de associações foram também observados na microscopia ótica (Figura 4.21), que também permitiu observar a presença de partículas de magnetita, de hematitas microcristalinas e lamelares, além de uma quantidade significativa de partículas mistas. Como era de se esperar, a amostra do minério “B” possui mais magnetita em comparação aos outros dois minérios.

A Tabela 4.10 apresenta as análises de EDS para a goethita maciça, goethita acicular e hematita. Observa-se que nos pontos escolhidos há uma presença considerável de ferro que também estão próximos aos mostrados da Tabela 2.1.

Tabela 4.10- Análise EDS 0,600 x 0,300 mm minério “B” (Figura 4.19)

(%) massa			
Elemento	Hematita (C)	Goethita maciça (C)	Goethita acicular (D)
Oxigênio	29,60	33,00	36,32
Ferro	69,82	66,08	61,49
Silício	0,53	0,83	1,37
Alumínio	0,02	0,05	0,46
Fósforo	0,03	0,04	0,23
Manganês	-	-	0,13

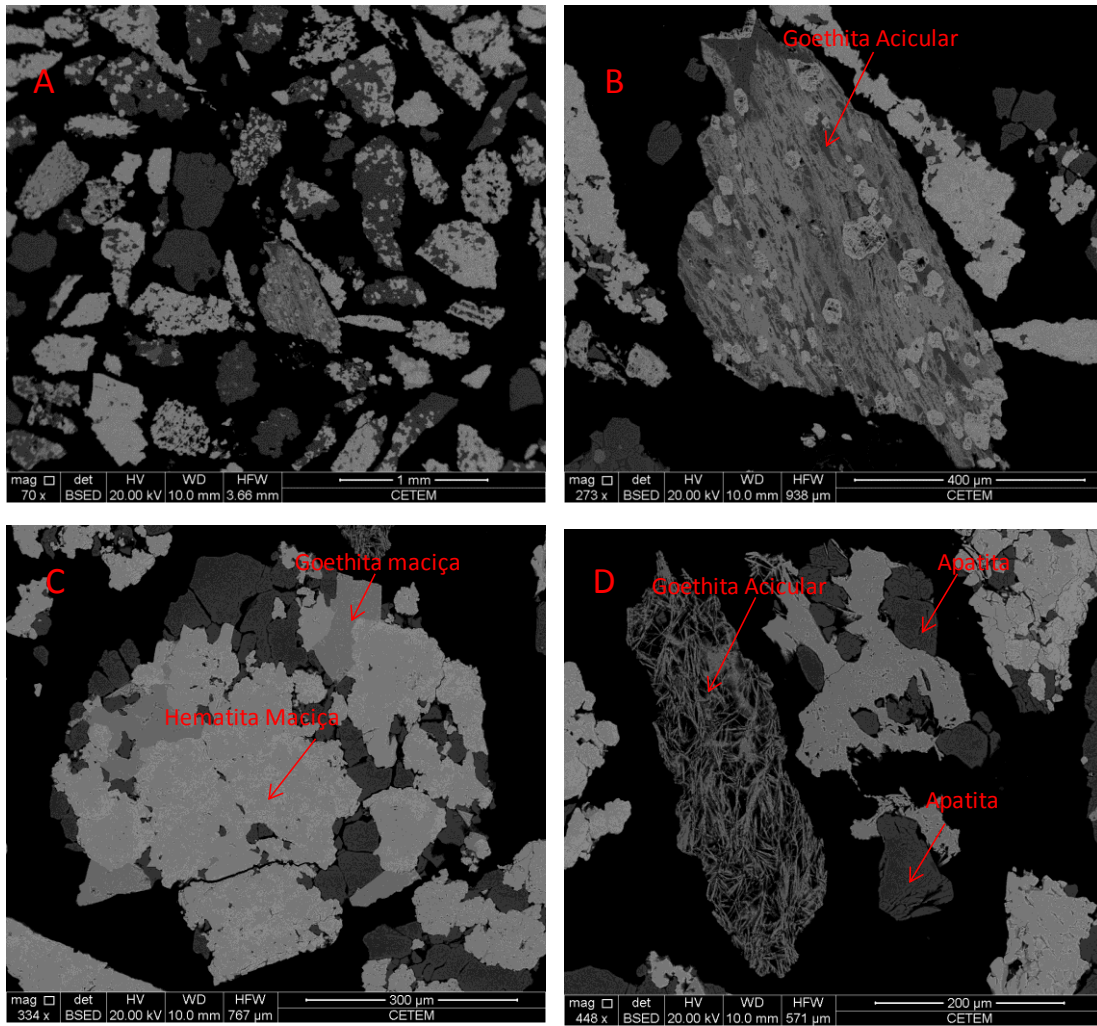


Figura 4.19- Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados fração 0,600 x 0,300 mm para o minério "B"

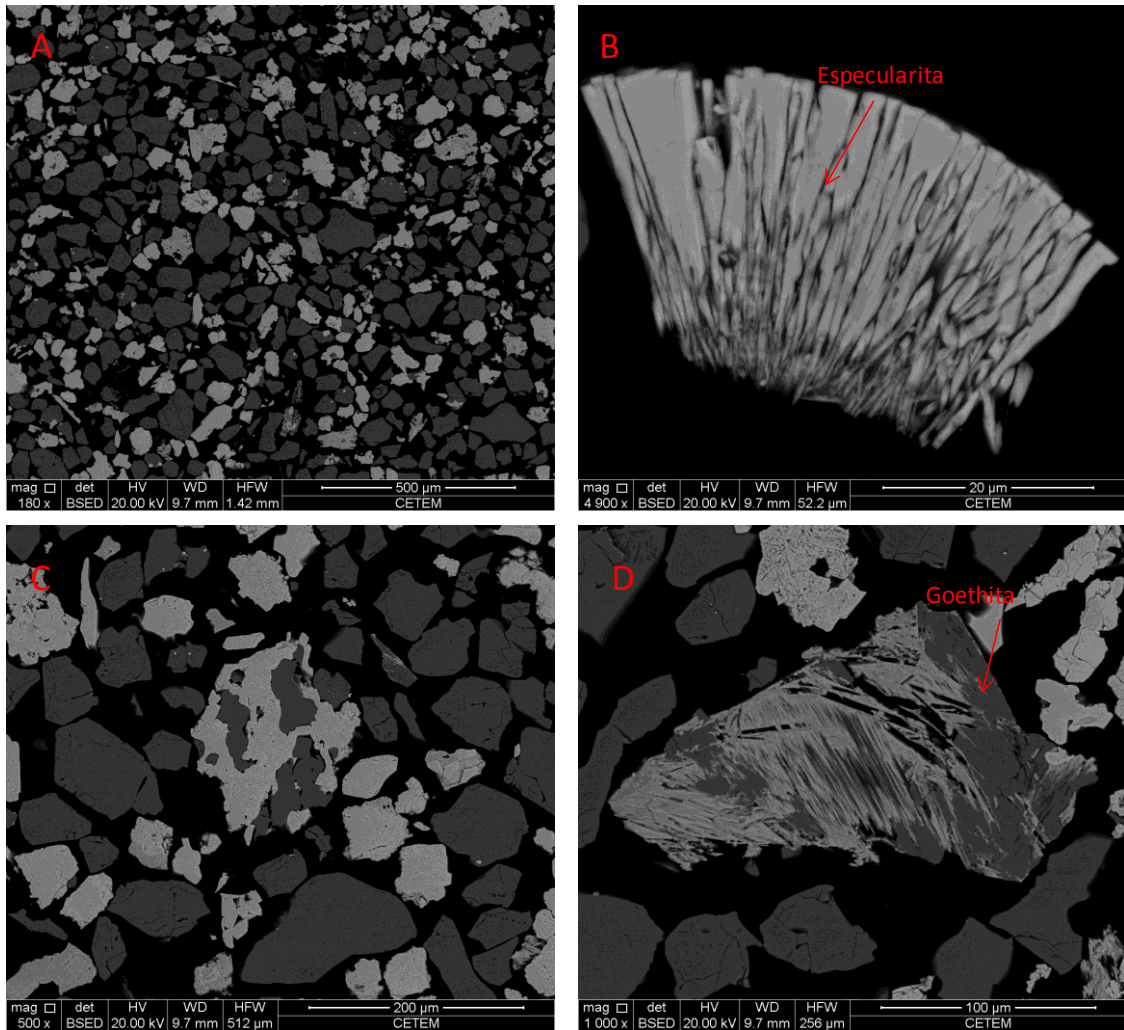


Figura 4.20- Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados fração 0,075 x 0,038mm para o minério “B”

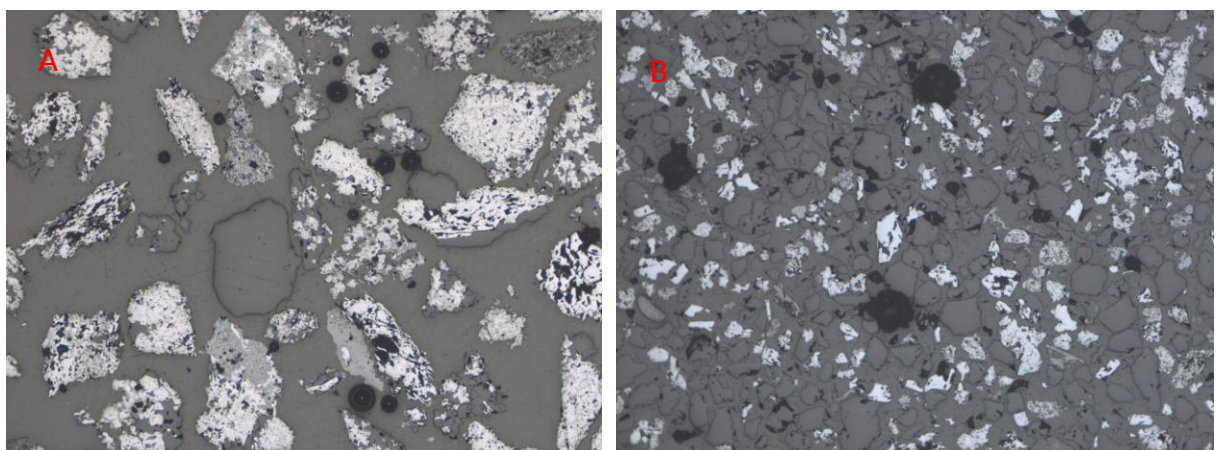


Figura 4.21 - Imagens de um campo da seção polida em (A) fração 0,600 x 0,300 mm observado com aumento de 5x, (B) fração 0,075 x 0,038mm observado com aumento de 10x para o minério “B”

A Figura 4.22 apresenta uma imagem de MEV em elétrons retroespalhados para o minério C nas frações 0,600 x 0,300 mm e a Figura 4.23 apresentam imagens nas frações de 0,075 x 0,038 mm.

O minério “C” é um típico itabirito (apresentar intercrescimento de quartzo com óxido de ferro), em relação aos minérios anteriores. Em relação à porosidade, apresentou baixa porosidade. Em relação à liberação é possível observar que, assim como o minério A, o minério C apresenta alguma liberação mesmo nas faixas mais grossas de 0,600 x 0,300 mm.

Na Figura 4.22 (B) é possível observar intercrescimento de quartzo com os óxidos de ferro, típico de minérios itabiríticos em (C) uma matriz de cimento goethítico ferruginoso, em (D) a presença de hidróxido de alumínio (Gibbsita), o que é coerente com as análises realizadas por DRX e mostradas na Tabela 4.5. A presença da gibbsita, assim como a presença da caulinita, está associada à presença da goethita, que em geral encontra-se em uma fração na qual o quartzo se encontra menos liberado, se comparados às demais frações. Observa-se em (E) agulhas goethíticas e em (F) a presença de minerais de terras raras (xenotima).

Na Figura 4.23 apresentam imagens nas frações de 0,075 x 0,038 mm, sendo possível observar relativamente uma boa liberação. Porém, observa-se a presença de partículas mistas (Figura 4.23 B), fato esse que também foi observado na microscopia ótica (Figura 4.24).

O minério C assim como o minério A apresentou uma diversidade de goethitas, partículas liberadas mesmo nas frações mais grossas e quartzo praticamente liberado na fração mais finas, porém com algumas inclusões de minerais ferrosos.

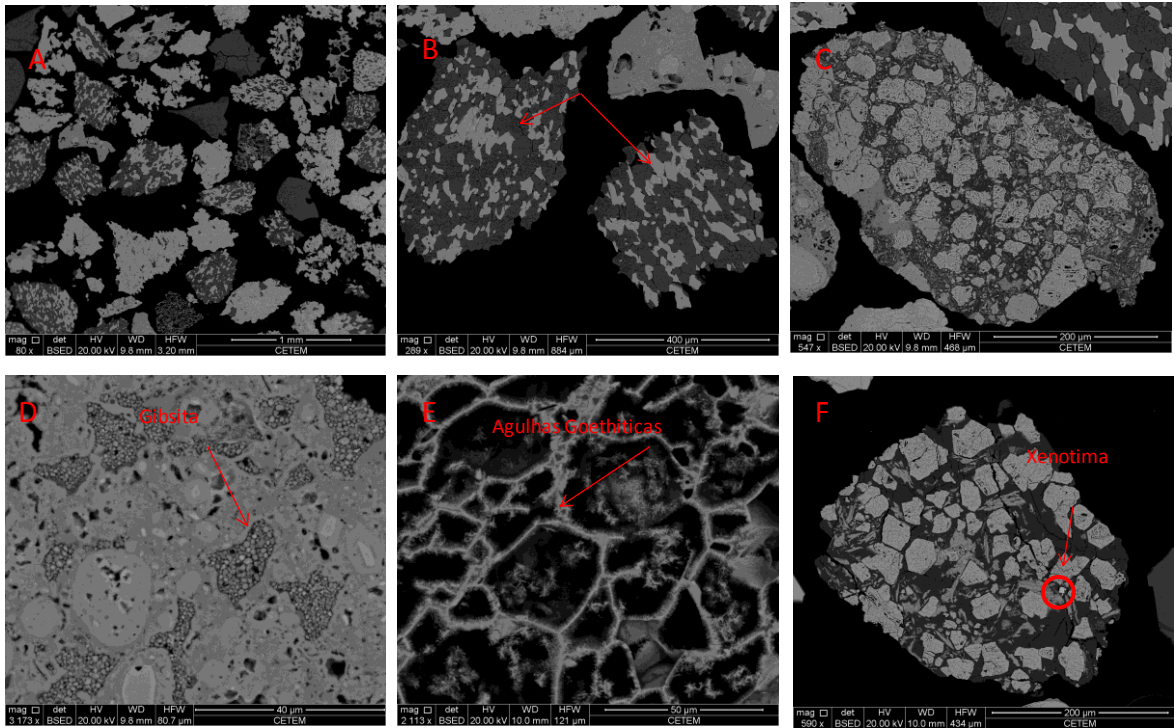


Figura 4.22- Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados (fração 0,600 x 0,300 mm) para o minério “C”

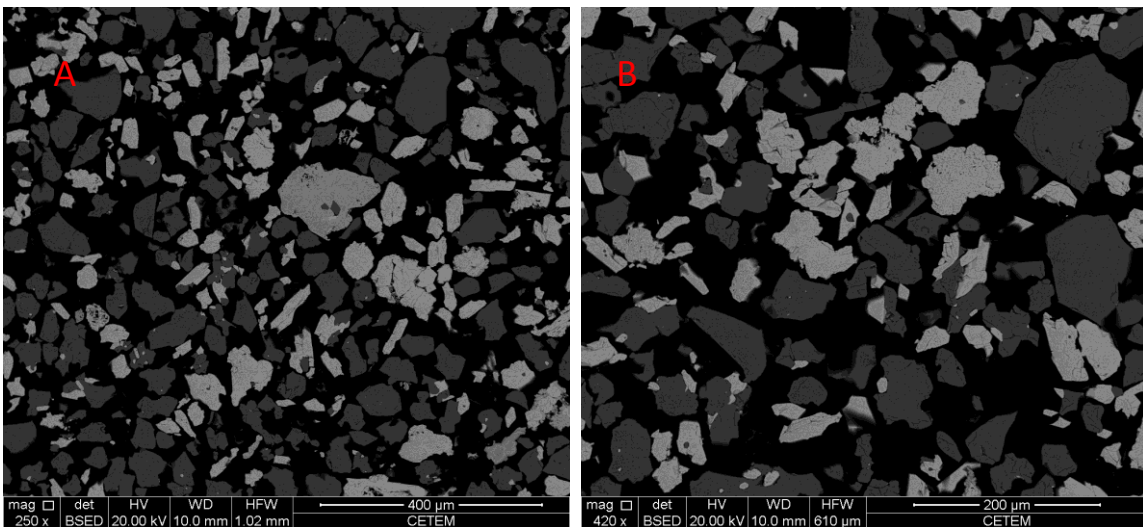


Figura 4.23- Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados (fração 0,075 x 0,038mm) para o minério “C”

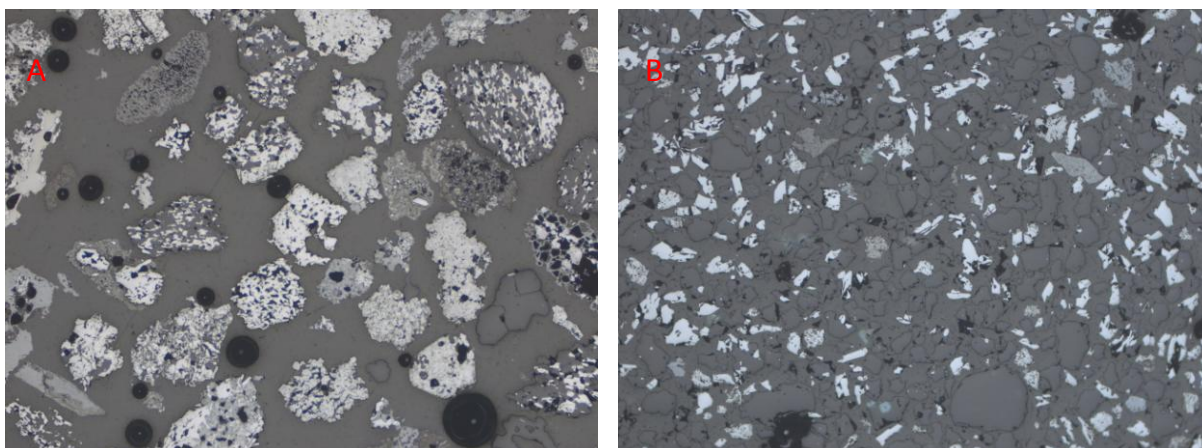


Figura 4.24 - Imagens de um campo da seção polida em (A) fração 0,600 x 0,300 mm observado com aumento de 5x, (B) fração 0,075 x 0,038mm observado com aumento de 10x para o minério “C”

4.1.3.2 – Espectro de Liberação

A Tabela 4.11 apresenta os percentuais em massa obtidos pelo sistema automático de classificação desenvolvido por Fontes & Gomes (2012) e a Figura 4.12 percentuais obtidos pelo método de Rietveld.

Fazendo uma comparação dos dados de mineralogia obtidos por DRX e os dados obtidos por análise de imagem de MEV, é possível observar uma boa correlação entre as técnicas. De fato, a correspondência entre os teores de quartzo das duas técnicas é muito boa. As tabelas, entretanto, evidenciam a dificuldade da análise de imagens de MEV em discriminar goethita dos óxidos, tendo em vista que as estimativas do teor de goethita por análise de imagens se mostrou sistematicamente mais alto que aquele identificado por difração de raios-X.

Tabela 4.11- Percentuais em massa das classes minerais por análise de imagem

Mineralogia	Minério A		Minério B		Minério C	
	600x300µm	75x38µm	600x300µm	75x38µm	600x300µm	75x38µm
Quartzo	8,2	31,3	22,5	43,0	17,2	48,7
Goethita	35,1	10,8	11,3	7,9	21,5	6,4
Hematita/Magnetita	56,7	57,9	66,2	49,0	61,3	44,9

Tabela 4.12- Percentuais em massa das classes minerais analisados por DRX

Mineralogia	Minério A		Minério B		Minério C	
	600x300µm	75x38µm	600x300µm	75x38µm	600x300µm	75x38µm
Quartzo	8,5	33,1	24,0	45,6	16,0	48,2
Goethita	25,1	7,0	8,9	5,0	11,8	3,6
Hematita/Magnetita	65,2	59,9	57,7	49,4	71,3	48,2

As Figuras 4.25 a 4.27 apresentam os espectros de liberação correspondentes a duas faixas extremas: 600x300µm e 75x38µm para os três minérios estudados. As figuras apresentam as quantidades relativas em cada faixa de teor.

Como podemos observar os minérios são diferentes, porém o comportamento é muito parecido. Por exemplo, os minérios B e C são bem diferentes, porém apresentaram uma distribuição muito parecida.

Segundo Gaudin (1939) os minerais que se encontram em menor concentração são mais difíceis de liberar, ao passo que o mineral que se encontra mais abundante é o que libera mais facilmente. Conforme a Figura 4.12 os minerais que se encontram em maior concentração são os minerais ferrosos. Era de se esperar que esses minerais estivessem mais liberados, no entanto, as Figuras 4.25 a 4.27 mostraram o contrário. Nas faixas de 600x300µm e 75x38µm a proporção de quartzo e outros minerais liberados são bem maiores que a proporção de minerais ferrosos. Os três minérios apresentaram o mesmo comportamento.

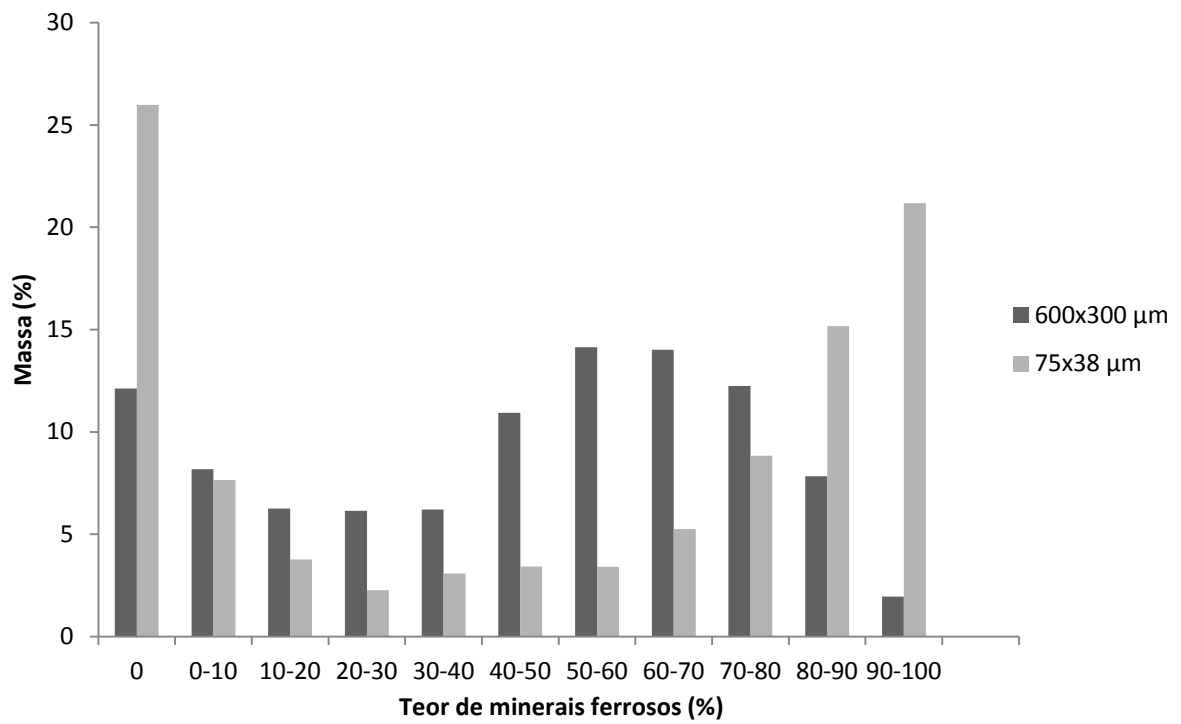


Figura 4.25- Espectro de liberação aparente para o minério “A”

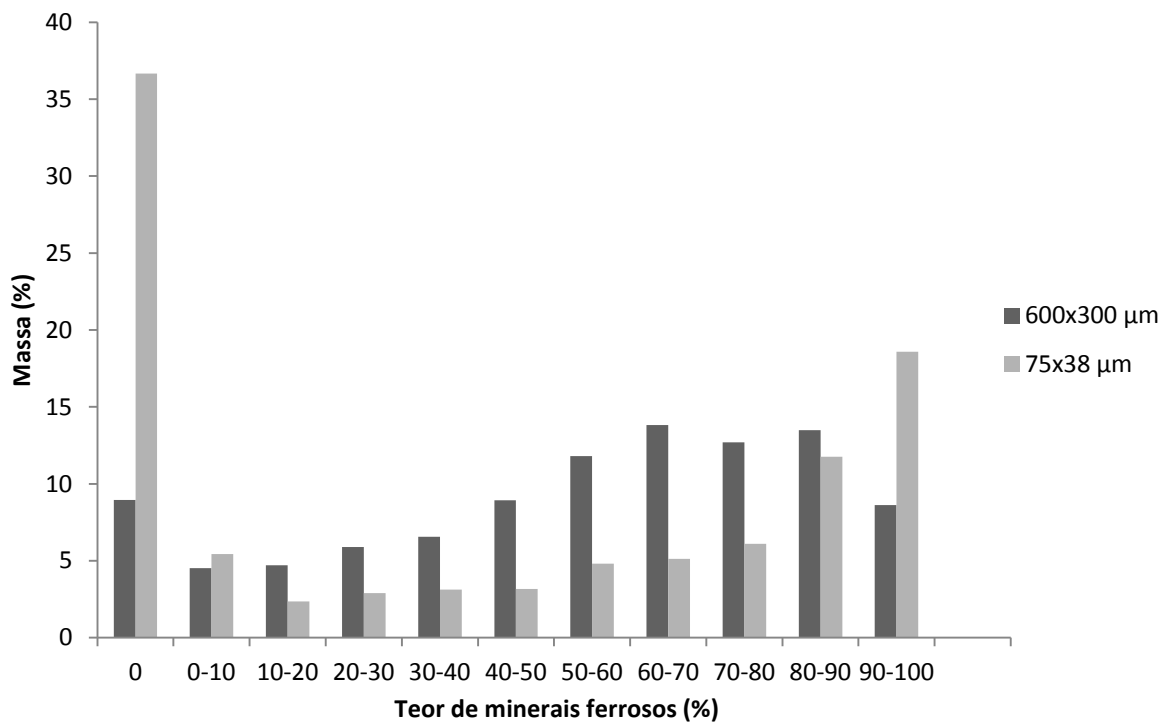


Figura 4.26- Espectro de liberação aparente para o minério “B”

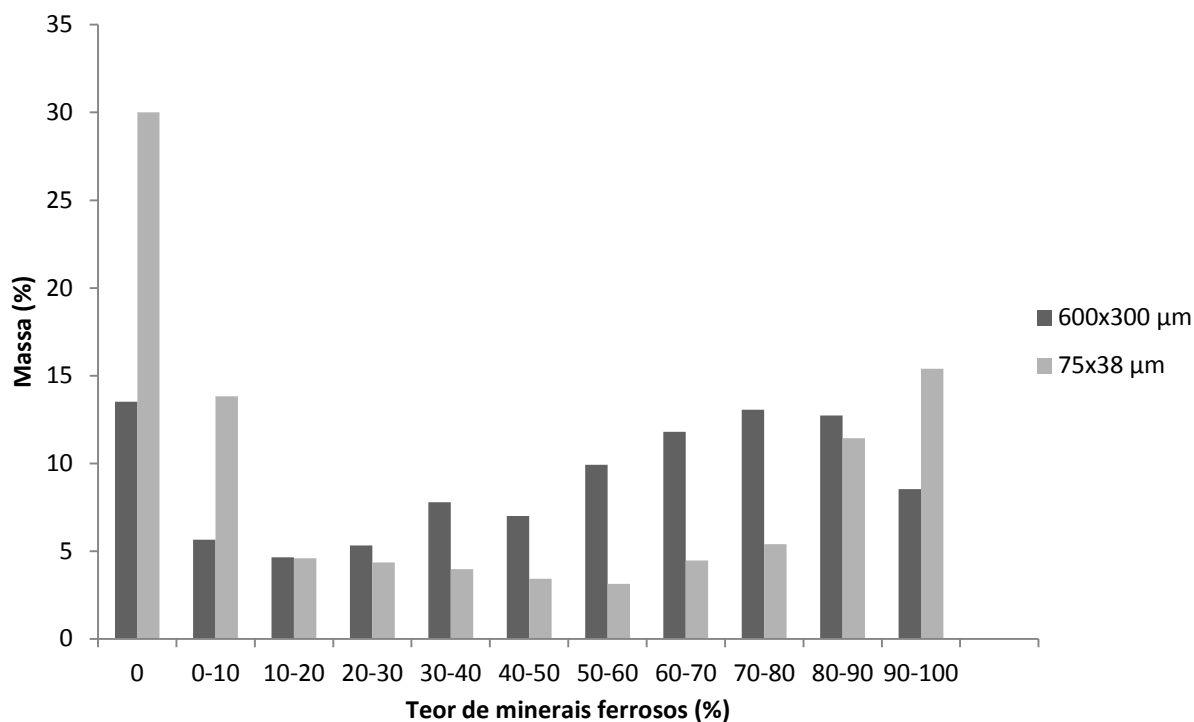


Figura 4.27- Espectro de liberação aparente para o minério “C”

4.1.3.3 – Implicações da mineralogia na separação magnética

De maneira geral é possível observar que conforme a granulométrica do material diminui os minerais de ferro vão sendo liberados. Também se observa que mesmo nas faixas mais grossas o quartzo se encontra liberado, e boa parte dos minerais ferrosos encontram-se nas faixas intermediárias.

Segundo Loyola (2014) os minérios A e C tem liberação em 0,150mm ao passo que o minério B tem uma liberação mais fina em 0,045mm.

Para o minério A, (Figura 4.25) podemos observar que mesmo na faixa mais grossa os minerais ferrosos embora em pequenas quantidades encontram-se liberados, na faixa mais fina observa-se que para uma massa de 26% não há ocorrência de minerais ferrosos liberados.

Para o minério B, (Figura 4.26) os minerais ferrosos concentram-se nas faixas intermediárias, na faixa mais fina presença de uma quantidade significativa de quartzo liberado o que é coerente com a mineralogia quantitativa.

Para o minério C, (Figura 4.27), assim como o minério B os minerais ferrosos encontram-se nas faixas intermediárias e analogamente apresenta uma quantidade significativa de quartzo já liberado.

Os resultados analisados em geral, revelaram que os minérios estudados, nas suas diferentes subfrações, apresentam composições mineralógicas semelhantes. A mineralogia dos minérios mostrou que a hematita, a goethita e a magnetita encontram-se presente em todos os minérios, sendo a hematita o mineral predominante. Particularmente o minério A apresentou em alguns pontos partículas com hábitos de magnetita. O minério C apresentou uma pequena quantidade de magnetita, porém de uma forma mais espalhada, e jangada como era de se espera apresentou uma quantidade significativa de magnetita.

Nesse mesmo contexto, tendo em vista as associações presentes se faz necessário o emprego de dois estágios de concentração magnética. O primeiro estágio seria o de baixa/média intensidade que irá recuperar a magnetita, e o segundo estágio de concentração de alta intensidade que irá recuperar a hematita, a goethita e outros minerais associados.

4.1.3 – Análise no Separador Isodinâmico Frantz

Os ensaios realizados no Separador Isodinâmico Frantz permitiram estabelecer os intervalos de intensidade de corrente preferencial de ocorrência das principais fases presentes nas amostras estudadas (Tabela 4.13).

Os resultados da Separação Magnética utilizando o separador Magnético Isodinâmico Frantz, juntamente com os teores dos principais constituintes, auxiliaram a visualizar a distribuição dos minerais em função dos intervalos de separação magnética associado às análises químicas.

As curvas de separabilidade (Figura 4.28 a 4.30) para cada material estudado podem ser visualizadas a seguir. Para a obtenção dos gráficos utilizou-se os valores cumulativos.

Tabela 4.13- Comportamento no separador isodinâmico Frantz das principais fases minerais presentes nas amostras estudadas compilado de Parfenoff (1970)

Minerais	Intensidade de corrente no Isodinâmico Frantz (A)						
	Inclinação longitudinal: 25°; Inclinação lateral: 15°						
	0,0	0,1	0,3	0,5	0,7	1,0	Ñ Mag.
Magnetita							
Hematita/Goethita							
Quartzo							

Nota: As linhas mais grossas representam intervalos de ocorrência mais frequentes.

Pode-se observar que à medida que a corrente é incrementada a percentagem de massa reportada para o concentrado cresce. À medida que a intensidade de corrente é elevada, entretanto, o teor do concentrado é reduzido, o que é coerente com os espectros de liberação. Na maior intensidade de corrente utilizada (1 A), o produto não-magnético apresentou para todos os materiais estudados teores de ferro inferiores a 6%.

De maneira análoga, pode-se observar que a percentagem de ferro que reporta ao concentrado aumenta de forma ainda mais significativa à medida que aumenta a intensidade de corrente. Isso é observado para todas as faixas analisadas, bem como para todos os materiais estudados.

Conforme visto na Tabela 4.13 a magnetita separa em correntes inferiores a 0,1 A. Comparando-se os resultados das Figuras 4.28 a 4.30 com os dados da mineralogia quantitativa (Tabelas 4.4 a 4.6) fica claro a coerência entre os dados, ou seja, minérios que apresentam elevada proporção de magnetita, também apresentaram elevada recuperação na intensidade de corrente de 0,1 A. Uma comparação mais cautelosa, entretanto, sugere que sistematicamente a recuperação com o ímã de mão é maior. Isso pode ser explicado pela incompleta liberação, bem como pelo caráter ferromagnético de algum outro dos minerais presentes.

Para o minério A, (Figura 4.28) na corrente de 0,1 A, a pequena quantidade de massa reportada para o concentrado é coerente, tendo em vista que na fração mais grossa a magnetita ocorre em pequenas quantidades como mostrou a análise mineralógica.

Diferentemente do minério A, no caso do minério B na corrente de 0,1 A, praticamente toda a magnetita presente foi recuperada, tendo em vista a grande quantidade de magnetita na faixa mais grossa, e decrescendo nas faixas mais finas.

Analogamente, o minério C, para a corrente de 0,1 A recuperou-se praticamente toda a magnetita, o que também é coerente com as análises mineralógicas.

Analisando as intensidades de correntes mais altas, observa-se que para o minério B, à medida que a corrente é incrementada possivelmente a hematita e a goethita presentes serão recuperadas até a um ponto onde ocorre a saturação no qual todos os minerais ferrosos são recuperados. Analogamente isso ocorre para o minério B. Em relação ao minério A, ocorreram problemas na execução do ensaio, que tornou incoerentes os resultados das análises para às intensidades de correntes mais altas.

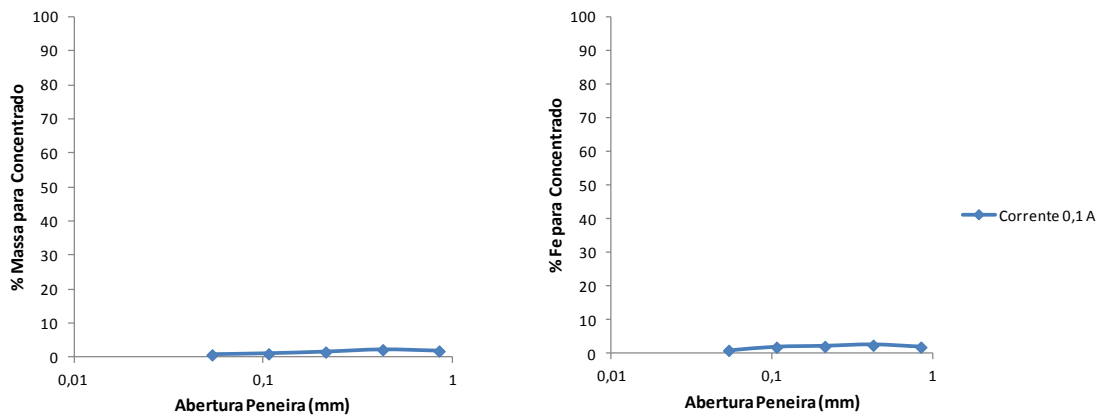


Figura 4.28- Relação entre os valores da separação Magnética no Frantz considerando a percentagem de massa e Fe reportados para o concentrado para o minério “A”

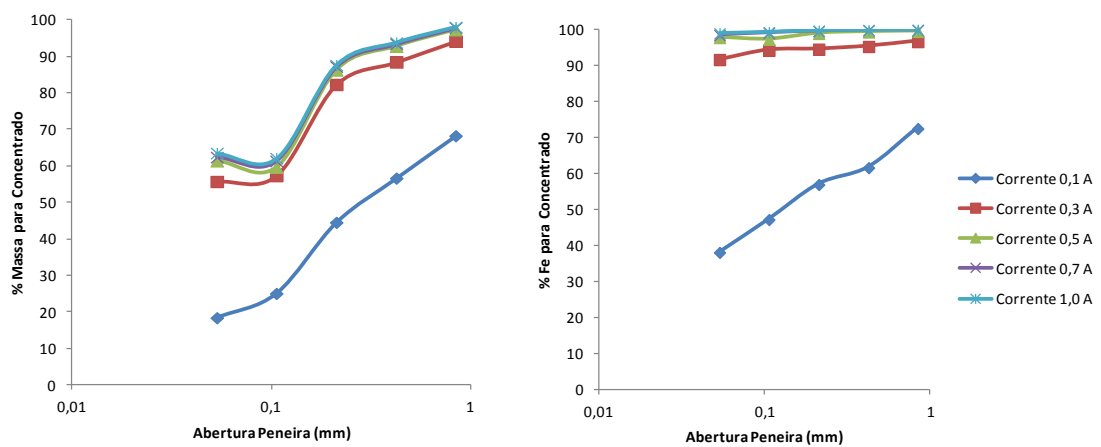


Figura 4.29- Relação entre os valores da separação Magnética no Frantz considerando a percentagem de massa e Fe reportados para o concentrado para o minério “B”

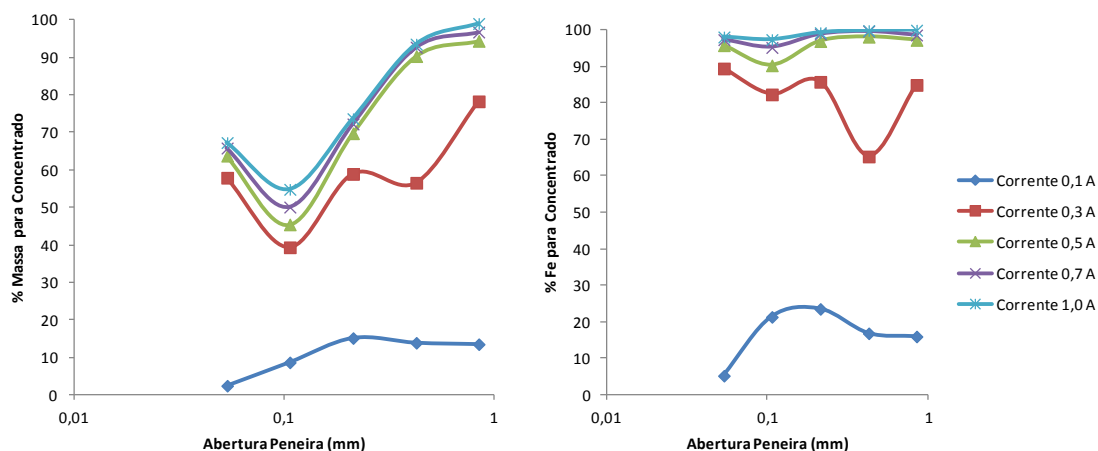


Figura 4.30- Relação entre os valores da separação Magnética no Frantz considerando a percentagem de massa e Fe reportados para o concentrado para o minério “C”

4.2 – Ensaios preliminares de separação magnética

As Figuras 4.31 a 4.33 apresentam resultados do rendimento (recuperação mássica) e recuperação acumulados nos ensaios de concentração magnética utilizando o WDRE e o Rapid nas condições de controle dos testes (ponto central dos planos fatoriais, dados nas Tabelas 3.2 e 3.4) em função do tamanho de partícula.

De acordo com a Tabela 4.13, a magnetita presente nas amostras será recuperada em campo baixo, ou seja, no primeiro estágio de concentração no WDRE. Os demais minerais ferrosos, hematita e a goethita com suas diferentes texturas serão recuperados no segundo estágio de concentração magnética de alta intensidade utilizando o concentrador Rapid.

Vale salientar que, apesar da magnetita ser considerada um mineral de elevada susceptibilidade magnética, ela poderá ou não ser recuperada no primeiro estágio de concentração. Isso pode ocorrer quando a partícula apresenta apenas uma pequena proporção de magnetita. Ou seja, nestas condições é possível aplicar um concentrador magnético de alta intensidade na recuperação completa da magnetita (Queiroz, 2010). Esse caso se aplica aos minérios A e C, pois eles apresentam magnética, porém fortemente dispersa entre os demais minerais. É importante destacar que a recuperação de ferro na separação com o Rapid foi superior a, aproximadamente, 90% em todas as faixas analisadas para as amostras de Jangada e Sapecado, sendo inferior somente no caso do minério “A”.

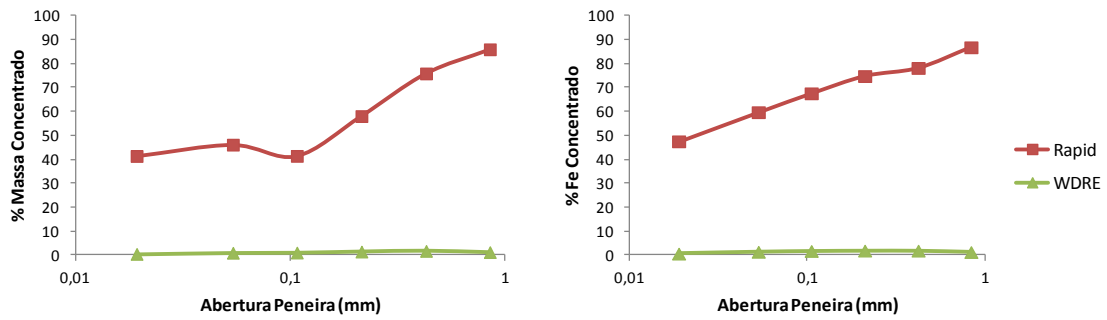


Figura 4.31- Comparação dos resultados de concentração de média e alta intensidade para o minério “A”

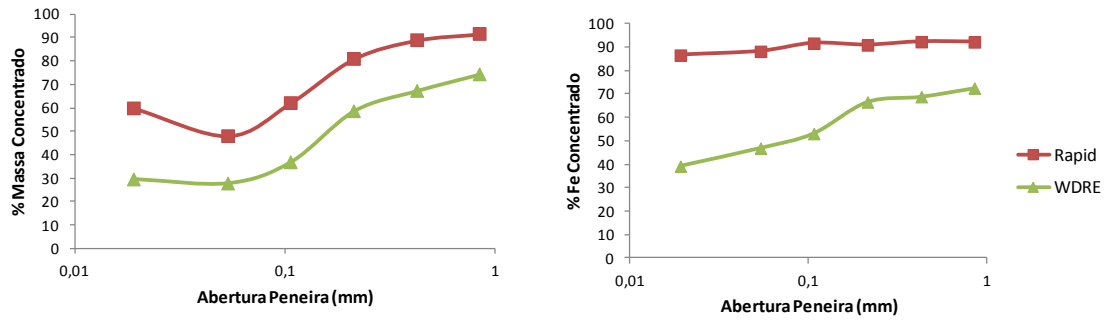


Figura 4.32- Comparação dos resultados de concentração de média e alta intensidade com para o minério “B”

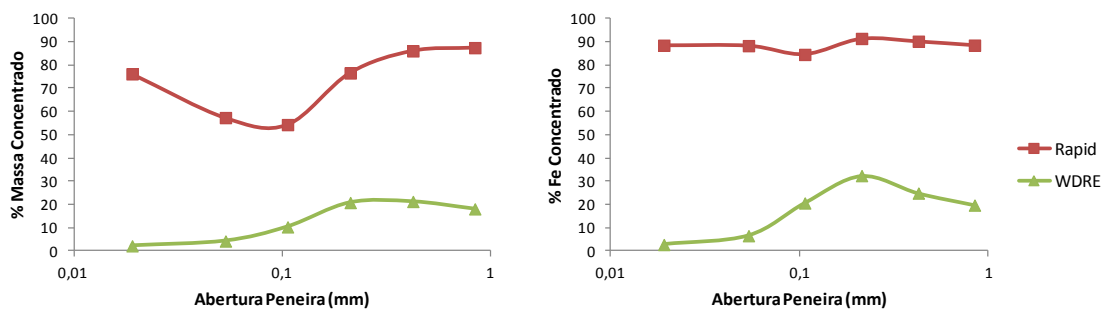


Figura 4.33- Comparação dos resultados de concentração de média e alta intensidade para o minério “C”

4.3-Análise fatorial da separação magnética de baixa-média intensidade

4.3.1- Resultados Gerais

Planos fatoriais de experimentos foram realizados a fim de avaliar a significância dos efeitos das principais variáveis na separação magnética no WDRE.

A granulometria da alimentação do equipamento foi com material abaixo de 1,18 mm, dentro do intervalo de aplicação (Tabela 2.1) e o material não sofreu qualquer remoção de finos ou deslamagem. Um resumo dos resultados da separação magnética de alta intensidade utilizando o separador magnético WDRE para as amostras estudadas é apresentado na Tabela 4.14, enquanto os resultados detalhados dos ensaios são apresentados em anexo. Para os minérios B e C são apresentados os valores de recuperação reconstituída a partir das análises granuloquímicas.

As Figuras 4.34 e 4.35 apresentam os resultados de recuperação e razão de enriquecimento para os três minérios estudados. Conforme esperado, o minério B, foi o que apresentou maiores recuperações, o que é coerente com a análise mineralógica quantitativa e o seu alto teor de magnetita. Já os minérios de A e C apresentaram recuperações mais baixas, o que também é coerente com a análise mineralógica, tendo em vista seus menores teores de magnetita. A Figura 4.35 dá uma ideia da seletividade obtida nos ensaios, o minério B apresentou baixa razão de enriquecimento em relação aos demais minérios, que apresentaram um índice de seletividade relativamente próximo. Os teores do concentrado e do rejeito podem ser observados no Anexo 5.

Tabela 4.14- Resultado da separação magnética utilizando o separador WDRE para os três minérios estudados

Testes	Minério A		Minério B		Minério C	
	Recuperação (%)	Razão de enriq.	Recuperação (%)	Razão de Enriq.	Recuperação (%)	Razão de Enriq.
1	0,96	1,22	53,60	1,13	6,46	1,42
2	1,17	1,31	56,77	1,22	10,58	1,38
3	1,26	1,38	51,09	1,19	11,69	1,42
4	1,22	1,30	60,77	1,20	7,84	1,46
5	1,76	1,33	59,10	1,19	11,77	1,48
6	0,58	1,34	57,29	1,12	8,72	1,48
7	1,08	1,32	53,30	1,19	9,31	1,28
8	1,63	1,33	63,28	1,08	8,20	1,30
9	1,33	1,29	55,33	1,12	7,30	1,35
10	1,73	1,32	58,36	1,12	6,60	1,42
11	1,09	1,38	54,73	1,13	10,02	1,37

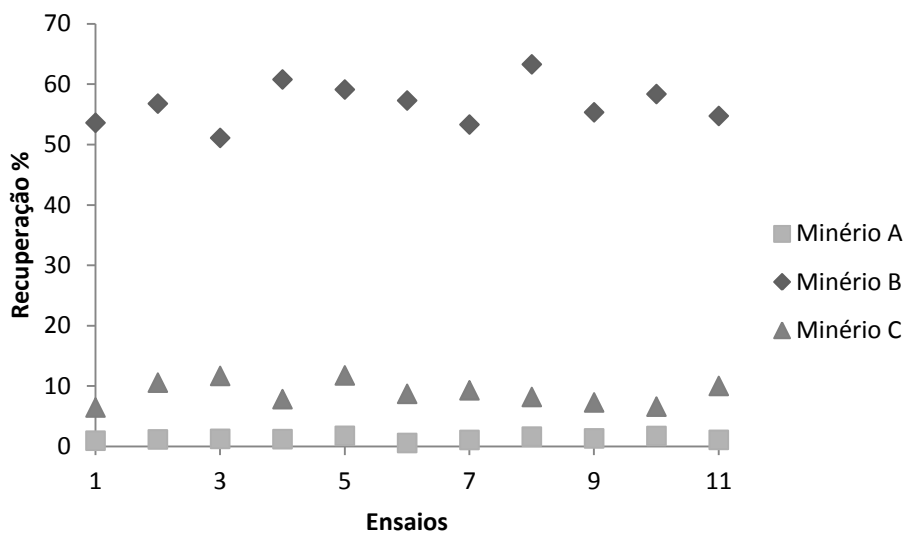


Figura 4.34- Recuperações obtidas para todos os ensaios de concentração de baixa/média intensidade

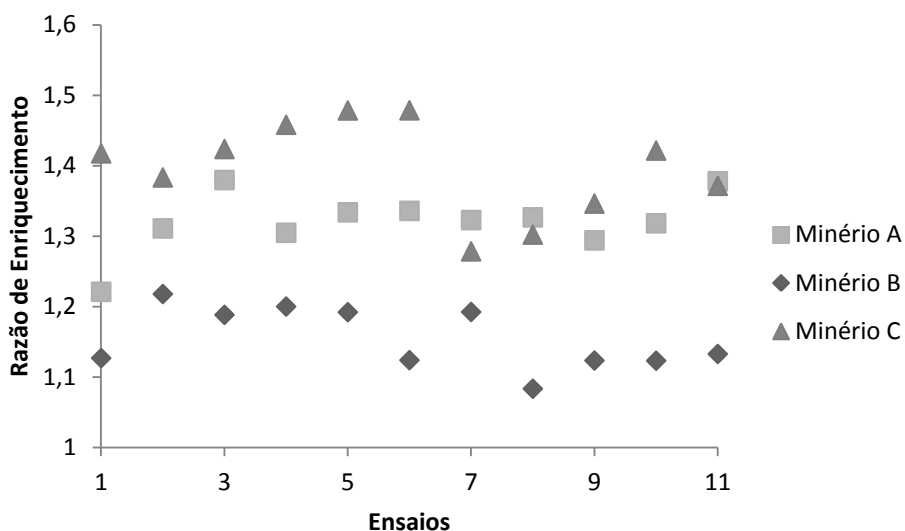


Figura 4.35- Razões de enriquecimento para todos os ensaios de concentração de baixa/média intensidade

4.3.2- Análise Estatística

Os dados do planejamento fatorial foram submetidos a uma análise de variância, sendo os resultados apresentados de forma resumida nas Tabelas 4.15 e 4.16 para os efeitos principais, bem como para o efeito de curvatura, na recuperação e na razão de enriquecimento, respectivamente. A significância ou não de cada um dos efeitos foi avaliada pelo valor de p, que é o menor valor de significância (α) para o qual pode-se considerar que aquele efeito é significativo. No presente trabalho optou-se pelo valor de α de 0,1, de maneira que afirmações são feitas com 90% de certeza sobre a significância dos efeitos.

Tanto no caso das recuperações quanto das razões de enriquecimento, observa-se que nenhum efeito se mostrou significativo para nenhuma das amostras analisadas. Na prática, isso significa que, dentro dos intervalos de valores estudados das variáveis e do erro experimental dos ensaios, não se pode afirmar que elas influenciam na recuperação ou na razão de enriquecimento de ferro.

Tabela 4.15- Resultado da análise estatística da recuperação no separador WDRE

Variáveis	Minério A		Minério B		Minério C	
	p	Efeito	p	Efeito	p	Efeito
A- Percentagem de sólido	0,462	-0,163	0,541	2,250	0,271	1,750
B- Rotação do Tambor	0,128	0,373	0,627	1,750	0,867	0,250
C- Taxa H. Alimentação	0,145	0,353	0,541	2,250	0,418	-1,250
D- Distância Tambor	0,255	-0,263	0,830	0,750	0,867	0,250
Curvatura	0,317	0,065	0,852	-2,551	0,120	5,315

Tabela 4.16- Resultado a análise estatística considerando o índice de seletividade no separador WDRE

Variáveis	Minério A		Minério B		Minério C	
	p	Efeito	p	Efeito	p	Efeito
A- Percentagem de sólido	0,500	0,023	0,356	0,028	0,525	-0,030
B- Rotação do Tambor	0,186	0,048	0,546	-0,018	0,199	-0,065
C- Taxa H. Alimentação	0,280	-0,038	0,930	-0,002	0,829	0,010
D- Distância Tambor	0,818	0,007	0,139	-0,048	0,462	0,035
Curvatura	0,475	0,001	0,089	0,002	0,122	0,005

4.4-Análise fatorial da separação magnética de alta intensidade

4.4.1- Resultados Gerais

Os resultados dos ensaios de separação magnética de alta intensidade utilizando o separador magnético Boxmag Rapid para as amostras estudadas são resumidos na Tabela 4.17. Esses ensaios foram realizados a partir do produto não magnético combinado dos ensaios de separação no WDRE. Para as amostras estudadas são apresentados na Tabela 4.17 os valores de recuperação e razão de enriquecimento para os 11 ensaios realizados, sendo os resultados de teores e rendimentos apresentados em anexo.

As Figuras 4.36 e 4.37 apresentam uma comparação dos dados de recuperação e razão de enriquecimento para os três minérios estudados.

Como esperado o minério C, foi o que apresentou melhores resultados em relação a recuperação, seguidos do minério B e A, o que é coerente com a análise mineralógica quantitativa, pois nesse estágio de concentração espera-se recuperar partículas com moderados a altos teores de hematita e goethita. A Figura 4.37 indica as seletividades obtidas nos ensaios, sendo que o minério C apresentou baixas razões de

enriquecimento em relação aos demais minérios. Os teores do concentrado e do rejeito podem ser observado no Anexo 6.

Tabela 4.17- Resultado da separação magnética utilizando o separador Rapid para os minérios estudados

Testes	Minério A		Minério B		Minério C	
	Recuperação (%)	Razão de Enriq.	Recuperação (%)	Razão de Enriq.	Recuperação (%)	Razão de Enriq.
1	54,02	1,35	86,38	1,62	88,89	1,36
2	30,11	1,26	46,22	1,77	57,42	1,32
3	59,70	1,31	66,56	1,57	85,26	1,27
4	42,55	1,41	66,51	2,03	61,08	1,36
5	52,69	1,44	80,91	1,62	86,93	1,33
6	73,49	1,40	80,99	1,59	86,96	1,30
7	56,22	1,35	74,18	1,61	81,05	1,33
8	27,48	1,25	43,55	1,64	55,51	1,30
9	50,58	1,31	74,72	1,59	81,25	1,32
10	60,05	1,26	73,12	1,68	85,25	1,32
11	37,04	1,25	72,71	1,37	63,12	1,29

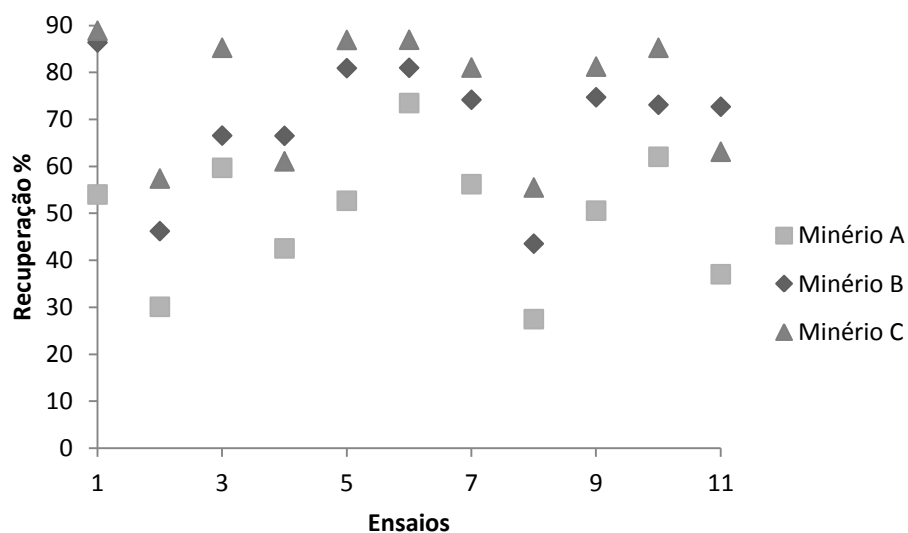


Figura 4.36-Recuperações obtidas para todos os ensaios de concentração alta intensidade

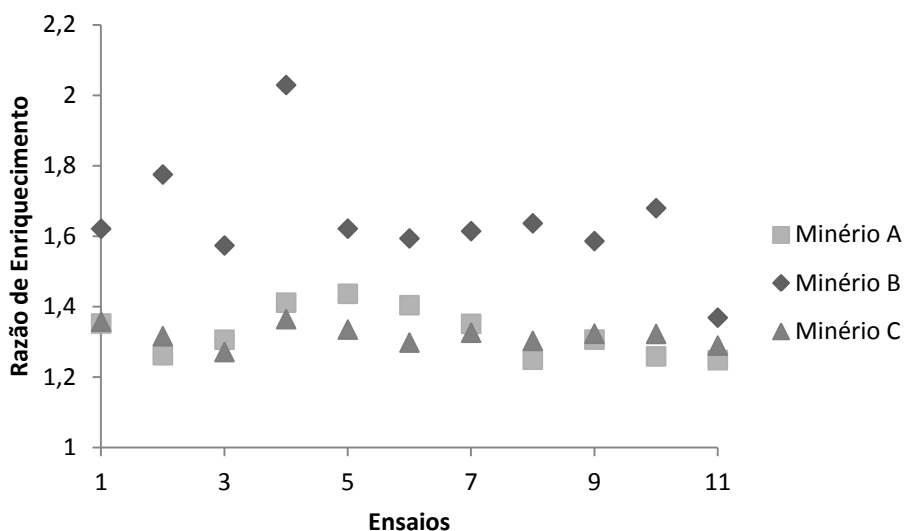


Figura 4.37- Razões de enriquecimento para todos os ensaios de concentração de alta intensidade

4.4.2- Análise Estatística

Os dados do planejamento fatorial foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA), a fim de avaliar a significância dos efeitos principais. Um resumo dos resultados é apresentado nas Tabelas 4.18 e 4.19.

Os valores destacados em negrito correspondem às variáveis cuja influência na variável resposta foi significativa. No caso da recuperação, considerando apenas os efeitos principais e a curvatura (Tabela 4.18) pode-se observar que o tempo de lavagem foi significativo, apresentando efeito positivo para os três minérios. Assim, o aumento do tempo de lavagem se mostrou benéfico para a recuperação do produto magnético. Outra variável que apresentou significância foi o campo magnético no caso do minério B, pois à medida que o campo magnético foi elevado a recuperação também aumentou. Para as demais amostras o efeito do campo magnético também foi positivo, porém não estatisticamente significativo.

Tabela 4.18- Resultado da análise estatística considerando a recuperação no separador Rapid

Variáveis	Minério A		Minério B		Minério C	
	p	Efeito	p	Efeito	p	Efeito
A- Percentagem de sólido	0,373	9,718	0,442	-8,606	0,625	-5,524
B- Campo Magnético	0,668	4,522	0,063	24,641	0,344	11,090
C- Gap	0,979	0,275	0,990	-0,137	0,977	0,326
D- Tempo de lavagem	0,006	45,496	0,009	42,454	0,006	48,036
E- Taxa H. Alimentação	0,913	1,139	0,742	-3,592	0,722	-3,992
Curvatura	0,244	-	0,404	-	0,229	-

Algumas variáveis também exerceram influência estatisticamente significativa na razão de enriquecimento. O gap e a taxa de alimentação tiveram um efeito negativo significativo na razão de enriquecimento para as amostras de B e C. Aumentando-se a taxa de alimentação e o gap da matriz do Rapid, observou-se uma piora na seletividade, ou seja, uma redução do teor do produto magnético. A percentagem de sólidos teve efeito significativo no caso do minério C, ou seja, a percentagens de sólidos mais elevadas aumenta a contaminação do produto magnético.

A validade dos testes estatísticos foi demonstrada a partir dos gráficos de normalidade dos resíduos e da comparação dos valores de resíduos versus os valores ajustados. Por fim, é importante que a insignificância de alguns dos efeitos e amostras está associada, em parte, aos erros experimentais encontrados em vários dos ensaios.

Tabela 4.19- Resultado a análise estatística considerando o índice de seletividade do separador Rapid

Variáveis	Minério A		Minério B		Minério C	
	p	Efeito	p	Efeito	p	Efeito
A- Percentagem de sólido	0,678	22,323	0,477	-0,126	0,064	-0,063
B- Campo Magnético	0,783	14,758	0,359	0,166	0,037	0,075
C- Gap	0,327	55,154	0,051	-0,420	0,052	-0,067
D- Tempo de lavagem	0,258	64,689	0,611	-0,089	0,405	0,024
E- Taxa H. Alimentação	0,327	55,050	0,098	-0,334	0,078	-0,059
Curvatura	0,001	-	0,148	-	0,991	-

4.4- Modelagem da Separação Magnética

Para a modelagem da separação magnética nos separadores WDRE e Rapid foram utilizados os dados obtidos a partir da separação no isodinâmico Frantz por faixa de tamanho como base para avaliar a separabilidade magnética das amostras. Assim, presumiu-se que o separador Franz representaria a separação ideal, sem qualquer material imprópriamente separado, enquanto o WDRE e o Rapid representaram os processos reais e, potencialmente, imperfeitos.

A título de ilustração a Tabela 4.20 apresenta os dados utilizados para o modelo na faixa de 1,18 x 0,600 mm. Os valores de susceptibilidade utilizados foram calculados segundo a equação 11. Admitiu-se um valor de susceptibilidade representativo do material contido em cada máxima foi calculado como a média para esses valores. A susceptibilidade máxima considerada foi de 1 kg/m^3 , que corresponderia à susceptibilidade da magnetita. A tabela para todos os detalhes de susceptibilidade incluindo a percentagem mássica e as faixas trabalhadas podem ser visualizadas no anexo 8.

Tabela 4.20- Valores de suscetibilidade magnética e percentagem mássica utilizados para simular os dois estágios de concentração (faixa de 1,18 x 0,600mm)

Corrente	Suscetibilidade Magnética		% Mássica		
	Eq. 11	Média	Minério A	Minério B	Minério C
0,1 A	0,0065	0,5033	2,18	16,19	0,25
0,3 A	0,00072	0,0036	10,49	6,16	8,40
0,5 A	0,00026	0,0005	2,61	0,74	3,97
0,7 A	0,00013	0,0002	0,38	0,15	0,16
1,0 A	0,000065	0,0001	0,37	0,03	0,01
Não mag.	0	0	0,15	0,47	0,30

Obs: Valores convertidos de CGS (cm³/g) em SI (m³/kg) segundo a equação: $4\pi \times 10^{-3}$ (Hopstock, 1985)

Uma modificação do modelo do King (item 2.7.2.1.3) foi utilizada para previsão dos resultados para os dois estágios de concentração magnética. O modelo se baseia na modelagem da curva de partição usando a equação de Rosin-Rammler, sendo a susceptibilidade magnética e o tamanho as variáveis que influenciam a proporção de partículas recuperadas no produto magnético. O modelo é dado pelas equações:

$$R_{ij} = \alpha_i + (1 - \alpha_i) \left[1 - \exp \left(-0,693 * \left(\frac{x_j}{a} \right)^b \right) \right] \quad (\text{Eq.50})$$

sendo,

$$\alpha_i = c \exp \left(\frac{-d * d_i}{0,001} \right) \quad (\text{Eq.51})$$

Sendo que a , b , c e d são parâmetros do modelo, que precisam ser ajustados a partir de dados experimentais e R_{ij} a recuperação mássica de material da classe de tamanhos i e da classe de composição j de susceptibilidade magnética.

O modelo foi ajustado com o mesmo conjunto de parâmetros para os três minérios (Tabela 4.21) e para os dois processos de separação, ou seja, o WDRE e o Rapid. A partir dos parâmetros ajustados, obtiveram-se as curvas de partição (Figura 4.38) para o separador de baixa e alta intensidade, que expressa quanto de massa reporta para o produto magnético em função da suscetibilidade magnética, ou seja, o material que apresentou alta suscetibilidade magnética está sendo praticamente todo recuperado no primeiro estágio de concentração magnética. Apenas um parâmetro a_i foi ajustado da simulação do estágio de baixa intensidade para o de alta intensidade. Observa-se na Figura 4.38 o pequeno efeito do tamanho de partícula na separação.

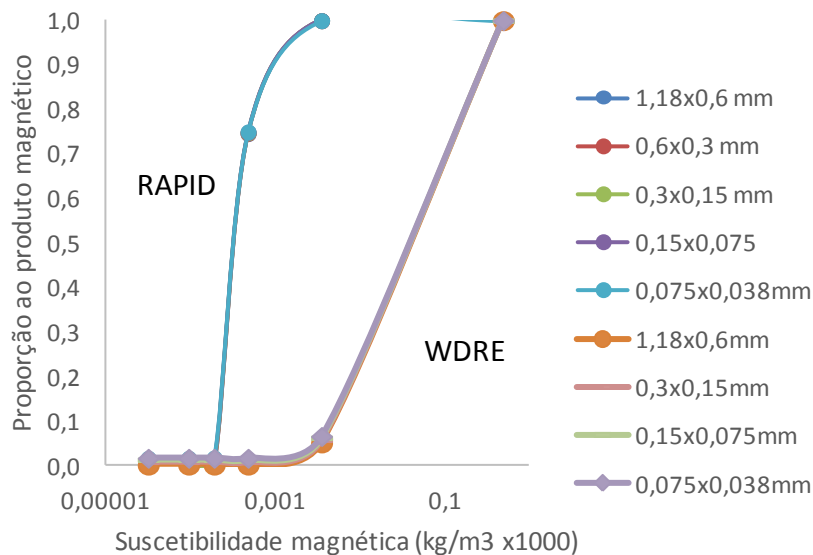


Figura 4.38- Curva de partição para os separadores WDRE e RAPID

Tabela 4.21- Parâmetros utilizados para modelar os separadores

Parâmetros:	α_1 (WDRE)	α_1 (Rapid)	b	c	d
	0,005	0,00045	8	0,02	4

As Figuras 4.39 a 4.41 apresentam os gráficos relativo aos dados medidos e simulados, onde as linhas representam os modelos e os pontos os dados experimentais. Como pode-se observar o modelo, em conjunto aos dados do separador isodinâmico Frantz, permitiram representar com bom sucesso ambos estágios de concentração para os três minérios analisados, sendo que para o minério A, não foi possível simular o estágio de alta intensidade pela pouca confiança nos dados do separador Franz para altas intensidades de corrente. A Figura 4.42 compara os valores de massas do concentrado medidas e ajustadas pelo modelo, mostrando que erros inferiores a 10% nos rendimentos (recuperações mássicas) foram observados.

A validade do modelo para os diferentes minérios mostra a sua relevância em oferecer uma descrição aproximada do desempenho da separação magnética de baixa-média e alta intensidade.

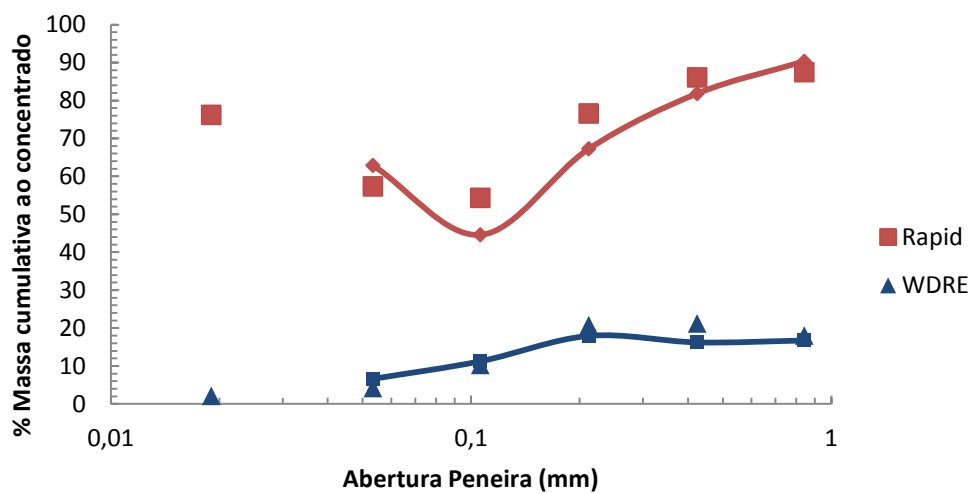


Figura 4.39- Curvas relativas aos dois estágios de concentração para o minério “C” as linhas representam os modelos e os pontos os dados experimentais

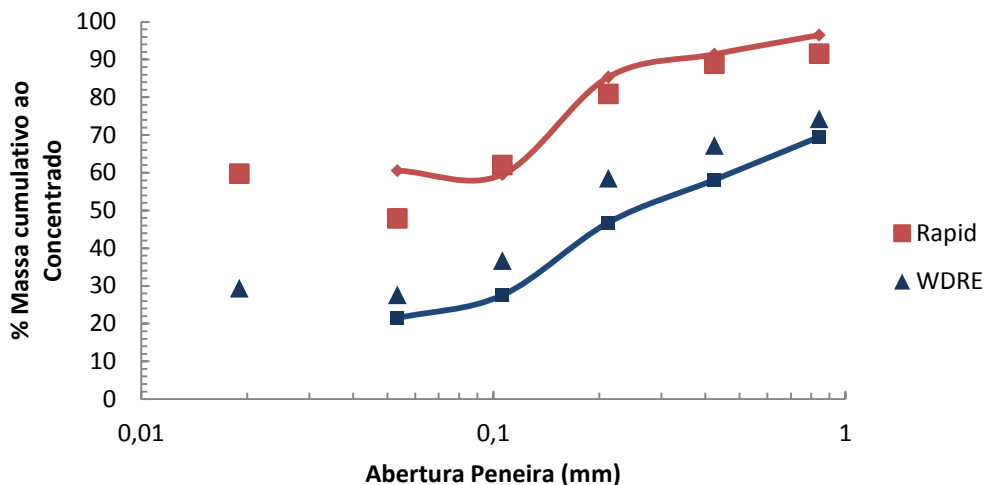


Figura 4.40- Curvas relativas aos dois estágios de concentração para o minério “B” as linhas representam os modelos e os pontos os dados experimentais

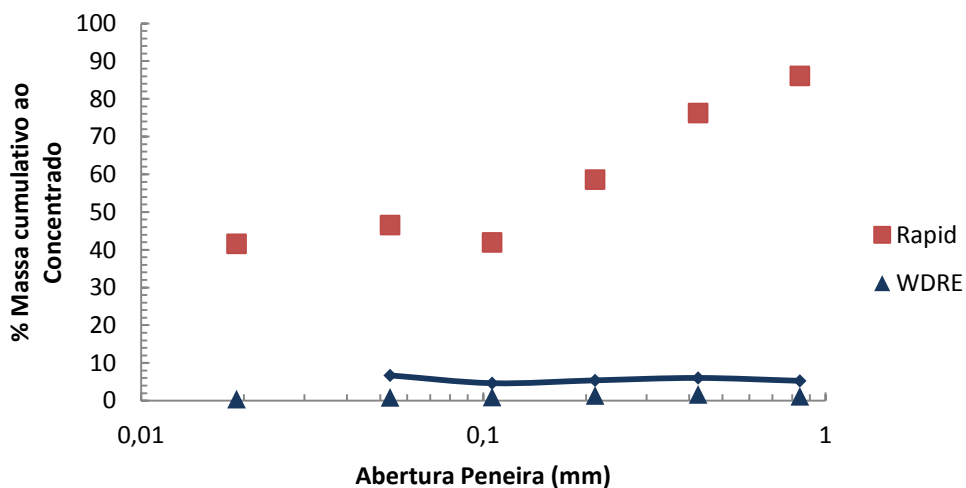


Figura 4.41- Curvas relativas aos dois estágios de concentração para o minério “A” as linhas representam os modelos e os pontos os dados experimentais

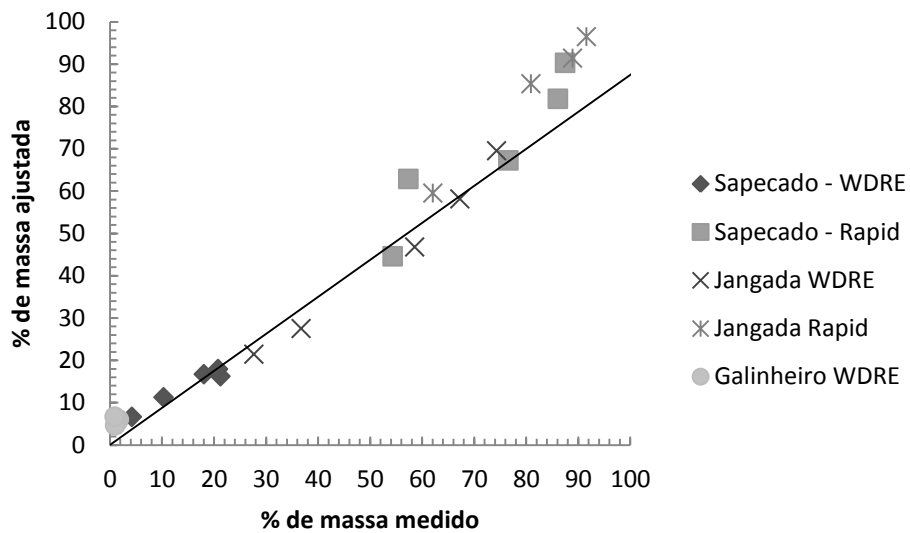


Figura 4.42- Comparação entre os valores de massa do concentrado medidos e ajustados pelo modelo para os três minérios estudados

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

As amostras de minério de ferro itabiríticos em estudo apresentaram uma mineralogia simples, composta basicamente de quartzo, hematita, goethita e magnetita, identificados por difração de raios X.

Os resultados da separação magnética utilizando o Separador Magnético Isodinâmico Frantz, juntamente com a distribuição dos principais teores, auxiliaram a visualizar a distribuição dos minerais em função dos intervalos de separação magnética associado às análises químicas, como também representou bem os estágios de concentração.

Planos fatoriais fracionários de experimentos foram realizados na separação das três amostras no separador magnético de baixa-média intensidade, não tendo sido concluído que qualquer das variáveis estudadas influenciou tanto a recuperação quanto a razão de enriquecimento de ferro no separador WDRE. Por outro lado, observou-se uma influência positiva tanto do tempo de lavagem quanto da intensidade do campo magnético na recuperação do produto magnético no separador Rapid, quanto negativa do gap da matriz magnética quanto da taxa de alimentação e da percentagem de sólidos da seletividade do processo.

Um modelo empírico, baseado no modelo de King e em análises de separabilidade magnética por tamanho de partícula obtidos no separador isodinâmico Frantz, foi aplicado com sucesso na previsão da separação magnética nos dois estágios de concentração para as três amostras, mostrando boa capacidade preditiva para ambos os estágios de separação.

CAPÍTULO 6

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar estudos mineralógicos e texturais dos minérios de ferro, visto que muitas das características das partículas do minério podem ser relacionadas com as características internas observadas, incluindo a medida da porosidade. Isso poderá ajudar na interpretação dos resultados;
- Análise quantitativa dos produtos da concentração magnética do separador Isodinâmico Frantz;
- Realização de ensaios em escala piloto no separador Jones para avaliação e comparação dos resultados com aqueles obtidos no separador Rapid.

CAPÍTULO 7

BIBLIOGRAFIA

ARAÚJO, A. C., SANTOS, L. D., GIRODO, A. C., PINTO, C. L. L., GALÉRY R., PAPINI R. M., VALADÃO G. E. S., CASTRO L. F. A., TAVARES R. P. Minérios de Ferro: Processos de Obtenção e sua Utilização na Siderurgia. Apostila curso ABM, 2008.

BOZZOLA, J.J. & RUSSELL, L.D. Electronmicroscopy. Boston: Jones and Bartlett Publishers, 1999. 670p.

CESAREO, R., BUSTAMANTE, A., CALZA, C. Energy- dispersive X- Ray fluorescence analysis v 39, 2010.

CHEN, C.W. Magnetism and metallurgy of soft magnetic materials. New York Dover Publications, 1986. 571 p.

CHEN, F. Magnetically enhanced centrifugation for continuous biopharmaceutical processing Massachusetts Institute of Technology (2009)

DAHLIN, D.C., RULE, A.R. Magnetic susceptibility of minerals in high magnetic fields. Pittsburgh: U. S. Bureau of Mines, 1993. 13 p. (Report of Investigations, n.9449).

DANA, J. D. (1984) Manual de Mineralogia, Livros, Técnicos e Científicos Editora S. A., 1ª Edição 9ª tiragem, Rio de Janeiro : Livros Técnicos e Científicos, 642 p.

DANA, J. D. & HURLBUT JR., C. S. Manual de Mineralogia. Ed. Livros Técnicos e Científicos Ed. S.A. Rio de Janeiro, 9ª Ed. 642 p.,1984.

DEDAVID, B.A., GOMES, C.I., MACHADO, G. Microscopia Eletrônica de Varredura: aplicação e preparação de amostra: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores (Recursos Eletrônicos). Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. 60p.

DOBBY, G. AND FINCH, J.A. (1977) An empirical model of capture in a high gradient magnetic separator and its use in performance prediction. Society of Mining engineers of AIME Annual Meeting Atlanta, Georgia, 1977.

DNPM. Sumário mineral. Departamento Nacional de Produção Mineral-2013. Acesso em: Junho de 2014.

FRANTZ, S.Q. COPANY INC. Laboratory Separators. Disponível em: <http://www.sgfrantz.com>. Acesso em: 20/12/2013.

FUERSTENAU, M.C., HAN, K.N. Principles of Mineral Processing. Society for Mining Metallurgy, and Exploration, Inc. 2003. 573p.

GAUDIN, A.M. Principles of Mineral Dressing, McGraw-Hill, 1939.

GOMES, C. F. ARGILAS- O que e para que servem. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1986.

GOMES, O.D.M. Microscopia co-localizada: novas possibilidades na caracterização de minérios. 2007. 103 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2007.

GOMES, O.D.F.M., IGLESIAS, J.C.A., PACIORNIK, S., VIEIRA, M.B., 2013. Classification of hematite types in iron ores through circularly polarized light microscopy and image analysis. Minerals Engineering 52, 191-197.

HAYASHI, S., MISHIMA F., AKIYAMA, Y., NISHIJIMA, S. Development of high gradient magnetic separation system for a highly viscous fluid IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 20 (3) (2010), pp. 945–948.

HAYES, P.C. Process selection in extractive metallurgy. Brisbane: Hayes Publishing Co., 1985. 406p.

HESS H. H. (1959) “Notes on operation of Frantz Isodynamic Magnetic Separator” Pamphlet published by S. G Frantz Co., Inc., 87p.

HOURNKUMNUARD AND CHANTRAPORNCHAI, 2011 Parallel simulation of concentration dynamics of nano-particles in high gradient magnetic separation Simulation Modelling Practice and Theory, 19 (2) (2011), pp. 847–871.

HOPSTOCK, D.M. (1975) Fundamental aspects of design and performance of low-intensity dry magnetic separators. Trans SME 258, pp. 221–227.

HOPSTOCK, D.M. Magnetic properties of minerals. In: WEISS, N.L. SME Mineral Processing Handbook. New York: Society of Mining Engineers, 1985. p. 6-10.

IBRAM. Informações e Análise da Economia Mineral Brasileira. 7^a Edição. Instituto Brasileiro de Mineração. Dezembro/2012. Acesso em: Junho de 2014.

JEKINS, R. JCPDS- International Centre For Diffraction Data- Sample Preparation Methods in X- Ray Power Diffraction Power Diffraction, 1986, vol.1 n°2, ps 163.

JOHANNES, L., KATHARINA, M., HERMANN, N. 2013. Simulation of magnetic suspensions for HGMS using CFD, FEM and DEM modeling. Institute of Mechanical Process Engineering and Mechanics, Karlsruhe Institute of Technology, Germany.

KLEIN, C. The 22nd edition of the manual of mineral science. 22nd ed. New York. John Wiley, 2002. 641 p.

KING, R.P. Modeling & Simulation of Mineral Processing Systems. 1st Edition. University of Utah, USA: Butterworth, 2001. 403p.

KING, R.P. A Modular Simulator for ore dressing plant flowsheets. Department of Metallurgical Engineering. University of Utah, may 2001.

KLUG, H.P. & ALEXANDER, L.E. X-ray diffraction procedures. For polycrystalline and amorphous materials. 2^a. edição. John Wiley & Sons, Inc. 966p. 1974.

LAWVER, J.E. AND HOPSTOCK, D.M. (1974) Wet magnetic separation of weakly magnetic materials. MineralsSci. Engng, Vol. 6, pp. 154–172.

LOYOLA, V. (2014). SAG application for itabirite ores in Vale, 1^o Seminário Vale de Moagem SAG, Belo Horizonte.

LUZ. A.B., SAMPAIO. J.L., FRANÇA. S.C.A. Tratamento de Minérios. 5^oed. Rio de Janeiro. CETEM/MCT, 2010. 960p.

LUZ. A.B., SAMPAIO. LINS. F.A.F. Tratamento de Minérios. 5^oed. Rio de Janeiro. CETEM/MCT, 2010. 960p.

MARQUES, M.L.S., 2013. Comunicação Pessoal.

MISHRA, B.K, MOHANTY, S.B.DAS. A preliminary investigation into magnetic separation process using CFD. Minerals Engineering, 2011.

NAPIER-MUNN, T.J., RAYNER.J.G. The mechanism of magnetic capture in the wet drum magnetic separation. Minerals Engineering, Vol.13 N°3, pp 277-285, 1999.

NAPIER-MUNN, T.J., RAYNER.J.G. A mathematical model of recovery of dense medium magnetic in the wet drum magnetic separation. International Journal of Mineral Processing, 2002.

NEUMANN, R., STANLEY, C.J. Specular reflectance data for quartz and some epoxy resins: implications for digital image analysis based on reflected light optical microscopy. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED MINERALOGY,9., 2008, Brisbane. Proceeding Carlton: AuslMM, 2008.p.703-5.

NEUMANN, R., SCHENEIDER, C.L., NETO, A.A. Caracterização Mineralógica de Minérios Parte II. p.92-93. Tratamento de Minérios, 5 ed. Rio de Janeiro 2010.

NEUMANN, R., 2014. Comunicação Pessoal.

OLIVEIRA, P.S, Rotas para Recuperação de Ferro fino Contido no Underflow do Espessador de Lama da Usina de Conceição. (Dissertação de Mestrado). Belo Horizonte, UFMG, 2006. 128p

PARFENOFF, A., POMEROL, C., TOURENQ, J. Lesminéraux em grains: méthodes d'étudeet détermination. Paris: Masson, 1970. 578 p.

QUEIROZ, L.A. Caracterização de Minérios da Mina de Brucutu, VALE, Focada na Previsibilidade das Operações de Concentração Mineral.(Tese de Doutorado), Belo Horizonte, UFMG,2008. 367p.

RAPISCANSYSTEMS,2013.http://www.rapiscansystems.com/en/products/industria_l_mining/productssatmagan-135 acesso em 01/03/13.

RATTI, G., Técnicas de Análise Química de Compostos Inorgânicos – Notas de aula, 28p. 2001. http://www.angelfire.com/crazy3/qfl2308/1_multipart_xF8FF_8_Analise_Quimica_PMI-2201.pdf acesso em 16/03/13.

ROSIÈRE, C. A. & CHEMALE Jr., F. Textural and structural aspects of iron ores from Iron Quadrangle, Brazil. Source, Transport and Deposition of Metals. Pagel & Leroy (Eds), Balkema, Rotterdam, p. 485 – 488, 1991.

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JR., F. & GUIMARÃES, M. L. V. Um modelo para a evolução microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte I: Estruturas e Recristalização. Geonomos, v.1, n. 1, p. 65 –84, 1993a.

SAMPAIO. J.L., LUZ. A.B., FRANÇA. S.C.A. Separação Magnética e Eletrostática. Tratamento de Minérios. 5ªed. Rio de Janeiro. CETEM/MCT, 2010. 960p.

SAMPAIO, C.H., TAVARES, L.M.M. Beneficiamento Gravimétrico: Uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade. Porto Alegre. 1ªed, UFRGS, 2005. 603p.

SEPOR, 2013 http://www.sepor.com/new/Davis_1.pdf acesso em 23/02/13.

SODRÉ, U. Modelos Matemáticos. Londrina- PR, 2007. Disponível em <http://www.mat.uel.br/matessencial/superior/pdfs/modelos.pdf> acesso em 16/03/13.

SCHENEIDER, C.L., CALIXTO, M. Desenvolvimento de um modelo para separadores magnéticos tipo Jones. Seminário de Minério de Ferro /7º Simpósio de Minério de Ferro. Ouro Preto- Anais v.2:619-633/2006.

STEINBERG, M., GERARDS, M., GOSWAMI. Recent process design solutions for the use of JONES® WHIMS in the field of different iron ore applications. XXVI, IMPC, 2012, New Delhi, India. Paper nº997.

SVOBODA, J. (1987) Magnetic Methods for the Treatment of Minerals. Elsevier, Amsterdam.

TAVARES, L. M. M., 2014. Comunicação Pessoal

TAVARES, L. M. M., 2009. Processamento de Recursos Minerais I (Apostila)

TAVARES, L.M, KING, R.P. A useful model for the calculation of the performance of batch and continuous jigs. Coal preparation, 1995 vol15 pag.99-128.

TUCKER, P. Modelling Wet High Intensity Magnetic Separation: A Case Study. Minerals Engineering, Vol.7, N°10,pp 1281-1300, 1994. Elsevier Science Ltd.

YEPES, A. F. 2013. Comunicação Pessoal

ANEXO 1

Determinar o teor de PPC

Procedimento:

1 - Pesar um cadinho de porcelana previamente seco. Adicionar aproximadamente 1,0 g da amostra.



Pesagem da amostra na balança analítica.

2 - Levar ao forno a $1000 \pm 50^{\circ}\text{C}$ a uma taxa de aquecimento $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ com tempo de residência de 20 min.



Colocação da amostra na mufla para efetuar a perda por calcinação.

3 - Esfriar em dessecador até a temperatura ambiente e pesar.



Esfriamento da amostra até a temperatura ambiente

Cálculo:

$$PF(\%) = \frac{(PCA-PCC)*100}{(PCA-PCV)} \text{ (Eq. 61)}$$

Sendo:

PCV= massa do cadinho vazio, em gramas;

PCA= massa do cadinho mais a massa da amostra, em gramas;

PCC= massa do cadinho mais a amostra após calcinação, em gramas.

Amostra: Minério A Cabeça

Minério A	1,18 x 0,600 mm	0,600 x 0,300 mm	0,300 x 0,150 mm	0,150 x 0,075 mm	0,075 x 0,038 mm	< 0,038 mm
M _{cadinho}	9,63	10,35	9,07	10,27	10,43	9,04
M _{material}	1,02	1,62	1,39	1,35	1,07	1,52
M _{cadinho} + M _{material}	10,65	11,96	10,46	11,62	11,50	10,56
M _{cadinho} + M _{calcinação}	10,61	11,91	10,44	11,60	11,48	10,54
Perda ao fogo	3,72	3,27	1,99	1,11	1,23	1,40

Amostra: Minério B Cabeça

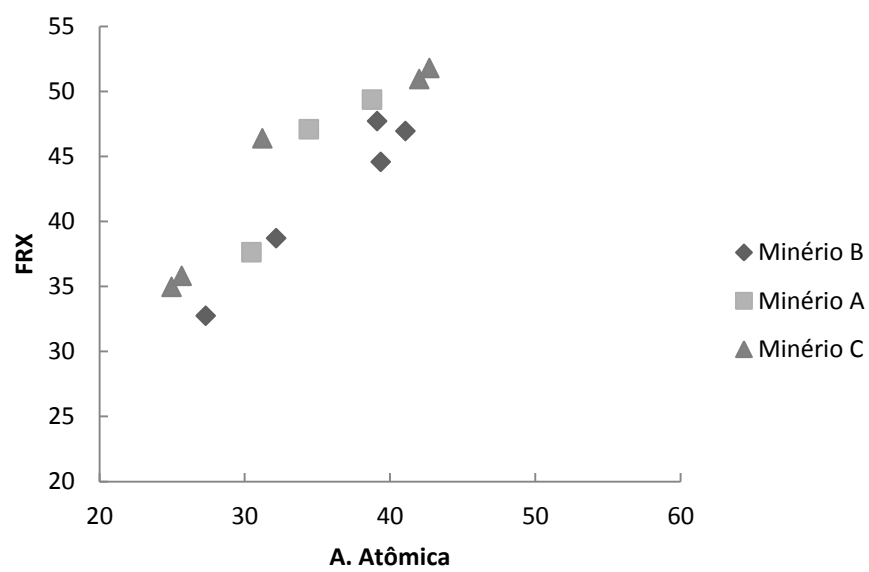
Minério B	1,18 x 0,600 mm	0,600 x 0,300 mm	0,300 x 0,150 mm	0,150 x 0,075 mm	0,075 x 0,038 mm	< 0,038 mm
M _{cadinho}	10,77	9,95	9,98	9,25	9,76	9,34
M _{material}	1,41	1,39	1,25	1,49	1,20	1,25
M _{cadinho} + M _{material}	12,17	11,35	11,23	10,75	10,96	10,59
M _{cadinho} + M _{calcinação}	12,17	11,34	11,22	10,74	10,95	10,57
Perda ao fogo	0,46	0,67	0,95	0,65	0,64	1,26

Amostra: Minério C Cabeça

Minério C	1,18 x 0,600 mm	0,600 x 0,300 mm	0,300 x 0,150 mm	0,150 x 0,075 mm	0,075 x 0,038 mm	< 0,038 mm
M _{cadinho}	12,91	10,75	10,70	11,55	10,69	11,94
M _{material}	1,61	1,44	1,22	1,13	1,05	1,48
M _{cadinho} + M _{material}	14,52	12,19	11,92	12,68	11,74	13,42
M _{cadinho} + M _{calcinação}	14,50	12,17	11,91	12,67	11,73	13,41
Perda ao fogo	1,31	1,64	1,38	0,89	0,51	0,57

ANEXO 2

Correção dos resultados de análises químicas



ANEXO 3

Quantificação em termos do elemento ferro para cada fração analisada pelo método de Rietveld.

Quantificação em termos do elemento Fe para Minério A

Tamanho (mm)	% Mássica	% Fe	%SiO ₂	Massa % Fe
1,18 x 0,600	33,92	61,48	6,8	20,9
0,600 x 0,300	11,12	60,64	8,1	6,7
0,300 x 0,150	11,14	49,20	26,3	5,5
0,150 x 0,075	10,22	36,44	45,9	3,7
0,075 x 0,038	20,30	45,65	32,6	9,3
< 0,038	13,30	49,94	23,5	6,6

Quantificação em termos do elemento Fe para Minério B

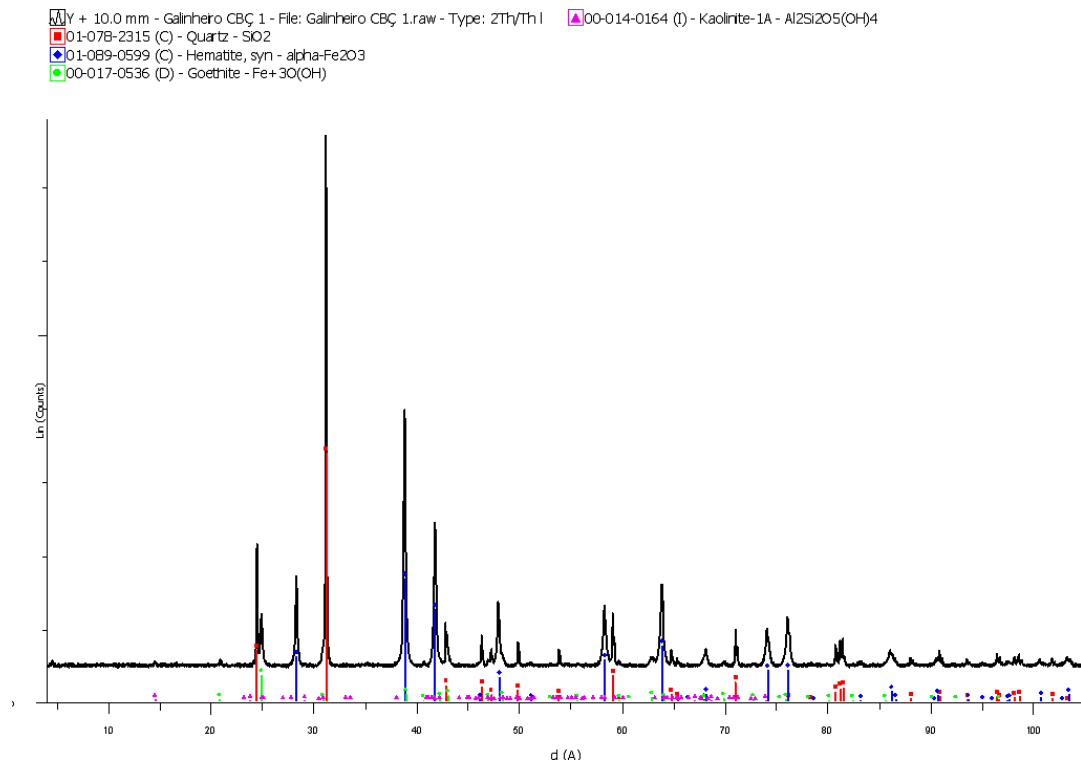
Tamanho (mm)	% Mássica	% Fe	%SiO ₂	Massa % Fe
1,18 x 0,600	14,09	51,60	25,1	17,5
0,600 x 0,300	5,68	52,15	24,0	5,8
0,300 x 0,150	7,95	51,85	24,6	5,8
0,150 x 0,075	4,51	41,87	39,1	4,3
0,075 x 0,038	29,91	35,26	49,2	7,2
< 0,038	37,86	44,09	30,2	5,9

Quantificação em termos do elemento Fe para Minério C

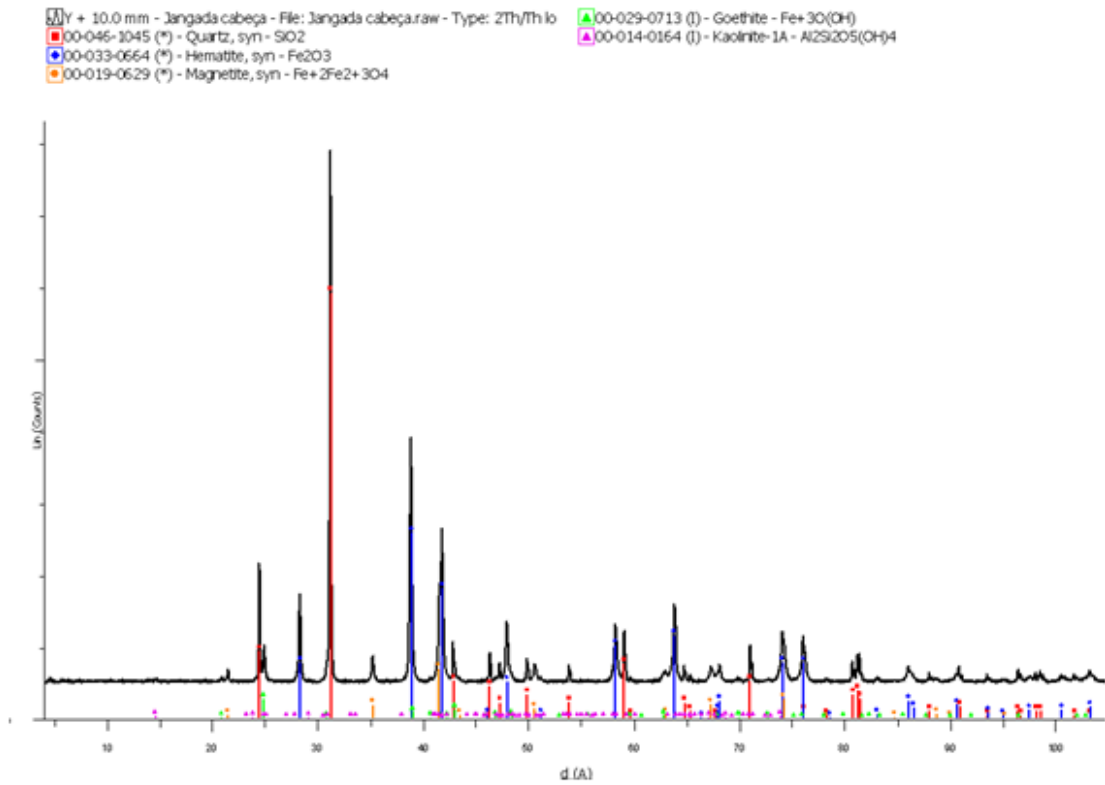
Tamanho (mm)	% Mássica	% Fe	%SiO ₂	Massa % Fe
1,18 x 0,600	14,09	57,10	15,3	8,0
0,600 x 0,300	5,68	56,64	15,8	3,2
0,300 x 0,150	7,95	46,38	31,4	3,7
0,150 x 0,075	4,51	33,68	50,2	1,5
0,075 x 0,038	29,91	35,81	47,9	10,7
< 0,038	37,86	45,69	31,6	17,3

ANEXO 4

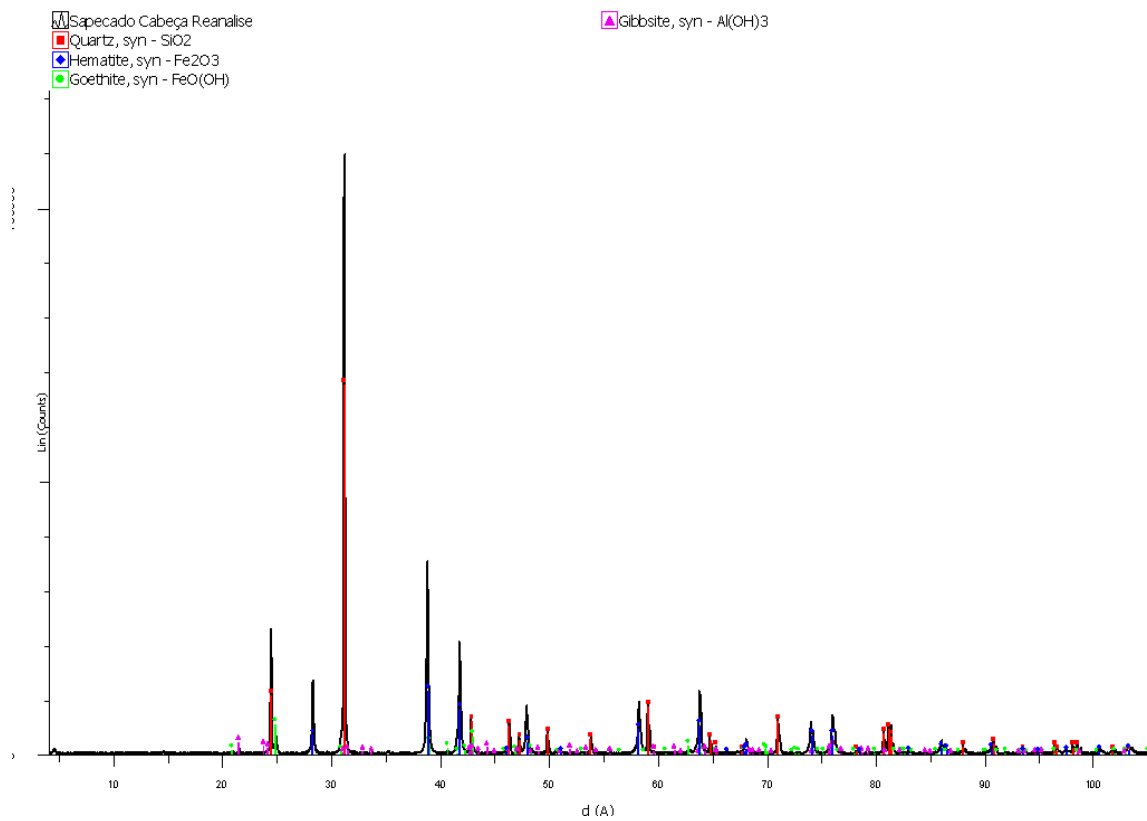
Interpretação qualitativa do espectro das amostras de cabeça efetuada por comparação com padrões contidos no banco de dados PDF04+ (ICDD, 2011) em software Bruker Diffrac EVA



Espectro da difração de raios-x referente à amostra de cabeça para o minério A



Espectro da difração de raios-x referente à amostra de cabeça para o minério B



Espectro da difração de raios-x referente à amostra de cabeça para o minério C

ANEXO 5

Resultado da separação magnética utilizando o separador WDRE

Amostra: Minério A	Matiz do Planejamento Experimental				Concentrado		Rejeito		Rendimento
Teste	% Sólido	Rotação do Tambor	Taxa de Alim. (g/min)	Distância do Tambor a bacia (mm)	%Fe	%SiO ₂	%Fe	%SiO ₂	(%)
1	30	25	1680	15	55	17	45	31	0,79
2	35	25	1680	10	59	12	45	29	0,89
3	32,5	30	1180	12,5	59	11	43	3127	0,92
4	32,5	30	1180	12,5	61	9	46	28	0,93
5	32,5	30	1180	12,5	60	10	45	31	1,32
6	35	25	600	15	59	11	44	28	0,43
7	35	35	600	10	61	9	46	29	0,82
8	35	35	1680	15	61	11	46	29	1,23
9	30	25	600	10	58	12	45	30	1,03
10	30	35	1680	10	58	12	44	30	1,32
11	30	35	600	15	61	9	44	30	0,79

Amostra: Minério B	Matiz do Planejamento Experimental				Concentrado		Rejeito		Rendimento
Teste	% Sólido	Rotação do Tambor	Taxa de Alim. (g/min)	Distância do Tambor a bacia (mm)	%Fe	%SiO ₂	%Fe	%SiO ₂	(%)
1	30	25	1680	15	50	26	38	40	48,00
2	35	25	1680	10	49	28	31	41	47,28
3	32,5	30	1180	12,5	49	28	34	46	43,56
4	32,5	30	1180	12,5	45	33	33	46	49,04
5	32,5	30	1180	12,5	48	28	32	48	50,18
6	35	25	600	15	46	31	35	44	51,19
7	35	35	600	10	48	29	31	49	460,7
8	35	35	1680	15	47	31	37	41	58,94
9	30	25	600	10	49	27	36	42	50,57
10	30	35	1680	10	46	31	34	45	52,72
11	30	35	600	15	47	27	34	44	49,49

Amostra: Minério C	Matiz do Planejamento Experimental				Concentrado		Rejeito		Rendimento
Teste	% Sólido	Rotação do Tambor	Taxa de Alim. (g/min)	Distância do Tambor a bacia (mm)	%Fe	%SiO ₂	%Fe	%SiO ₂	(%)
1	30	25	1680	15	62	8	43	33	4,33
2	35	25	1680	10	62	7	43	34	6,55
3	32,5	30	1180	12,5	62	7	42	35	7,45
4	32,5	30	1180	12,5	62	6	41	37	5,00
5	32,5	30	1180	12,5	64	5	41	37	7,72
6	35	25	600	15	62	5	41	38	5,46
7	35	35	600	10	63	6	48	27	5,94
8	35	35	1680	15	63	6	48	28	5,03
9	30	25	600	10	63	5	46	30	4,59
10	30	35	1680	10	64	5	44	33	4,30
11	30	35	600	15	63	7	45	32	6,59

ANEXO 6

Resultado da separação magnética utilizando o separador RAPID

Amostra: Minério A	Matiz do Planejamento Experimental					Concentrado		Rejeito		Rendimento
Teste	% Sólido	Corrente (A)	Taxa de Alim. (g/min)	Abertura da Matriz	Tempo Lavagem (s)	%Fe	%SiO ₂	%Fe	%SiO ₂	(%)
1	35,0	20	1720	2/4	15	57	13	32	45	40,0
2	35,0	10	680	1/2	10	52	20	38	39	23,9
3	32,5	15	1000	1.5/3	12,5	54	16	31	47	45,7
4	30	20	680	1/2	15	54	17	32	48	30,2
5	35	10	680	2/4	15	60	9	31	47	36,7
6	30	20	680	2/4	10	57	13	23	61	52,3
7	32,5	15	1000	1.5/3	12,5	56	14	31	47	52,3
8	30	10	1720	1/2	15	54	16	40	37	41,6
9	30	10	1720	2/4	10	57	13	35	42	22,0
10	32,5	15	1000	1.5/3	12	54	17	32	47	49,3
11	35	20	1720	1/2	10	56	15	40	37	29,7

Amostra: Minério B	Matiz do Planejamento Experimental					Concentrado		Rejeito		Rendimento
Teste	% Sólido	Corrente (A)	Taxa de Alim. (g/min)	Abertura da Matriz	Tempo Lavagem (s)	%Fe	%SiO ₂	%Fe	%SiO ₂	(%)
1	35,0	20	1720	2/4	15	49	26	9	81	53,3
2	35,0	10	680	1/2	10	48	28	20	66	26,0
3	32,5	15	1000	1.5/3	12,5	49	24	18	68	42,3
4	30	20	680	1/2	15	48	26	12	77	32,8
5	35	10	680	2/4	15	49	26	12	77	49,9
6	30	20	680	2/4	10	48	25	12	77	50,8
7	32,5	15	1000	1.5/3	12,5	49	26	14	73	46,0
8	30	10	1720	1/2	15	48	27	22	62	26,6
9	30	10	1720	2/4	10	47	28	14	73	47,1
10	32,5	15	1000	1.5/3	12	49	25	14	74	43,5
11	35	20	1720	1/2	10	44	33	19	68	53,1

Amostra: Minério C	Matiz do Planejamento Experimental					Concentrado		Rejeito		Rendimento
Teste	% Sólido	Corrente (A)	Taxa de Alim. (g/min)	Abertura da Matriz	Tempo Lavagem (s)	%Fe	%SiO ₂	%Fe	%SiO ₂	(%)
1	35,0	20	1720	2/4	15	58	14	14	75	65,5
2	35,0	10	680	1/2	10	55	17	32	49	43,6
3	32,5	15	1000	1.5/3	12,5	55	17	19	67	67,1
4	30	20	680	1/2	15	56	16	29	53	44,8
5	35	10	680	2/4	15	57	15	16	70	65,1
6	30	20	680	2/4	10	58	14	18	69	67,0
7	32,5	15	1000	1.5/3	12,5	55	17	20	65	61,1
8	30	10	1720	1/2	15	55	18	33	48	42,6
9	30	10	1720	2/4	10	59	11	22	64	61,4
10	32,5	15	1000	1.5/3	12	57	14	18	68	64,5
11	35	20	1720	1/2	10	56	16	32	50	49,0

ANEXO 7

Resultados das análises químicas por Fluorescência de raios X para os dois ensaios de concentração.

Minério A: Concentrado WDRE

Óxidos	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10	Teste 11
Fe ₂ O ₃	78,0	83,7	84,8	86,6	86,3	84,3	87,2	87,4	82,8	83,4	87,2
SiO ₂	17,0	12,0	11,2	9,2	9,7	11,4	9,1	10,5	12,2	12,5	9,1
Al ₂ O ₃	2,7	1,7	1,9	1,7	1,7	1,9	1,5	-	2,6	1,8	1,6
SO ₃	0,8	1,1	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0	0,9	0,6	0,6	0,8
MnO	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1
Ca ₂ O	-	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZnO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	-
CaO	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	-	-
PF	1,4	1,4	1,2	1,6	1,2	1,2	1,2	1,1	1,5	1,5	1,2
SOMA	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Minério A: Rejeito WDRE

Óxidos	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10	Teste 11
Fe ₂ O ₃	63,8	63,6	61,2	66,2	64,4	63,0	65,7	65,6	63,8	63,0	63,1
SiO ₂	30,6	28,7	30,9	26,7	28,5	31,0	28,2	28,9	30,4	29,5	29,9
Al ₂ O ₃	2,7	4,8	4,5	4,3	4,7	2,8	2,8	2,6	2,6	4,4	4,0
SO ₃	0,8	0,9	1,3	0,9	1,2	0,9	1,1	0,9	0,9	0,9	0,9
MnO	0,1	0,1	-	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-	-
PF	2,0	2,0	2,1	2,0	1,2	2,1	2,1	2,0	2,2	2,0	2,1
SOMA	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Minério A: Concentrado Rapid

Óxidos	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10	Teste 11
Fe ₂ O ₃	81,6	74,5	77,7	77,5	85,6	81,9	80,1	77,6	81,5	76,7	79,9
SiO ₂	12,6	20,2	15,8	16,7	9,2	12,7	13,9	16,3	12,8	16,8	14,9
Al ₂ O ₃	3,0	2,8	3,5	3,3	2,4	2,4	3,1	3,6	3,0	3,7	2,6
SO ₃	0,9	0,7	0,9	0,8	0,8	1,0	0,8	0,5	0,8	0,7	0,8
MnO	0,1	-	0,1	-	0,1	0,1	-	0,1	-	0,1	0,1
CaO	-	-	-	-	-	0,1	-	0,1	-	-	-
Ca ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	-	0,1
PF	1,8	1,9	2,0	1,8	1,8	1,8	2,0	1,8	1,8	2,0	1,6
SOMA	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Minério A: Rejeito Rapid

Óxidos	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10	Teste 11
Fe ₂ O ₃	46,2	54,2	47,0	47,7	47,4	60,6	46,8	57,8	50,3	47,2	57,3
SiO ₂	45,3	38,9	44,2	45,2	44,5	32,4	44,5	37,0	41,5	45,6	37,3
Al ₂ O ₃	5,5	3,8	6,0	4,9	5,3	5,5	5,8	2,6	5,3	4,8	2,6
SO ₃	1,4	1,2	1,2	0,7	1,3	1,2	1,4	0,9	1,2	0,9	1,3
MnO	0,1	-	0,1	-	-	-	-	-	0,1	-	-
CaO	-	-	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
Tm ₂ O ₃	-	-	-	-	-	0,1	0,1	0,1	-	0,1	-
PF	1,5	1,8	1,5	1,5	1,5	0,1	1,4	1,7	1,5	1,3	1,4
SOMA	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Minério C: Concentrado WDRE

Óxidos	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10	Teste 11
Fe ₂ O ₃	88,5	88,2	89,2	88,5	91,0	89,1	89,9	90,4	90,3	91,4	90,0
SiO ₂	8,2	7,4	6,8	6,3	5,4	5,4	5,9	6,0	5,0	4,9	6,6
Al ₂ O ₃	1,6	2,0	2,0	2,0	1,7	1,8	1,6	1,8	1,8	2,0	1,6
SO ₃	0,8	1,0	1,1	1,0	0,8	1,0	0,9	0,8	1,1	1,0	0,8
MnO	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2
PF	0,7	1,1	0,8	2,0	0,9	2,4	1,7	0,8	1,6	0,6	0,8
SOMA	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Minério C: Rejeito WDRE

Óxidos	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10	Teste 11
Fe ₂ O ₃	61,2	62,1	60,5	59,3	59,1	58,6	69,1	68,3	66,0	63,1	63,9
SiO ₂	33,3	34,3	34,9	37,0	37,2	37,6	26,6	28,1	29,9	33,3	32,4
Al ₂ O ₃	3,2	1,5	1,8	1,6	1,7	1,4	1,8	1,7	1,6	1,5	1,5
SO ₃	1,2	1,0	1,5	0,9	1,0	1,3	0,7	0,9	1,2	1,0	1,0
MnO	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Tm ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,2
PF	1,0	1,1	1,2	1,1	1,0	1,0	1,7	0,9	1,1	1,0	1,1
SOMA	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Minério C: Concentrado Rapid

Óxidos	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10	Teste 11
Fe ₂ O ₃	82,2	79,1	78,7	80,5	81,4	82,4	79,3	78,5	84,0	81,6	80,4
SiO ₂	14,1	16,5	16,9	16,0	15,1	13,9	16,6	17,7	11,4	14,4	15,7
Al ₂ O ₃	1,7	2,0	2,0	1,7	1,8	2,0	1,9	1,8	2,2	1,9	2,0
SO ₃	0,8	0,6	1,1	1,0	0,7	0,7	1,2	1,0	1,4	0,9	0,7
MnO	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
PF	1,0	1,6	1,1	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,1	1,1
SOMA	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Minério C: Rejeito Rapid

Óxidos	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10	Teste 11
SiO ₂	74,8	48,9	66,7	52,7	70,3	69,1	65,0	48,1	63,6	68,4	49,8
Fe ₂ O ₃	19,5	45,4	27,7	41,6	22,8	25,1	29,1	46,7	30,8	25,6	45,1
Al ₂ O ₃	3,7	3,3	3,1	3,5	4,3	4,0	3,5	3,3	3,7	3,4	3,3
SO ₃	1,3	1,3	1,6	1,4	1,8	1,3	1,7	1,0	1,2	1,7	1,0
MnO	-	0,1	-	0,1	-	-	-	0,1	-	-	0,1
Tm ₂ O ₃	-	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1
Cs ₂ O	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	-
CaO	-	-	0,1	-	0,1	-	-	-	-	0,1	-
PF	0,6	0,9	0,6	0,8	0,5	0,4	0,7	0,8	0,7	0,7	0,6
SOMA	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Minério B: Concentrado WDRE

Óxidos	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10	Teste 11
Fe ₂ O ₃	71,0	69,7	69,5	64,6	69,3	66,1	68,1	67,3	70,1	65,9	67,3
SiO ₂	25,6	28,2	27,7	32,6	28,1	30,8	29,0	30,7	27,5	30,7	27,1
Al ₂ O ₃	1,7	1,1	1,3	1,7	1,4	1,6	1,1	1,0	1,4	1,4	2,5
SO ₃	0,9	0,8	0,6	0,8	1,0	0,9	0,8	0,9	0,9	1,1	0,9
P ₂ O ₅	0,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MnO	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
PF	0,3	0,1	0,8	0,2	0,1	0,5	0,9	0,0	0,1	0,8	2,1
SOMA	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Minério B: Rejeiro WDRE

Óxidos	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10	Teste 11
Fe ₂ O ₃	54,5	49,0	48,6	46,9	48,3	50,6	49,2	53,3	51,2	48,8	48,8
SiO ₂	40,0	44,5	45,6	46,2	45,5	43,6	44,5	41,0	42,0	44,8	43,8
Al ₂ O ₃	2,3	3,2	2,6	3,3	2,7	2,2	2,9	2,3	3,5	3,1	3,6
SO ₃	1,2	1,3	1,0	1,4	1,4	1,4	1,3	1,0	1,2	1,0	1,3
MnO	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2
Tm ₂ O ₃	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CaO	-	0,1	0,1	0,1	0,1	-	-	0,1	-	-	0,1
PF	1,6	1,7	1,8	1,9	1,8	1,9	2,0	2,2	1,9	2,2	2,1
SOMA	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Minério B: Concentrado Rapid

Óxidos	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10	Teste 11
Fe ₂ O ₃	70,1	68,1	69,8	68,3	70,6	68,6	69,4	68,0	67,8	70,2	62,8
SiO ₂	26,1	27,7	24,1	26,5	25,8	25,2	25,5	27,4	27,5	24,7	32,6
Al ₂ O ₃	2,4	1,3	3,1	1,9	2,3	2,3	1,6	1,6	1,3	1,4	1,4
SO ₃	0,9	0,7	0,6	1,1	1,0	1,1	0,9	0,9	0,8	1,0	0,9
MnO	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2
CaO	-	-	-	-	-	0,1	-	-	0,1	-	-
PF	0,2	1,9	2,1	2,1	2,1	2,4	2,3	1,8	2,3	2,3	2,1
SOMA	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Minério B: Rejeito Rapid

Óxido s	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10	Teste 11
Fe ₂ O ₃	81,5	65,8	68,4	77,2	76,6	77,0	73,1	62,2	72,6	73,7	67,6
SiO ₂	12,6	27,9	25,7	16,8	16,6	16,6	20,6	32,0	20,4	19,9	26,7
Al ₂ O ₃	3,6	3,3	2,9	3,3	3,8	3,3	3,4	3,1	3,9	3,8	2,9
SO ₃	1,4	1,6	1,6	1,6	1,6	1,7	1,6	0,9	1,8	1,3	1,4
MnO	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
Cs ₂ O	-	-	0,0	0,1	0,1	0,1	-	0,1	-	-	-
CaO	-	-	-	-	0,2	0,2	-	-	-	-	-
PF	0,7	1,4	1,3	0,9	1,0	0,9	1,2	1,6	1,1	1,3	1,3
SOMA	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

ANEXO 8

Dados utilizados para modelar os dois estágios de concentração magnética

							Minério C	Minério B	Minério A			
Tamanhos		Tamanho Medio (mm)	Susctib.	Susctib. Min.	Max	Media	Massa (%)	Massa (%)	Massa (%)	alfa	Rec*	Rec
1,18	0,6	0,89	0,1 A	0,0065	0	0,0033	13,45	68,22	1,94	0,001	1,00	1,00
		0,89	0,3 A	0,00072	0,0065	0,0036	64,81	25,94	65,52	0,001	1,00	1,00
		0,89	0,5 A	0,00026	0,00072	0,0005	16,13	3,12	30,97	0,001	0,75	0,75
		0,89	0,7 A	0,00013	0,00026	0,0002	2,37	0,61	1,22	0,001	0,00	0,00
		0,89	"1 A"	0,000065	0,00013	0,0001	2,28	0,13	0,11	0,001	0,00	0,00
		0,89	NM	0	0,000065	0,0000	0,96	1,98	0,25	0,001	0,00	0,00
0,6	0,3	0,45	0,1 A	0,0065	0	0,00325	13,82	56,60	2,33	0,003	1,00	1,00
		0,45	0,3 A	0,00072	0,0065	0,00361	42,71	31,85	67,68	0,003	1,00	1,00
		0,45	0,5 A	0,00026	0,00072	0,00049	33,79	4,31	26,59	0,003	0,75	0,75
		0,45	0,7 A	0,00013	0,00026	0,000195	2,38	0,67	0,97	0,003	0,00	0,00
		0,45	"1 A"	0,000065	0,00013	9,75E-05	0,81	0,36	0,14	0,003	0,00	0,00
		0,45	NM	0	0,000065	3,25E-05	6,48	6,53	2,29	0,003	0,00	0,00
0,3	0,15	0,23	0,1 A	0,0065	0	0,00325	15,08	44,46	1,64	0,008	1,00	1,00
		0,23	0,3 A	0,00072	0,0065	0,00361	43,80	37,81	59,57	0,008	1,00	1,00
		0,23	0,5 A	0,00026	0,00072	0,00049	10,85	3,97	20,38	0,008	0,75	0,75
		0,23	0,7 A	0,00013	0,00026	0,000195	2,49	0,94	5,18	0,008	0,00	0,01
		0,23	"1 A"	0,000065	0,00013	9,75E-05	1,39	0,40	0,62	0,008	0,00	0,01
		0,23	NM	0	0,000065	3,25E-05	26,38	12,41	12,61	0,008	0,00	0,01

0,15	0,075	0,11	0,1 A	0,0065	0	0,00325	8,59	24,97	1,12	0,013	1,00	1,00
		0,11	0,3 A	0,00072	0,0065	0,00361	30,71	32,31	45,96	0,013	1,00	1,00
		0,11	0,5 A	0,00026	0,00072	0,00049	6,10	2,31	43,75	0,013	0,75	0,75
		0,11	0,7 A	0,00013	0,00026	0,000195	4,64	1,72	2,36	0,013	0,00	0,01
		0,11	"1 A"	0,000065	0,00013	9,75E-05	4,74	0,77	0,28	0,013	0,00	0,01
		0,11	NM	0	0,000065	3,25E-05	45,21	37,92	6,53	0,013	0,00	0,01
0,075	0,038	0,06	0,1 A	0,0065	0	0,00325	2,37	18,31	0,82	0,016	1,00	1,00
		0,06	0,3 A	0,00072	0,0065	0,00361	55,51	37,36	87,54	0,016	1,00	1,00
		0,06	0,5 A	0,00026	0,00072	0,00049	5,87	5,67	8,54	0,016	0,75	0,75
		0,06	0,7 A	0,00013	0,00026	0,000195	2,05	1,02	0,13	0,016	0,00	0,02
		0,06	"1 A"	0,000065	0,00013	9,75E-05	1,46	1,12	0,31	0,016	0,00	0,02
		0,06	NM	0	0,000065	3,25E-05	32,74	36,52	2,67	0,016	0,00	0,02
0,038							100	100	100		0,00	